

Glossario del bilancio termico dell'edificio

Fabio Dandri

Agenzia per l'Energia del Friuli Venezia Giulia

Per una miglior comprensione dei fascicoli pubblicati in questa collana, abbiamo raccolto in questo documento alcune definizioni riguardanti il comportamento energetico e la fisica tecnica degli edifici.

Affinché il documento possa soddisfare la curiosità di tutti gli interessati, compresi i professionisti del settore, per ogni concetto si è cercato di fornire una spiegazione discorsiva, un cenno alle formule di calcolo che descrivono il fenomeno fisico e, infine, i riferimenti normativi per l'approfondimento.

Tutte le voci riportate servono a descrivere la prestazione termica di un edificio, di un componente o di un insieme di componenti. Con l'aiuto di questi parametri, nella fase di progettazione di una casa passiva, il progettista può comprendere nel dettaglio quali sono i flussi di energia termica che interessano l'edificio e l'efficacia delle soluzioni adottate rispetto agli obiettivi di risparmio energetico e, in particolar modo, agli obiettivi di comfort termico interno.

Per una miglior consultazione, le voci sono riportate in ordine alfabetico.

Le parti in blu nel testo rimandano alle altre voci del glossario.

UNITÀ DI MISURA	PARAMETRO	SIMBOLO	NOTE
J (Joule)	energia termica (calore)	Q	1 kWh corrisponde a 3,6 MJ
kWh (chilowattora)	energia primaria	E_P	
W (Watt)	potenza	P	
	flusso termico scambiato nell'unità di tempo	q	
°C (grado Celsius)	temperatura	T	1°C corrisponde a 1K
K (Kelvin)		θ	

Tab. 1. Simboli e unità di misura correlati alle prestazioni termiche.

Ammettenza termica

L'ammiettenza termica fa parte di quelle grandezze complesse che descrivono l'andamento del flusso di calore che attraversa un elemento costruttivo ed i suoi effetti.

Un elemento edilizio che divide due ambienti con temperature diverse è interessato da un flusso di calore in ingresso dall'ambiente più caldo e da uno in uscita verso l'ambiente più freddo. Quindi, i fattori considerati sono quattro – temperatura più alta, temperatura più bassa, flusso termico sul lato caldo, flusso termico sul lato freddo – e vengono valutati nella loro oscillazione periodica in un determinato arco di tempo, per esempio 24 ore, oscillazione che può essere rappresentata in un grafico con una curva sinusoidale.

La variazione dell'andamento periodico di uno dei fattori induce una variazione nell'andamento degli altri tre. L'entità di questa variazione dipende dalle caratteristiche fisiche dei materiali che compongono l'elemento edilizio.

In fase di progetto è importante verificare queste grandezze complesse, spesso definite *parametri dinamici*, per comprendere come gli elementi edilizi rispondono alle sollecitazioni termiche, in particolare quelle del periodo estivo al fine di contenere la tendenza al surriscaldamento degli ambienti interni nei periodi più caldi. La strategia è quella di posizionare correttamente all'interno delle strutture edilizie uno o più strati ad alta **inerzia termica**, in modo da ridurre al minimo l'effetto delle oscillazioni della temperatura esterna sulle condizioni di **comfort** termico interno. Il calcolo dei parametri dinamici mette in relazione i suddetti fattori, genericamente indicati con θ_m , θ_n , q_m e q_n , o con θ_1 , θ_2 , q_1 e q_2 (dove 1 rappresenta il lato interno e 2 quello esterno), attraverso la cosiddetta matrice di trasferimento termico:

$$\begin{pmatrix} \hat{\theta}_2 \\ \hat{q}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{\theta}_1 \\ \hat{q}_1 \end{pmatrix}$$

L'ammiettenza termica è il parametro dinamico che valuta la variazione del flusso termico scambiato da un'unità di superficie di un elemento edilizio, a seguito di una variazione della temperatura che si verifica sullo stesso lato dell'elemento. Esiste quindi una ammettenza termica interna Y_{11} ed una esterna Y_{22} (che si misurano in W/m^2K).

$$Y_{11} = q_1 / \theta_1$$

Al fine di ottimizzare il comportamento dell'elemento edilizio, il valore che più ci interessa è quello dell'ammiettenza termica interna, che rappresenta la capacità degli strati più interni dell'elemento edilizio di fare da volano termico mitigando i picchi di temperatura. Soprattutto in presenza di soluzioni costruttive di tipo leggero, è indispensabile migliorare il comportamento degli strati interni puntando ad un aumento del valore di ammettenza termica interna (CasaClima per esempio raccomanda un valore di almeno $2 W/m^2K$).

Attenuazione

Vedere: **fattore di decremento**.

Capacità termica

La capacità termica indica la propensione di un materiale, o di un elemento edilizio o di un insieme di elementi edilizi, di accumulare il calore. Si misura in J/K e rappresenta la quantità di energia che deve essere immagazzinata dal materiale per aumentarne la temperatura di un Kelvin.

I materiali, o le combinazioni di materiali, con più alta capacità termica sono in grado, a parità di energia accumulata, di scaldarsi di meno. Una capacità termica alta consente di rallentare il trasferimento di calore tra due ambienti, oppure di disporre di un "serbatoio" maggiore dove accumulare energia.

Aumentando la capacità termica interna si può ottimizzare l'accumulo dell'energia proveniente dagli apporti solari nel periodo invernale e ridurre la tendenza al surriscaldamento delle superfici interne delle pareti e dei soffitti nel periodo estivo.

Per aumentare la capacità termica di un sistema vanno privilegiati materiali pesanti, oppure materiali di origine vegetale come il legno, perché la capacità termica è direttamente proporzionale alla massa ρ e al calore specifico c dei materiali (il calore specifico è la proprietà del materiale che indica quanta energia serve per riscaldare un chilogrammo di materiale di un Kelvin). La tabella 2 riporta le caratteristiche di alcuni materiali per l'edilizia.

Capacità termica areica interna periodica

La capacità termica areica è un indicatore della possibilità di accumulo del calore da parte di un elemento edilizio, espresso in J/m^2K .

Il fenomeno che generalmente ci interessa valutare è quello interno, ovvero la capacità della superficie interna delle strutture di immagazzinare calore per poi rilasciarlo in un secondo momento. La profondità dello strato dell'elemento edilizio interessata dal processo dipende dai materiali, ma generalmente

	ρ kg/m ³	c J/kgK	λ W/mK
intonaco di calce e gesso	1300	900	0,7
intonaco di argilla	1700	930	0,8
cartongesso	900	1050	0,21
calcestruzzo armato	2300	1110	2,3
laterizio	1700	900	0,9
legno	500	2000	0,13
pannelli in fibra di legno	40-160	2000	0,04
pannelli di sughero	120	1670	0,04
pannelli di EPS	20	1450	0,04
pannelli di lana di roccia	40-160	1030	0,04
pannelli in fibra di cellulosa	50	1900	0,04
pannelli di legnocemento	450	1000	0,07

Tab. 2. Caratteristiche di alcuni materiali per l'edilizia (ρ = densità, c = calore specifico, λ = conducibilità termica, vedere trasmittanza termica).

si tratta al massimo di una decina di centimetri e comunque fino allo strato isolante, se posto sul lato interno.

Un adeguato livello di capacità termica areica interna periodica ($C_{p,i}$) consente all'edificio di:

- accumulare nel periodo invernale gli apporti di energia gratuita (apporti solari ed apporti interni, vedere [energia netta](#)) per restituirli all'ambiente nei momenti in cui la fonte energetica non è più disponibile;
- accumulare nel periodo estivo l'energia in eccesso, moderando le oscillazioni delle temperature interne e migliorando la dissipazione del calore che viene spostata nelle ore notturne, quando è possibile sfruttare lo scambio termico con l'aria più fresca.

Carico termico

Il carico termico di un edificio, o di una zona all'interno dell'edificio, indica la potenza termica che deve essere resa disponibile dall'impianto di riscaldamento o raffrescamento per assicurare le temperature interne di comfort prefissate. Il carico termico dipende dalle prestazioni dell'edificio e dalla propensione a disperdere calore d'inverno e ad accumularlo d'estate. La verifica viene generalmente effettuata considerando le condizioni più sfavorevoli che si possono riscontrare nei periodi di climatizzazione invernale ed estiva, in modo che l'impianto sia in grado di coprire anche i momenti più critici.

Uno degli obiettivi di progettazione di una [Passivhaus](#) è quello di raggiungere una prestazione energetica dell'edificio tale da mantenere il carico termico sotto i 10 W/m^2 (se riferito alla superficie utile climatizzata) o sotto i 350 W/persona (se riferito agli occupanti nelle normali condizioni di utilizzo dell'edificio), soglie che consentono di climatizzare gli ambienti veicolando il calore esclusivamente, o quasi esclusivamente, attraverso l'impianto di ventilazione meccanica.

Comfort

Il comfort è uno degli obiettivi principali della progettazione architettonica e impiantistica. Un buon progetto dovrebbe puntare ad edifici in grado di offrire le migliori condizioni di comfort, attraverso una adeguata scelta dei materiali, del livello di isolamento termico, di illuminazione, delle modalità di climatizzazione, ecc.

I criteri che contraddistinguono una [Passivhaus](#) sono stati definiti proprio per rispondere alle esigenze di comfort, in particolare quelle termoigrometriche. Per comprenderle, dobbiamo fare riferimento al bilancio termico del corpo umano che, attraverso il metabolismo, cerca di mantenersi in equilibrio ad una temperatura costante di $36 - 36,5^\circ\text{C}$: l'organismo deve produrre una quantità di energia tale da compensare le perdite, dovute alle attività effettuate dalla persona e agli scambi termici con l'ambiente, che avvengono per irraggiamento, convezione, respirazione, evaporazione e sudorazione.

Una parte delle variabili fa capo a parametri soggettivi legati alla persona (età, abbigliamento, stato di salute, attività praticata,

ecc.), altri invece sono parametri ambientali legati alle modalità di scambio termico del corpo umano: l'irraggiamento dipende dalla temperatura superficiale degli elementi che circondano la persona, la convezione è influenzata dalla temperatura dell'aria e dalla velocità dell'aria in movimento, lo scambio termico attraverso la respirazione e l'evaporazione è più o meno agevolato in funzione della quantità di umidità presente nell'aria. Per questi motivi, il benessere termoigrometrico non dipende solo dalla temperatura dell'aria, ma anche dalla [temperatura media radiante](#) delle superfici circostanti, dal livello di umidità e dalla presenza di eventuali correnti d'aria.

Nella casa passiva la temperatura media radiante è molto omogenea e vicina alla temperatura dell'aria, non vi sono quindi salti termici evidenti e stratificazioni, e la tenuta all'aria dell'edificio evita il formarsi di spifferi negli ambienti. D'inverno, la ventilazione meccanica lavora a velocità molto basse per non creare correnti, comprende un recuperatore di calore ad alta efficienza per non introdurre aria fredda, concorre al controllo dell'umidità; d'estate le modalità di utilizzo cambiano in base alle condizioni climatiche esterne, con velocità dell'aria più elevate quando possibile. La definizione delle classi ottimali di benessere termoigrometrico avviene sperimentalmente seguendo il modello di Fanger, utilizzando il parametro PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) che indica la percentuale di insoddisfatti in presenza di determinate condizioni ambientali. Il PPD si ottiene attraverso il valore del voto medio previsto assegnato a quelle condizioni ambientali, indicato con l'acronimo PMV (Predicted Mean Vote). La classe A di comfort corrisponde ad un PPD $< 6\%$, che si ottiene con una [temperatura operante](#) tra 20 e 24°C ($23-26^\circ\text{C}$ d'estate), una [stratificazione](#) verticale dell'aria contenuta in massimo 3°C , il controllo della asimmetria radiativa data dalle differenti temperature superficiali degli elementi edilizi, un'umidità relativa tra il 30 e il 70% , una velocità dell'aria inferiore a $0,18 \text{ m/s}$ ($0,22$ d'estate).

Questo metodo di valutazione della classe di comfort considera solo le condizioni ambientali interne all'edificio e presuppone la presenza di un impianto che mantenga la temperatura dell'aria interna nei parametri prefissati. In assenza di un impianto, con particolare riferimento al periodo estivo, il livello di comfort può essere definito utilizzando il modello adattivo, che parte dal presupposto che la percezione del comfort da parte delle persone sia influenzata anche dall'andamento delle condizioni climatiche esterne e dalla capacità dell'organismo di adattarsi all'evoluzione stagionale del clima.

Per esempio, l'arrivo graduale delle temperature più elevate ed il protrarsi delle stesse per lunghi periodi ci consente di aumentare la nostra tolleranza rispetto al caldo; il modello adattivo, quindi, non fornisce temperature di comfort prefissate, ma correla il livello di comfort all'andamento delle temperature esterne consentendo maggiore flessibilità negli obiettivi di progettazione, in particolare nell'ottimizzazione delle prestazioni dell'edificio nei periodi di funzionamento senza impianto di condizionamento (il cosiddetto *free cooling*).

Costante di tempo

La costante di tempo di un edificio caratterizza l'inerzia termica interna dell'ambiente riscaldato e ci dà un'indicazione sul tempo di risposta dell'edificio alle sollecitazioni termiche: più alta è la costante di tempo, più lungo sarà il periodo necessario per modificare le condizioni interne, sia per effetto dell'impianto sia per la variazione delle temperature esterne.

Una costante di tempo lunga si addice agli edifici usati in maniera continuativa che, una volta portati a regime, saranno meno sensibili alle sollecitazioni termiche improvvise. Costanti di tempo brevi, invece, possono essere più indicate negli edifici usati in modo saltuario, per renderli più reattivi quando l'esigenza è quella di riscaldarli solo un paio d'ore al giorno o pochi giorni alla settimana.

In una casa passiva, progettare gli elementi edilizi con lo scopo di ottenere una costante di tempo lunga consente di realizzare un edificio con prestazioni termiche e condizioni di comfort interno omogenei nel tempo, anche a fronte di variazioni significative delle condizioni meteorologiche. In particolare, brevi periodi con picchi particolarmente freddi o caldi della temperatura esterna, non saranno percepiti all'interno dell'edificio.

La costante di tempo τ si misura in ore con la seguente formula:

$$\tau = C / H$$

dove C è la capacità termica interna dell'edificio e H il coefficiente di dispersione termica.

Siccome la capacità termica interna C dipende dalla massa e dal calore specifico dei materiali posti sullo strato interno degli elementi edilizi, mentre il coefficiente H dipende per buona parte dalla trasmittanza termica media dell'edificio, la costante di tempo può essere incrementata in presenza di pareti e solai con un'efficace livello di coibentazione termica ed uno strato interno costruito con materiali ad elevata inerzia termica.

Energia netta

Il fabbisogno di energia netta, talvolta indicato come fabbisogno di energia utile o fabbisogno di energia dell'involucro edilizio, rappresenta la quantità di energia che l'impianto deve fornire d'inverno e sottrarre d'estate agli ambienti interni per mantenerli nelle desiderate condizioni di temperatura.

Un edificio, in cui si vuole mantenere una temperatura diversa da quella esterna, è interessato da alcuni flussi di energia termica che in parte riescono a compensarsi e per la parte restante necessitano di un contributo da parte del sistema impiantistico. Questi flussi vanno a comporre un bilancio termico che quantifica l'energia in ingresso e quella in uscita, principalmente in base alle caratteristiche geometriche dell'edificio, a come viene utilizzato, ai materiali che compongono l'involucro edilizio e alle condizioni locali di temperatura e irraggiamento solare. Per mantenere la temperatura costante all'interno dell'edificio nel periodo invernale, la quantità di calore immessa dall'impianto sommata agli apporti di energia solare e agli apporti interni deve corrispondere alla quantità di calore dispersa per trasmissione attraverso i materiali dell'involucro e per ventilazione, quest'ultima dovuta alle esigenze di ricambio d'aria dei locali. Nel periodo

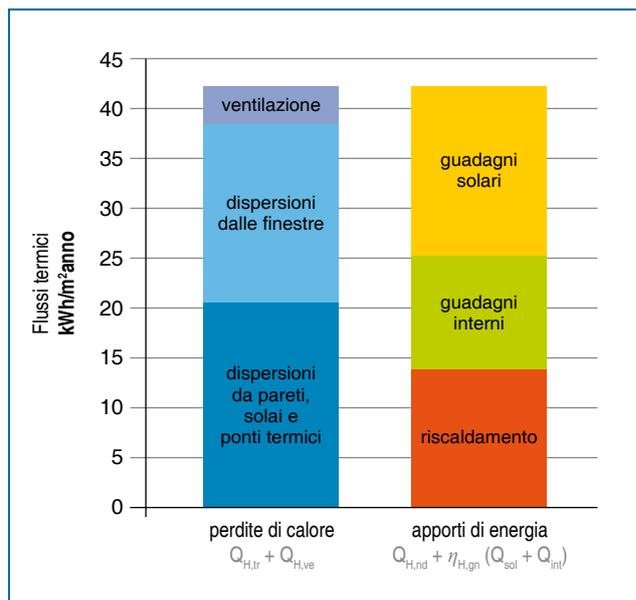


Fig. 1. Esempio di bilancio termico invernale di una Passivhaus.

estivo alcuni flussi termici cambiano verso, ma il principio generale rimane analogo. Il bilancio termico che definisce l'energia netta per riscaldamento e raffreddamento è rappresentato dalle seguenti formule:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,tr} + Q_{H,ve} - \eta_{H,gn} \times (Q_{sol} + Q_{int})$$

$$Q_{C,nd} = Q_{sol} + Q_{int} - \eta_{C,ls} \times (Q_{C,tr} + Q_{C,ve})$$

$Q_{H,nd}$ è il fabbisogno di energia netta che l'impianto deve fornire all'edificio per mantenerlo ad una temperatura prefissata (di norma 20°C) nel periodo di riscaldamento. Tale energia deve compensare l'energia persa attraverso i componenti edilizi per trasmissione $Q_{H,tr}$ e quella persa per ventilazione $Q_{H,ve}$, al netto degli apporti gratuiti di energia: gli apporti solari Q_{sol} (energia termica dovuta alla radiazione solare captata attraverso le superfici vetrate) e gli apporti interni Q_{int} (energia termica prodotta all'interno dei locali dalle apparecchiature domestiche ed elettroniche, dalla cottura dei cibi, dalle persone, ecc.).

$\eta_{H,gn}$ è il fattore di utilizzazione degli apporti. Siccome questi ultimi non contribuiscono in modo continuo al bilancio termico (per esempio gli apporti solari sono presenti solo nelle giornate soleggiate), bisogna tener conto che una parte dell'energia disponibile non viene utilizzata a meno che non venga accumulata dagli elementi edilizi, sul lato interno. Infatti, il fattore $\eta_{H,gn}$ dipende dalla capacità termica interna dell'edificio: migliorare la capacità di accumulo da parte delle strutture significa ottimizzare l'utilizzo degli apporti gratuiti di energia.

$Q_{C,nd}$ è il fabbisogno di energia netta che l'impianto deve sottrarre all'edificio per mantenerlo ad una temperatura prefissata nel periodo di raffreddamento (di norma la temperatura di riferimento è di 26°C). L'energia sottratta va a compensare il calore che si accumula nell'edificio a causa degli apporti solari Q_{sol} e degli apporti interni Q_{int} . Anche d'estate l'edificio è interessato dagli scambi termici con l'esterno per trasmissione $Q_{C,tr}$ e ventilazione $Q_{C,ve}$, che nel calcolo vengono ridotti

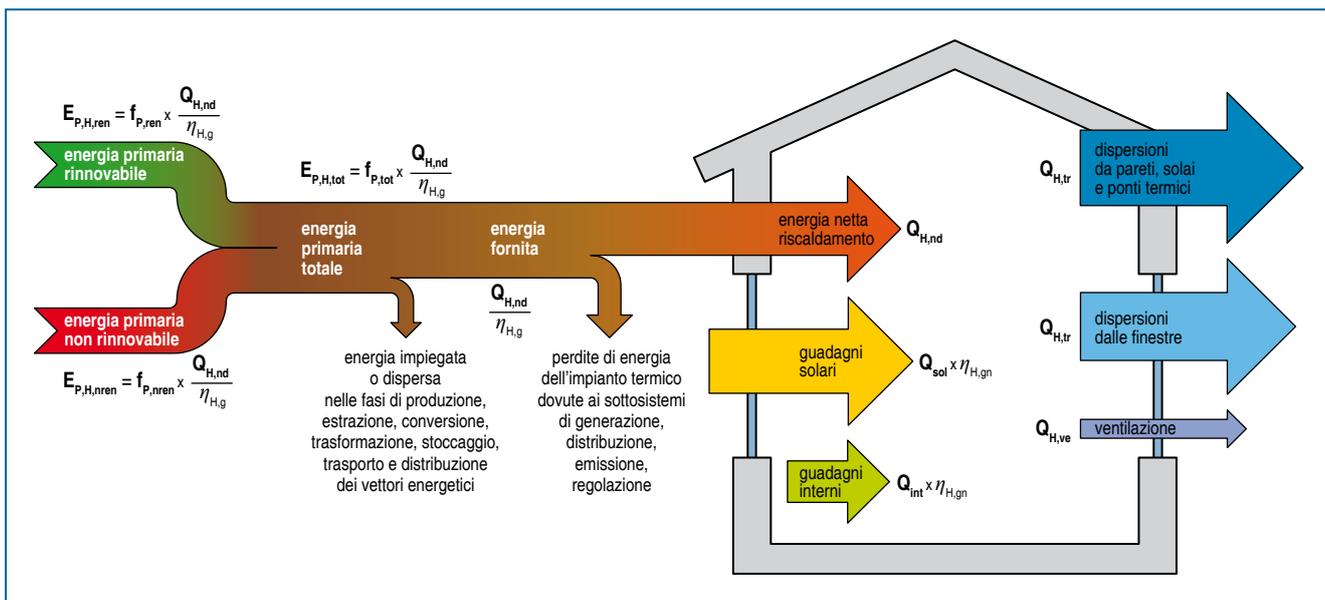


Fig. 2. Schema dei principali flussi energetici che interessano un edificio nel periodo invernale.

di una percentuale che dipende dalla **capacità termica** interna dell'edificio ed è indicata dal fattore di utilizzazione delle dispersioni di energia termica $\eta_{C,Is}$.

Dai fabbisogni di energia netta, espressi in kWh/anno, si ottengono gli indici di prestazione energetica dell'involucro, invernale ed estivo, che in una **Passivhaus** sono normalmente inferiori a 15 kWh/m²anno.

Energia primaria

Per definizione, l'energia primaria è "l'energia, da fonti rinnovabili e non, che non ha subito alcun processo di conversione o trasformazione" (D.Lgs. 192/2005). Rappresenta quindi la quantità di energia misurata alla fonte, non solo quella fornita e conteggiata dal contatore dell'edificio.

Per ogni unità di energia fornita all'edificio e utilizzata dal sistema impiantistico, corrisponde una certa quantità di energia che viene impiegata o dispersa nelle fasi di produzione, estrazione, conversione, trasformazione, stoccaggio, trasporto e distribuzione dei vari vettori energetici. Il fabbisogno di energia primaria di un edificio comprende tutta l'energia, quella fornita e quella impiegata per produrre l'energia fornita, incluse le perdite.

L'energia primaria è un parametro che mette in relazione i consumi dell'edificio con il suo impatto energetico sull'ambiente, dunque si esprime in termini di energia primaria rinnovabile e non rinnovabile, ed energia primaria totale quale somma delle altre due.

Nei bilanci energetici degli edifici, l'energia primaria viene calcolata applicando opportuni fattori di conversione, predeterminati dal legislatore o da altri enti del settore (va evidenziato che i vari protocolli di certificazione energetica non sempre utilizzano i medesimi fattori di conversione in energia primaria). In generale, l'energia primaria non rinnovabile per riscaldamento si calcola con la seguente formula:

$$E_{P,H,nren} = f_{P,nren} \times Q_{H,nd} / \eta_{H,g}$$

$\eta_{H,g}$ è il rendimento dell'impianto termico, che dipende dal livello

di efficienza dei sottosistemi di generazione del calore, accumulo e distribuzione, emissione e regolazione. Il rapporto tra l'**energia netta** per riscaldamento $Q_{H,nd}$ ed il rendimento dell'impianto termico $\eta_{H,g}$ rappresenta l'energia fornita all'edificio dalla quale, moltiplicando per il fattore $f_{P,nren}$, si ottiene il fabbisogno di energia primaria non rinnovabile per riscaldamento.

Analogamente, per la quota rinnovabile:

$$E_{P,H,ren} = f_{P,ren} \times Q_{H,nd} / \eta_{H,g}$$

e per quella totale:

$$E_{P,H,tot} = f_{P,tot} \times Q_{H,nd} / \eta_{H,g} = E_{P,H,nren} + E_{P,H,ren}$$

Fattore di decremento o attenuazione

Il fattore di decremento, o fattore di attenuazione, indica l'attitudine di un elemento edilizio a ridurre gli effetti delle escursioni termiche esterne così come percepiti all'interno degli ambienti. È uno dei parametri che ci aiutano a capire quanto una struttura può contribuire alla protezione dal surriscaldamento estivo, allo scopo di contenere i consumi energetici per raffrescamento e a migliorare il **comfort** termico attraverso l'abbassamento delle **temperature medie radianti** nel periodo estivo.

Con riferimento allo schema pubblicato di seguito (fig. 3), se si rappresentano con delle curve le escursioni termiche che si registrano nell'arco delle 24 ore sulla superficie esterna e interna di un elemento edilizio, il fattore di decremento indica quanto la struttura è in grado di ridurre l'ampiezza della curva interna rispetto a quella esterna.

Dal punto di vista del calcolo, il fattore di decremento è il rapporto tra la **trasmissione termica periodica** Y_{12} e la **trasmissione termica** in condizioni stazionarie U .

$$f_a = Y_{12} / U$$

Spesso, il fattore di decremento è utilizzato in abbinamento al valore di **sfasamento** per definire la qualità di un elemento

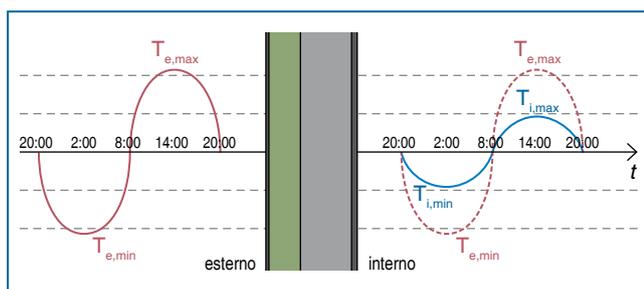


Fig. 3. Rappresentazione schematica degli effetti dell'attenuazione.

edilizio dal punto di vista dell'**inerzia termica**. La tabella 3, tratta dal D.M. 26/06/2009 «Linee guida nazionali per la certificazione energetica» (decreto abrogato a seguito dell'entrata in vigore del nuovo D.M. 26/06/2015), ci consente di mettere facilmente in relazione la qualità edilizia coi valori di attenuazione e sfasamento.

Fattore solare e fattore solare totale

Il fattore solare, o trasmittanza energetica solare, è un parametro caratteristico che indica la quantità di energia termica che può attraversare un elemento vetrato. È calcolato come rapporto tra l'energia che attraversa l'elemento vetrato e l'energia che incide sullo stesso.

È un parametro importante per determinare gli apporti solari che interessano l'edificio e che concorrono alla definizione dei fabbisogni di **energia netta**, tenendo conto che l'energia solare captata dalle finestre è positiva d'inverno, poiché contribuisce a ridurre i consumi per riscaldamento, ma è negativa d'estate, visto che comporta un aumento delle temperature interne e delle esigenze di raffrescamento. Per valutare correttamente la prestazione termica degli elementi vetrati in tutte le occasioni, andranno necessariamente considerati più parametri:

- il fattore solare g o $g_{gl,n}$, cioè il rapporto tra la quantità di energia termica che attraversa l'elemento vetrato e la quantità di energia proveniente dalla radiazione solare con incidenza perpendicolare (questo è il parametro fornito dal produttore della vetrocamera a seguito dei test effettuati ai fini della marcatura CE);
- il fattore solare dell'elemento in opera g_{gl} , che dipende dal suddetto fattore solare e dall'angolo effettivo di incidenza solare: se l'angolo tra il vetro e i raggi solari è più acuto,

QUALITÀ DELLA PRESTAZIONE	FATTORE DI ATTENUAZIONE f_a	SFASAMENTO φ
ottima	$f_a < 0,15$	$\varphi > 12$ h
buona	$0,15 \leq f_a < 0,30$	10 h $< \varphi \leq 12$ h
media	$0,30 \leq f_a < 0,40$	8 h $< \varphi \leq 10$ h
sufficiente	$0,40 \leq f_a < 0,60$	6 h $< \varphi \leq 8$ h
mediocre	$f_a \geq 0,60$	$\varphi \leq 6$ h

Tab. 3. Correlazione tra i valori di attenuazione e sfasamento e le prestazioni attese.

crece la componente di energia che viene riflessa a scapito della parte trasmessa verso l'interno (l'angolo di incidenza dipende dall'orientamento della finestra e dalla sua posizione nell'edificio);

- il fattore solare totale g_{gl+sh} o g_{tot} , che considera l'effetto combinato del vetro e dei sistemi schermanti esterni, fornendo un'indicazione sull'efficacia delle strategie di ombreggiamento estivo;
- il valore di **trasmittanza termica** U , ovvero le proprietà isolanti del vetro.

Nel periodo invernale è sufficiente valutare il fattore solare g_{gl} senza contare l'effetto dei sistemi schermanti mobili, che verosimilmente resteranno aperti per consentire la massima captazione della radiazione solare. D'estate invece dovranno essere valutati con attenzione i benefici delle schermature esterne per evitare il surriscaldamento, tenendo presente che la norma UNI 14501 indica, in base al fattore solare totale g_{tot} , diverse classi di influenza sul **comfort** termico, così come illustrate nella tabella 4.

Fattore di temperatura

Vedere: [ponte termico](#).

Gradi giorno e gradi ora

Il numero di gradi giorno, riferito ad una specifica località, è il parametro che rappresenta le condizioni climatiche locali in relazione alle esigenze di riscaldamento (o raffrescamento). Un numero di gradi giorno più alto indica che la località è più fredda (o calda) e che dovrà essere impiegata una maggiore quantità di energia per la climatizzazione invernale (o estiva). Dati un periodo ed una temperatura interna di riferimento (per esempio 20°C d'inverno e 26°C d'estate), i gradi giorno si ottengono sommando, per ognuno dei giorni del periodo, i valori corrispondenti alle differenze tra la temperatura di riferimento e la temperatura media esterna giornaliera. I gradi giorno possono essere calcolati su scala stagionale o mensile, a seconda del tipo di calcolo energetico da effettuare; esiste inoltre un valore convenzionale di gradi giorno fornito dalla legislazione nazionale e ricavato in base alla durata convenzionale della stagione di riscaldamento (D.P.R. 412/1993).

Quando il periodo viene misurato in ore di riscaldamento

CLASSE	FATTORE SOLARE TOTALE g_{tot}	INFLUENZA SUL BENESSERE ESTIVO
0	$g_{tot} \geq 0,50$	molto poca
1	$0,35 \leq g_{tot} < 0,50$	poca
2	$0,15 \leq g_{tot} < 0,35$	moderata
3	$0,10 \leq g_{tot} < 0,15$	buona
4	$g_{tot} < 0,10$	molto buona

Tab. 4. Correlazione tra il fattore solare totale e la prestazione attesa.

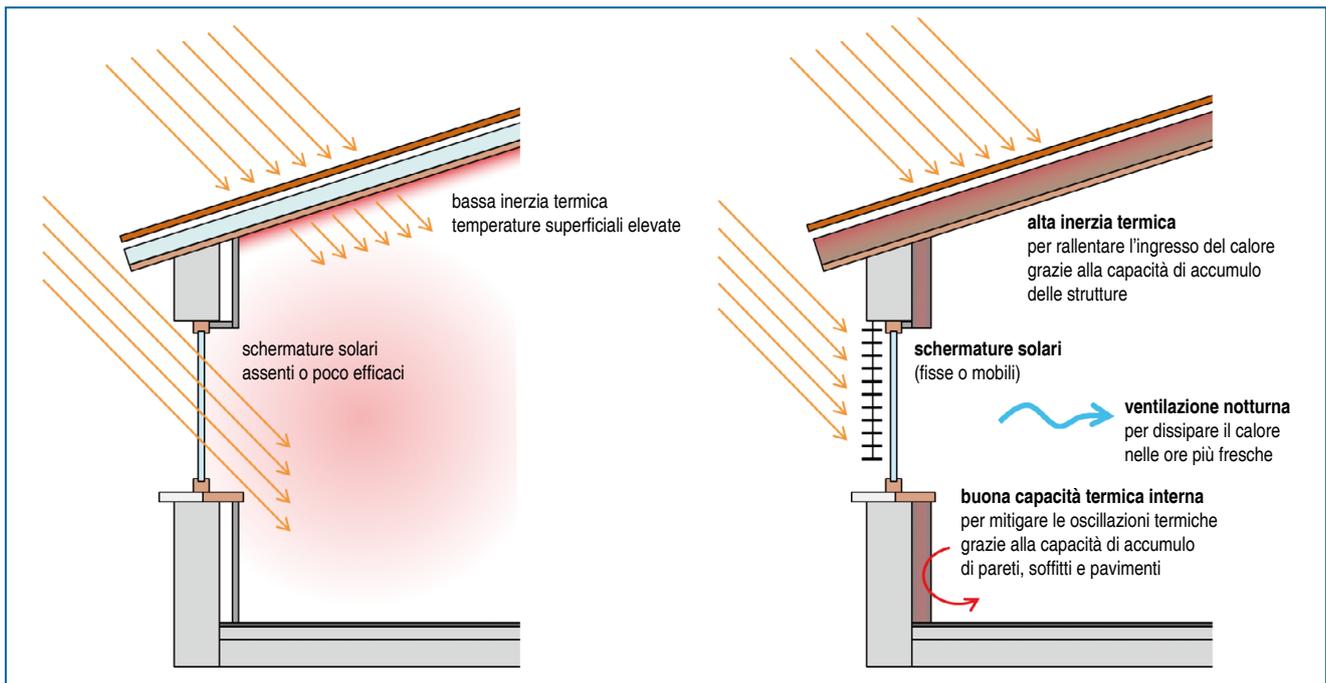


Fig. 4. Carico termico estivo: i problemi più comuni e le possibili strategie per la protezione dal surriscaldamento.

(o raffrescamento) anziché in giorni, il risultato è espresso in gradi ora: in questo caso il calcolo riguarderà tutte le ore del periodo di riferimento e le temperature medie esterne saranno quelle orarie.

Inerzia termica

L'inerzia termica indica la capacità di un materiale, o di una combinazione di materiali, di accumulare e trasferire il calore più o meno lentamente, quindi di opporsi al passaggio del calore o di accumularne una parte, modificando in modo più o meno significativo la propria temperatura. L'inerzia termica di un elemento edilizio può essere vista come l'effetto combinato della **capacità termica** e della **trasmissione termica**.

Soluzioni costruttive con buona inerzia termica possono fare da volano termico, accumulando il calore quando è più disponibile per rilasciarlo in un secondo momento, quando è più utile.

Inoltre, un adeguato livello di inerzia termica consente di mitigare all'interno dell'edificio gli effetti delle fluttuazioni e dei picchi di temperatura, migliorando le condizioni di **comfort**.

A seconda del fenomeno da valutare e dei flussi termici coinvolti, l'inerzia termica può essere descritta utilizzando uno o più parametri dinamici descritti in questo fascicolo: **sfasamento** e **fattore di decremento**, **trasmissione termica periodica**, **ammittenza termica** e **capacità termica areica periodica**.

Passivhaus o Passive House

È un edificio, con qualsiasi destinazione d'uso e realizzato con qualsiasi materiale e tecnica costruttiva, che soddisfa i criteri internazionali Passivhaus sviluppati dal Passivhaus Institut (PHI) di Darmstadt.

Secondo tale protocollo, le esigenze di **comfort** termico di una Passivhaus – descritte utilizzando la norma ISO 7730 – sono

ottenute prevalentemente mediante il post-riscaldamento e post-raffrescamento dell'aria che viene ricambiata per motivi igienici. Normalmente non sono necessari apporti termici da parte di altri impianti, anche se non si esclude a priori la possibilità di prevedere, in funzione del progetto e della località climatica, l'installazione di componenti integrativi per la climatizzazione invernale o estiva.

Il termine "passivo" sottolinea il fatto che l'elevatissima prestazione energetica dell'edificio è determinata dal ruolo prevalente delle soluzioni passive di captazione e conservazione del calore. Un edificio, completato o in corso di costruzione o ristrutturazione, può essere considerato Passivhaus se il rispetto dei suddetti criteri è verificato mediante il Passivhaus Planning Package (PHPP), lo specifico strumento di calcolo del bilancio energetico. La scelta dei componenti, dei prodotti e dei materiali deve essere appropriata affinché la soluzione finale, costruttiva e impiantistica, risponda ai criteri dello standard Passivhaus.

Ponte termico

Analizzando l'andamento dei flussi di energia che determinano gli scambi termici per trasmissione (vedere **energia netta**), possiamo suddividere le varie parti che compongono l'involucro di un edificio in due insiemi: gli elementi omogenei e i ponti termici.

Del primo insieme fanno parte tutti gli elementi edilizi (pareti, solai, ecc.) costruiti con uno o più strati di materiali omogenei, che sono quindi interessati da un flusso termico regolare e perpendicolare alle superfici esterne il quale può essere calcolato semplicemente partendo dalla **trasmissione termica U**. I ponti termici comprendono invece tutte le zone di disomogeneità, gli spigoli e i punti di congiunzione

tra gli elementi omogenei, i cambi di materiale, di spessore o geometria. In queste zone la trasmittanza termica non è più uniforme e viene calcolata in modo più complesso con l'ausilio di specifici software con il cosiddetto metodo agli elementi finiti (FEM).

Lo scambio termico per trasmissione dell'edificio corrisponde quindi alla somma di tutte le perdite di calore attraverso gli elementi edilizi omogenei e degli effetti aggiuntivi dovuti ai ponti termici (che possono essere di tipo lineare o puntuale a seconda del loro sviluppo), secondo la seguente formula:

$$L = \sum_i U_i A_i + \sum_k \Psi_k l_k + \sum_j X_j$$

dove:

- U e A sono, rispettivamente, la trasmittanza e l'area di ogni elemento edilizio;
- Ψ è la **trasmittanza termica lineica** dei ponti termici lineari e l è la lunghezza di applicazione del ponte termico;
- X è la trasmittanza termica puntuale dei ponti termici puntuali.

L'analisi approfondita dei ponti termici è essenziale in un progetto, per tre motivi: il risparmio energetico, la salvaguardia delle strutture (ovvero la verifica che non vi siano condensazioni interstiziali che potrebbero pregiudicare nel tempo la conservazione delle proprietà dei materiali) e il comfort interno. Dal punto di vista dell'efficienza energetica, in prossimità del ponte termico possiamo riscontrare un aumento delle perdite di calore, pertanto dovremo adottare una serie di strategie costruttive atte a contenere le dispersioni, affinché il ponte termico si comporti in modo più simile possibile rispetto agli elementi edilizi che lo circondano. In via semplificata, una Passivhaus si può considerare priva di ponti termici quando le trasmittanze termiche lineiche non superano i 0,01 W/mK (questo non esclude la possibilità di avere trasmittanze termiche lineiche superiori, ma in tal caso il progettista dovrà preoccuparsi di effettuare le necessarie verifiche tecniche sul ponte termico). Dal punto di vista del comfort e della salubrità degli ambienti indoor, invece, il parametro da valutare è quello della temperatura superficiale. Un'area interessata da basse temperature superficiali potrebbe essere soggetta alla formazione di muffa e i ponti termici sono generalmente i punti più esposti a tale rischio. Una trasmittanza termica lineica bassa non è sempre garanzia di un favorevole andamento delle temperature superficiali interne, pertanto sulle temperature dovrà essere effettuata un'analisi specifica.

Siccome la temperatura superficiale interna che si registra sul ponte termico varia in funzione della temperatura interna ed esterna, generalmente per le verifiche del rischio muffa si fa riferimento al fattore di temperatura. Come si vede dalla formula seguente, il fattore di temperatura f_{Rsi} è correlato alle temperature in gioco ma fornisce un valore finale adimensionale svincolato dalle temperature, che semplifica le operazioni di verifica.

$$f_{Rsi} = (\theta_{si} - \theta_e) / (\theta_i - \theta_e)$$

In linea teorica, f_{Rsi} va da 0 a 1, dove 0 significa che la temperatura superficiale interna sul ponte termico θ_{si} è uguale a quella dell'aria

esterna θ_e , mentre se è pari a 1 vuol dire che la temperatura superficiale è uguale alla temperatura dell'aria interna θ_i (e quindi non c'è ponte termico). L'obiettivo progettuale è ridurre l'effetto negativo dei ponti termici ottenendo, grazie all'impiego di materiali isolanti e geometrie favorevoli, fattori di temperatura più alti possibile.

Con riferimento alle condizioni invernali standard, ovvero aria interna con temperatura di 20°C e umidità relativa del 50%, la verifica del rischio muffa è positiva con un fattore di temperatura superiore a 0,7. Le esigenze di **comfort** potrebbero però richiedere valori più elevati, in modo che la **temperatura operante** derivi da condizioni sufficientemente uniformi evitando temperature radianti troppo diverse tra loro.

Sfasamento

Lo sfasamento indica l'attitudine di un elemento edilizio a rallentare il flusso termico, spostando nel tempo gli effetti delle escursioni termiche esterne. È uno dei parametri che ci aiutano a capire quanto una struttura possa contribuire alla protezione dal surriscaldamento estivo, sfruttando i benefici che derivano dal ritardare di alcune ore l'ingresso dei picchi di calore esterni, facendo in modo che si manifestino all'interno dell'edificio nelle ore più fresche quando possono essere smaltiti più facilmente.

Lo sfasamento è quindi il periodo di tempo che intercorre tra l'ampiezza massima della causa (escursione termica esterna) e l'ampiezza massima dell'effetto, come schematizzato nel grafico sottostante (fig. 5).

Spesso, per definire la qualità di un elemento edilizio dal punto di vista dell'**inerzia termica**, il valore dello sfasamento è utilizzato in abbinamento all'attenuazione (vedere la tabella 3).

Stratificazione della temperatura

L'aria contenuta in una stanza non si presenta tutta alla stessa temperatura, per effetto delle fonti di calore presenti e della temperatura superficiale degli elementi edilizi (pareti, soffitto, pavimento e finestre). Più sono accentuate le differenze di temperatura dei vari elementi, più sarà percepibile la stratificazione dell'aria. Per esempio, negli edifici storici la combinazione di radiatori ad alta temperatura e finestre con vetri dalle basse prestazioni, può portare ad una differenza anche di diversi gradi delle temperature dei vari strati d'aria, che sarà nettamente avvertita dagli occupanti come causa di discomfort.

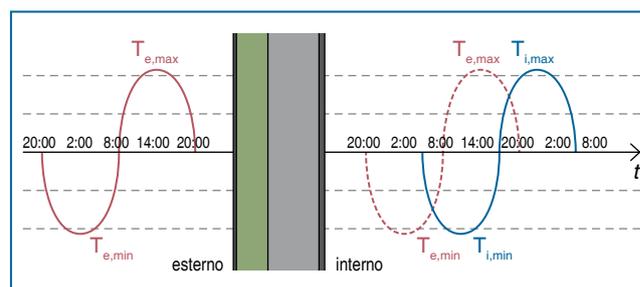


Fig. 5. Rappresentazione schematica degli effetti dello sfasamento.

I principi di **comfort**, invece, richiedono che il gradiente verticale della temperatura dell'aria sia contenuto in meno di 3°C. Questo è possibile negli edifici termicamente isolati, senza **ponti termici**, con serramenti ad alte prestazioni e sistemi di climatizzazione radianti, ove tutte le differenze di temperatura sono molto contenute. In questo senso, le migliori opportunità arrivano proprio dalle case passive, dove le soluzioni costruttive e tecnologiche portano a temperature ancora più uniformi.

Temperatura media radiante e temperatura operante

Spesso la qualità del benessere termico percepito all'interno di una stanza viene correlata esclusivamente alla temperatura dell'aria. In realtà il nostro corpo scambia solo parte del calore con l'aria (per convezione) mentre un'altra parte è scambiata con gli oggetti circostanti per irraggiamento. Per determinare le condizioni di **comfort** termico si usa quindi un parametro, la temperatura operante, che tiene conto sia della temperatura dell'aria sia della temperatura radiante degli elementi edilizi che delimitano la stanza. La temperatura operante corrisponde alla media aritmetica della temperatura dell'aria interna e della temperatura media radiante:

$$T_o = (T_i + T_{mr}) / 2$$

Trasmittanza solare o trasmittanza energetica solare

Vedere: **fattore solare**.

Trasmittanza termica o valore U

La trasmittanza termica U indica l'attitudine di un elemento edilizio a farsi attraversare da un flusso di calore. Indica quindi il livello di isolamento termico: gli elementi edilizi con i valori U più bassi sono quelli più isolanti.

Si misura in W/m²K, ovvero la potenza termica che attraversa un metro quadro dell'elemento edilizio per ogni grado di differenza di temperatura.

La trasmittanza si ottiene come reciproco della resistenza termica totale dell'elemento ($U = 1 / R_{tot}$), la quale si ricava sommando la resistenza termica di tutti i materiali che compongono l'elemento edilizio. La resistenza termica aumenta (quindi la trasmittanza diminuisce) se si aumentano gli spessori dei materiali o se si utilizzano materiali a bassa conducibilità termica. Quest'ultima, indicata con λ , è una proprietà fisica del materiale e indica la propensione dello stesso a scambiare calore, ovvero a isolare. Nel caso delle finestre, la trasmittanza termica U_w è un valore medio ponderato che tiene conto della trasmittanza termica del vetro U_g e di quella del telaio U_f , nonché del **ponte termico** tra i due componenti.

Trasmittanza termica lineica

La trasmittanza termica lineica, indicata generalmente con Ψ , è un coefficiente correttivo che tiene conto delle variazioni localizzate del flusso termico dovute alla presenza di un **ponte termico**.

La trasmittanza termica lineica quantifica la differenza di comportamento tra lo scambio termico reale di un'area dell'involucro edilizio e lo scambio termico ideale della stessa area senza il ponte termico; quest'ultimo può essere facilmente calcolato conoscendo la **trasmittanza termica** degli elementi edilizi interessati.

Per calcolare la trasmittanza termica lineica è necessario partire da una modellazione dell'area interessata dal ponte termico con un software che sia in grado di restituire il coefficiente di accoppiamento termico L^{2D} , che rappresenta il comportamento reale. Se da questo togliamo la quota di scambio termico dovuta agli elementi edilizi (data dalla somma delle trasmittanze termiche U moltiplicate per la larghezza dell'area interessata), otteniamo la trasmittanza termica lineica Ψ , espressa in W/mK:

$$\Psi = L^{2D} - \sum_i U_i l_i$$

Trasmittanza termica periodica o valore U dinamico

La **trasmittanza termica** U descrive la prestazione termica di un elemento edilizio in regime stazionario, quindi con una visione semplificata che considera le temperature e i flussi termici costanti nel tempo. Questo tipo di semplificazione è generalmente accettabile per valutare gli scambi termici invernali di un elemento edilizio, ma è insufficiente per comprenderne il comportamento estivo. Ci si avvale pertanto di parametri dinamici, che mettono in reciproca relazione le variazioni periodiche delle temperature e dei flussi termici (vedere il paragrafo sull'**ammittenza**).

Tra i parametri dinamici, la trasmittanza termica periodica (indicata con Y_{12} o Y_{IE} , talvolta denominata U dinamico) è la grandezza che valuta la variazione del flusso termico scambiato attraverso la superficie interna di un elemento edilizio, a seguito delle variazioni di temperatura che si verificano sul lato esterno. L'unità di misura è W/m²K e la formula di riferimento è la seguente:

$$Y_{12} = q_1 / \theta_2$$

Al pari della combinazione dei parametri di **sfasamento** e **attenuazione** riportati nella tabella 3, la trasmittanza termica periodica è utile per verificare gli effetti dell'**inerzia termica** sul passaggio del calore attraverso le strutture, allo scopo di prevenire il surriscaldamento estivo degli ambienti interni. Un buon valore di trasmittanza termica periodica si attesta sotto lo 0,1 W/m²K.

SITOGRAFIA DI RIFERIMENTO:

www.passiv.de
www.passivehouse-international.org
www.passipedia.org

RIFERIMENTI DI CALCOLO:

D.M. 26/06/2015 «Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici»
UNI EN 410:2011 «Vetro per edilizia - Determinazione delle caratteristiche luminose e solari delle vetrate»

UNI EN 673:2011 «Vetro per edilizia - Determinazione della trasmittanza termica (valore U) - Metodo di calcolo»

UNI EN ISO 6946:2018 «Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodi di calcolo»

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»

UNI EN ISO 10077-1:2018 «Prestazione termica di finestre, porte e chiusure oscuranti - Calcolo della trasmittanza termica - Parte 1: Generalità»

UNI EN ISO 10077-2:2018 «Prestazione termica di finestre, porte e chiusure oscuranti - Calcolo della trasmittanza termica - Parte 2: Metodo numerico per i telai»

UNI EN ISO 10211:2018 «Ponti termici in edilizia - Flussi termici e temperature superficiali - Calcoli dettagliati»

UNI/TS 11300-1:2014 «Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale»

UNI/TS 11300-2:2014 «Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali»

UNI/TS 11300-3:2010 «Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva»

UNI/TS 11300-4:2016 «Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria»

UNI EN 12831:2018 «Prestazione energetica degli edifici - Metodo per il calcolo del carico termico di progetto»

UNI EN ISO 13786:2018 «Prestazione termica dei componenti per edilizia - Caratteristiche termiche dinamiche - Metodi di calcolo»

UNI EN ISO 13789:2018 «Prestazione termica degli edifici - Coefficienti di trasferimento del calore per trasmissione e ventilazione - Metodo di calcolo»

UNI EN ISO 13790:2008 «Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento»

UNI EN 14501:2006 «Tende e chiusure oscuranti - Benessere termico e visivo - Caratteristiche prestazionali e classificazione»

UNI EN ISO 14683:2018 «Ponti termici in edilizia - Coefficiente di trasmissione termica lineica - Metodi semplificati e valori di riferimento»

UNI EN 15251:2008 «Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica»

UNI EN ISO 52016:2018 «Prestazione energetica degli edifici - Fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne e carichi termici sensibili e latenti»

UNI EN ISO 52022-1:2018 «Prestazione energetica degli edifici - Proprietà termiche, solari e luminose di componenti ed elementi edilizi. Parte 1: Metodo di calcolo semplificato delle caratteristiche luminose e solari per dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate»

UNI EN ISO 52022-3:2018 «Prestazione energetica degli edifici - Proprietà termiche, solari e luminose di componenti ed elementi edilizi - Parte 3: Metodo di calcolo dettagliato delle caratteristiche luminose e solari per dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate»

IG PASSIVHAUS Friuli Venezia Giulia

Passivhaus significa competenze progettuali, attenzione ai dettagli, accuratezza nell'esecuzione e garanzia di professionalità da parte di consulenti, progettisti, tecnici, imprese e maestranze. L'associazione IG Passivhaus del Friuli Venezia Giulia (IGP FVG) vuole contribuire a livello territoriale a diffondere questo sapere e a promuovere i necessari criteri di qualità.

Questo fascicolo fa parte di una raccolta di approfondimenti tecnici curata da IGP FVG con il coordinamento di APE FVG, suddivisi nelle seguenti aree tematiche:

1. Principi e comfort
2. Involucro opaco
3. Serramenti
4. Ponti termici
5. Tenuta all'aria
6. Impianti

I contenuti sono di proprietà degli autori, sono sviluppati in autonomia e non necessariamente rispecchiano la posizione del Passivhaus Institut, o di altri enti che rappresentano lo standard Passivhaus.

È vietato l'uso del presente materiale, da parte di chiunque, per scopi di carattere commerciale o per finalità estranee a quelle di IGP FVG e di APE FVG.

Testo e immagini:

Fabio Dandri

Agenzia per l'Energia del Friuli Venezia Giulia

Publicazione:

giugno 2019



APE Agenzia Per l'Energia
del Friuli Venezia Giulia
www.ape.fvg.it

Coordinamento e impaginazione grafica:
Agenzia per l'Energia del Friuli Venezia Giulia
via Santa Lucia, 19
33013 Gemona del Friuli (UD)
tel. + 39 0432 980 322
info@ape.fvg.it