

Codice di simulazione EDILEGO

analisi e previsioni del comportamento termico dei sistemi di riscaldamento e raffrescamento negli edifici civili

F. Groppi

Le numerose esperienze condotte dal Centro Ricerca Ambiente e Materiali dell'ENEL nel campo degli interventi volti a ridurre il consumo energetico e a migliorare i livelli di comfort interno negli edifici civili, hanno stimolato sempre più l'introduzione di soluzioni innovative.

Queste soluzioni riguardano sia il campo del contenimento delle dispersioni (aumento delle prestazioni e migliore utilizzo per i materiali isolanti, soluzioni architettoniche volte allo sfruttamento della radiazione solare nei mesi freddi) sia il campo impiantistico (utilizzo di pompe di calore, pannelli solari a bassa temperatura, accumulo del calore e/o del freddo, sistemi di Building Automation).

In effetti, svariate considerazioni sia di tipo economico, legate al costo dei combustibili tradizionali, sia di tipo ambientale, legate al contenimento delle emissioni dei prodotti della combustione nelle centrali termiche (problema avvertito in particolar modo nelle grandi città) giustificano sempre più i numerosi studi e le sperimentazioni che vengono condotte da numerosi enti, ditte e istituti di ricerca, sia in ambito nazionale che internazionale, finalizzate al contenimento dei consumi e ad un più razionale sfruttamento degli impianti e delle risorse energetiche.

Tale orientamento è anche espresso dalla recente legge 10/91 e successivo decreto di attuazione del 26/8/93 in cui, oltretutto, viene fatto obbligo, per gli edifici di proprietà pubblica o adibiti ad uso pubblico, di soddisfare il fabbisogno energeti-

Viene qui pubblicato il primo di 3 articoli che trattano altrettanti modelli di simulazione finalizzati alla progettazione e allo studio di interventi di risparmio energetico negli edifici. Il primo e il secondo di tali articoli riportano due modelli di simulazione termica (EDILEGO ed ESP) che principalmente differiscono tra loro per il differente livello di dettaglio con cui vengono descritti l'edificio e l'impianto HVAC. Il terzo articolo si propone invece di descrivere un programma di simulazione illuminotecnica (KANDAELA) di tipo innovativo.

co favorendo il ricorso a fonti di energia rinnovabili e assimilate. D'altro canto, le costruzioni civili che tendono a sfruttare razionalmente gli apporti dovuti all'energia solare, tenendo conto magari dell'inerzia termica delle strutture, oppure quelle che fanno uso di sistemi di accumulo del caldo o del freddo al fine di vantaggi-

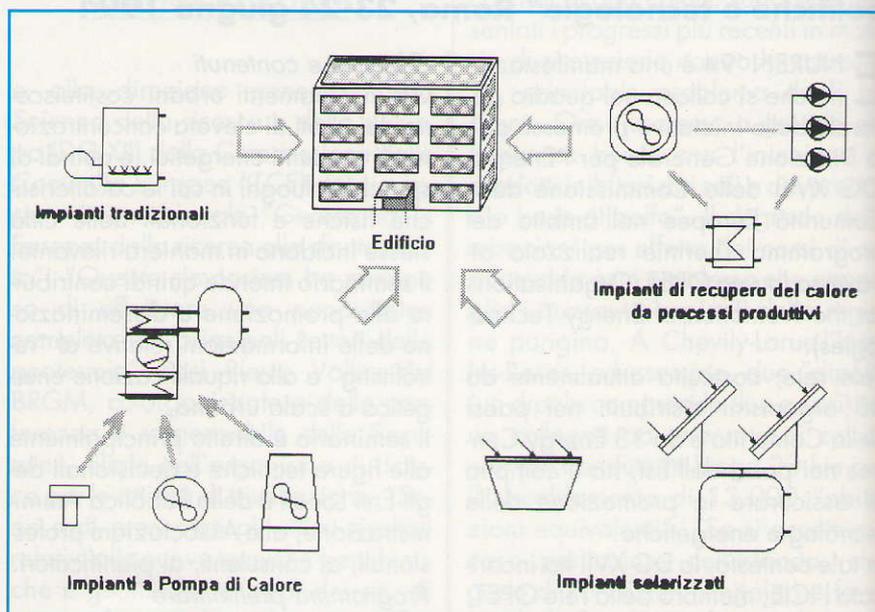


figura 1 - Panorama delle potenzialità offerte da Edilego

giarsi della differenziazione di prezzo delle tariffe elettriche nelle fasce orarie, o, ancora, quelle che fanno uso di fonti di calore per loro natura di tipo discontinuo come ad esempio i reflui termici industriali o i vari sistemi di captazione solare oggi in commercio, rischiano di vedere vanificate o comunque ridotte le possibilità operative di tali impianti se non dispongono di dispositivi di controllo affidabili, in grado di adattare le loro prestazioni alle reali esigenze e di eseguire interventi sufficientemente rapidi, così da utilizzare l'energia solo quando, dove e nella giusta misura in cui serve.

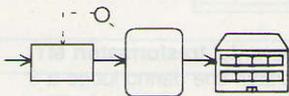
Il programma EDILEGO ha il vantaggio, se confrontato con altri programmi analoghi di facile utilizzo e operanti su piattaforme a basso costo quali i PC, di analizzare con un notevole livello di dettaglio il comportamento dinamico dell'edificio, anche e soprattutto nel caso che quest'ultimo faccia uso di sistemi impiantistici non convenzionali come quelli precedentemente citati.

Configurazioni di impianto

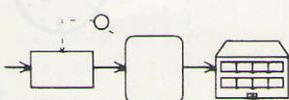
In figura 1 sono indicati i vari componenti che è possibile collegare tra loro per simulare le varie configurazioni impiantistiche per la generazione e lo sfruttamento del caldo e del freddo. Il programma è comunque in grado di simulare situazioni in cui differenti tipi di impianto sono accoppiati tra loro al fine di sfruttarne al meglio le reali possibilità oppure di valutare possibili configurazioni di backup a fronte di particolari condizioni meteo-climatiche. È possibile inoltre collegare i vari componenti fra loro in modo da simulare situazioni in cui il fabbisogno energetico dell'edificio viene soddisfatto in differenti modi a seconda della disponibilità delle varie fonti energetiche (un sistema solarizzato può, ad esempio, utilizzare un impianto a pompe di calore quale sorgente integrativa o di soccorso nel periodo invernale). In pratica, fino ad ora sono state sviluppate le seguenti applicazioni:



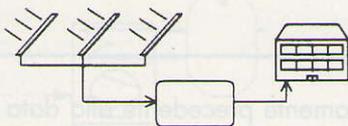
Edificio senza impianto: Per valutare il comportamento termico dell'edificio in condizioni di lunga indisponibilità dell'impianto o di situazioni di quasi-abbandono.



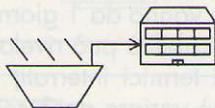
Edificio con pompa di calore a funzionamento diurno: Questo tipo di configurazione prevede che l'edificio, nel corso della giornata, prelevi dal serbatoio collegato con le pompe di calore l'energia termica o frigorifera necessaria alla propria climatizzazione.



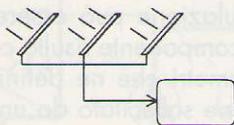
Edificio con pompa di calore a funzionamento notturno: Questo impianto ha lo scopo di sfruttare le più convenienti tariffe elettriche per i consumi effettuati nelle ore notturne. L'impianto a pompa di calore viene fatto funzionare di notte, mentre l'edificio viene riscaldato o raffrescato durante il giorno. Il serbatoio deve essere sufficiente ad accumulare l'energia necessaria per una giornata di riscaldamento o raffrescamento.



Edificio con pannelli solari e accumulo stagionale: In questo impianto, il serbatoio interposto tra pannelli solari e edificio permette di risolvere il problema dello sfasamento tra l'energia solare captata dai pannelli e il fabbisogno termico invernale dell'edificio.



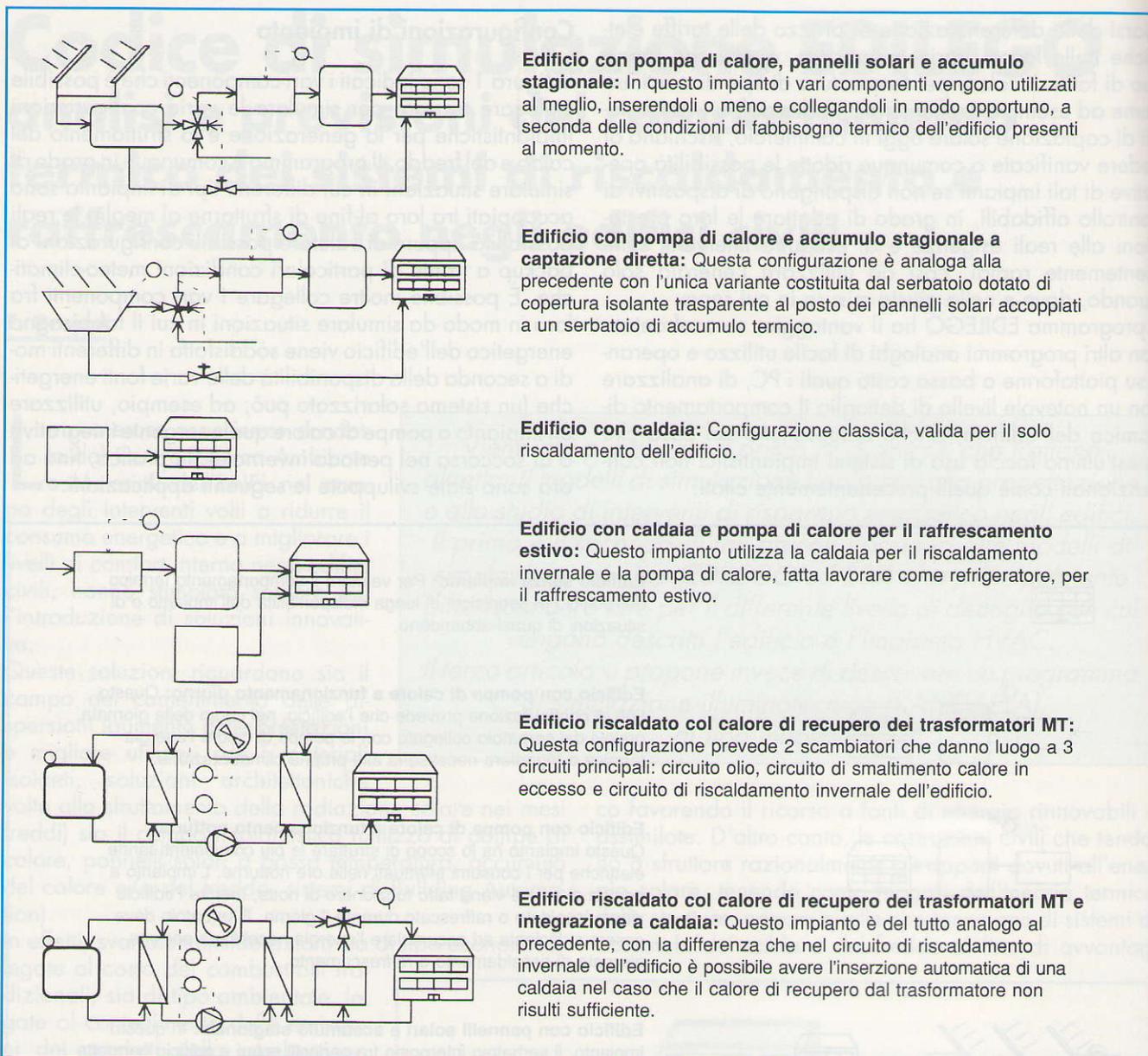
Edificio con accumulo stagionale a captazione diretta: Il fabbisogno termico invernale dell'edificio è assicurato da un serbatoio di accumulo termico che, disponendo di una copertura trasparente, viene riscaldato direttamente dal sole.



Solo pannelli solari e accumulo stagionale: In questo caso vengono valutate le performances di un sistema a captazione solare e accumulo prefissando un particolare prelievo termico variabile nel tempo.



Solo accumulo stagionale a captazione diretta: Questa configurazione serve a valutare le performances di un serbatoio a copertura trasparente prefissando un particolare prelievo termico variabile nel tempo.



L'inserzione o disinserzione dei vari dispositivi avviene secondo logiche di comando e regolazione il cui schema va a sovrapporsi alla particolare configurazione di impianto prescelta.

Nelle figure 2, 3, 4 e 5 sono riportate le principali logiche utilizzate dal programma.

Funzionamento del programma

Una volta definito il tipo di impianto di cui si intende simulare il funzionamento, si può passare alla scelta del periodo dell'anno che si intende studiare. Al programma occorre quindi fornire la data di inizio di tale periodo (giorno e mese) e la sua durata (in giorni), inoltre, poiché è sempre preferibile eliminare le poco realistiche evoluzioni delle variabili dovute a fenomeni di transitorio iniziale, è possibile definire un periodo di asse-

stamento, immediatamente precedente alla data di inizio, di cui non si terrà conto nei risultati.

È possibile simulare periodi che vanno da 1 giorno fino ad alcuni anni (quest'ultima possibilità può rivelarsi utile nel caso di grossi accumuli termici interrati) e con passi temporali il cui valore può variare da 1 secondo ad alcune ore.

L'impianto oggetto della simulazione può essere visto come un sistema, in cui ogni componente risulta caratterizzato da una serie di parametri che ne definiscono struttura e geometria, che viene sollecitato da un insieme di input variabili nel tempo:

- Dati meteorologici (temperatura e umidità dell'aria esterna, velocità del vento, radiazione solare diretta e diffusa).
- Attivazione centrale termica per la produzione del caldo e del freddo.

figura 2
Regolazione a termostato di tipo On-Off della temperatura dei locali

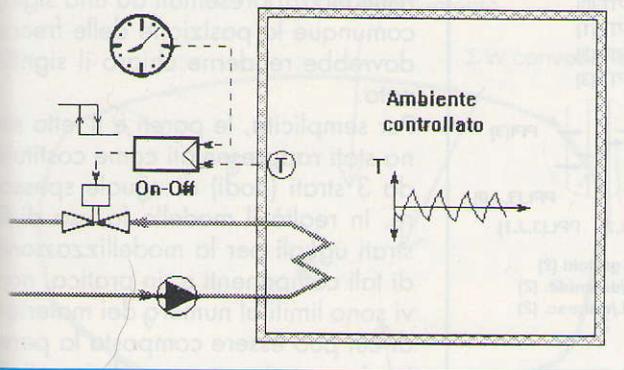


figura 3
Regolazione di tipo proporzionale-integrale-derivativo della temperatura dei locali

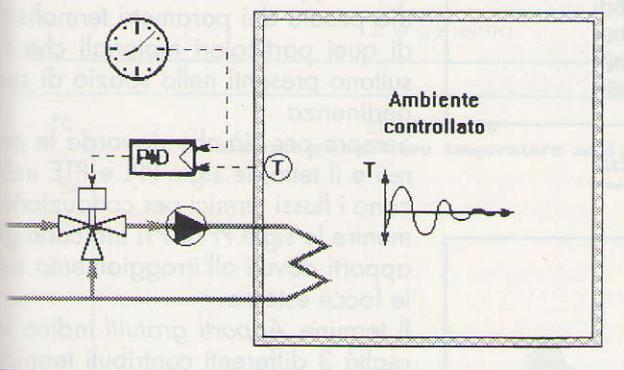


figura 4
Regolazione a termostato del riscaldamento o raffreddamento di un serbatoio

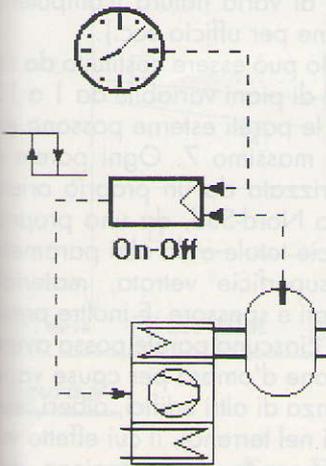
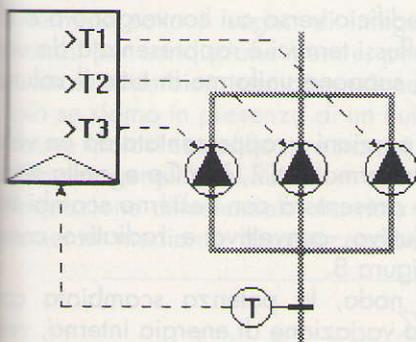


figura 5
Intervento in sequenza di un gruppo di pompe di circolazione per temperature progressive del fluido



- Presenza persone nell'edificio.
- Attivazione impianto di riscaldamento o raffreddamento nell'edificio.
- Attivazione sistema di ricambio igienico dell'aria ambienti nell'edificio.
- Potenza e temperatura della sorgente di calore recuperato da altre fonti (solo per impianti a recupero).
- Andamento dei fabbisogni termici di un edificio o di un complesso abitativo (solo per impianti che non simulano l'edificio).

In base alle condizioni viste, il programma, ad intervalli stabiliti dal valore del passo temporale e dopo aver interpolato o mediato, a seconda dei casi, i dati meteorologici, esegue il calcolo delle seguenti grandezze:

- Flussi termici dovuti ai fenomeni di scambio per conduzione, convezione e irraggiamento previsti per ogni componente e per l'edificio.
- Temperature e portate dei fluidi termovettori.
- Valori dei regolatori (mappa delle connessioni, valori di apertura per valvole e serrande, stato dei regolatori On-Off e PID).
- Temperature dei materiali e dei fluidi che caratterizzano, secondo le modellizzazioni fatte, ogni componente e l'edificio.

Le grandezze calcolate dal programma vengono poi manipolate in modo opportuno e memorizzate in modo da costituire, una volta terminata la simulazione, una serie di dati di output che contengono i seguenti tipi di informazione:

- Bilanci termici per i componenti e per l'edificio che riportano, per ogni porzione in cui sono stati suddivisi, la temperatura all'inizio e alla fine della simulazione e la variazione di energia interna corrispondente, mentre per ogni flusso termico viene riportata l'energia totale transitata nel periodo di simulazione.
- Valori medi giornalieri delle temperature e dei flussi termici più significativi.
- Andamento giornaliero delle temperature e dei flussi termici per tutte le zone simulate dell'edificio corrispondenti a un giorno, precedentemente scelto, contenuto nel periodo di simulazione.
- Andamento dei valori delle temperature e dei flussi termici, corrispondenti a campionamenti giornalieri effettuati ad una determinata ora, precedentemente scelta, di ogni giorno di simulazione.
- Andamento delle temperature e dei flussi termici all'interno delle pareti e del tetto dell'edificio in particolari istanti prefissati.

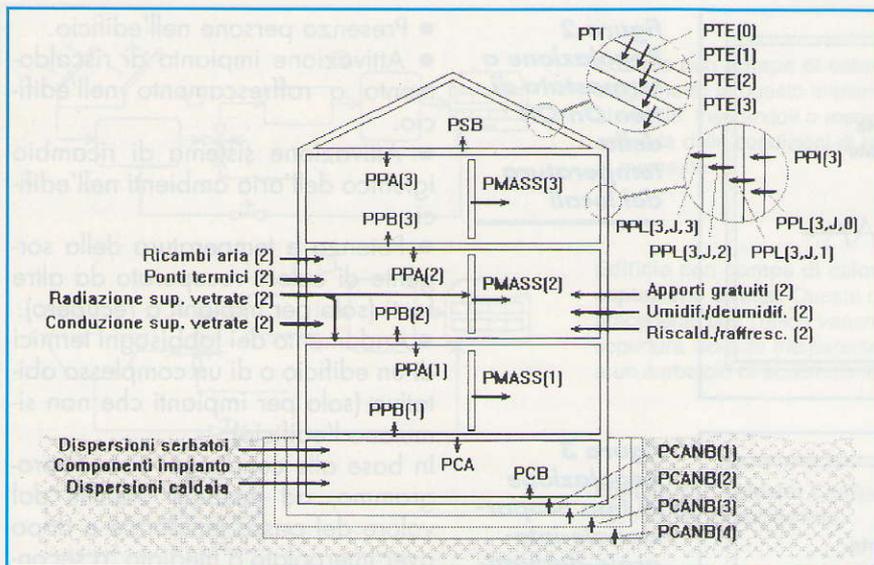


figura 6 - Flussi termici all'interno dell'edificio

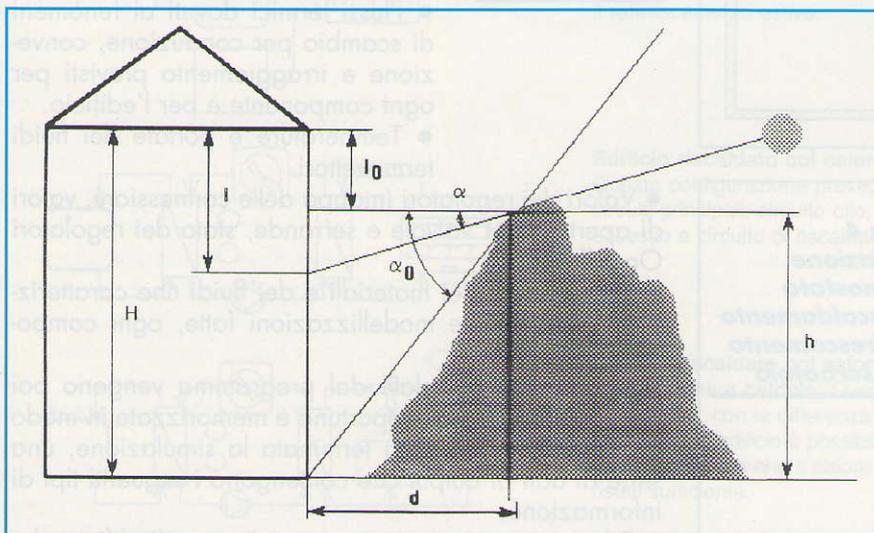


figura 7 - Effetto della presenza di ostacoli alla radiazione solare sulle pareti esterne

Modello dell'edificio

In questo articolo viene descritto il solo modello adottato per l'edificio, perché esso costituisce sicuramente la parte più complessa e delicata di tutto il programma e, inoltre, le diverse soluzioni utilizzate per descriverne il comportamento fisico hanno validità generale essendo state successivamente impiegate anche per altri modelli di componenti.

In figura 6 è visibile l'insieme dei flussi termici atti a rappresentare gli scambi di energia che avvengono all'interno dell'edificio, tra l'edificio e gli altri componenti e tra l'edificio e il mondo esterno.

risultano rappresentati da una sigla, comunque la posizione delle frecce dovrebbe renderne chiaro il significato.

Per semplicità, le pareti e il tetto sono stati rappresentati come costituiti da 3 strati (nodi) di uguale spessore. In realtà il modello fa uso di 8 strati uguali per la modellizzazione di tali componenti e, in pratica, non vi sono limiti al numero dei materiali di cui può essere composta la parete, in quanto ognuno di questi 8 strati rappresenta in realtà una media pesata dei parametri termofisici di quei particolari materiali che risultano presenti nello spazio di sua pertinenza.

Sempre per ciò che riguarda le pareti e il tetto, le sigle PPL e PTE indicano i flussi termici per conduzione, mentre le sigle PPI e PTI indicano gli apporti dovuti all'irraggiamento sulle facce esterne.

Il termine *Apporti gratuiti* indica in realtà 3 differenti contributi termici: illuminazione, occupanti e carichi elettrici di varia natura (computers, macchine per ufficio ecc.).

L'edificio può essere costituito da un numero di piani variabile da 1 a 10 mentre le pareti esterne possono essere al massimo 7. Ogni parete è caratterizzata da un proprio orientamento Nord-Sud, da una propria superficie totale e da altri parametri quali superficie vetrata, materiali impiegati e spessore. È inoltre previsto che ciascuna parete possa avere delle zone d'ombra per cause varie (vicinanza di altri edifici, alberi, elevazioni nel terreno), il cui effetto varia a seconda della stagione del-

l'anno e dell'ora del giorno come schematizzato in figura 7.

Ogni porzione di edificio verso cui convergono o si dipartono uno o più flussi termici è rappresentata da una temperatura che si suppone uniforme in tutto il volume considerato.

Ognuna di queste porzioni è rappresentata da un volume V, dai parametri termofisici λ , D e Cp e, nella situazione più generale presenterà con l'esterno scambi termici di tipo conduttivo, convettivo e radiativo come schematizzato in figura 8.

Poiché, per ogni nodo, la potenza scambiata con l'esterno è pari alla variazione di energia interna, vale la seguente equazione:

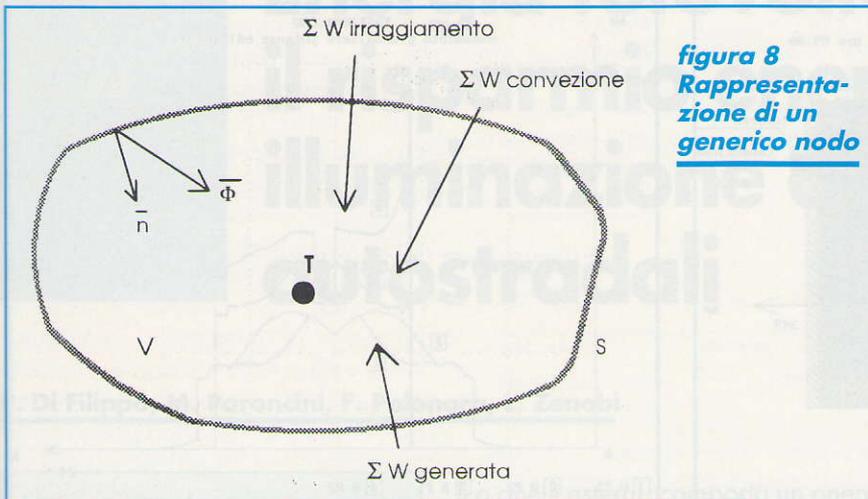


figura 8
Rappresentazione di un generico nodo

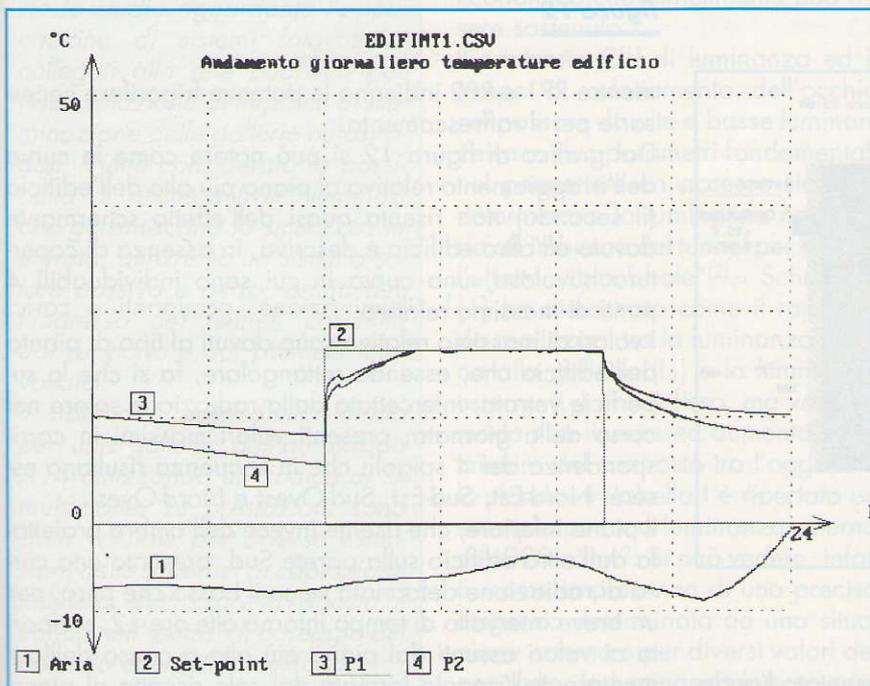


figura 9

$$\int_S \phi \cdot \bar{n} \cdot dS + \sum W_{\text{irraggiamento}} + \sum W_{\text{convezione}} + \sum W_{\text{generata}} = C_p \cdot D \cdot V \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

Il termine sotto il segno di integrale rappresenta gli scambi per conduzione mentre, per quanto riguarda la potenza scambiata per convezione (che ha significato solo se siamo in presenza di un fluido), sono state fatte alcune ipotesi semplificative tra cui le condizioni di perfetta omogeneità del fluido.

L'equazione differenziale ora vista viene risolta numericamente mediante discretizzazione nel dominio del

tempo, così da trovare i valori corrispondenti alla funzione incognita T . Poiché il metodo di risoluzione numerica adottato dal programma risulta essere quello di Eulero a un passo (metodo di risoluzione esplicito alle differenze finite) il passo temporale precedentemente visto risulta essere il valore di ogni suddivisione di tutto l'intervallo d'integrazione della funzione.

Al trascorrere di ogni passo temporale τ il valore della nuova temperatura viene allora calcolato con la formula riportata al piede di questa stessa pagina.

La scelta del passo temporale deve tenere conto del tipo di simulazione che si vuole effettuare. In generale, un passo temporale troppo breve allunga eccessivamente i tempi di esecuzione, mentre vi è un limite superiore al valore che esso può assumere dovuto al possibile instaurarsi di fenomeni di instabilità nei calcoli delle temperature.

Esempi di analisi dei transitori

Una delle applicazioni più interessanti del programma EDILEGO risulta essere l'analisi dell'andamento e dei tempi di regimazione per le temperature di un edificio. Studi di questo tipo si dimostrano particolarmente interessanti quando vengono condotti considerando condizioni meteorologiche severe o che presentano caratteristiche insolite come, per esempio, nel caso di forti escursioni termiche.

Anche nel caso del dimensionamento di sistemi solarizzati, risulta sempre necessario stabilire come l'impianto sia in grado di far fronte a situazioni di transitorio e come debba essere dimensionato l'accumulo termico che, interposto tra il sistema di captazione e l'utenza, ha lo scopo di attenuare lo sfasamento intercorrente tra produzione e domanda di calore.

Queste ultime considerazioni risultano particolarmente valide se si considera il costo non indifferente degli impianti solarizzati, che rende sconsigliabili i sovradimensionamenti che spesso si verificano a causa di progettazioni poco accurate.

$$T_{n+1} = T_n + \tau \cdot \frac{\sum W_{\text{conduzione}} + \sum W_{\text{irraggiamento}} + \sum W_{\text{convezione}} + \sum W_{\text{generata}}}{C_p \cdot D \cdot V}$$

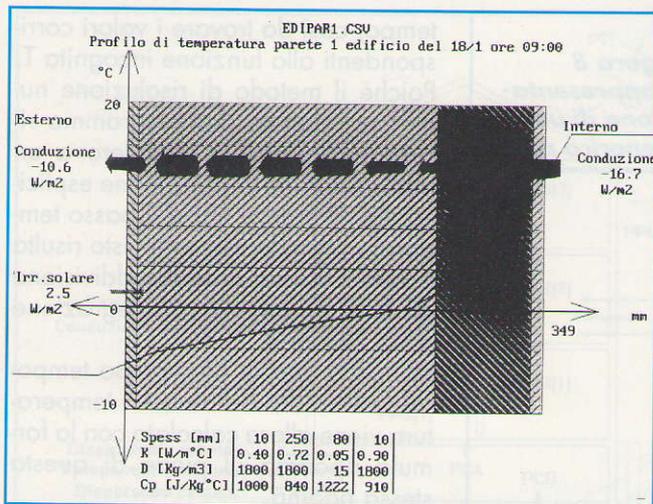


figura 10

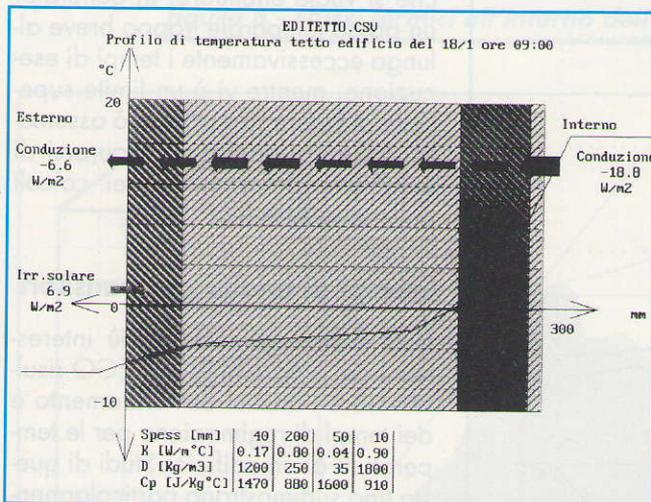


figura 11

A titolo di esempio, in figura 9 è rappresentato l'andamento giornaliero delle temperature e degli ambienti di un edificio a 2 piani di 1500 m³, adibito a uffici, in una giornata particolarmente fredda e facendo uso di dati meteorologici tipici di Milano (come si vede da questo esempio, a causa delle condizioni esterne sfavorevoli, pur essendo l'impianto correttamente dimensionato, i tempi di regimazione termica risultano piuttosto lunghi). Nelle figure 10 e 11 sono invece riportati i profili di temperatura e i flussi termici all'interno di una delle pareti laterali e del tetto alle ore 9 dello stesso giorno, cioè al mattino durante la fase di regimazione.

La figura 12 mostra infine l'andamento di alcuni significativi flussi termici in un giorno particolarmente caldo e soleggiato. L'edificio risulta parzialmente schermato sul lato sud da un altro edificio di pari altezza posto a 5 metri di distanza. Le curve indicate con VP1 e VP2 mostrano i flussi termici entranti in ognuno dei due piani dell'edificio attraverso i vetri per l'irraggiamento solare,

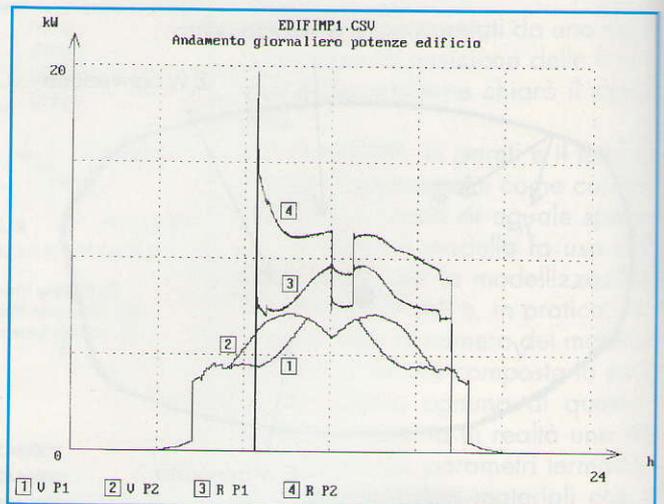


figura 12

mentre RP1 e RP2 indicano le potenze frigorifere necessarie per il raffreddamento.

Dal grafico di figura 12 si può notare come la curva dell'irraggiamento relativo al piano più alto dell'edificio (il secondo) non risenta quasi dell'effetto schermante dovuto all'altro edificio e descriva, in assenza di copertura nuvolosa, una curva in cui sono individuabili 4 punti di massimo relativo.

I valori di massimo relativo sono dovuti al tipo di pianta dell'edificio che, essendo rettangolare, fa sì che la superficie vetrata, intercettata dalla radiazione solare nel corso della giornata, presenti valori massimi in corrispondenza dei 4 spigoli, che in sequenza risultano essere: Nord-Est, Sud-Est, Sud-Ovest e Nord-Ovest.

Il piano inferiore, che risente invece dell'ombra proiettata dall'altro edificio sulla parete Sud, presenta una curva di radiazione deformata verso il basso che però, per un breve intervallo di tempo intorno alle ore 12, si riporta ai valori assunti dal piano più alto a causa dell'aumentare dell'angolo formato dal sole rispetto al piano orizzontale.

Conclusioni

Il programma EDILEGO costituisce senza dubbio uno strumento utile e versatile per lo studio dei fenomeni termici negli edifici, in funzione soprattutto della possibile utilizzazione di fonti rinnovabili o non convenzionali e di soluzioni impiantistiche mirate al conseguimento di un migliore utilizzo dell'energia per il riscaldamento e il raffreddamento.

Si tratta di un programma in grado di girare su una qualsiasi piattaforma PC e che risulta di facile apprendimento e utilizzo per utenti già dotati di un minimo bagaglio di conoscenze in campo termotecnico e impiantistico.

Francesco Groppi, ENEL/CRAM, Milano