

P. Brunello, L. de Santoli

CARATTERIZZAZIONE ENERGETICA DELL'INVOLUCRO EDILIZIO E GRADI- GIORNO MODIFICATI

Negli ultimi anni, inoltre, è sempre più rilevante, per il bilancio energetico del Paese, il problema della climatizzazione estiva, che si va diffondendo sia con i tradizionali impianti centralizzati (ad aria, ad acqua o misti) sia con i piccoli condizionatori autonomi.

Nel condizionamento estivo la previsione del fabbisogno energetico stagionale diventa ancora più delicata: infatti, oltre ai problemi comuni con il caso del riscaldamento invernale (sostanzialmente quelli connessi con il comportamento dell'edificio), entrano in gioco quasi sempre anche altri aspetti (ad esempio, quelli legati alla presenza contemporanea di raffreddamento con deumidificazione e di post-riscaldamento), per tener conto dei quali difficilmente si può evitare il ricorso a valutazioni orarie a livello di singolo ambiente (in linea, del resto, con quanto si fa per il dimensionamento degli impianti stessi).

INTRODUZIONE

Per la caratterizzazione energetica del patrimonio edilizio la normativa italiana (in particolare, il D.P.R. 412/93) prevede attualmente la determinazione del cosiddetto "Fabbisogno Energetico Normalizzato (FEN)" del sistema edificio-impianto con riferimento al solo periodo invernale: a tal fine, il progettista ha a disposizione ben tre metodi di calcolo che tuttavia hanno sollevato non poche perplessità, tanto è vero che lo stesso Comitato Termotecnico Italiano ha recentemente iniziato la revisione della normativa tecnica a ciò preposta.

RIASSUNTO - ABSTRACT

Caratterizzazione energetica dell'involucro edilizio e gradi-giorno modificati

Come è noto, il comportamento energetico di un edificio è strettamente legato alle sue caratteristiche costruttive e di orientamento, oltre che a quelle climatiche relative alla località in cui esso è ubicato. Al fine di ottenere una caratterizzazione energetica dell'involucro edilizio di semplice applicazione, in questo lavoro viene discussa una espressione semplificata per il calcolo del fabbisogno energetico stagionale dell'edificio, in condizioni sia estive che invernali, che consente anche interessanti considerazioni sul concetto di "gradi-giorno" esteso su base annuale.

Parole chiave - Gradi-giorno - Consumo di energia - Certificazione edilizia - Fisica dell'edificio.

Energy parameters of the building envelope and degree - days concept

As a further development of the degree-days concept, a simple parameter which takes into account site's meteorological conditions as well as building envelope performance is proposed in this paper.

Such a parameter shows good correlation with building energy requirements, both in winter and in summer conditions.

Key words: Degree-days - Energy consumption - Building certification - Building physics



Alla luce di ciò, c'è da chiedersi se, per una efficace pianificazione energetica del settore edilizio, sia effettivamente necessario stimare il fabbisogno energetico del sistema edificio-impianto (con gli oneri di calcolo che ne conseguono) o non sia invece preferibile agire a monte, controllando cioè (in maniera semplice, ma sufficientemente precisa) il grado di "vulnerabilità energetica" dell'involucro edilizio nei confronti del clima esterno.

In questo caso, infatti, è giustificato non solo prescindere dall'eventuale intermittenza di funzionamento (come del resto previsto anche dal DPR 412/93), ma anche semplificare ulteriormente il calcolo degli scambi termici attraverso l'involucro: si può così pervenire, come indicato nel seguito, ad una espressione del fabbisogno energetico stagionale dell'edificio applicabile in regime sia estivo che invernale, la quale si rivela sufficientemente affidabile per gli scopi sopra esposti e si presta anche ad interessanti considerazioni sulle possibilità e sui limiti del concetto di *gradi-giorno* esteso su base annuale.

2 CARATTERIZZAZIONE ENERGETICA DELL'INVOLUCRO EDILIZIO

Si consideri una generica parete perimetrale di un edificio, di definite caratteristiche termofisiche e geometriche, con una parte finestrata di area S_f ed una parte opaca di area S_o .

Se all'interno dell'edificio è mantenuta una temperatura costante θ_i , in virtù del teorema della media, l'energia E_o che attraversa la parte opaca della parete

in un certo intervallo di tempo T , supponendo che la variazione della sua energia interna risulti complessivamente trascurabile, può essere espressa come:

$$E_o = f_c U_o S_o (\theta_i - \theta_o) T \quad (1)$$

dove U_o è la trasmittanza della parete e θ_o rappresenta la temperatura fittizia sole-aria definita da:

$$\theta_o = \theta_e + \frac{a \cdot I}{\alpha_e} \quad (2)$$

in cui θ_e è la temperatura media dell'aria esterna, a il coefficiente di assorbimento emisferico globale, I l'irradianza solare media sulla parete e α_e il coefficiente limite esterno, mentre il fattore f_c , che tiene conto della variabilità del coefficiente limite interno, può essere ottenuto come [1]:

$$f_c = 1 - 0,194 U_m + 0,021 U_m^2 \quad (\text{stagione estiva}) \quad (3)$$

$$f_c = 1 - 0,397 U_m + 0,087 U_m^2 \quad (\text{stagione invernale})$$

dove U_m rappresenta la trasmittanza media dell'ambiente a cui la parete appartiene:

$$U_m = \frac{\sum_{i=1}^k U_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (4)$$

con la sommatoria al numeratore estesa alle sole superfici disperdenti (opache e trasparenti) e con quella al denominatore estesa a tutte le superfici dell'ambiente considerato.

Si osservi che, dovendo trattare un intero edificio, non sempre è necessario calcolare la trasmittanza media di ogni ambiente: per gli edifici residenziali, infatti, detto V il loro volume ed S la loro superficie disperdente, è possibile individuare un unico valore medio di U_m , valido per tutti gli ambienti, utilizzando la seguente espressione semplificata [2], dove C_d rappresenta il coefficiente volumico di dispersione dell'intero edificio:

$$U_m = 0,22 \frac{C_d}{S/V} \quad (5)$$

Per quanto riguarda la parte vetrata, l'energia E_v scambiata attraverso di essa comprende anche la componente solare, per cui si avrà:

$$E_v = [f_c U_v S_v (\theta_i - \theta_e) - f_r \tau S_v I] T \quad (6)$$

avendo indicato con U_v la trasmittanza della parete vetrata, con τ il suo fattore medio di trasmissione solare (comprensivo degli eventuali effetti di ombreggiamento) e con f_r , infine, un coefficiente correttivo che tiene conto del fatto che la radiazione incide sulle pareti interne innalzandone la temperatura, e viene quindi in parte dispersa verso l'esterno; f_r può essere calcolato in funzione della trasmittanza media U_m come [3]:

$$f_r = 1 - 0,32 U_m + 0,003 U_m^2 \quad (\text{stagione estiva}) \quad (7)$$

$$f_r = 1 - 0,65 U_m + 0,005 U_m^2 \quad (\text{stagione invernale})$$

In definitiva, sommando la (1) e la (6), l'energia totale E_w cambiata attraverso l'intera parete considerata può essere scritta come:

$$E_w = [f_c (U_o S_o + U_v S_v) \cdot (\theta_i - \theta_e) - S_s I] T \quad (8)$$

dove con S_s si indica la seguente superficie equivalente della parete ai fini della captazione della radiazione solare:

$$S_s = f_c U_o S_o \frac{a}{\alpha_e} + f_r S_v \tau \quad (9)$$

Per l'intero edificio, l'energia globale scambiata E_E si otterrà quindi applicando la (9) a tutte le k pareti esterne e aggiungendoci il flusso entalpico legato alla portata media di aria esterna G di infiltrazione e ventilazione:

$$E_E = [B(\theta_i - \theta_e) - \sum_{j=1}^k S_{s,j} I_j] T \quad (10)$$

dove con B si indica il seguente coefficiente unitario di scambio termico globale dell'edificio (detto c_p il calore specifico dell'aria a pressione costante):

$$B = f_c \sum_{j=1}^k (U_o S_o + U_v S_v)_j + c_p G \quad (11)$$

Dovendo effettuare considerazioni su base annuale, è conveniente applicare l'eq. (10) facendo riferimento a periodi T di un mese, sia perché i relativi dati meteorologici medi sono oggi disponibili per un gran numero di località [4], sia perché in questo modo è possibile individuare con sufficiente precisione i periodi in cui, sempre nell'ipotesi di temperatura interna θ_i costante (ma eventualmente differenziata nei vari mesi), l'edificio richiede apporti o sottrazioni di energia (il che avviene, rispettivamente, quando risulta $E_E > 0$ o $E_E < 0$).

A rigore, l'energia calcolata applicando l'eq. (10) non rappresenta certamente il reale fabbisogno energetico dell'edificio nel periodo considerato: infatti, la temperatura interna dell'edificio può discostarsi dal valore θ_i a causa di transitori termici legati all'intermittenza della climatizzazione o ad altri fenomeni come il surriscaldamento che può manifestarsi in certi momenti della stagione invernale e per tener conto di ciò, la normativa attualmente vigente (in particolare, la norma UNI 10344) introduce opportuni coefficienti che purtroppo comportano però non trascurabili oneri di calcolo. D'altra parte, l'eq. (10) gode indubbiamente di una notevole immediatezza concettuale e di una semplicità applicativa che la renderebbe molto adatta per scopi di prescrizione e controllo energetico.

Per valutare quindi l'errore che si commette approssimando l'effettivo fabbisogno energetico di un edificio con l'energia E_E calcolata tramite l'eq. (10) sono stati effettuati confronti su un numero molto rilevante (1080) di edifici, assumendo come riferimento le simulazioni effettuate (ora per ora ed ambiente per ambiente) con un modello numerico di grande affidabilità [5].

Tali edifici sono stati assoggettati a diverse condizioni climatiche (utilizzando i "Test Reference Years (TRY)" [6] di Bolzano, Milano, Venezia, Roma e Trapani) e si differenziano per l'esposizione principale (edifici a pianta quadrata, edifici in linea con orientamento N-S ed E-W, edifici a stella), per il numero di piani (da 1 a 5), per la trasmittanza dei componenti di involucro (da $0,36 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ a $1,29 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ per le parti opache, da $2,7 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ a $5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ per le parti vetrate), per l'ampiezza delle finestre (0%, 30%, 70%, 100% della rispettiva parete) e per il loro fattore di trasmissione solare (da 0,48

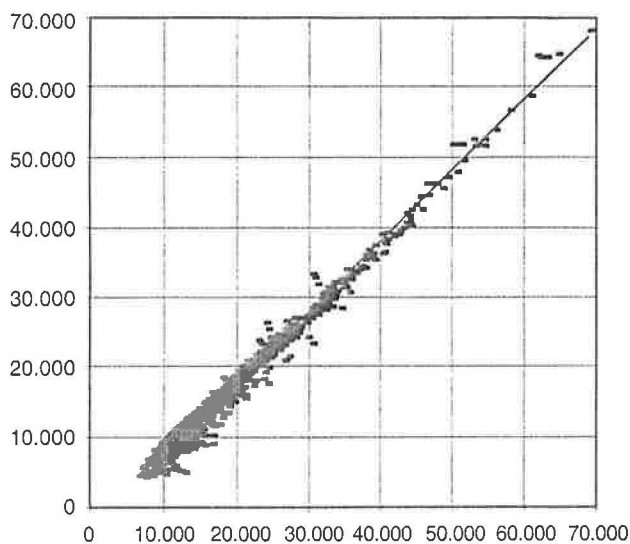


Figura 1 - Fabbisogni energetici di 1080 edifici nella stagione invernale (espressi in Wh/m²/anno): confronto tra l'eq. (10) in ascissa e le simulazioni [5] in ordinata

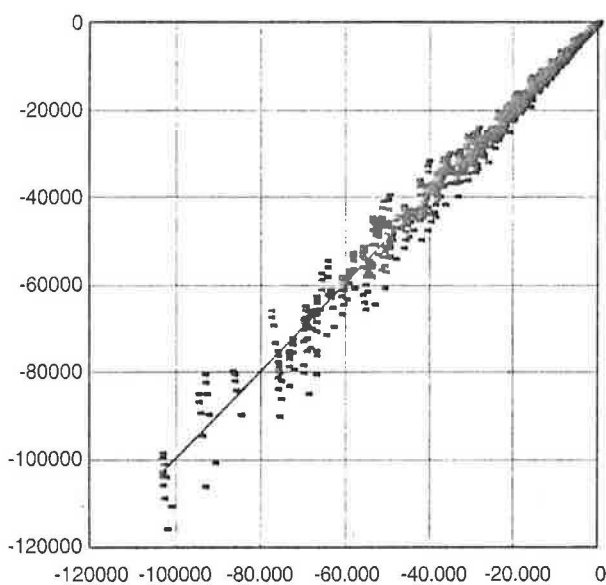


Figura 2 - Fabbisogni energetici di 1080 edifici nella stagione estiva (espressi in Wh/m²/anno): confronto tra l'eq. (10) in ascissa e le simulazioni [5] in ordinata

a 0,85). I risultati dei confronti sono riassunti nelle figg. 1 e 2 [7], dove sono riportati i fabbisogni energetici rispettivamente per il periodo di riscaldamento e per quello di raffrescamento; come si vede, in entrambe le figure l'accordo tra l'energia E_E calcolabile con l'eq. (10) ed i risultati delle simulazioni orarie è complessivamente soddisfacente (gli scarti sono quasi sempre inferiori al 15%), cosicché non sembra ingiustificato proporre questa grandezza come un efficace indicatore della "vulnerabilità energetica" dell'involucro edilizio nei confronti del clima esterno.

3 CONSIDERAZIONI SUI "GRADI GIORNO" MODIFICATI

In base agli standard internazionali [8], viene oggi definito numero di gradi-giorno di una certa località il seguente parametro:

$$D_d = \sum_{j=1}^{365} \frac{(\theta_i - \theta_g) + |\theta_i - \theta_g|}{2} \quad (12)$$

dove θ_i rappresenta ancora la temperatura interna di set-point mentre θ_g è la temperatura dell'aria esterna media giornaliera. In questo modo vengono cumulate tutte le differenze di temperatura che danno luogo a dispersioni attraverso l'involucro di un edificio, ed il valore dei gradi-giorno dà quindi una misura della severità della temperatura dell'aria esterna in una certa località, mentre non fornisce alcuna informazione sull'influenza della radiazione solare. Pertanto, anche se modificata opportunamente per computare le differenze di temperatura che danno luogo ad apporti energetici attraverso l'involucro, difficilmente l'eq. (12) potrà risultare di qualche utilità nel caso estivo.

Per definire un parametro concettualmente legato ai gradi-giorno, ma in grado di tener conto anche della radiazione solare, si può tuttavia osservare che, detta P la durata del giorno ed N il numero di giorni compresi nel periodo T (cosicché $T = P \cdot N$), l'energia globale data dall'eq. (10) può anche essere espressa come:

$$E_E = B \cdot \Delta\theta^* \cdot N \cdot P \quad (13)$$

dove $\Delta\theta^*$ rappresenta la seguente differenza di temperatura efficace, media nel periodo considerato:

$$\Delta\theta^* = (\theta_i - \theta_e) - \frac{\sum_{j=1}^k (S_j \cdot I_j)}{B} \quad (14)$$

la quale risulta legata non solo alla temperatura dell'aria esterna, ma anche all'influenza della radiazione solare nei confronti dell'edificio considerato. Cumulando quindi questa differenza di temperatura efficace anziché la mera differenza di temperatura ($\theta_i - \theta_e$), si può ottenere un nuovo parametro D^* che è naturale chiamare *gradi-giorno modificati* e che, per il periodo di tempo T considerato, sarà esprimibile come:

$$D^* = \Delta\theta^* \cdot N \quad (15)$$

oppure, in base all'eq. (14):

$$D^* = (\theta_i - \theta_e) N - \frac{\sum_{j=1}^k (S_s I)_j}{B} N \quad (16)$$

In definitiva, l'eq. (16) rappresenta un'evoluzione del tradizionale concetto di *gradi-giorno* che rende questo parametro significativo non solo in condizioni di riscaldamento, ma anche di raffrescamento e può quindi essere applicata mese per mese per calcolare valori annui distinti per le due condizioni.

La stessa equazione evidenzia però chiaramente anche alcune cautele che un parametro di questo tipo richiede: infatti, contrariamente ai *gradi-giorno* tradizionali, che rappresentano una grandezza puramente climatica e quindi adatta a confrontare tra loro località diverse, i *gradi-giorno modificati* si prestano a questo scopo solo con riferimento ad un determinato edificio, poiché, come si è visto, sono legati non solo al clima, ma anche alle caratteristiche dell'involucro. D'altra parte, per una certa località il valore dei *gradi-giorno modificati* non consente da solo di confrontare tra loro edifici diversi in termini di vulnerabilità energetica, a meno che essi non abbiano lo stesso coefficiente unitario di scambio B.

4 CONCLUSIONI

Da più parti è sentita l'esigenza di affrontare il problema della caratterizzazione energetica su base annuale dell'involucro edilizio in modo semplice e completo, considerando il problema in tutti i suoi aspetti più significativi, compreso quello della captazione solare, ma senza per questo utilizzare procedure eccessivamente complesse.

Tenendo conto di ciò, l'algoritmo esposto nel presente lavoro consente di prevedere, in maniera semplice ma sufficientemente precisa, gli effettivi fabbisogni energetici di un edificio nella stagione invernale ed in quella estiva e permette anche di ottenere una interessante evoluzione su base annuale del concetto di *gradi-giorno*, tradizionalmente limitato al solo periodo invernale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] P. Brunello, A. Rieppi, "Effetti degli scambi termici per radiazione e convezione all'interno degli ambienti sul calcolo delle dispersioni degli edifici", *Condizionamento dell'aria, riscaldamento, refrigerazione*, Anno XXXI, n. 11, PEG Editrice, Milano, 1987.
- [2] P. Brunello, "Energy Requirements Calculation for Multifamily Buildings with Individual Heating Systems", *Atti del Convegno "Energy Conservation in the Built Environment"*, CIB Publication 152, IRB-Verlag, Stoccarda, 1993.



- [3] P. Brunello, S. Del Giudice, "Analisi del comportamento termico degli edifici in regime estivo: metodo di calcolo del carico termico", *Condizionamento dell'aria, riscaldamento, refrigerazione*, Anno XXVIII, n. 12, PEG Editrice, Milano, 1984.
- [4] UNI-CTI, "Riscaldamento e raffrescamento degli edifici: dati climatici", Norma 10349, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 1994.
- [5] T. Kusuda, "NBSLD, the Computer Program for Heating and Cooling Loads in Buildings", NBS, Building Science Series, n. 69, Washington D.C., 1976.
- [6] CEE, "Test Reference Years (TRY)", Commission of the European Communities, Directorate General XII, Bruxelles, 1985.
- [7] N. Tornieri, "Analisi di procedure per la stima del fabbisogno energetico degli edifici", *Tesi di Laurea, Istituto Universitario di Architettura, Venezia*, 1996.
- [8] ISO, "Climatic data for Building Design", ISO/DIS 6397, International Organization for Standardization, Ginevra, 1995.

Prof. ing. Pierfrancesco Brunello, Istituto Universitario di Architettura, Venezia

Prof. ing. Livio de Santoli, Dipartimento di Fisica Tecnica, Università "La Sapienza", Roma

Articolo 05-05
Manoscritto ricevuto il 26-07-96
accettato per la pubblicazione il 29-10-96