

11- Il bilancio termico di un ambiente confinato: analisi critica



Sommario

<i>11.1</i>	<i>Il comfort negli ambienti confinati</i>	<i>330</i>
11.1.1	Concetti di base	330
11.1.2	Il comfort termo-igrometrico negli ambienti confinati	331
11.1.3	Il comfort nel caso della certificazione energetica	334
<i>11.2</i>	<i>La qualità dell'aria negli ambienti confinati</i>	<i>336</i>
11.2.1	Concetti di base	336
11.2.2	La qualità dell'aria negli ambienti confinati	336
11.2.3	La qualità dell'aria nella certificazione energetica	337
<i>11.3</i>	<i>Il bilancio invernale (d.d.g. n. 5796 11 giugno 2009)</i>	<i>338</i>
11.3.1	Introduzione	338
11.3.2	L'equazione del bilancio invernale	338
11.3.2.1	Le dispersioni per trasmissione	340
11.3.2.1.1	Potenza ed energia dispersa per trasmissione	342
11.3.2.2	Le dispersioni per ventilazione	345
11.3.2.2.1	Potenza ed energia scambiate per ventilazione	347
11.3.2.3	I guadagni interni	350
11.3.2.4	I guadagni solari	352
11.3.2.5	Gli apporti solari attraverso strutture opache	354
11.3.2.6	Gli spazi soleggiati	355
11.3.2.7	Il fattore di utilizzo dei guadagni	356
11.3.3	Commento critico al calcolo di ET_H	357
<i>11.4</i>	<i>Il bilancio estivo (D.d.g. n. 5796 11 giugno 2009)</i>	<i>360</i>
11.4.1	L'equazione del bilancio estivo	360
11.4.1.1	I guadagni solari	361
11.4.1.2	Gli spazi soleggiati	362
11.4.1.3	Il fattore di utilizzo delle dispersioni	363
11.4.2	Commento critico al calcolo di ET_c	364
<i>11.5</i>	<i>Il recupero termico dovuto all'ACS</i>	<i>366</i>



11.1 Il comfort negli ambienti confinati

11.1.1 Concetti di base

Un ambiente confinato consiste in un volume di aria, chiamato volume di controllo, chiuso su tutti i lati da pareti opache o trasparenti. Ai fini della certificazione energetica o, più in generale, ai fini dello studio energetico degli edifici, tale volume scambia energia e massa con l'ambiente circostante, che può essere l'ambiente esterno o un altro ambiente confinato.

In questa sede la trattazione del comfort è limitata agli ambienti confinati, sono, quindi, esclusi gli aspetti legati agli ambienti esterni o parzialmente esterni. Inoltre, non è oggetto di trattazione il comfort in ambienti non climatizzati, essendo la certificazione energetica legata alla presenza di un impianto termico per il riscaldamento o la climatizzazione invernale.

Secondo una definizione largamente adottata, si intende per stato di benessere ambientale l'atteggiamento mentale di completa soddisfazione per l'ambiente entro il quale si opera. Il comfort può anche essere definito come l'assenza di sensazioni di fastidio. Tale concetto prevede la considerazione di tutti gli aspetti della relazione tra l'uomo e l'ambiente che lo circonda. Il presupposto del benessere ambientale è che un insieme di grandezze fisiche riferite all'ambiente assumano valori opportuni. Nel presente documento non vengono considerati gli aspetti legati al comfort acustico, tattile, olfattivo e visivo se non in maniera marginale.

La trattazione si limita, quindi, al comfort termo-igrometrico in ambienti confinati, con cenni alla qualità dell'aria interna e al comfort olfattivo. Le grandezze fisiche descritte saranno perciò quelle legate a questi aspetti, quali ad esempio la temperatura, l'umidità relativa, la concentrazione di CO₂, etc.

Gli impianti di climatizzazione per il benessere hanno proprio lo scopo di controllare opportunamente i valori di queste grandezze all'interno dell'ambiente confinato. In particolare, il benessere termico degli occupanti è influenzato da:

- temperatura;
- umidità;
- velocità dell'aria nella zona occupata;
- temperatura radiante.

In secondo luogo, gli impianti di climatizzazione possono controllare la ventilazione degli ambienti, dalla quale dipende il mantenimento di condizioni di igiene ambientale oltre che la diluizione di inquinanti (in sostanza la "qualità dell'aria"). Sono omesse le considerazioni acustiche sugli impianti.

Il consumo energetico legato al comfort ambientale dipende, quindi, dall'energia necessaria per mantenere le condizioni di temperatura, umidità, velocità e qualità dell'aria all'interno di un range prestabilito.



11.1.2 Il comfort termo-igrometrico negli ambienti confinati

Il comfort termo-igrometrico può essere definito come l'assenza di sensazioni sgradevoli legate alla temperatura ed all'umidità interna dell'aria. Concorrono al comfort termo-igrometrico le caratteristiche di movimento dell'aria, a causa degli effetti legati allo scambio convettivo tra il corpo umano, l'aria e le temperature delle pareti dell'ambiente confinato, a causa dello scambio radiativo tra la superficie del corpo umano e le stesse superfici dell'ambiente.

La sensazione di comfort si realizza quando gli scambi termici tra il corpo umano e l'ambiente circostante si equilibrano, in condizioni di omeotermia. Tale situazione è descritta in Figura 11.1.

Bilancio termico del corpo umano:

$$M \pm Cd \pm Cv \pm Rd - Ev = \Delta S$$

M = produzione calore *metabolico*

Cd = calore scambiato per *conduzione*

Cv = calore scambiato per *convezione*

Rd = calore scambiato per *irraggiamento*

Ev = calore scambiato per *evaporazione*

ΔS = calore ceduto o accumulato

Comfort, equilibrio $\Delta S = 0$

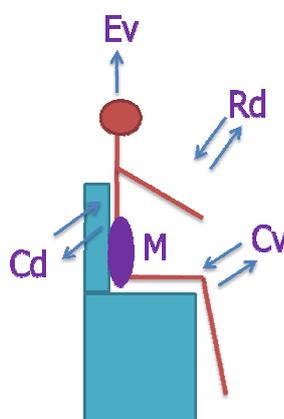


Figura 11.1: Bilancio termico del corpo umano.

Ciascuno dei termini del bilancio termico del corpo umano può, quindi, essere analizzato al fine del benessere termo-igrometrico. La norma UNI EN ISO 7730: 2006, "Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale" permette di determinare se statisticamente l'ambiente termico considerato soddisfa le condizioni di comfort.

La norma basa il suo approccio sulla determinazione degli indici PMV, cioè Predicted Mean Vote che significa Voto Medio Previsto, e PPD, cioè Predicted Percentage of Dissatisfied che significa Percentuale Prevista di Insoddisfatti. Il primo indice rappresenta il voto che un campione di persone abbastanza ampio assegnerebbe all'ambiente termico, su una scala di sette valori, riportata nella Tabella 11.1.



Tabella 11.1: Scala del voto medio previsto PMV [Fonte: UNI EN ISO 7730:2006]

Voto	Sensazione termica soggettiva
+3	molto caldo
+2	caldo
+1	leggermente caldo
0	confortevole, neutralità termica
-1	leggermente freddo
-2	freddo
-3	molto freddo

Nella scala di sensazione termica, le singole votazioni di un gruppo di persone assoggettate a determinate condizioni ambientali presentano ovviamente una certa dispersione attorno al valore medio. È importante, quindi, poter determinare non solo il voto medio previsto nella scala di sensazione termica PMV, ma anche la percentuale associata di persone prevedibilmente non soddisfatte PPD. Questa percentuale corrisponde alle persone che esprimeranno un apprezzamento negativo per le condizioni ambientali dell'ambiente oggetto di studio, corrispondente alle votazioni +3, +2, -2, -3. La Tabella 11.2, basata sulle sperimentazioni di Fanger che hanno coinvolto 1300 individui, mostra la distribuzione dei voti di sensazione termica ed il corrispondente valore dell'indice PPD per differenti valori del voto medio previsto PMV.

Tabella 11.2: Determinazione della percentuale prevista di insoddisfatti PPD in funzione del voto medio previsto PMV [Fonte: UNI EN ISO 7730:2006]

PMV	PPD %	Valutazione ambiente termico
+3	100	molto caldo
+2	75,7	caldo
+1	26,4	leggermente caldo
+0,85	20	ambiente termicamente accettabile
+0,5 < PMV < -0,5	< 10	benessere termico
-0,85	20	ambiente termicamente accettabile
-1	26,8	fresco
-2	76,4	freddo
-3	100	molto freddo

Si considera, quindi, che nella situazione media di benessere termico, cioè con PMV compreso tra -0,5 e +0,5, ci siano il 10% di persone non soddisfatte delle condizioni termo-igrometriche venutesi a creare all'interno dell'ambiente confinato.

La determinazione dell'indice PMV, e di conseguenza dell'indice PPD, tiene conto dei parametri microclimatici ambientali:

- temperatura dell'aria, T_a [°C];
- temperatura media radiante, T_r [°C];
- velocità dell'aria, V_a [m/s];



- umidità relativa, U.R. [%];

e su parametri fisiologici quali:

- indice metabolico MET, connesso all'attività lavorativa;
- tipologia di abbigliamento, indice di isolamento termico CLO.

Questi ultimi due indici, adimensionali, sono determinati sulla base della Tabella 11.3, e della Tabella 11.4.

Tabella 11.3: Tassi metabolici MET [Fonte: UNI EN ISO 7730:2006]

Attività	Energia Metabolica [W/m ²]	Tasso Metabolico [MET]
Disteso	46	0,8
Seduto, rilassato	58	1,0
Attività sedentaria (ufficio, casa, scuola, laboratorio)	70	1,2
Attività leggera in piedi (compere, laboratorio, industria leggera)	93	1,6
Attività media in piedi (commesso, lavori domestici, lavori a macchina)	116	2,0
Camminare a 2 km/h	110	1,9
Camminare a 3 km/h	140	2,4
Camminare a 4 km/h	165	2,8
Camminare a 5 km/h	200	3,4

Tabella 11.4: Indici di vestiario CLO [Fonte: UNI EN ISO 7730:2006]

Tipo di abbigliamento	Resistenza termica I _{cl} [m ² K/W]	CLO
Nudo	0	0
Pantaloncini corti	0,016	0,1
Tipica tenuta tropicale: slip, calzoncini, camicia a collo aperto e maniche corte, calzini e sandali	0,047	0,3
Abbigliamento leggero estivo: slip, pantaloncini leggeri, camicia a collo aperto e maniche corte, calzini e scarpe	0,047	0,3
Tenuta da lavoro leggera: biancheria intima leggera, camicia da lavoro in cotone a maniche lunghe, pantaloni da lavoro, calze in lana e scarpe	0,11	0,7
Abbigliamento invernale tipico per interni: biancheria intima, camicia a maniche lunghe, pantaloni, pull-over a maniche lunghe, calze pesanti e scarpe	0,16	1,0
Tenuta tradizionale europea pesante per lavoro: biancheria intima a maniche e gambe lunghe, camicia, abito completo con pantaloni, giacca e gilet, calze in lana e scarpe invernali	0,23	1,5
Abbigliamento in uso nei paesi a clima polare	0,46-0,62	3-4



Per quanto riguarda la velocità dell'aria, una scala di valutazione può essere espressa nella Tabella 11.5.

Tabella 11.5: Sensazione associata al movimento dell'aria [Fonte: UNI EN ISO 7730:2006]

Velocità dell'aria v_a [m/s]	Sensazione associata
< 0,1	aria ferma
0,1 - 0,2	non distinguibile
0,2 - 0,5	piacevole
0,5 - 1,0	consapevolezza
1,0 - 1,5	corrente percepita
> 1,5	fastidio

Si può considerare come confortevole un'umidità relativa compresa tra il 30% e il 65-70%. Bisogna tenere in considerazione che valori elevati di umidità influiscono sul corpo limitando l'evapotraspirazione, mentre valori bassi di umidità sono irritanti per le mucose dell'apparato respiratorio e causano secchezza della pelle. Risulta, quindi, opportuno che l'umidità relativa sia mantenuta entro l'intervallo 40%-60%, non tanto per considerazioni di benessere, ma soprattutto perché vengono minimizzati processi biologici (proliferazione di microorganismi patogeni) o chimici nocivi e possibilità di contrarre affezioni all'apparato respiratorio.

Utilizzando il metodo proposto dalla UNI EN ISO 7730:2006, si ottiene ad esempio un PMV pari a 0,5, cioè leggermente caldo, e una percentuale di insoddisfatti PPD del 10%, con le seguenti condizioni:

Tabella 11.6: Esempio di indici di comfort estivi ed invernali

Inverno	Estate
PMV = 0,5 - PPD = 10%	PMV = 0,44 - PPD = 9%
$T_a = 23,5^\circ\text{C}$	$T_a = 27,0^\circ\text{C}$
$T_r = 23,5^\circ\text{C}$	$T_r = 27,0^\circ\text{C}$
$V_a = 0,10$ m/s	$V_a = 0,30$ m/s
U.R. = 40%	U.R. = 60%
MET = 1,2 (attività sedentaria)	MET = 1,2 (attività sedentaria)
CLO = 1,0 (abbigliamento tipico invernale per interni)	CLO = 0,5 (abbigliamento tipico estivo per interni)

11.1.3 Il comfort nel caso della certificazione energetica

Come già descritto nel Capitolo 3, il calcolo della energia primaria per la climatizzazione è normato dalla procedura di calcolo del d.d.g. 5796. È bene distinguere tra:

- riscaldamento, cioè il mantenimento di una temperatura prefissata durante la stagione di riscaldamento;
- climatizzazione invernale, cioè il mantenimento di una temperatura e di una umidità prefissata durante la stagione di riscaldamento;



- raffrescamento, cioè il mantenimento di una temperatura prefissata durante la stagione di raffrescamento;
- climatizzazione estiva, cioè il mantenimento di una temperatura e di una umidità prefissate durante la stagione di raffrescamento.

Nel caso della certificazione energetica, queste temperature ed umidità sono fissate e vengono considerate costanti sulle 24 ore, così come si assumeranno costanti sulle 24 ore il livello di occupazione, gli apporti interni e i ricambi d'aria. Il valore di temperatura e umidità assunte ai fini della certificazione energetica dipende dalla destinazione d'uso, secondo il DPR 412/93, come illustrato nella Tabella 11.7.

Tabella 11.7: Corrispondenza tra le destinazioni d'uso degli edifici e le condizioni interne di calcolo ai fini della certificazione energetica [Estrapolazione dati d.d.g. n. 5796]

Categoria edifici	Destinazione d'uso	Temperatura invernale	Temperatura estiva	Umidità relativa
E.1 (1)	Edifici residenziali con occupazione continuativa	20°C	26°C	50%
E.1 (2)	Edifici residenziali con occupazione saltuaria	20°C	26°C	50%
E.1 (3)	Edifici adibiti ad albergo, pensioni ed attività similari	20°C	26°C	50%
E.2	Edifici adibiti ad uffici ed assimilabili	20°C	26°C	50%
E.3	Edifici adibiti ad ospedali, cliniche o case di cura ed assimilabili	20°C	26°C	50%
E.4	Edifici adibiti ad attività ricreative, associative e di culto	20°C	26°C	50%
E.5	Edifici adibiti ad attività commerciali ed assimilabili	20°C	26°C	50%
E.6 (1)	Edifici adibiti a piscine, saune e assimilabili	28°C	28°C	90%
E.6 (2)	Edifici adibiti a palestre e assimilabili	18°C	24°C	50%
E.6 (3)	Edifici adibiti a servizi di supporto alle attività sportive	20°C	26°C	50%
E.7	Edifici adibiti ad attività scolastiche di tutti i livelli e assimilabili	20°C	26°C	50%
E.8	Edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali ed assimilabili	18°C	26°C	50%



11.2 La qualità dell'aria negli ambienti confinati

11.2.1 Concetti di base

Il concetto di qualità dell'aria può essere espresso come la condizione di presenza di inquinanti in concentrazione al di sotto del valore che si ritiene essere dannoso per le cose o le persone. Per determinare se l'aria abbia una qualità elevata bisogna, quindi, garantire che uno o più inquinanti dannosi siano presenti in quantità talmente basse da non causare effetti negativi.

L'inquinante diviene tale a seconda dell'ambiente considerato. Nell'ambito di questo capitolo viene trattata solo la qualità dell'aria degli ambienti interni, o IAQ acronimo inglese di Indoor Air Quality. In generale si considerano principalmente gli inquinanti che possono causare danno alle persone. Si limita la definizione della qualità dell'aria interna come la condizione di presenza di inquinanti dannosi alle persone al di sotto di valori che possono essere nocivi.

11.2.2 La qualità dell'aria negli ambienti confinati

Il controllo della qualità dell'aria interna è parte integrante del concetto di benessere ambientale. Ne è testimonianza il fatto che l'uomo moderno passa in luoghi confinati 22-24h/giorno. I materiali da costruzione, le suppellettili, le piante, l'uomo stesso sono fonti di produzione di inquinanti. Se questi ultimi non sono adeguatamente diluiti, tramite la ventilazione o il ricambio d'aria, si accumulano nell'aria interna e raggiungono concentrazioni dannose.

Gli inquinanti possono essere classificati secondo:

- la provenienza:
 - metabolismo umano: CO₂, odori corporali, sostanze organiche tossiche espulse attraverso la respirazione e la traspirazione dalla pelle;
 - inquinanti dovuti da attività umane in ambienti confinati: fumo di tabacco, cottura di cibi, prodotti chimici per la pulizia, fotocopiatrici, stampanti;
 - materiali edilizi: gas, radon, particolati;
 - dall'esterno, attraverso la ventilazione, l'aerazione o le infiltrazioni: CO, SO_x, CO_x e composti volatili organici (COV o VOC, Volatile Organic Compounds), particolato sospeso nelle polveri (Pm₁₀, Pm_{2,5}), ozono, etc.;
- la tipologia:
 - gas o vapori: CO, CO₂, SO_x, NO_x, COV, O₃, Radon, etc.;
 - inquinanti biologici: microrganismi, muffe, funghi, batteri, virus, protozoi, etc.;
 - inquinanti organici di origine animale o vegetale: polline, spore, fumo da tabacco, particolato fibroso, polveri, etc..



Le quantità di inquinanti sono di solito espresse in ppm (parti per milione), mg/m³, µg/m³, Bq/m³. I valori tollerati variano molto da paese a paese e molto spesso i dati di riferimento sono mancanti. Diverse associazioni nazionali ed internazionali forniscono linee guida sulle concentrazioni accettabili, sia per un tempo limitato che per un tempo più lungo. Si riportano i valori per alcuni di essi in Tabella 11.8.

Tabella 11.8: Concentrazione ritenuta dannosa per alcuni degli inquinanti interni [Fonte UNI 10339:1995]

Inquinante	Concentrazione dannosa
Anidride carbonica CO ₂	> 1000 ppm
Ossidi di zolfo SO _x	5 ppm
Ossidi di azoto NO _x	350 µg/m ³ per i bambini, 1000 µg/m ³ per gli adulti
Monossido di carbonio CO	10-20 ppm
Formaldeide (uno dei tanti COV)	2 mg/m ³
Radon (gas radioattivo)	> 400 Bq/m ³

Per diluire la quantità di inquinanti è opportuno permettere un adeguato ricambio d'aria interna con aria di rinnovo, proveniente da ventilazione, aerazione o infiltrazioni; meglio se quest'aria viene opportunamente filtrata dagli inquinanti esterni prima di immetterla in ambiente.

La determinazione della portata d'aria di rinnovo può essere fatta avvalendosi di dati tabellari come quelli proposti dalla norme UNI 10339:1995 o UNI EN 13779: 2008, che forniscono una portata d'aria specifica per persona o per superficie, a seconda della destinazione d'uso, oppure può essere fatta basandosi su un approccio prestazionale basato sulle concentrazioni di inquinanti. Il primo approccio è quello utilizzato nell'ambito della certificazione energetica, a meno di disporre di dati maggiormente dettagliati di origine progettuale. Il secondo approccio, non previsto dalla procedura di calcolo d.d.g. 5796, è consigliato soprattutto in presenza di forti affollamenti o riconosciuta presenza di sorgenti di inquinanti specifici (es. copisterie).

11.2.3 La qualità dell'aria nella certificazione energetica

Il concetto di qualità dell'aria viene preso in considerazione anche nell'ambito della certificazione energetica; in particolare nel bilancio dell'edificio rientra anche la quantità di calore scambiato tramite la ventilazione. Le due esigenze sono ovviamente contrapposte: da un lato si auspica un incremento del numero di ricambi orari per ridurre l'impatto degli inquinanti, mentre dall'altro le esigenze di risparmio energetico inducono una riduzione della portata d'aria.

Per quanto riguarda la certificazione energetica la quantificazione del volume di aria si basa su un ricambio orario fisso nel caso di aerazione, infiltrazione o ventilazione naturale, mentre nel caso di ventilazione meccanica controllata il numero di ricambi orari può essere determinato sulla base del prospetto XI del d.d.g. n. 5796, valutando opportunamente il numero di ore giornaliere di ventilazione. Per maggiori dettagli ci si riferisca al capitolo 5.



11.3 Il bilancio invernale (d.d.g. n. 5796 11 giugno 2009)

11.3.1 Introduzione

Nei capitoli 11.1 e 11.2 sono state illustrate brevemente le motivazioni che stanno alla base del fabbisogno energetico dell'edificio: il comfort termo-igrometrico, che determina la necessità di un sistema impiantistico di regolazione delle temperature e delle umidità, e la qualità dell'aria interna, che determina la necessità di una adeguata ventilazione. In questo capitolo sono discusse le conseguenze a livello energetico determinate dal soddisfacimento di queste esigenze.

11.3.2 L'equazione del bilancio invernale

La procedura di calcolo permette di determinare il fabbisogno annuo di energia termica (dell'involucro) per il riscaldamento o per la climatizzazione invernale (se si è in presenza di sistemi impiantistici in grado di controllare anche l'umidità dell'aria). Esso può essere definito come la quantità di energia termica idealmente richiesta dall'involucro edilizio, nel corso della stagione di riscaldamento, in regime di attivazione continuo dell'impianto.

La durata della stagione di riscaldamento è fissata dal d.d.g. n. 5796, in funzione della zona climatica.

Zona Climatica	Periodo di calcolo
Zona D	1 novembre – 30 aprile
Zona E	1 ottobre – 30 aprile
Zona F	1 ottobre – 30 aprile

Il regime di attivazione continuo prevede il mantenimento di una temperatura interna di ogni singola zona costante nelle 24 ore; si assumono costanti anche il livello di occupazione, gli apporti interni e i ricambi d'aria.

Riquadro I: Il metodo di calcolo mensile

Il calcolo del fabbisogno energetico viene effettuato su base mensile.

La durata del mese considerato si calcola, dunque, secondo la seguente formula:

$$\Delta t = \frac{24 \cdot N}{1000} \quad (11.1)$$

dove:

N è il numero di giorni del mese considerato;

24 sono le ore all'interno del giorno;

1000 è il fattore di conversione che permette di ottenere le grandezze espresse in kWh.

Per tutti gli edifici, viene assunta una temperatura interna θ_i costante pari a 20°C, fatta eccezione per gli edifici classificati come E.6 (1) (piscine) (che risultano essere mantenuti ad una



temperatura di 28 °C) e gli edifici classificati come E.6 (2) (palestre) e E.8 (fabbricati industriali) per i quali si assume una temperatura interna costante pari a 18°C.

Questo significa che la procedura determina le dispersioni che avvengono (per trasmissione e per ventilazione) attraverso l'involucro edilizio, a fronte della temperatura interna fissata e della temperatura dell'aria esterna. Sottraendo dalle dispersioni gli apporti gratuiti (interni e solari) effettivamente utilizzati (attraverso il fattore di utilizzazione), si ottiene il fabbisogno di energia utile, ovvero la quantità di calore che l'impianto deve fornire all'ambiente per mantenere, all'interno dell'edificio, le condizioni prefissate di temperatura.

$$Q_{NH} = \max [0; (Q_T + Q_V - Q_{SE,O}) - \eta_{G,H} \cdot (Q_I + Q_{SI})] \quad (11.2)$$

dove:

Q_{NH} è il fabbisogno di energia termica sensibile di riferimento per il riscaldamento o la climatizzazione invernale della zona considerata, [kWh];

Q_T è la quantità di energia dispersa per trasmissione tra la zona climatizzata o a temperatura controllata e l'ambiente circostante, [kWh];

Q_V è la quantità di energia di riferimento dispersa per ventilazione tra la zona climatizzata o a temperatura controllata e l'ambiente circostante, [kWh];

$Q_{SE,O}$ è la quantità di energia solare assorbita dai componenti opachi e trasferita alla zona climatizzata o a temperatura controllata, [kWh];

Q_I è la quantità di energia gratuita dovuta ad apparecchiature elettriche e persone, [kWh];

Q_{SI} è la quantità di energia gratuita dovuta alla radiazione solare entrante attraverso le superfici trasparenti rivolte direttamente verso l'ambiente esterno, [kWh];

$\eta_{G,H}$ è il fattore di utilizzazione di riferimento degli apporti energetici gratuiti.

Si sottolinea come vi possa essere anche il contributo dovuto alla presenza di spazi soleggiati (serre) adiacenti all'ambiente riscaldato: tali contributi saranno evidenziati nel Capitolo 11.3.2.6.

Non tutti gli apporti gratuiti possono essere sfruttati ai fini del fabbisogno energetico. Per questo motivo viene introdotto il fattore di utilizzazione (valore compreso tra 0 e 1), il quale permette di considerare il comportamento dinamico (che avviene in realtà) come comportamento semi-stazionario. Più tale valore è alto, maggiore sarà la capacità dell'involucro di sfruttare gli apporti gratuiti.

Per come è definito il fabbisogno, se dovessero essere maggiori gli apporti gratuiti sfruttati invece delle dispersioni, si considera un valore di fabbisogno nullo. Per definizione, infatti, il fabbisogno di energia utile rappresenta la quantità di calore che è necessario fornire in ambiente per mantenere la temperatura fissata.



Si ricorda infine come l'edificio possa, ai fini della determinazione del fabbisogno annuale di energia termica, essere suddiviso in zone termiche omogenee. Il fabbisogno annuale di energia termica di un edificio viene, quindi, determinato sommando il fabbisogno energetico delle sue zone termiche.

11.3.2.1 Le dispersioni per trasmissione

Ciascuna superficie disperdente (sia opaca sia trasparente) che separa la zona climatizzata o a temperatura controllata dall'ambiente circostante esterno o da ambienti non dotati di impianto di riscaldamento contribuisce alle dispersioni per trasmissione.

Ai fini del calcolo, per convenzione si considerano le superfici lorde (ovvero, viste dall'esterno). Questo significa che l'area dell'elemento comprenderà l'intero spessore del solaio o della muratura (a seconda del tipo di elemento considerato) se quest'ultimo confina con l'ambiente esterno, con il terreno o con ambienti non riscaldati. Tale convenzione deriva dal metodo con il quale vengono conteggiati i ponti termici, il cui effetto è considerato utilizzando le dimensioni esterne. Nel caso in cui l'elemento considerato disperda verso altri ambienti riscaldati, l'area lorda sarà invece considerata fino alla mezzzeria dello spessore dell'elemento.

Il calcolo riportato nell'equazione 11.3 deve essere eseguito per ciascun elemento k-esimo termicamente uniforme, come presentato nel precedente Capitolo 10.

$$Q_T = \sum_k A_{L,k} \cdot U_{C,k} \cdot F_{T,k} \cdot (\theta_i - \theta_e) \cdot \Delta t \quad (11.3)$$

dove:

Q_T è la quantità di energia dispersa per trasmissione tra la zona climatizzata o a temperatura controllata e l'ambiente circostante, [kWh];

$A_{L,k}$ è l'area lorda della struttura k-esima, che separa la zona climatizzata o a temperatura controllata dall'ambiente circostante, [m²];

$U_{C,k}$ è la trasmittanza termica media corretta, della struttura k-esima, che separa la zona climatizzata o a temperatura controllata dall'ambiente circostante, [W/(m²K)];

$F_{T,k}$ il fattore correttivo da applicare a ciascuna struttura k-esima così da tener conto delle diverse condizioni di temperatura degli ambienti con cui essi sono a contatto, [kWh];

θ_i è la temperatura interna prefissata, [°C];

θ_e è il valore medio della temperatura media giornaliera esterna, [°C].

La presenza dei ponti termici si traduce nella correzione della trasmittanza termica. La trasmittanza termica media corretta di ciascuna struttura opaca rivolta verso l'ambiente circostante, da utilizzare nell'equazione 11.3, si può determinare attraverso due metodi distinti (vedi Capitolo 10):



- metodo semplificato: si tiene conto delle maggiorazioni dovute ai ponti termici applicando un fattore correttivo al valore di trasmittanza termica della struttura opaca;
- metodo dettagliato: l'incidenza del ponte termico deve essere calcolata analiticamente, ottenendo una trasmittanza media che considera la trasmittanza termica dell'*i*-esimo ponte termico lineare e la lunghezza caratteristica dello stesso.

Il metodo semplificato può essere applicato solo per gli edifici esistenti. Si evidenzia come le maggiorazioni siano applicabili alle sole pareti opache, e comprendono già tutti i ponti termici di tutti i sottosistemi costruttivi che appartengono o si interfacciano con la parete (parete d'angolo, nodo pilastro-parete, nodo solaio-parete, nodo serramento-parete ecc.)

Il metodo di calcolo dettagliato risulta essere invece obbligatorio per gli edifici nuovi. Si sottolinea come i valori di riferimento della trasmittanza termica lineica (basati sulle dimensioni esterne) per le più diffuse tipologie di ponti termici siano ricavabili dagli abachi contenuti nella UNI EN ISO 14683:2008. Tali valori non risultano essere applicabili qualora le condizioni differiscano sostanzialmente dalle condizioni al contorno definite dalla UNI EN ISO 14683:2008 e riportate nel d.d.g. n. 5796. In tal caso, è necessario procedere al calcolo della trasmittanza termica lineica effettiva del ponte termico. L'utilizzo di valori calcolati invece dei valori da abaco potrebbe portare, in taluni casi, anche a significative differenze.

Il fattore correttivo della temperatura permette di tenere conto delle diverse condizioni di temperatura degli ambienti con i quali la struttura edilizia analizzata è in contatto. Esso è, infatti, un numero, compreso tra 0 e 1, che va a moltiplicare la differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno. Per definizione stessa, ad un valore pari a 1 corrisponde esattamente la temperatura esterna, mentre ad un valore pari a 0 corrisponde una temperatura identica a quella interna (nessun flusso di calore). Gli ambienti non climatizzati si trovano, dunque, in situazioni intermedie. Esistono due metodi di calcolo di tale fattore:

- metodo semplificato: si tiene conto della temperatura dell'ambiente adiacente alla zona termica considerata attraverso la scelta di uno specifico valore da tabellato (vedi Capitolo 10), in modo da correggere la differenza di temperatura tra interno ed esterno e ricavare, quindi, indirettamente la temperatura dell'ambiente non climatizzato per ciascun mese;
- metodo dettagliato: si procede al calcolo dei 12 valori di temperatura media mensile dell'ambiente circostante, applicando il metodo previsto nell'Appendice A del d.d.g. n. 5796.

Riquadro II: Il potenziale di dispersione per trasmissione: il coefficiente di dispersione per trasmissione H_T

Il prodotto tra la superficie lorda disperdente, la trasmittanza termica corretta e il fattore correttivo della temperatura rappresenta il coefficiente di scambio termico per trasmissione, H_T , che tiene conto delle perdite di calore attraverso le strutture che separano la zona termica considerata dall'ambiente circostante. Tale coefficiente, espresso in $[W/K]$ rappresenta il potenziale delle dispersioni per trasmissione: a parità, infatti, di salto termico, maggiore è tale coefficiente più elevate saranno le perdite



di trasmissione.

La forzante climatica affinché vi siano dispersioni per trasmissione è la differenza di temperatura fra l'interno (valore fissato) e il valore medio della temperatura media giornaliera esterna, ricavata dalla UNI 10349:1994 (Tabella 11.9). Tale norma fornisce i citati valori per i capoluoghi di provincia. Per i Comuni non coincidenti con il capoluogo di provincia, verrà operata una correzione, in funzione della differenza di altitudine e del gradiente verticale di temperatura, come già presentato nel Capitolo 4.

Riquadro III: La forzante climatica: il concetto di Gradi-Giorno

Il prodotto tra la differenza di temperatura (fra interno ed esterno) e la durata del mese Δt considerato richiama il concetto di Gradi-Giorno.

Per "Gradi-Giorno" (GG) di una località si intende, così come definito all'interno del DPR 412/93, la somma, estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento, delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura dell'ambiente, convenzionalmente fissata a 20°C, e la temperatura media esterna giornaliera.

Non vi è esatta corrispondenza tra la forzante climatica (intesa come il prodotto tra la differenza di temperatura e la durata del mese) e il concetto di GG, sia perché quest'ultimi non sono calcolati a partire dai valori di temperatura riportati nella UNI 10349:1994, sia perché le durate della stagione di riscaldamento non coincidono con le due metodologie (Regione Lombardia e DPR 412/93). I valori risultano essere, tuttavia, comparabili in termini di ordine di grandezza. È ovvio che, a parità di coefficiente di dispersione per trasmissione H_T , edifici collocati in climi più rigidi e, quindi, con GG maggiori, saranno interessati da maggiori dispersioni per trasmissione.

Tabella 11.9: Valori medi mensili della temperatura media giornaliera dell'aria esterna, θ_{er} [Fonte d.d.g. n. 5796]

Comune	Alt. [m]	Ott. [°C]	Nov. [°C]	Dic. [°C]	Gen. [°C]	Feb. [°C]	Mar [°C]	Apr. [°C]	Mag [°C]	Giu. [°C]	Lug. [°C]	Ago. [°C]	Set. [°C]
Bergamo	249	14,2	8,6	4,5	3,1	4,9	8,9	13,3	17,0	21,3	23,7	23,2	19,9
Brescia	149	14,0	7,8	3,5	1,5	4,2	9,3	13,5	17,7	22,0	24,4	23,7	19,9
Como	201	13,7	8,4	4,4	2,9	5,0	8,8	12,7	16,7	21,1	23,6	23,1	19,6
Cremona	45	13,4	7,2	2,5	0,7	3,3	8,4	13,3	17,4	21,9	24,3	23,4	19,7
Lecco	214	14,3	9,2	5,3	3,9	5,7	9,6	13,3	16,0	20,1	22,6	22,1	19,2
Lodi	87	13,4	7,3	2,5	0,9	3,3	8,6	13,5	17,8	22,5	24,5	23,4	19,6
Mantova	19	14,0	8,0	2,9	1,0	3,3	8,4	13,3	17,4	22,0	24,3	23,6	20,0
Milano	122	14,0	7,9	3,1	1,7	4,2	9,2	14,0	17,9	22,5	25,1	24,1	20,4
Monza e Brianza	122	14,0	7,9	3,1	1,7	4,2	9,2	14,0	17,9	22,5	25,1	24,1	20,4
Pavia	77	13,3	7,1	2,3	0,5	3,2	8,4	12,9	17,1	21,3	23,5	22,7	19,3
Sondrio	307	12,4	6,6	1,7	0,5	3,3	8,2	12,6	16,0	20,0	22,3	21,4	18,1
Varese	382	11,2	5,3	1,9	1,2	1,9	6,0	10,4	14,0	17,7	20,5	19,6	16,4

11.3.2.1.1 Potenza ed energia dispersa per trasmissione

L'effetto di scambio di energia termica tra l'ambiente confinato e l'ambiente esterno o a temperatura non controllata è determinato dalla differenza di temperatura tra i due ambienti. Se questa è positiva vi è un flusso di energia che è trasmesso attraverso le pareti opache e vetrate



dall'interno verso l'esterno (caso invernale), mentre se la differenza è negativa vi è un flusso entrante verso l'ambiente interno (caso estivo). La quantità di calore entrante o uscente dipende inoltre dalle caratteristiche termo-fisiche delle pareti opache e trasparenti, come discusso nel capitolo 10. In questa sede si discutono solo i valori relativi alle temperature interne ed esterne assunti nell'ambito della certificazione energetica o nel progetto impiantistico. Per quanto riguarda le temperature interne, si rimanda alla Tabella 11.7 per i dettagli relativi alla destinazione d'uso, mentre di seguito si propone un calcolo assumendo una temperatura interna di 20°C per l'inverno (flusso energetico uscente) e di 26°C per l'estate (flusso energetico entrante). Per le temperature esterne, si può invece far riferimento ai dati medi mensili proposti dalla UNI 10349:1994, così come riportati nel Prospetto II del d.d.g. n. 5796, per la determinazione della potenza di riscaldamento.

La potenza dispersa o acquisita da una parete, \dot{Q}_T , si determina, quindi, con la formula seguente:

$$\dot{Q}_T = U \cdot A \cdot \Delta T = U \cdot A \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (11.4)$$

dove:

\dot{Q}_T è la potenza dispersa da una parete opaca o trasparente, [W];

U è la trasmittanza termica della parete opaca o trasparente, [W/(m²K)];

A è l'area della parete opaca o trasparente, [m²];

ΔT è la differenza di temperatura tra interno e esterno, [K];

θ_i è la temperatura interna dell'ambiente confinato, [°C];

θ_e è la temperatura esterna all'ambiente confinato (ambiente esterno o ambiente a temperatura non controllata), [°C].

Riquadro IV: Considerazioni sulla potenza dispersa o acquisita dalle pareti per trasmissione

Il d.d.g. n. 5796 considera, nella maggior parte dei casi come temperatura interna θ_i un valore di 20°C, considerati ai fini del calcolo per la certificazione energetica costanti su tutta la stagione di riscaldamento. Per quanto riguarda le temperature esterne viene assunta θ_e pari alla media mensile corretta in funzione della località di riferimento. Si considera, quindi:

- una destinazione d'uso residenziale, quindi una di $\theta_i = 20^\circ\text{C}$;
- un edificio collocato a Milano, nel mese di gennaio, $\theta_e = 1,7^\circ\text{C}$ quale media mensile (Tabella 11.9).

Si effettua un calcolo della potenza media mensile dispersa da una superficie A di 100 m² con trasmittanza U media pari a 0,5 W/(m²K) e si ottiene, applicando la formula (11.4) il seguente sviluppo:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T = U \cdot A \cdot (\theta_i - \theta_e) = 0,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \cdot 100 \text{m}^2 \cdot (20 - 1,7) \text{K} = 915 \text{W} = 0,915 \text{kW} \quad (11.5)$$



Questo valore rappresenta il valore medio di potenza dispersa dalle pareti opache e trasparenti e può correttamente essere utilizzato per determinare l'energia necessaria a riscaldare l'ambiente interno nel mese di gennaio, assumendo il mantenimento delle stesse condizioni interne per tutte le ore del mese.

Se, invece, si vuole determinare la massima potenza dispersa in condizioni di picco, utile a determinare la potenza termica dei terminali e dei sistemi di generazione, si assume quale $\theta_e = -5^\circ\text{C}$, secondo quanto proposto per Milano sulla norma UNI EN 12831:2006, e allo stesso modo si vuole considerare di permettere all'utente, in un caso reale, di portare la θ al valore di 22°C , si otterrebbe il seguente valore:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot (\theta_i - \theta_e) = 0,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \cdot 100 \text{ m}^2 \cdot (22 - (-5)) \text{ K} = 1350 \text{ W} = 1,35 \text{ kW} \quad (11.6)$$

Allo stesso modo durante l'estate il d.d.g. n. 5796 considera quale temperatura interna $\theta_i = 26^\circ\text{C}$, ai fini di dimensionare i terminali e la centrale di generazione per la climatizzazione estiva, se si vuole determinare la massima potenza entrante per trasmissione in ambiente interno a causa della maggiore temperatura esterna, si può assumere come $\theta_e = 33,5^\circ\text{C}$ di picco, che porta ad un calcolo:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot (\theta_i - \theta_e) = 0,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \cdot 100 \text{ m}^2 \cdot (26 - 33,5) \text{ K} = -375 \text{ W} = -0,375 \text{ kW} \quad (11.7)$$

L'energia dispersa o acquisita da una parete \dot{Q} si determina con la formula seguente:

$$Q_T = \dot{Q}_T \cdot \Delta t = U \cdot A \cdot \Delta \theta \cdot \Delta t = U \cdot A \cdot (\theta_i - \theta_e) \cdot (t_2 - t_1) \quad (11.8)$$

dove:

Q_T è l'energia dispersa o acquisita da una parete opaca o trasparente, [Wh];

\dot{Q}_T è la potenza dispersa da una parete opaca o trasparente, [W];

Δt è la differenza di tempo tra l'istante t_1 e l'istante t_2 , [h];

U è la trasmittanza termica della parete opaca o trasparente, [W/(m²K)];

A è l'area della parete opaca o trasparente, [m²];

$\Delta \theta$ è la differenza di temperatura tra interno e esterno, [K];

θ_i è la temperatura interna dell'ambiente confinato, [°C];

θ_e è la temperatura esterna all'ambiente confinato (ambiente esterno o ambiente a temperatura non controllata), [°C];

t_1 è l'istante iniziale del calcolo, [h];

t_2 è l'istante finale del calcolo, [h].

È importante determinare il tempo di calcolo e le condizioni interne ed esterne all'interno di questo periodo; per ogni variazione delle condizioni interne è necessario ripetere il calcolo per il tempo in cui tali condizioni si mantengono costanti, oppure per effettuare un calcolo su un



periodo di tempo più lungo è opportuno scegliere condizioni interne ed esterne medie sul periodo di calcolo. Questo è l'approccio adottato dal d.d.g. n. 5796, e più in generale dai modelli di calcolo italiani, per la determinazione del fabbisogno di energia termica e primaria nell'ambito della certificazione energetica.

Riquadro V: Considerazioni sulla energia dispersa o acquisita dalla pareti per trasmissione

Assumendo le stesse condizioni di calcolo dell'esempio riportato nel riquadro precedente si ottiene, applicando la formula 11.8 e considerando che il mese di gennaio ha 744 h:

$$Q = \dot{Q} \cdot \Delta t = U \cdot A \cdot \Delta \theta \cdot \Delta t = U \cdot A \cdot (\theta_i - \theta_e) \cdot (t_2 - t_1) = 915 \text{ W} \cdot 744 \text{ h} \\ = 680760 \text{ Wh} = 681 \text{ kWh} \quad (11.9)$$

Questo valore rappresenta il valore totale di energia necessaria per mantenere a 20°C un ambiente interno costituito da 100m² di pareti opache e trasparenti con trasmittanza media di 0,5 W/(m²K), nel mese di gennaio, con una temperatura media mensile esterna $\theta_e = 1,7^\circ\text{C}$. Come termine di confronto questa energia termica corrisponde a circa 71 m³ di gas metano, assumendo come potere calorifico del metano 9,59 kWh/m³

Ripetendo questo calcolo per ogni mese della stagione di riscaldamento si ottiene l'energia totale dispersa per trasmissione dalle pareti trasparenti e opache.

A titolo di esempio, si calcola ora l'energia giornaliera introdotta dalle pareti nel caso di una giornata estiva, considerando una temperatura interna $\theta_i = 26^\circ\text{C}$ e una temperatura media giornaliera di 29°C.

$$Q = \dot{Q} \cdot (t_2 - t_1) = 0,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{K} \cdot 100 \text{ m}^2 \cdot (26 - 29) \text{ K} \cdot 24 \text{ h} = \\ 3600 \text{ Wh} = 3,6 \text{ kWh} \quad (11.10)$$

Si tenga in considerazione che nel bilancio sia invernale sia estivo di un ambiente confinato, l'energia dispersa o acquisita per trasmissione è solo uno dei termini che concorre alla determinazione della potenza e della energia totale dispersa o acquisita dall'ambiente interno. Vanno considerati anche gli scambi di massa dovuti alla ventilazione, gli apporti di energia solare e gli apporti interni. Una volta considerati tutti questi fattori, bisogna considerare l'impianto termico e le sue inefficienze per determinare, in funzione del vettore energetico, il fabbisogno di energia primaria.

11.3.2.2 Le dispersioni per ventilazione

Un ambiente scambia energia attraverso l'ambiente circostante non solo attraverso la trasmissione, ma anche attraverso la ventilazione. Il fatto stesso che gli ambienti siano occupati richiede, per esigenze legate al benessere degli occupanti, che vi siano un certo numero di ricambi d'aria. Tali ricambi d'aria possono avvenire secondo differenti modalità:

- ventilazione naturale: presenza di aperture nell'involucro edilizio, all'uopo predisposte e normalmente non occluse, che attivino ventilazione naturale principalmente per tiraggio termico;
- aerazione: il ricambio d'aria negli ambienti per apertura e chiusura manuale delle finestre;



- infiltrazione: i ricambi d'aria (non desiderati) dovuti alla non perfetta impermeabilità dell'involucro e alla presenza di differenze di pressione tra esterno e interno dovute all'azione del vento ed alle differenze di temperatura;
- ventilazione meccanica.

Anche nelle dispersioni per ventilazione si ha la stessa forzante climatica presente nel caso delle dispersioni per trasmissione.

Il coefficiente di scambio termico per ventilazione H_v è definito come il prodotto tra la capacità termica dell'aria e la portata d'aria di rinnovo media giornaliera, misurata in $[m^3/h]$.

Tale portata d'aria viene calcolata, nel caso di ventilazione naturale, aerazione ed infiltrazioni, come il prodotto del volume netto dell'ambiente V e dell'indice dei ricambi d'aria n . Quest'ultimo è il numero di ricambi d'aria medio giornaliero $[h^{-1}]$, determinato in funzione della destinazione d'uso e comprensivo delle infiltrazioni. Maggiore è, dunque, questo valore, maggiore sarà il corrispondente volume d'aria che viene ricambiato in un'ora. La procedura di calcolo fornisce diversi valori convenzionali per tale indice, distinguendo il caso degli edifici residenziali esistenti ($n=0,5 h^{-1}$, nei quali si presuppone che la tenuta all'aria dell'involucro sia scarsa), edifici residenziali nuovi ($n=0,3 h^{-1}$), mentre per tutti gli altri edifici si assume un valore di indice dei ricambi d'aria medio giornaliero calcolato in funzione del numero di persone presenti nell'ambiente (attraverso l'indice di affollamento) e della richiesta specifica per persona di portata d'aria di rinnovo necessaria. È importante sottolineare come l'indice di affollamento sia considerato al 60% rispetto a quanto indicato, per tenere conto del periodo di occupazione non continuo di tali ambienti.

Nel caso di ventilazione meccanica la portata d'aria di rinnovo coincide con la portata d'aria di progetto (comprensiva anche del contributo delle infiltrazioni), la quale non può, tuttavia, essere inferiore rispetto ai valori minimi calcolati da procedura.

A seconda della tipologia di impianto di ventilazione meccanica presente (semplice o doppio flusso, senza o con pre-riscaldamento e senza o con recuperatore di calore) è necessario specificare alcuni dati aggiuntivi, quali ad esempio la temperatura di immissione e l'efficienza effettiva del recuperatore.

Riquadro VI: Il potenziale di dispersione per ventilazione: il coefficiente di dispersione per ventilazione H_v

Il prodotto della capacità termica volumica dell'aria e della portata di aria di rinnovo rappresenta il coefficiente di scambio termico per ventilazione, H_v . Tale coefficiente, espresso in $[W/K]$ rappresenta il potenziale delle dispersioni per ventilazione: a parità, infatti, di salto termico, maggiore è tale coefficiente più elevate saranno le perdite di ventilazione.

$$Q_v = 0,34 \cdot (\dot{V}_a \cdot b_v) \cdot (\theta_i - \theta_e) \cdot \Delta t \quad (11.11)$$



dove:

- Q_V è la quantità di energia di riferimento dispersa per ventilazione naturale, aerazione e/o infiltrazione tra la zona climatizzata o a temperatura controllata e l'ambiente circostante, [kWh];
- 0,34 è la capacità termica volumica dell'aria (ovvero, il prodotto della densità e del calore specifico dell'aria), [Wh/(m³K)];
- $\dot{V}_{a,k}$ è la portata d'aria media giornaliera, [m³/h]; (in caso di ventilazione naturale, aerazione e infiltrazioni, tale valore si calcola come prodotto del volume netto V [m³] e dell'indice dei ricambi d'aria medio giornaliero n [h⁻¹])
- b_v è il fattore di correzione per la differenza di temperatura effettivamente presente nel flusso d'aria, [kWh]; (in caso di ventilazione naturale, aerazione e infiltrazioni, tale valore risulta essere pari a 1)
- θ_i è la temperatura interna prefissata, [°C];
- θ_e è il valore medio della temperatura media giornaliera esterna, [°C].

In presenza di un sistema di ventilazione meccanica, la procedura di calcolo prevede comunque il calcolo della ventilazione che si avrebbe in assenza dell'impianto meccanico, in modo tale da poter inserire in maniera adeguata il contributo della ventilazione sul fabbisogno di energia termica dell'involucro.

11.3.2.2.1 Potenza ed energia scambiate per ventilazione

Ai fini della certificazione energetica la determinazione del numero di ricambi d'aria orari, secondo il d.d.g. n. 5796, viene distinta in due differenti casi, nella condizione di aerazione, ventilazione naturale e infiltrazioni:

- si assume per gli edifici o parti di edificio residenziali esistenti, $n = 0,5 \text{ h}^{-1}$; per gli edifici o parti di edificio residenziali nuovi, $n = 0,3 \text{ h}^{-1}$;
- per gli altri edifici si calcola in numero di ricambi n con la formula (30) del d.d.g. n. 5796 basandosi sui dati del Prospetto XI dello stesso.

Nel caso di ventilazione meccanica controllata si assumono i valori di progetto, purché maggiori o uguali a quelli ottenuti dal calcolo effettuato con la formula (30) del d.d.g. n. 5796 con l'applicazione del fattore correttivo 0,6.

Determinato il numero di ricambi orari, la potenza dispersa o acquisita per ventilazione si calcola come:

$$\dot{Q}_V = \rho_a \cdot c_a \cdot V \cdot n \cdot \Delta T = \rho_a \cdot c_a \cdot V \cdot n \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (11.12)$$



dove:

\dot{Q}_v è la potenza dispersa o acquisita per scambio di massa tra ambiente interno o esterno, [W];

$\rho_a \cdot c_a$ è la capacità termica volumica dell'aria, pari a 0,34 Wh/(m³K);

V è il volume netto dell'ambiente confinato, [m³];

n è il numero di ricambi orari, [h⁻¹]

ΔT è la differenza di temperatura tra interno ed esterno, [K];

θ_i è la temperatura interna dell'ambiente confinato, [°C];

θ_e è la temperatura esterna all'ambiente confinato (ambiente esterno o ambiente a temperatura non controllata), [°C].

Se viene, quindi, introdotto il tempo ove si verifica un ricambio medio orario n nella formula precedente, è possibile calcolare l'energia dispersa o acquisita per ventilazione tramite la formula:

$$Q_v = \dot{Q}_v \cdot \Delta t = \rho_a \cdot c_a \cdot V \cdot n \cdot \Delta T \cdot \Delta t = \rho_a \cdot c_a \cdot V \cdot n \cdot (\theta_i - \theta_e) \times (t_1 - t_2) \quad (11.13)$$

dove:

Q_v è l'energia dispersa o acquisita per scambio di massa tra ambiente interno ed esterno, [Wh];

\dot{Q}_v è la potenza dispersa o acquisita per scambio di massa tra ambiente interno o esterno, [W];

Δt è la differenza di tempo tra l'istante t₁ e l'istante t₂, [h];

$\rho_a \cdot c_a$ è la capacità termica volumica dell'aria, pari a 0,34 Wh/(m³K);

V è il volume netto dell'ambiente confinato, [m³];

n è il numero di ricambi orari, [h⁻¹]

ΔT è la differenza di temperatura tra interno ed esterno, [K];

θ_i è la temperatura interna dell'ambiente confinato, [°C];



θ_e è la temperatura esterna all'ambiente confinato (ambiente esterno o ambiente a temperatura non controllata), [°C].

t_1 è l'istante iniziale del calcolo, [h];

t_2 è l'istante finale del calcolo, [h].

Per le condizioni interne ed esterne medie vale quanto già definito precedentemente nel capitolo.

Riquadro VII: Considerazioni sulla potenza dispersa o acquisita da un ambiente interno per ventilazione

Considerando nuovamente le condizioni di calcolo del Riquadro IV ($\theta_i = 20^\circ\text{C}$, $\theta_e = 1,7^\circ$) viene valutata la potenza media mensile dispersa per ventilazione da un ambiente interno di 300 m^3 , per un edificio residenziale avente come ricambio orario $n = 0,5 \text{ h}^{-1}$. Questo si traduce nel calcolo:

$$\dot{Q}_V = \rho_a \cdot c_a \cdot V \cdot n \cdot (\theta_i - \theta_e) = 0,34 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3 \text{K}} \cdot 300 \text{ m}^3 \cdot 0,5 \frac{1}{\text{h}} \cdot (20 - 1,7) \text{K} \cong 933 \text{ W} \cong 0,933 \text{ kW} \quad (11.14)$$

Questo valore rappresenta il valore medio di potenza scambiata per ventilazione e può correttamente essere utilizzato per determinare l'energia necessaria a riscaldare l'ambiente interno nel mese di gennaio, assumendo il mantenimento delle stesse condizioni interne per tutte le ore del mese.

Se, invece, si vuole determinare la massima potenza dispersa in condizioni di apertura delle finestre (aerazione), assumendo ad esempio un valore di ricambio orario di picco di $n = 2 \text{ h}^{-1}$, con una tipica temperatura invernale di 0°C , si procede come segue:

$$\dot{Q}_V = \rho_a \cdot c_a \cdot V \cdot n \cdot (\theta_i - \theta_e) = 0,34 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3 \text{K}} \cdot 300 \text{ m}^3 \cdot 2 \frac{1}{\text{h}} \cdot (20 - 0) \text{K} = 4080 \text{ W} \cong 4 \text{ kW} \quad (11.15)$$

Allo stesso modo durante l'estate il d.d.g. n. 5796 considera quale temperatura interna $\theta_i = 26^\circ\text{C}$, ai fini di dimensionare i terminali e la centrale di generazione per la climatizzazione estiva, se si vuole determinare la potenza scambiata per ventilazione in ambiente interno a causa della maggiore temperatura esterna, si può assumere come $\theta_e = 33,5^\circ\text{C}$ di picco e un ricambio orario maggiorato per l'evacuazione dell'eccesso di umidità pari a $n = 0,8 \text{ h}^{-1}$, che porta, quindi, al calcolo:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_V &= \rho_a \cdot c_a \cdot V \cdot n \cdot (\theta_i - \theta_e) = 0,34 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3 \text{K}} \cdot 300 \text{ m}^3 \cdot 0,8 \frac{1}{\text{h}} \cdot (26 - 33,5) \text{K} \\ &\cong -0,6 \text{ kW} \end{aligned} \quad (11.16)$$

Si tenga in considerazione in questo ultimo caso che non si è considerato l'apporto di carico latente dovuto alla ventilazione. Per maggiori dettagli su questo tema ci si riferisca al Capitolo 7.



Riquadro VIII: Considerazioni sull'energia dispersa o acquisita da un ambiente interno per ventilazione

Assumendo le stesse condizioni di calcolo dell'esempio riportato nel Riquadro VII si ottiene, applicando la formula 11.13 e considerando che il mese di gennaio ha 744 h:

$$Q_V = \rho_a \cdot c_a \cdot V \cdot n \cdot (\vartheta_i - \theta_e) \cdot (t_2 - t_1) = 933,3 \text{ W} \cdot 744 \text{ h} \\ \cong 694375 \text{ Wh} = 695 \text{ kWh} \quad (11.17)$$

Questo valore rappresenta il valore totale di energia necessaria per mantenere a 20°C un ambiente interno nel mese di gennaio, con una temperatura media mensile esterna $\theta_e = 1,7^\circ\text{C}$, costituito da 300m³ di volume interno ed un ricambio orario medio dell'aria pari a 0,5 h⁻¹. Come termine di confronto questa energia termica corrisponde a circa 72,5 m³ di gas metano, assumendo come potere calorifico del metano 9,59 kWh/m³.

Ripetendo questo calcolo per ogni mese della stagione di riscaldamento si ottiene l'energia totale dispersa per ventilazione tra ambiente interno ed ambiente esterno.

A titolo di esempio si calcola ora l'energia giornaliera introdotta dalla ventilazione nel caso di una giornata estiva, considerando una temperatura interna $\theta_i = 26^\circ\text{C}$ e una temperatura media giornaliera di 29°C. Viene inoltre assunto un ricambio orario di 0,8 h⁻¹.

$$Q_V = \dot{Q}_V \cdot (t_2 - t_1) = 0,34 \text{ Wh/m}^3 \text{ K} \cdot 300 \text{ m}^3 \cdot 0,8 \text{ 1/h} \cdot (26 - 29)\text{K} \cdot 24 \text{ h} \\ = -244,8 \text{ W} \cdot 24 \text{ h} = -5,9 \text{ kWh} \quad (11.18)$$

11.3.2.3 I guadagni interni

Qualunque calore generato all'interno della zona climatizzata o a temperatura controllata contribuisce ad accrescere gli apporti di calore interni, Q_I . Tra le principali sorgenti di calore interne vi sono:

- gli apporti dovuti al metabolismo degli occupanti;
- il calore sprigionato dalle apparecchiature elettriche e di illuminazione.

In edifici a destinazione d'uso residenziale gli apporti di calore dovuti alla presenza di queste sorgenti sono ricavati, in maniera convenzionale, moltiplicando il valore medio globale degli apporti interni per la durata del mese considerato.

Il valore globale degli apporti interni viene fornito, convenzionalmente:

- apporti medi globali [W], in funzione della superficie utile, per gli edifici residenziali;
- apporti medi globali per unità di superficie [W/m²], per tutte le altre destinazioni d'uso.

$$Q_I = \dot{Q}_a \cdot \Delta t \quad (11.19)$$

dove:

Q_I è l'apporto di calore dovuto ad apparecchiature elettriche e persone, [kWh];

\dot{Q}_a è il valore medio degli apporti globali interni, [W];



$\Delta\theta$ è l'apporto di calore dovuto ad apparecchiature elettriche e persone, [kWh].

Nel caso di edifici residenziali il valore medio degli apporti globali interni viene calcolato secondo il Prospetto XII del d.d.g. n. 5796, riferito alla norma UNI TS 11300-1:2008 ovvero:

Tabella 11.10: Prospetto XII d.d.g 5796 Valori globali degli apporti interni per il residenziale [Fonte UNI TS 11300-1:2008]

Categoria di edificio	Destinazione d'uso	Apporti medi globali \dot{Q}_a [W]
E.1 (1); E.1(2)	Edifici Residenziali con A <170 m ²	5,294 x A-0,01557 x A ²
E.1 (1); E.1(2)	Edifici Residenziali con A >170 m ²	450

Nel caso di edifici non residenziali, tale valore viene calcolato come il prodotto tra il valore medio globale degli apporti interni per unità di superficie utile [W/m²] e la superficie utile di pavimento [m²].

$$Q_l = \dot{q}_a \cdot A \cdot \Delta t \quad (11.20)$$

dove:

Q_l è l'apporto di calore dovuto ad apparecchiature elettriche e persone, [kWh];

\dot{q}_a è il valore medio degli apporti globali interni per unità di superficie utile, [W/m²];

A è la superficie utile di pavimento, [m²];

Δt è la durata del mese considerato, [kh].

Il valore medio degli apporti globali interni per unità di superficie utile viene definito secondo il Prospetto XIII del d.d.g. n. 5796, riferito alla norma UNI TS 11300-1:2008



Tabella 11.11: Prospetto XIII d.d.g. n. 5796 Valori globali degli apporti interni per le destinazioni d'uso diverse dal residenziale [Fonte UNI TS 11300-1:2008]

Categoria di edificio	Destinazione d'uso	Apporti medi globali per unità di superficie \dot{q}_a [W/m ²]
E.1 (3)	Edifici adibiti ad albergo, pensioni ed attività similari	6
E.2	Edifici adibiti ad uffici e assimilabili	6
E.3	Edifici adibiti ad ospedali, cliniche o case di cura ed assimilabili	8
E.4(1)	Cinema e teatri, sale di riunione per congressi	8
E.4(2)	Luoghi di culto, mostre, musei e biblioteche	8
E.4(3)	Bar, ristoranti, sale da ballo	10
E.5	Edifici adibiti ad attività commerciali ed assimilabili	8
E.6(1)	Piscine, saune ed assimilabili	10
E.6(2)	Palestre ed assimilabili	5
E.6(3)	Servizi di supporto alle attività sportive	4
E.7	Edifici adibiti ad attività scolastiche di tutti i livelli ed assimilabili	4
E.8	Edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali ed assimilabili	6

11.3.2.4 I guadagni solari

Gli apporti solari attraverso le superfici trasparenti rivolte verso l'ambiente esterno vengono calcolati moltiplicando l'irradiazione globale disponibile (sempre in termini di valori medi mensili) per l'area di captazione solare effettivamente disponibile.

Per quanto riguarda l'irradiazione, essa è calcolata a partire dai valori riportati nella UNI 10349:1994, la quale fornisce i valori di irradiazione globale (diretta e diffusa) giornaliera media mensile incidente [kWh/m²] su una superficie unitaria per i differenti capoluoghi di provincia. Moltiplicando tale valore per il numero dei giorni N del mese considerato, si ottiene la massima radiazione solare disponibile per un metro quadro di superficie avente quell'orientamento.

Tale calcolo dovrà pertanto essere eseguito per ciascuna esposizione j-esima e per ciascun elemento trasparente i-esimo avente quella esposizione.

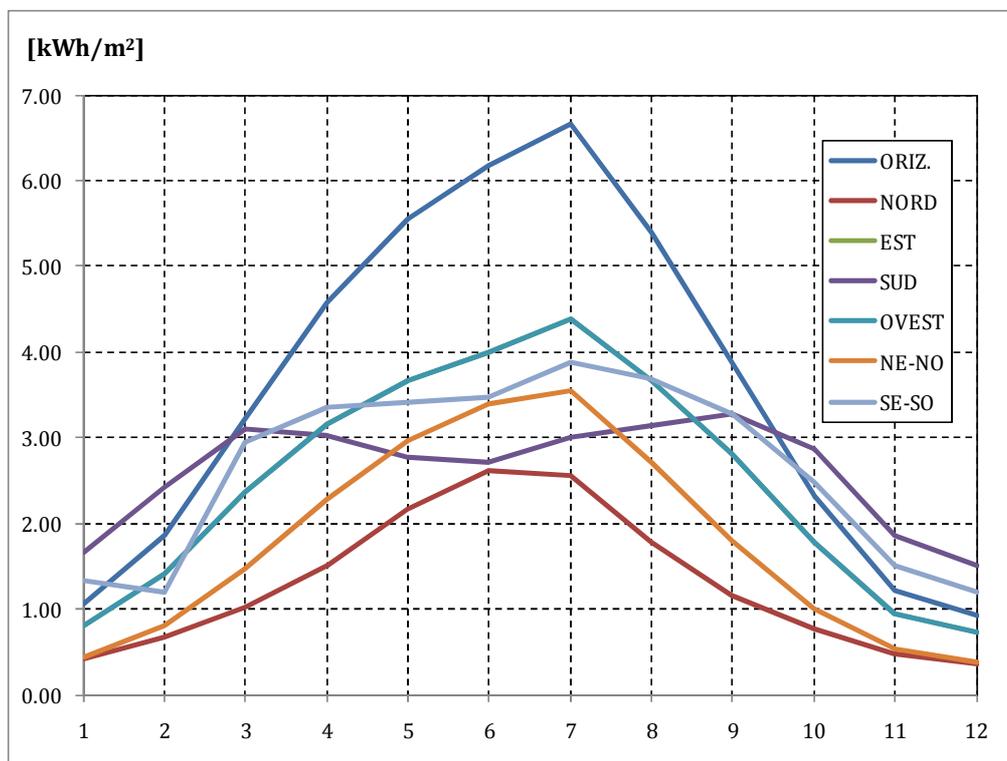


Figura 11.2: Radiazione solare giornaliera media mensile per la Città di Milano.

L'area di captazione solare da considerare è quella dei serramenti. È ovvio che non tutta l'area del serramento A_w entra in gioco: si deve innanzitutto considerare la presenza del telaio (che è non trasparente alla radiazione solare).

Oltre a tale contributo, è necessario considerare il fattore di riduzione per ombreggiatura relativo ad elementi esterni, F_s . Tale contributo viene conteggiato considerando la presenza di ostruzioni esterne (F_h) e ombreggiature parziali dovute alla presenza di aggetti orizzontali (F_o) e verticali (F_v). Questi contributi sono ricavati dai Prospetti XVII e XVIII del d.d.g. n. 5796, in funzione dell'angolo di ombreggiamento e dell'esposizione della superficie ombreggiata. Il fattore di riduzione per ombreggiatura è un numero il cui dominio di esistenza è compreso tra 0 (completamente ombreggiato) e 1 (ostruzione assente).

La quantità di energia che attraversa il vetro rispetto all'energia incidente è rappresentata dal fattore di trasmittanza dell'energia solare totale g (detto anche semplicemente fattore solare). Abitualmente, viene fornito il valore con angolo di incidenza nullo, ovvero il massimo valore (g_{\perp}). Il dominio di esistenza del fattore solare è 0 - 0,87 (che corrisponde al fattore solare del vetro singolo).

Per tale motivo, è necessario tenere conto della riduzione dovuta all'inclinazione dei raggi solari rispetto alla superficie verticale interessata, attraverso il coefficiente F_{gl} , fornito convenzionalmente in funzione di una correlazione empirica per le diverse tipologie di vetri



(trasmissione termica) e rivestimenti (fattore solare), assumendo la distribuzione della radiazione diffusa.

$$Q_{SI} = N \cdot \sum_j \left[\bar{H}_{s,j} \cdot \left(\sum_i A_{w,i} \cdot (1 - F_{F,i}) \cdot F_{S,i,j} \cdot F_{gl,i} \cdot g_{\perp} \right) \right] \quad (11.21)$$

dove:

Q_{SI} è l'apporto di calore dovuto alla radiazione solare attraverso le superfici trasparenti rivolte verso l'ambiente esterno, [kWh];

N è il numero di giorni del mese considerato, [-];

$\bar{H}_{s,j}$ è l'irradiazione globale giornaliera media mensile incidente sulla superficie trasparente con esposizione j , [kWh/m²] (Prospetto XIV d.d.g. n. 5796);

$A_{w,i}$ è la superficie lorda del serramento vetrato i , (assunta pari a quella dell'apertura realizzata sulla parete), [m²];

$(1 - F_{F,i})$ è il coefficiente di riduzione dovuto al telaio per il serramento i , pari al rapporto tra l'area trasparente e l'area totale dell'unità vetrata, si assume un valore convenzionale pari a 0,80;

$F_{S,i,j}$ è il fattore di riduzione dovuto all'ombreggiatura per la superficie i , con esposizione j , [-];

F_{gl} è il fattore di correzione che tiene conto della dipendenza angolare delle proprietà ottiche della superficie trasparente i , [-];

g_{\perp} è la trasmittanza dell'energia solare totale della superficie trasparente del serramento, [-].

11.3.2.5 Gli apporti solari attraverso strutture opache

Gli apporti solari mensili attraverso le strutture opache esterne costituiscono un apporto gratuito di calore e, nella procedura di calcolo del d.d.g. n. 5796, sono considerati come una riduzione delle dispersioni termiche. Essi risultano essere in parte bilanciati dall'extra flusso termico dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste. Si può, pertanto, affermare che durante la stagione invernale tale contributo sia di secondaria importanza all'interno del bilancio termico. Per tale ragione, è lecito considerare in maniera semplificata gli ombreggiamenti sugli elementi opachi.

Una volta assegnata una superficie opaca, per determinare gli apporti solari è sufficiente definire il fattore di assorbimento medio (funzione del tipo di colorazione dell'elemento) ed il coefficiente di riduzione che tiene conto dell'incidenza del flusso radiativo emesso dalla superficie verso la volta celeste (funzione dell'inclinazione dell'elemento).



$$Q_{SE,O} = N \cdot \sum_j \bar{H}_{s,j} \cdot \left(\sum_i \alpha_i \cdot A_{L,i} \cdot F_{S,i} \cdot F_{er,i} \cdot \frac{U_i}{h_e} \right) \quad (11.22)$$

dove:

$Q_{SE,O}$ è la quantità di energia solare assorbita dalle pareti opache esterne e trasferita all'ambiente a temperatura controllata o climatizzato, [kWh];

N è il numero di giorni del mese considerato;

$\bar{H}_{s,j}$ è l'irradiazione globale giornaliera media mensile incidente sulla superficie trasparente con esposizione, j [kWh/m²] (Prospetto XIV d.d.g. n. 5796);

α_i è il fattore di assorbimento solare medio della superficie assorbente della parete opaca, i , rivolta verso l'esterno (Prospetto XXIII d.d.g. n. 5796);

$A_{L,i}$ è la superficie lorda della parete opaca i rivolta verso l'esterno, [m²];

$F_{S,i}$ è il fattore di riduzione dovuto all'ombreggiatura, [-];

$F_{er,i}$ è il coefficiente di riduzione che tiene conto dell'incidenza del flusso radiativo emesso dalla superficie, i , verso la volta celeste, [-];

U_i è la trasmittanza termica della parete opaca, i , rivolta verso l'esterno, [W/(m²K)];

h_e è il coefficiente di scambio termico superficiale esterno, pari a 25 W/(m²K).

11.3.2.6 Gli spazi soleggiati

La presenza di spazi soleggiati (serre) addossati all'ambiente climatizzato si traduce, essenzialmente, in tre contributi.

- $Q_{T,S}$: riduzione delle dispersioni di trasmissione (che si avrebbero in assenza della serra), dovuta all'innalzamento della temperatura nello spazio soleggiato ed aggiunta di dispersioni per trasmissione dalla serra all'ambiente esterno.
- $Q_{SE,S}$: contributo solare indiretto, ovvero aumento degli apporti solari attraverso le superfici opache di separazione tra l'ambiente climatizzato e la serra (dovuto sia al surriscaldamento dell'ambiente non climatizzato soleggiato per effetto della radiazione solare assorbita dalle varie superfici sia alla radiazione solare direttamente assorbita dalle parti opache della parete divisoria tra la zona climatizzata o a temperatura controllata e lo spazio soleggiato). In realtà questo contributo, all'interno della procedura di calcolo del d.d.g. n. 5796, viene considerato come una riduzione delle dispersioni termiche.
- $Q_{SI,S}$: apporto solare diretto, dovuto all'ingresso della radiazione solare che passa prima attraverso il vetro della serra e successivamente attraverso il vetro delle finestre tra il volume climatizzato e lo spazio soleggiato.



Si rimanda al d.d.g. n. 5796 per le formule.

Viene riproposta unicamente l'equazione del bilancio di energia termica utile, in presenza di spazi soleggiati. Il contributo di energia $Q_{T,S}$ trasferita per trasmissione attraverso uno spazio soleggiato adiacente alla zona climatizzata o a temperatura controllata considerato è incluso nelle dispersioni per trasmissione Q_T .

$$Q_{NH} = \max\left(0; (Q_T + Q_V - Q_{SE,O} - Q_{SE,S}) - \eta_{G,H} \cdot (Q_I + Q_{SI} + Q_{SI,S})\right) \quad (11.23)$$

dove:

$Q_{SE,S}$ è la quantità di energia solare trasferita all'ambiente climatizzato o a temperatura controllata dovuta a spazi soleggiati a temperatura non controllata addossati all'involucro, [kWh];

$Q_{SI,S}$ è l'apporto solare diretto (interno) dovuto alla radiazione solare che passa prima attraverso il vetro dello spazio soleggiato e poi attraverso il vetro della finestra tra la zona climatizzata e lo spazio soleggiato, [kWh].

11.3.2.7 Il fattore di utilizzo dei guadagni

Non tutti gli apporti gratuiti possono essere sfruttati ai fini del fabbisogno energetico. Quando gli apporti sono (nel valore istantaneo) troppo grandi rispetto alle dispersioni c'è il rischio che questi abbiano come effetto un eccessivo surriscaldamento dell'ambiente interno. Questo è tanto più vero quanto minore è la capacità dell'edificio ad accumulare velocemente l'energia resa disponibile gratuitamente. La capacità termica si traduce, dunque, nella capacità di applicare la disponibilità istantanea di calore su un tempo più lungo.

Attraverso una correzione forfettaria (determinata su base statistica), qual è, appunto, il fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti, è dunque possibile considerare la dinamica di tali apporti come un comportamento "quasi-stazionario".

Oltre alla capacità termica, rappresentata dalla costante di tempo τ , il fattore di utilizzazione dipende anche dal grado di isolamento dell'involucro e dalla disponibilità di apporti a fronte delle dispersioni termiche (rapporto di bilancio termico γ). Il rapporto γ è anche un buon indicatore della precisione del metodo: a valori di γ alti (maggiori di 0,75) corrispondono maggiori incertezze ed errori nel calcolo (in quanto l'aleatorietà degli apporti gratuiti solari diviene significativa).

Per quanto riguarda la capacità termica, essa può essere calcolata:

- in funzione di valori tabellati che tengono conto delle caratteristiche termofisiche degli elementi di involucro edilizio che racchiudono il volume riscaldato, limitatamente agli edifici esistenti;
- in funzione di un calcolo dettagliato.



Anche per gli edifici nuovi è ammesso il calcolo della capacità termica in maniera semplificata, secondo quanto indicato nel Decreto 14006 del 15/12/2009.

I componenti dell'involucro edilizio che concorrono a definire la capacità termica complessiva sono quelli che delimitano il volume riscaldato. Sono esclusi i serramenti, i cassonetti, le porte, i controsoffitti, i pavimenti sopraelevati e, a discrezione, le partizioni verticali interne. Sono invece da considerare le partizioni interne orizzontali. Le superfici da considerare nel calcolo sono quelle nette.

Siccome nel calcolo entrano le perdite di ventilazione, è necessario calcolare due distinti valori del fattore di utilizzazione, considerando la reale modalità di ventilazione della zona termica.

$$\begin{aligned}\eta_{G,H} &= \frac{1 - \gamma_H^{a_H}}{1 - \gamma_H^{a_H+1}}; \\ \gamma_H &= \frac{Q_I + Q_{SI} + Q_{SL,S}}{Q_T + Q_V - Q_{SE,O}}; \\ a_H &= 1 + \frac{\tau_H}{15}; \\ \tau_H &= \frac{C_m \times A_{tot}}{3,6 \cdot (H_T + H_V)}\end{aligned}\tag{11.24}$$

dove:

$\eta_{G,H}$ è il fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti per il riscaldamento, [-];

γ_H è il rapporto apporti/perdite nel mese, [-];

τ_H è la costante di tempo, [h];

C_m è la capacità termica per unità di superficie interna, [kJ/(m²K)];

A_{tot} è l'area totale interna, cioè la somma delle superfici nette dei componenti opachi che delimitano una zona climatizzata o a temperatura controllata, [m²].

11.3.3 Commento critico al calcolo di ET_H .

Una volta eseguito il calcolo del fabbisogno mensile, è sufficiente sommare tali fabbisogni per determinare il fabbisogno di riscaldamento invernale dell'involucro, Q_{NH} . Rapportando tale fabbisogno alla superficie utile (nel caso di edifici residenziali) o al volume lordo climatizzato (nel caso degli altri edifici), si ricava immediatamente l'indicatore di prestazione termica ET_H [kWh/m²] o [kWh/m³] (fabbisogno energetico specifico dell'involucro per la climatizzazione invernale).

Analizzando tale valore, che rappresenta l'energia che è necessario fornire all'ambiente per mantenere le condizioni di temperatura prefissate all'interno della stagione di riscaldamento convenzionale, è possibile ricavare una serie di utili informazioni. Si ricorda che tale indicatore non trova poi corrispondenza con una classe energetica.



Rapporto di forma S/V

Maggiore sarà il rapporto di forma S/V, maggiore sarà il fabbisogno di energia per il riscaldamento, in quanto vi sarà maggiore superficie disperdente, a parità di volume riscaldato. Questa affermazione trova conferma anche nel più elevato valore consentito di $EP_{H,limite}$ da rispettare per edifici con elevati rapporti S/V.

Il rapporto di forma S/V è un ottimo indicatore di quello che è il “peso” relativo delle dispersioni per trasmissione e ventilazione. A bassi rapporti S/V (tipici, ad esempio, di edifici a torre o di appartamenti confinati all’interno di edifici riscaldati) corrisponderanno, probabilmente, notevoli incidenze percentuali delle dispersioni per ventilazione, mentre nel caso di alti valori del rapporto S/V (tipico, ad esempio, di ville residenziali) saranno preponderanti le perdite per trasmissione.

Coefficiente di dispersione per trasmissione

Analizzando la formula delle dispersioni per trasmissione, risulta che, a parità di forzante climatica, al crescere del coefficiente H_T crescono le dispersioni per trasmissione. Per tale ragione, al momento della proposta di interventi migliorativi che interessano l’involucro, questo valore deve essere attentamente esaminato.

Il contributo dei ponti termici deve essere attentamente valutato: qualora l’involucro sia ben isolato, l’incidenza dei ponti termici cresce notevolmente.

È importante, inoltre, sottolineare come il metodo semplificato attribuisca tutti i ponti termici interamente alle pareti, portando quindi a peggioramenti significativi della trasmittanza termica di tali elementi. Questo si traduce in alti coefficienti di dispersioni per trasmissione H_T : tale fatto deve essere valutato nella proposta di interventi di miglioramento dell’involucro.

Si sottolinea inoltre come l’utilizzo del metodo semplificato rispetto al metodo dettagliato possa portare, in alcuni casi, a significative variazioni in termini di risultato.

Coefficiente di dispersione per ventilazione

La presenza di un recuperatore di calore si riflette sul fabbisogno di energia termica dell’involucro e sul fabbisogno di energia primaria.

Apporti interni

I carichi interni assumono sempre più importanza qualora ci si muove verso edifici isolati. Poter sfruttare (interamente, grazie al fattore di utilizzazione) un apporto di circa $3,7 \text{ W/m}^2 \times \Delta t$ mensilmente significa avere a disposizione circa $2,74 \text{ kWh/m}^2$ per ciascun mese della stagione di riscaldamento.

Apporti solari



Vale quanto sopra. Analizzando la forzante climatica, per le latitudini della Regione Lombardia, in un mese si hanno a disposizione tra i 20 e gli 80 kWh per m² di superficie di captazione solare. Tale valore viene poi notevolmente ridotto per la presenza di tutti i fattori di riduzione presentati nel Paragrafo 11.3.2.4. Lo sfruttamento degli apporti solari è sicuramente uno fra i principali aspetti progettuali da tenere in debita considerazione per il raggiungimento di prestazioni elevate. È necessario sottolineare come tale scelta debba considerare anche gli aspetti estivi, come trattato nel seguito del presente Capitolo.

Fattore di utilizzazione

Il fattore di utilizzazione permette di stabilire la quota parte di apporti non utilizzati. Tale valore è vicino all'unità per edifici con pochi apporti, mentre può diminuire notevolmente qualora gli apporti gratuiti giochino un ruolo fondamentale.

Il fattore di utilizzazione dipende direttamente dalla capacità termica che risulta essere, comunque, un parametro poco sensibile, in riferimento al fabbisogno di energia termica per il riscaldamento. Per tale ragione, anche per gli edifici nuovi è ammesso il calcolo semplificato della capacità termica dell'involucro, così come è lasciata la possibilità di decidere se includere nel calcolo anche le superfici (verticali) interne.



11.4 Il bilancio estivo (D.d.g. n. 5796 11 giugno 2009)

11.4.1 L'equazione del bilancio estivo

La procedura di calcolo permette di determinare il fabbisogno annuo di energia termica (dell'involucro) per il raffrescamento o per la climatizzazione estiva (se si è in presenza di sistemi impiantistici in grado di controllare l'umidità dell'aria). Esso può essere definito come la quantità di energia termica idealmente richiesta dall'involucro edilizio, nel corso della stagione di raffrescamento, in regime di attivazione continuo dell'impianto.

La durata della stagione di raffrescamento, a differenza della durata della stagione di riscaldamento, non è definita a priori per le varie zone climatiche. In realtà, infatti, non esiste una vera e propria stagione di raffrescamento: il calcolo viene effettuato per tutti i mesi dell'anno. I limiti del fabbisogno di energia termica dell'involucro per il raffrescamento o la climatizzazione estiva risultano essere definiti dal valore positivo del fabbisogno (questo vuol dire che laddove esiste un fabbisogno per il riscaldamento non potrà esserci contemporaneamente anche un fabbisogno di raffrescamento).

È interessante notare che per alcune tipologie di edifici e di zone termiche (ad esempio, per le zone termiche interne di edifici commerciali), si può avere un carico termico per raffrescamento anche nel periodo invernale.

Per tutti gli edifici, viene assunta una temperatura interna θ_i costante pari a 26°C, fatta eccezione per gli edifici classificati come E.6 (1) (piscine) (che risultano essere mantenuti ad una temperatura di 28 °C) e gli edifici classificati come E.6 (2) (palestre), per i quali si assume una temperatura interna costante pari a 24°C.

Il calcolo estivo è in tutto simile, concettualmente, al calcolo invernale: i termini in gioco sono infatti sempre gli stessi. Si effettua un calcolo mensile, con temperatura interna costante (regime continuo) e si utilizza sempre l'eventuale suddivisione in zone termiche. Quello che cambia, oltre al valore della temperatura di progetto e della durata della stagione (che si è visto non essere fissata a priori) è il "verso" del bilancio, che non sarà più dispersioni meno apporti (utilizzati), ma, viceversa, apporti meno dispersioni (utilizzate).

Questo significa che la procedura determina le dispersioni che avvengono (per trasmissione e per ventilazione) attraverso l'involucro edilizio, a fronte della temperatura interna fissata e della temperatura dell'aria esterna. Tali dispersioni saranno sottratte (attraverso il fattore di utilizzazione) agli apporti gratuiti (interni e solari), per ottenere il fabbisogno di energia utile, ovvero la quantità di calore che deve essere sottratto dall'ambiente (tramite l'impianto) per mantenere, all'interno dell'edificio, le condizioni prefissate di temperatura.

Si sottolinea come il fattore di utilizzazione sia in questo caso riferito alle dispersioni, e non agli apporti.



$$Q_{NC} = \max\left(0; (Q_I + Q_{SI}) - \eta_{L,C} \cdot (Q_T + Q_V + Q_{SE,O})\right) \quad (11.25)$$

dove:

Q_{NC} è il fabbisogno di energia termica sensibile di riferimento per il raffrescamento o la climatizzazione estiva della zona considerata, [kWh];

Q_I è la quantità di energia gratuita dovuta ad apparecchiature elettriche e persone, [kWh];

Q_{SI} è la quantità di energia gratuita dovuta alla radiazione solare entrante attraverso le superfici trasparenti rivolte direttamente verso l'ambiente esterno, [kWh];

Q_T è la quantità di energia dispersa per trasmissione tra la zona climatizzata o a temperatura controllata e l'ambiente circostante, [kWh];

Q_V è la quantità di energia di riferimento dispersa per ventilazione tra la zona climatizzata o a temperatura controllata e l'ambiente circostante, [kWh];

$Q_{SE,O}$ è la quantità di energia solare assorbita dai componenti opachi e trasferita alla zona climatizzata o a temperatura controllata, [kWh];

$\eta_{L,C}$ è il fattore di utilizzazione di riferimento delle dispersioni.

Si sottolinea come, anche nel caso estivo, deve essere considerato il contributo dovuto alla presenza di spazi soleggiati (serre) adiacenti all'ambiente riscaldato.

Per come è definito il fabbisogno, se le dispersioni (sfruttate) dovessero essere maggiori degli apporti, si considera un valore di fabbisogno nullo. Per definizione, infatti, il fabbisogno di energia utile rappresenta la quantità di calore che è necessario estrarre dall'ambiente per mantenere la temperatura fissata.

Ai fini del presente paragrafo, vengono riportati i soli fattori che variano rispetto al caso invernale, ovvero:

- apporti solari;
- spazi soleggiati;
- fattore di utilizzazione delle dispersioni.

11.4.1.1 I guadagni solari

Nel calcolo degli apporti solari durante la stagione estiva, è necessario prendere in considerazione l'effetto di schermature mobili permanenti, cioè integrate nell'involucro edilizio e non liberamente montabili e smontabili dall'utente.

La presenza di tali elementi viene considerata in un fattore di riduzione $F_{(sh+gl)}$ che considera il fattore di riduzione degli apporti solari F_{sh} , dovuto alla presenza di schermature mobili permanenti, ed il fattore di correzione F_{gl} per angolo di incidenza medio giornaliero diverso da



0°, che tiene conto della dipendenza angolare delle proprietà ottiche della superficie trasparente i , quando essa non è schermata.

$$Q_{SI} = N \cdot \sum_j \left[\bar{H}_{s,j} \cdot \left(\sum_i A_{w,i} \cdot (1 - F_{F,i}) \cdot F_{S,i,j} \cdot F_{(sh+gl),i} \cdot g_{\perp} \right) \right] \quad (11.26)$$

dove:

Q_{SI} è l'apporto di calore dovuto alla radiazione solare attraverso le superfici trasparenti rivolte verso l'ambiente esterno, [kWh];

N è il numero di giorni del mese considerato, [-];

$\bar{H}_{s,j}$ è l'irradiazione globale giornaliera media mensile incidente sulla superficie trasparente con esposizione j , [kWh/m²] (Prospetto XIV d.d.g. n. 5796);

$A_{w,i}$ è la superficie lorda del serramento vetrato i , (assunta pari a quella dell'apertura realizzata sulla parete), [m²];

$(1-F_{F,i})$ è il coefficiente di riduzione dovuto al telaio per il serramento i , pari al rapporto tra l'area trasparente e l'area totale dell'unità vetrata, si assume un valore convenzionale pari a 0,80;

$F_{S,i,j}$ è il fattore di riduzione dovuto all'ombreggiatura per la superficie i , con esposizione j , [-];

$F_{(sh,gl),i,j}$ è il fattore di riduzione degli apporti solari relativo all'utilizzo di schermature mobili o fisse complanari al serramento i , con esposizione j , comprensivo della riduzione dovuta all'inclinazione dei raggi solari rispetto alla superficie verticale interessata, [-];

g_{\perp} è la trasmittanza dell'energia solare totale della superficie trasparente del serramento, [-].

Si sottolinea come il fattore di riduzione degli apporti solari dovuto all'effetto di schermature mobili permanenti tenga conto sia della trasmittanza di energia solare diretta che diffusa del serramento in presenza della schermatura.

11.4.1.2 Gli spazi soleggiati

La presenza di spazi soleggiati (serre) addossati all'ambiente climatizzato si traduce, essenzialmente, negli stessi tre contributi visti per il caso invernale (riduzione delle dispersioni di trasmissione $Q_{T,S}$, contributo solare indiretto $Q_{SE,S}$ e apporto solare diretto $Q_{SI,S}$).

La differenza rispetto al caso invernale è che la procedura per determinare l'energia trasferita per trasmissione attraverso lo spazio soleggiato adiacente non tiene conto delle perdite di ventilazione, in quanto la portata d'aria tra lo spazio soleggiato e la zona climatizzata o a temperatura controllata è assunto pari a 0.



Infatti, è buona norma “disattivare” le serre durante la stagione estiva, per evitare problemi di surriscaldamento.

11.4.1.3 Il fattore di utilizzo delle dispersioni

Anche in questo caso vale quanto già presentato per il caso invernale. Il fattore di utilizzazione delle perdite è funzione del rapporto di bilancio termico apporti/perdite, γ_c , e di un parametro numerico, a_c , che dipende dalla costante di tempo della zona.

Quello che cambia rispetto al caso invernale è però la fisica del fenomeno, che si traduce nel cambio del segno nella formula utilizzata per il calcolo del fattore di utilizzazione delle dispersioni.

Tale fattore di utilizzazione delle dispersioni (scambi termici per trasmissione e ventilazione) tiene in considerazione il fatto che solo parte di tale scambio termico è effettivamente utilizzato per ridurre i fabbisogni di raffrescamento; lo scambio termico per trasmissione e ventilazione “non utilizzato” si manifesta durante periodi o intervalli (per esempio di notte) quando non ha alcun effetto sui fabbisogni di raffrescamento, che si manifestano in realtà durante altri periodi o momenti (per esempio di giorno).

Lo scambio termico per trasmissione e ventilazione nell’equazione di bilancio termico è calcolato sulla base della temperatura interna di regolazione per il raffrescamento, ignorando così il fatto che questo valore di regolazione nella realtà non sempre si raggiunge. Il fattore di utilizzazione delle dispersioni fornisce appunto la correzione necessaria. Con questa formulazione si mostra esplicitamente come lo scambio termico contribuisca alla riduzione dei fabbisogni di energia termica dell’edificio per il raffrescamento.

$$\begin{aligned}\eta_{L,C} &= \frac{1 - \gamma_c^{-a_c}}{1 - \gamma_c^{-(a_c+1)}}; \\ \gamma_c &= \frac{Q_I + Q_{SI} + Q_{SLS}}{Q_T + Q_V - Q_{SE,O}}; \\ a_c &= 1 + \frac{\tau_c}{15}; \\ \tau_c &= \frac{C_m \cdot A_{tot}}{3,6 \cdot (H_T + H_V)}\end{aligned}\tag{11.27}$$

dove:

$\eta_{L,C}$ è il fattore di utilizzazione delle perdite per il raffrescamento, [-];

γ_c è il rapporto apporti/perdite nel mese, [-];

τ_c è la costante di tempo, [h];

C_m è la capacità termica per unità di superficie interna, [kJ/(m²K)];



A_{tot} è l'area totale interna, cioè la somma delle superfici nette dei componenti opachi che delimitano una zona climatizzata o a temperatura controllata, [m²].

11.4.2 Commento critico al calcolo di ET_c

Analizzando l'indicatore di prestazione termica ET_c , [kWh/m²] o [kWh/m³], (fabbisogno energetico specifico dell'involucro per la climatizzazione estiva), è possibile trarre alcune considerazioni. Il valore rappresenta l'energia che è necessario fornire all'ambiente per mantenere le condizioni di temperatura prefissate all'interno della stagione di raffrescamento.

Essendo la fisica del fenomeno "capovolta" rispetto al caso invernale, è possibile affermare che, minore sarà il rapporto di forma S/V , maggiore sarà il fabbisogno di energia per il raffrescamento, giacché vi sarà minore superficie disperdente.

Nel periodo estivo gli apporti termici interni e solari diventano la causa fondamentale dell'esigenza di raffrescamento, poiché contribuiscono a surriscaldare l'ambiente confinato.

L'incremento dei carichi interni può essere smaltito efficacemente attraverso l'adeguata ventilazione degli ambienti. Un successivo contributo alla riduzione dei carichi di condizionamento è fornito dalle dispersioni attraverso l'involucro dato che, per il modello di calcolo adottato, il gradiente di temperatura nei mesi estivi è tale da determinare valori medi mensili di temperatura dell'aria interna maggiori rispetto a quelli della temperatura dell'aria esterna.

Infatti, nel clima italiano, fatta eccezione per poche città al Sud, la temperatura media mensile dell'aria esterna è normalmente inferiore alla temperatura interna di progetto estiva (assunta essere pari a 26°C). Queste differenze di temperatura sono normalmente molto modeste e di conseguenza le dispersioni per trasmissione e ventilazione sono di entità limitata.

Esaminando un caso reale, estraneo al modello di calcolo adottato e che possa disporre di dati climatici orari ci renderemmo conto della presenza di maggiori dispersioni termiche durante le ore notturne in cui le temperature orarie dell'aria esterna si riducono notevolmente e di picchi ed elevata variabilità degli apporti solari su chiusure opache e trasparenti durante tutte le ore del giorno.

Si ricorda, infine, che l'indicatore di prestazione termica ET_c trova corrispondenza nella classificazione energetica per la climatizzazione estiva o il raffrescamento. A livello regionale, non esiste tuttavia ad oggi un limite relativo alla fase di progettazione circa la prestazione dell'involucro nella stagione estiva, come invece avviene in diversi altri contesti normativi (ad esempio, il DPR 59/09).

A livello progettuale, si richiama in tale sede come, al fine di limitare i fabbisogni energetici per la climatizzazione estiva o il raffrescamento e di contenere la temperatura degli ambienti, il progettista, secondo quanto riportato all'interno della d.g.r. VIII/8745 e già discusso anche all'interno del Capitolo 2, deve verificare, per alcuni casi specificati ed in alternativa al valore della massa superficiale, che il valore del modulo della trasmittanza termica periodica Y_{IE} sia



inferiore rispettivamente a $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ relativamente alle strutture verticali opache oppure a $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ relativamente alle strutture opache orizzontali e inclinate.

Riquadro IX: La trasmittanza termica periodica

La trasmittanza termica periodica, definita come il prodotto fra il fattore di attenuazione (f) e la trasmittanza termica in condizioni stazionarie, è il parametro che valuta la capacità di un elemento opaco di sfasare ed attenuare il flusso termico che lo attraversa nell'arco delle 24 ore.

La trasmittanza termica periodica e gli altri principali parametri termici dinamici, quali ad esempio il coefficiente di sfasamento temporale (φ), vengono calcolati attraverso la norma UNI EN ISO 13786:2008, sulla base delle caratteristiche termo-fisiche dei materiali (conducibilità termica, spessore, calore specifico e densità) e dalla stratigrafia della struttura, sfruttando il calcolo matriciale.

Si ricorda che la trasmittanza termica periodica è un numero complesso, definito come l'ampiezza complessa della densità del flusso termico su un lato del componente quando l'ampiezza di temperatura su quel lato è nulla (temperatura costante) diviso per l'ampiezza complessa di temperatura sull'altro lato.



11.5 Il recupero termico dovuto all'ACS

La procedura di calcolo del fabbisogno di energia primaria dell'edificio segue, nella sua applicazione, un percorso inverso a quello delineato dai flussi di energia tra i vari sottosistemi. Il calcolo parte, quindi, dai fabbisogni termici della zona termica (o edificio se mono-zona), nelle sue varie componenti, e procede a ritroso con la determinazione delle perdite termiche di ogni sottosistema e degli assorbimenti elettrici degli ausiliari.

Riquadro X: Perdite termiche ed elettriche recuperabili

L'energia termica complessivamente dispersa dai vari sottosistemi impiantistici è costituita dalla perdita termica di processo (legata cioè alla modalità di trasferimento dell'energia termica dall'ingresso all'uscita del sottosistema considerato) e dalla quota dispersa dell'energia elettrica degli ausiliari verso l'ambiente esterno al sottosistema.

L'energia elettrica degli ausiliari è convertita in energia termica e parzialmente recuperata in termini d'incremento dell'energia termica in uscita ai vari sottosistemi impiantistici, attraverso la frazione recuperata dell'energia elettrica assorbita dagli ausiliari ($k_{x,y}$). Ogni kWh elettrico consumato dai vari sottosistemi impiantistici sarà dissipato e convertito in lavoro ed energia termica. Sistemi impiantistici differenti avranno differenti frazioni di recupero dell'energia termica secondo il loro reale funzionamento.

Le perdite termiche non derivanti dalla trasformazione di energia elettrica in termica, ai fini della presente procedura di calcolo, si considerano invece non recuperabili, con l'eccezione di quelle che si riferiscono all'acqua calda sanitaria. A titolo di esempio rientrano all'interno delle perdite non recuperabili le perdite del sistema di distribuzione, dell'accumulo e della generazione dell'impianto di riscaldamento.

In questo modo, si evita di dover procedere per iterazioni successive: cambiando, infatti, il fabbisogno termico netto della zona variano anche le perdite dei vari sottosistemi impiantistici, la loro quota recuperata e quindi ancora il fabbisogno termico netto definito in partenza.

Le perdite termiche di processo dei sottosistemi, dove possibile, sono determinate attraverso l'impiego del rendimento del sottosistema $\eta_{x,y}$, determinato utilizzando i prospetti contenenti dati precalcolati in funzione della tipologia di sottosistema e di uno o più parametri caratteristici.

Tutti questi aspetti saranno approfonditi nei successivi Capitoli.

Note tali perdite, è possibile calcolare la quota recuperata dal sistema involucro della zona termica ($Q_{Z,RL}$) che va a correggere il fabbisogno termico della zona termica, secondo le seguenti equazioni:

$$Q^*_{NH,s} = Q_{NH,s} - Q_{Z,LR} \quad (11.28)$$

$$Q^*_{NC,s} = Q_{NC,s} + Q_{Z,LR} \quad (11.29)$$

dove:

$Q^*_{NH,s}$ è il fabbisogno di energia termica sensibile per il riscaldamento della zona termica considerata, al netto delle perdite recuperate [kWh];

$Q^*_{NC,s}$ è il fabbisogno di energia termica sensibile per il raffrescamento della zona termica considerata, al netto delle perdite recuperate [kWh];



$Q_{Z,LR}$ è la quota parte delle perdite termiche dei sottosistemi recuperata dal sistema involucro della zona termica considerata, [kWh].

Si sottolinea come il termine $Q_{Z,LR}$ sia definito sempre positivo, sia nella stagione di riscaldamento sia nella stagione di raffrescamento, in quanto si tratta sempre di perdite energetiche.

Anche se l'ordine di inserimento dei dati nel software non rispecchia la procedura, il software provvederà per prima cosa al calcolo del fabbisogno di acqua calda sanitaria ed alla definizione delle perdite termiche recuperate.

Le perdite termiche dei differenti servizi e sottosistemi impiantistici si considerano non recuperate, ad eccezione di quelli relativi alla produzione, all'accumulo ed alla distribuzione dell'acqua calda sanitaria, come visibile nello schema riportato in Figura 11.3 Si sottolinea come le perdite termiche siano costituite dalle perdite termiche di processo e dalla quota non recuperata degli assorbimenti elettrici.

La quota recuperata di energia termica dispersa dai vari sottosistemi impiantistici dipende da opportuni fattori di recupero ($f_{R,W,y}$), numeri compresi fra 0 e 1, stabiliti in maniera convenzionale dalla procedura di calcolo. Le perdite termiche del sottosistema di erogazione non si considerano recuperabili.

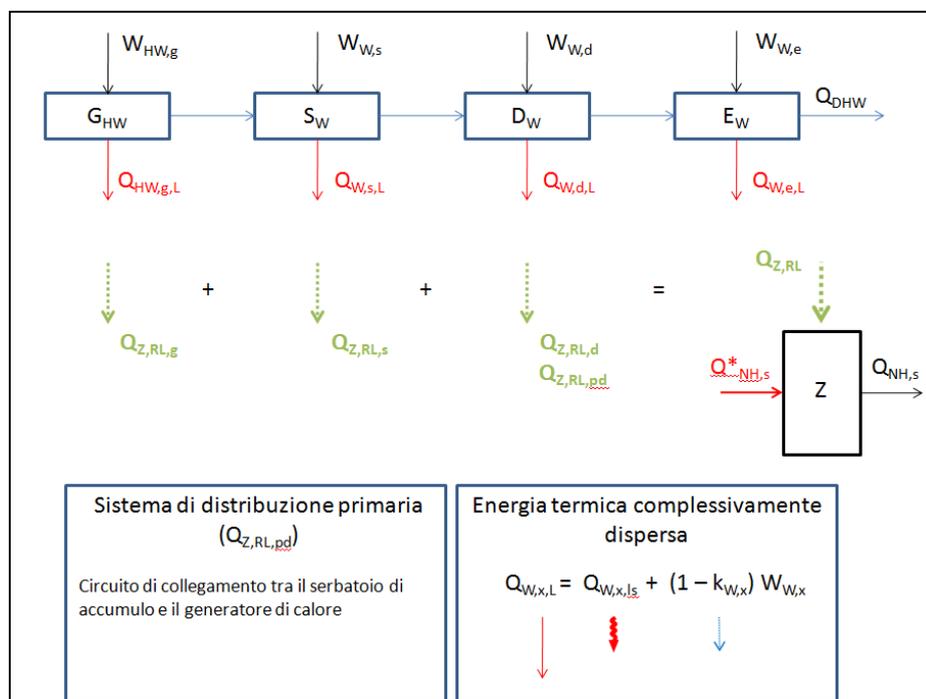


Figura 11.3: Schema per il recupero di energia termica dal servizio impiantistico ACS

Le perdite termiche recuperabili dal sottosistema impiantistico di distribuzione derivano dalla presenza di una differenza di temperatura fra il fluido circolante nella rete e la temperatura



dell'ambiente in cui sono installate le tubazioni, nonché dalle lunghezze e dalle caratteristiche di scambio termico dei tratti del sottosistema di distribuzione.

Riquadro XI: Lunghezze dei tratti della rete di distribuzione

Per gli edifici nuovi il calcolo delle lunghezze dei tratti della rete di distribuzione deve essere effettuato in maniera dettagliata, mentre nel caso di edifici esistenti ed in presenza di una rete di ricircolo vengono attribuiti valori convenzionali alle varie lunghezze in funzione delle dimensioni dell'edificio. È da tenere in opportuna considerazione la necessità di inserire in maniera corretta le lunghezze delle tubazioni nel caso di certificazione energetica di singole zone termiche servite da un impianto centralizzato. Si deve infatti indicare il solo tratto di rete appartenente alla zona in oggetto, in modo da non sovrastimare i recuperi energetici da questo sottosistema impiantistico, che possono, se non correttamente conteggiate, portare in alcuni casi a risultati differenti anche in termini di classe energetica.

Si sottolinea come vi sia la necessità di considerare anche le perdite che interessano il tratto di distribuzione primaria ($Q_{z,L,R,pd}$), ovvero il circuito di collegamento tra il serbatoio di accumulo ed il generatore di calore.

Le perdite recuperate dal sottosistema generatore sono la sola frazione attribuibile al mantello. Esse sono riferite al solo caso in cui la produzione di acqua calda sanitaria avvenga tramite uno o più generatori di calore a tale scopo dedicati (impianto centralizzato ovvero impianto autonomo di produzione per singola unità immobiliare). Sia per il generatore sia per il serbatoio di accumulo, nel caso di installazione all'aperto le perdite recuperabili sono considerate nulle.