



Ricerca di Sistema elettrico

# Valutazione di applicabilità del metodo RTS come codice di calcolo per la certificazione energetica degli edifici

Gaetano Fasano, Francesca Margiotta, Giovanni Puglisi

VALUTAZIONE DI APPLICABILITÀ DEL METODO RTS COME CODICE DI CALCOLO PER LA CERTIFICAZIONE  
ENERGETICA DEGLI EDIFICI

Gaetano Fasano, Francesca Margiotta, Giovanni Puglisi (ENEA)  
Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

Obiettivo: Sviluppo sistemi.

Responsabile del Progetto: Gaetano Fasano

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 IL QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO .....	5
3 APPROCCIO METODOLOGICO.....	6
4 IL SOFTWARE ODESSE.....	6
4.1 IL MODELLO MATEMATICO DELL'EDIFICIO: CARICO TERMICO INVERNALE.....	7
4.2 IL MODELLO MATEMATICO DELLA TEMPERATURA INTERNA .....	8
4.3 IL MODELLO MATEMATICO DELL'EDIFICIO: CARICO TERMICO ESTIVO .....	9
4.3.1 <i>Heat Balance Method</i> .....	10
4.3.2 <i>Radiant Time Series (RTS) Method</i> .....	11
4.3.3 <i>Guadagni conduttivi pareti opache</i> .....	14
4.3.4 <i>Guadagni parti vetrate</i> .....	17
4.3.5 <i>Guadagni interni</i> .....	18
4.3.6 <i>Guadagni per ventilazione ed infiltrazione</i> .....	18
4.3.7 <i>Convezione e Radiazione</i> .....	18
4.3.8 <i>Conversione delle parti radiative dei guadagni di calore in carichi di raffrescamento</i> .....	19
4.3.9 <i>Risultati</i> .....	21
4.4 CRITICITÀ.....	24
5 CONCLUSIONI .....	27
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	27

## Sommario

La qualità e l'efficienza energetica degli edifici rivestono, ormai da tempo, ruoli importanti e strategici ai fini del raggiungimento degli obiettivi di contenimento dei consumi energetici fissati dalle normative europee. In particolare, le Direttive 2002/91/CE, 2006/32/CE e 2010/31/UE dettano le linee per la determinazione della prestazione energetica degli edifici e obbligano gli Stati membri al recepimento delle misure previste nelle stesse.

Il Dlgs 192/2005 (allegato I, comma 16), che recepisce la Direttiva 2002/91/CE, recita che nel calcolo rigoroso della prestazione energetica dell'edificio occorre prendere in considerazione diversi fattori, tra i quali: *“per gli edifici di nuova costruzione del settore terziario con volumetria maggiore di 10.000 mc, l'influenza dei fenomeni dinamici, attraverso l'uso di opportuni modelli di simulazione.”*

Obiettivo dell'attività svolta è quello di proporre una metodologia di calcolo per poter redigere certificazioni energetiche tenendo conto dell'influenza dei fenomeni dinamici sulla determinazione delle prestazioni energetiche degli edifici. Nello specifico è stato analizzato il simulatore O.DES.S.E. di ENEA, sviluppato nelle precedenti annualità (PAR 2009-2012) e utilizzato come codice di calcolo dinamico, basato sul metodo RTS (*Radiative Time Series*), proposto nell' Handbook 2009, ASHRAE. In parallelo nell'ambito della collaborazione con la facoltà di ingegneria dell'Università di Catania è stata sviluppata una metodologia dinamica che implementa il calcolo orario previsto dalla UNI EN 13790.

Il lavoro svolto ha evidenziato come il metodo RTS sia idoneo ad essere implementato in un codice di calcolo dinamico, ma complesso nella definizione dei coefficienti RTSf necessari al calcolo della prestazione energetica degli edifici.

## 1 Introduzione

La Direttiva Europea 2002/91/CE ha introdotto le norme per la riduzione dei consumi energetici mediante una serie di azioni atte a migliorare la prestazione energetica degli edifici (EPBD, Energy Performance of Building Directive) e prescrive che tutti gli edifici debbano possedere un certificato che ne indichi la prestazione energetica annuale.

In particolare con il D.Lgs. 192/2005 viene posta l'attenzione sulle problematiche relative all'influenza che gli aspetti dinamici possano avere nel calcolo del bilancio energetico dell'edificio. Infatti lo stesso D.Lgs. 192/2005 recita che nel calcolo rigoroso della prestazione energetica dell'edificio occorre prendere in considerazione diversi fattori, tra i quali: *“per gli edifici di nuova costruzione del settore terziario con volumetria maggiore di 10.000 mc, l'influenza dei fenomeni dinamici, attraverso l'uso di opportuni modelli di simulazione”*.

Da ciò nasce la necessità di considerare una metodologia di calcolo dinamico che, nella definizione del fabbisogno termico dell'edificio tenga conto delle caratteristiche dinamiche degli elementi costruttivi e costitutivi l'involucro.

Questo perché il comportamento termofisico dell'edificio, in particolare in regime estivo, risulta alquanto complesso a causa della variabilità delle condizioni ambientali che rendono gli scambi termici edificio-ambiente in una condizione di transitorio continuo.

Ciò è dovuto principalmente al fatto che l'irraggiamento solare, che in regime estivo è il fattore che influenza maggiormente l'andamento della temperatura interna dell'edificio e, conseguentemente, del carico termico, varia notevolmente nel corso della giornata; di conseguenza il termine di accumulo nell'equazione di bilancio termico dell'edificio assume un ruolo fondamentale e non può essere trascurato.

Le attività previste nel PAR 2013, Area: **RAZIONALIZZAZIONE E RISPARMIO NELL'USO DELL'ENERGIA**, Tema di Ricerca: **SVILUPPO DI MODELLI PER LA REALIZZAZIONE DI INTERVENTI DI EFFICIENZA ENERGETICA SUL PATRIMONIO IMMOBILIARE PUBBLICO**, linea a.3, sono finalizzate a valutare la possibilità di utilizzare il simulatore O.DES.S.E sviluppato da ENEA, come codice di calcolo dinamico per la determinazione delle prestazioni energetiche gli edificio necessarie per la certificazione energetica.

## 2 Il quadro normativo di riferimento

Il processo di certificazione energetica degli edifici vede come prime disposizioni nazionali in materia la legge 10/91, volta a favorire e ad incentivare, tra l'altro, l'uso razionale dell'energia, lo sviluppo delle fonti rinnovabili e la riduzione dei consumi specifici di energia nei processi produttivi.

Successivamente, la normativa è stata rivisitata e integrata dai D.Lgs. n. 192/2005 e n. 311/2006, che hanno recepito la Direttiva 2002/91/CE, che insieme alle direttive 2006/32/CE e 2010/31/UE costituisce le linee per la determinazione della prestazione energetica degli edifici e obbliga gli Stati membri al recepimento delle misure previste nelle stesse.

Il D.Lgs. 192/2005 stabilisce i requisiti minimi prestazionali degli edifici e l'obbligatorietà della certificazione energetica e, in particolare, pone l'attenzione sulle problematiche relative all'influenza degli aspetti dinamici nel calcolo del bilancio energetico dell'edificio. Infatti nell'allegato I, comma 16 lo stesso decreto recita che nel calcolo rigoroso della prestazione energetica dell'edificio occorre prendere in considerazione diversi fattori, tra i quali: *“per gli edifici di nuova costruzione del settore terziario con volumetria maggiore di 10.000 mc, l'influenza dei fenomeni dinamici, attraverso l'uso di opportuni modelli di simulazione.”*

Da ciò nasce l'esigenza di disporre di una metodologia che tenga conto delle caratteristiche dinamiche degli elementi costruttivi e costitutivi l'involucro nel calcolo del comportamento termofisico dell'edificio, ad oggi non ancora contemplata in alcuna normativa.

### 3 Approccio metodologico

La crescente richiesta di edifici ad alte prestazioni energetiche e l'evoluzione della normativa tecnica di riferimento, in materia di contenimento dei consumi energetici, richiedono l'utilizzo di codici di calcolo che consentano l'analisi energetica dell'edificio esistente o di nuova progettazione con diversi livelli di dettaglio. Attualmente esistono numerosi strumenti di valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici che differiscono fondamentalmente per gli algoritmi di calcolo utilizzati.

Le metodologie comunemente più utilizzate si differenziano per il regime di calcolo in:

- stazionario
- dinamico

Regime stazionario: il calcolo è effettuato sulla base di dati climatici rappresentati dalle medie mensili di temperatura e irraggiamento, per cui viene esclusa qualsiasi variabilità temporale del carico termico.

Regime dinamico: si calcolano su base oraria o sub-oraria, gli scambi termici tra le superfici interne, valutando la capacità termica dell'involucro edilizio e quindi l'inerzia termica per tenere conto del calore accumulato nelle murature dell'edificio e di come questo venga rilasciato all'ambiente interno in maniera differita nel tempo.

La simulazione dinamica consente, quindi, di svolgere analisi dettagliate delle prestazioni energetiche dell'edificio permettendo così di simulare il comportamento dell'involucro in condizioni di funzionamento vicine a quelle reali, cioè in funzione delle condizioni climatiche esterne, dei carichi interni e degli impianti, definiti non come valori medi ma come andamenti temporali variabili nel periodo di simulazione.

L'importanza di disporre di un modello dinamico, in generale, risiede nella possibilità di poter valutare a priori il comportamento della sezione di generazione al variare del carico termico ed elettrico dell'edificio, dando la possibilità di valutare l'integrazione di più tecnologie in funzione delle caratteristiche meteo del sito e delle richieste del contesto territoriale.

Quest'ultima tipologia di approccio metodologico è stata analizzata e poi implementata nel codice di calcolo, denominato O.DES.S.E., sviluppato da ENEA [1,2,3].

### 4 Il software ODESSE

Obiettivo dell'attività oggetto del presente rapporto è valutare la possibilità di usare il codice O.DES.S.E. come modello dinamico per la certificazione energetica degli edifici.

L'aspetto prioritario che il calcolo dinamico induce è legato al comportamento dell'edificio in regime estivo che risulta alquanto complesso per la variabilità delle condizioni ambientali (interne ed esterne) che rendono gli scambi termici edificio-ambiente in una condizione di transitorio continuo.

Ciò è dovuto principalmente al fatto che l'irraggiamento solare, che in regime estivo è il fattore che influenza maggiormente l'andamento della temperatura interna dell'edificio e, conseguentemente, del carico termico, varia notevolmente nel corso della giornata. Questo implica che, a differenza di quanto è possibile ipotizzare in regime invernale, nell'equazione di bilancio termico dell'edificio deve essere considerato il termine di accumulo:

$$Q_{entrante} + Q_{impianti} - Q_{uscente} = Accumulo$$

Infatti la radiazione solare che penetra attraverso i componenti opachi e quelli trasparenti non diventa istantaneamente carico termico; infatti:

- la quota parte che attraversa le superfici trasparenti riscalda molto debolmente l'aria a causa del suo basso fattore di assorbimento; riscalda, invece, sensibilmente i corpi su cui incide, che aumentano la loro energia interna e, conseguentemente, la loro temperatura; quando questa è maggiore di quella dell'aria inizia il processo di scambio termico per convezione;
- la radiazione che incide sulle pareti opache viene in parte assorbita e in parte trasmessa all'interno della parete e, quindi, riemessa (per convezione) all'interno dell'edificio.

In entrambi i casi il processo di trasformazione non è istantaneo, ma avviene dopo un certo intervallo temporale che dipende dalle capacità termiche e dalle capacità di scambio termico dei materiali con l'aria. Queste ultime valutazioni giustificano la necessità di considerare la condizione di raffrescamento in regime di continuo transitorio.

La variabilità delle condizioni climatiche e l'ipotesi di regime transitorio rendono difficoltosa la risoluzione analitica dell'equazione (differenziale) di bilancio termico dell'edificio, per cui si ricorre a metodi matematici che, per quanto accurati, non potranno fornire soluzioni esatte; infatti tali metodi introducono delle approssimazioni dovute all'uso di coefficienti e alla impossibilità di valutare con esattezza la variabilità dei parametri termo-fisici con le condizioni ambientali (coefficienti di scambio termico, trasmittanze termiche, etc.).

La determinazione del carico termico di raffrescamento avviene considerando due componenti del flusso termico:

- Guadagno termico (*heat gain*)
- Carico di raffreddamento (*cooling load*)

Il guadagno termico è il flusso di calore netto all'interno dell'edificio, istante per istante; tale guadagno è prodotto dalla differenza fra i flussi entranti nell'edificio e quelli uscenti, ovvero:

- flusso termico per radiazione attraverso le superfici opache e trasparenti;
- flusso termico per conduzione attraverso le pareti orizzontali e verticali;
- flusso termico per ventilazione e/o infiltrazione di aria esterna;
- flusso termico generato da persone, apparecchiature elettriche, sorgenti di illuminazione.

Il carico di raffreddamento è la quantità di calore che bisogna estrarre dall'ambiente per mantenere la temperatura di riferimento voluta<sup>1</sup> e, di conseguenza, dimensionare opportunamente gli impianti di climatizzazione. Questo viene determinato a partire dal guadagno termico e mediante l'utilizzo di opportuni coefficienti dipendenti dal metodo utilizzato. Si può notare che a causa delle modalità con cui viene convertito il flusso radiativo, spesso il guadagno termico non coincide con il carico di raffreddamento.

Fra i vari metodi esistenti si è scelto di implementare in O.DES.S.E. il Metodo delle Serie Radiative Temporali (RTS), derivato dal metodo di Bilancio di Calore, pubblicato dall'ASHRAE.

Nei paragrafi successivi sono descritti i modelli matematici per il calcolo dei carichi termici in regime invernale ed estivo e della temperatura interna.

L'ipotesi adottata è quella di considerare l'edificio composto da una zona unica, delimitata dal volume racchiuso dalle pareti esterne. Il passo di simulazione è orario, ma può essere ulteriormente ridotto senza problematica alcuna.

Il software è stato implementato in ambiente Matlab-Simulink.

#### 4.1 Il modello matematico dell'edificio: carico termico invernale

La metodologia di calcolo segue una procedura semplificata, ma utilizza come input di calcolo parametri termofisici dettagliati della struttura edilizia e del suo effettivo utilizzo:

- 1) le dispersioni termiche orarie dell'edificio attraverso le chiusure opache e trasparenti;
- 2) l'apporto termico solare
- 4) l'apporto termico gratuito delle sorgenti interne (illuminazione, affollamento)
- 5) Il carico termico totale orario invernale ed estivo
- 3) Il fabbisogno annuale di energia termica estiva ed invernale necessaria per mantenere la temperatura interna di progetto all'interno dell'edificio.

La scelta di semplificare il modello dell'edificio in una zona unica consente la seguente equazione di bilancio energetico fra il sistema edificio e l'ambiente esterno:

---

<sup>1</sup> La temperatura di riferimento può essere rappresentata da una funzione complessa

$$\sum m_i C_i \frac{dT}{dt} = Q_{disp} + Q_{vent} - (Q_{sol\_w} + Q_{sol\_o} + Q_{int}) - Q_{aux} \quad (1)$$

dove

- $T_r$  è la temperatura della zona termica simulata
- $\Sigma m_i C_i$  è la sommatoria della capacità termica estesa a tutte le superfici opache di chiusura verticale, ai solai di copertura e di calpestio, ai solai intermedi e al volume d'aria interno. La metodologia di calcolo della capacità termica, eseguita ai sensi della UNI EN 13786, è meglio dettagliata al paragrafo seguente.
- $Q_{sol\_w}$  sono gli apporti termici solari attraverso la superficie finestrata;
- $Q_{sol\_o}$  sono gli apporti termici solari attraverso la superficie opache;
- $Q_{int}$  sono gli apporti termici interni
- $Q_{disp}$  è lo scambio termico per trasmissione attraverso l'involucro edilizio (opaco e trasparente);
- $Q_{vent}$  è lo scambio termico per ventilazione e infiltrazione;
- $Q_{aux}$  è l'apporto termico fornito dagli elementi terminali dell'impianto di riscaldamento.

Il primo membro dell'equazione (1) rappresenta l'effetto dell'accumulo termico dell'edificio; in pratica l'accumulo termico funge da volano consentendo variazioni più attenuate della temperatura interna dell'edificio. Infatti, se il bilancio è positivo al primo membro l'eccesso di energia termica viene accumulato riscaldando pareti, aria, oggetti e tutto ciò che è all'interno dell'edificio, mentre se il bilancio è negativo si ha un raffreddamento delle strutture accumulanti.

Facendo riferimento alla Normativa Europea e ad una serie di normative tecniche e strumenti nazionali, nella determinazione delle singole componenti presenti nell'equazione di bilancio sono state applicate le seguenti norme:

- UNI/TS 11300-1 definisce le linee guida per l'applicazione nazionale della Norma UNI EN ISO 13790:2008 con riferimento al metodo mensile quasi stazionario per il calcolo dei fabbisogni netti di energia per riscaldamento e per raffrescamento;
- UNI TS 11300 prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2-1: determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e la produzione di acqua calda sanitaria nel caso di utilizzo dei combustibili fossili;
- UNI EN ISO 13786: Prestazione termica dei componenti per l'edilizia: caratteristiche termiche dinamiche – metodo di calcolo
- UNI EN ISO 10375: Metodo di calcolo della temperatura interna estiva degli ambienti

## 4.2 Il modello matematico della temperatura interna

L'andamento orario della temperatura dell'aria interna dell'edificio è regolata da un'equazione differenziale del primo ordine che permette di inglobare gli effetti delle inerzie termiche (sfasamento e attenuazione) dovuti alla tipologia dell'involucro edilizio e al suo volume.

Nella sua espressione più generale la temperatura interna  $T$  è data dall'equazione seguente:

$$\sum m_i C_i \frac{dT}{dt} = Q_g + Q_i - Q_{disp} - Q_v + Q_{aux} \quad (2)$$

in cui  $m_i$  e  $C_i$  sono, rispettivamente, la massa e la capacità termica dell'edificio, mentre i termini al secondo membro sono quelli esemplificati nei paragrafi precedenti.

Si può notare che la l'equazione (2) è formalmente analoga a quella vista per il carico termico invernale con l'aggiunta del primo membro che rappresenta l'accumulo termico dell'edificio.

La stessa equazione è espressa in forma canonica e implementata in Simulink:

$$\frac{dT_r(t)}{dt} = -K T_r(t) + H(t) + C$$

dove

- $K$  è la costante di tempo dell'edificio, pari a:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{N'} U_i A_i + U_t A_t + c_p \rho nV}{C}$$

- H è la parte di termine noto funzione dell'irraggiamento:

$$H = f_c \sum_{i=1}^M A_{wi} SHGC_i I_i + \sum_{i=1}^N U_i A_i \frac{\alpha_p}{h_e} I_i$$

- e C il termine noto dipendente dalla temperatura esterna:

$$C = \left( \sum_{i=1}^{N'} U_i A_i + U_t A_t + c_p \rho nV \right) T_a$$

Al fine di validare l'equazione differenziale applicata ad un "edificio prova", è stato confrontato l'andamento dinamico orario della temperatura interna con la temperatura interna modellata utilizzando un software commerciale, Trnsys e fornendo ad entrambi i codici, uguali condizioni a contorno.

I risultati ottenuti mostrano che i due modelli sono praticamente identici:

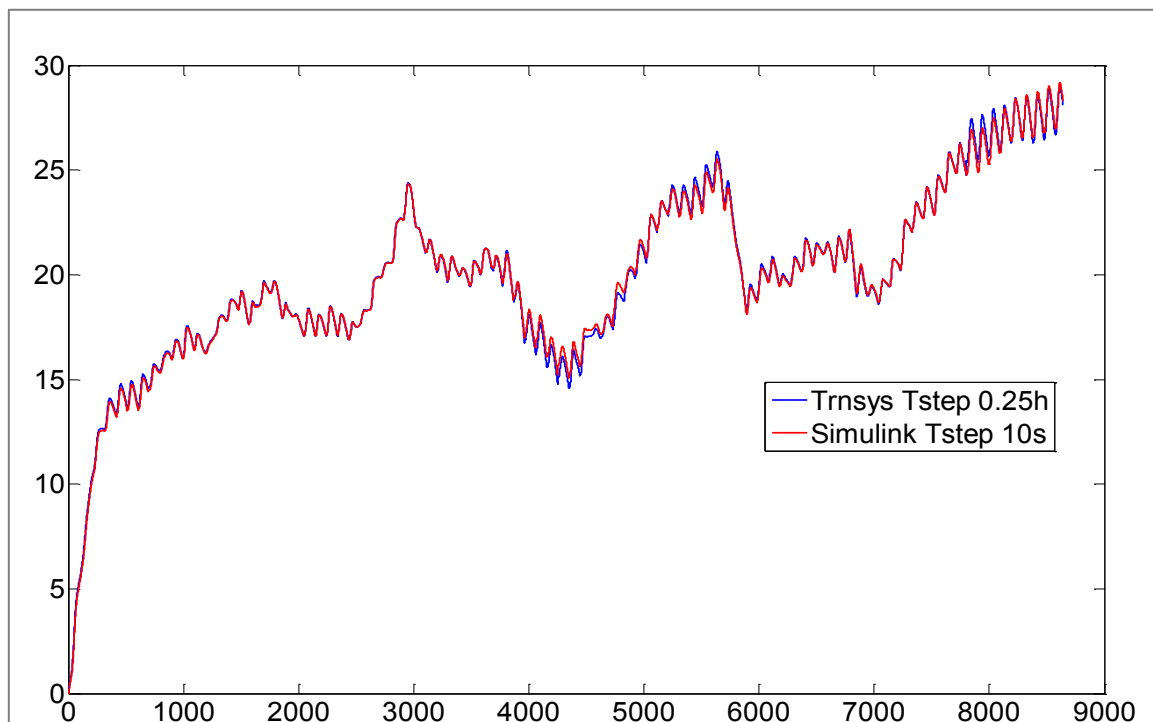


Figura 1: Temperatura interna -confronto "modello"- TRNSYS edificio semplificato

Questo risultato dimostra la validità dell'equazione ricavata dal modello multizona complesso del TRNSYS che è stata implementata nel simulatore.

### 4.3 Il modello matematico dell'edificio: carico termico estivo

Il metodo *Radiant Time Series* (RTSM) è un metodo semplificato per eseguire il calcolo del carico di raffrescamento, derivato dal metodo del bilancio termico (HBM).

Il RTSM è stato sviluppato per essere rigoroso, senza la necessità di effettuare cicli iterativi (come fa l'HBM) per determinare i guadagni di calore di conduzione e i carichi di raffrescamento. Con il RTSM si determinano le singole componenti dei guadagni per poi calcolare i carichi di raffrescamento che possono essere così esaminati più facilmente. Inoltre, i coefficienti che vengono utilizzati per calcolare il transitorio

nel guadagno di conduzione (CTFs) e quelli utilizzati per i carichi di raffreddamento (RTFs) hanno un significato fisico: i primi quello di modellare l'inerzia termica delle singole pareti e i secondi la componente del carico dovuta alla radiazione.

Prima di passare alla descrizione dell'algoritmo RTS si descriverà il metodo HBM in maniera qualitativa. Una trattazione esaustiva di tale metodologia si può trovare su manuali tecnici che trattano in maniera dettagliata il problema del carico termico di raffrescamento, come l'Handbook dell'ASHRAE.

#### 4.3.1 Heat Balance Method

I processi che costituiscono il modello HBM, descritti nello schema mostrato nella seguente figura, sono:

1. bilancio termico sulla superficie esterna
2. processo di conduzione del muro
3. bilancio termico sulla superficie interna
4. bilancio termico dell'aria

Lo schema mostra nel dettaglio il processo di equilibrio termico per una singola superficie opaca.

La parte ombreggiata viene replicata per ciascuna delle superfici che racchiudono la zona. Il processo per le superfici trasparenti è simile a quello indicato, ma non ha la componente solare assorbita sulla superficie esterna; quest'ultima è divisa in due parti, una frazione verso l'interno e una frazione verso l'esterno, che parteciperanno al bilancio termico rispettivamente sulle superfici interne ed esterne. Le superfici trasparenti forniscono anche una componente solare trasmessa.

La formulazione dell'HBM consiste nel descrivere matematicamente i quattro processi principali, indicati dai blocchi rettangolari riportati.

Si ha bilancio termico quando la somma di tutte le componenti (in ingresso e in uscita) è nulla:

$$\sum_i Q_i = 0$$

Questo è un metodo rigoroso, che può essere schematizzato in 4 processi distinti:

1. Bilancio termico su ogni superficie esterna:

$$q_{sol} + q_{LWR} + q_{conv} - q_{ko} = 0$$

con:

- $q_{sol}$ : flusso dovuto alla radiazione solare diretta e diffusa
- $q_{LWR}$ : flusso dovuto alla radiazione a onda lunga scambiato con l'aria circostante
- $q_{conv}$ : flusso di scambio convettivo con l'aria esterna
- $q_{ko}$ : flusso conduttivo all'interno del muro

2. Processo di conduzione attraverso i muri, risolvibile attraverso varie tecniche (differenze finite, elementi finiti, metodo delle trasformate, metodo delle serie temporali)

3. Bilancio termico su ogni superficie interna:

$$q_{LWX} + q_{SW} + q_{LWS} + q_{ki} + q_{sol} + q_{conv} = 0$$

con

- $q_{LWX}$ : flusso dovuto alla radiazione a onda lunga scambiata tra le superfici della zona
- $q_{SW}$ : flusso dovuto alla radiazione a onda corta delle luci sulle superfici
- $q_{LWS}$ : flusso radiativo a onda lunga dalle apparecchiature presenti
- $q_{ki}$ : flusso conduttivo attraverso i muri
- $q_{sol}$ : flusso radiativo solare trasmesso e assorbito alla superficie
- $q_{conv}$ : flusso convettivo dell'aria nella zona

4. Bilancio termico dell'aria:

$$q_{conv} + q_{CE} + q_{IV} + q_{sys} = 0$$

con

- $q_{conv}$ : calore trasferito per convezione dalle superfici
- $q_{CE}$ : parti convettive del carico interno
- $q_{IV}$ : carico sensibile causato da infiltrazione e ventilazione

$q_{sys}$ : calore trasferito a\da impianti di condizionamento e trattamento dell'aria (HVAC system).

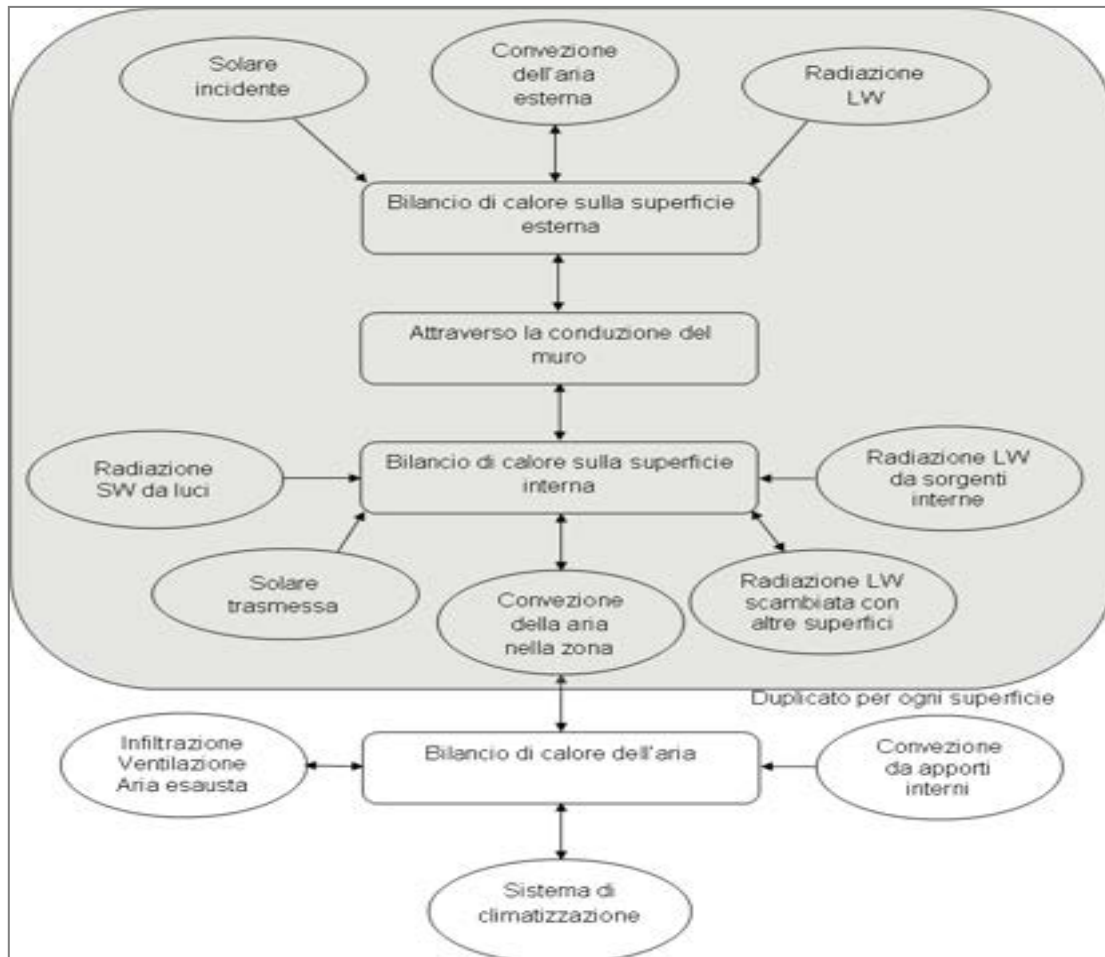


Figura 2: Descrizione dell'Heat Balance Method

#### 4.3.2 Radiant Time Series (RTS) Method

Il Radiant Time Series Method (RTSM) è un metodo per il calcolo del carico di raffrescamento che, come detto, deriva direttamente dalla HBM e sostituisce tutti gli altri metodi semplificati (non a bilancio termico) come il Transfer Function Method (TFM), il Cooling Load Temperature Difference - Solar Cooling Load - Cooling Load Factor Method (CLTD - SCL - CLFM), e il Total Equivalent Temperature Difference - Time Averaging Method (TETD - TAM).

Lo sviluppo del RTSM ha richiesto l'assunzione di diverse ipotesi di base:

1. *Periodo di calcolo* - il RTSM presuppone che il calcolo del carico di raffreddamento sia per un singolo giorno, con i giorni precedenti che hanno le stesse condizioni. In altre parole, l'energia immagazzinata in un edificio durante la notte sarà coerente con i giorni precedenti, essendo identiche le condizioni meteorologiche e i guadagni di calore interno. In pratica, anche il HBM utilizza questa ipotesi. Il metodo può essere utilizzato anche in condizioni non periodiche supponendo non ci siano grandi variazioni tra un giorno ed il successivo.

2. *Bilancio di calore sulla superficie esterna* - il RTSM sostituisce il bilancio termico sulla superficie esterna imponendo come condizione a contorno la temperatura aria-sole. Lo scambio di calore è regolato dalla conduttanza superficiale, che, come è noto, è un coefficiente che nasce dalla combinazione di scambi radiativi e convettivi.
3. *Bilancio di calore della superficie interna e bilancio dell'aria della zona* - è importante includere questo processo nell'analisi in quanto l'energia viene immagazzinata e successivamente rilasciata da ciascuna superficie e come conseguenza si ha che il picco del carico di raffrescamento è smorzato e sfasato. Il RTSM usa un approccio derivato dalla semplificazione dello scambio di calore radiativo e utilizzando i dati ricavati dal HBM (cioè i fattori tempo radiativi) fa una stima ragionevolmente accurata dello smorzamento e del ritardo. Il metodo HBM fa il bilancio dei flussi di calore (convettivo, radiativo, e conduttivo) sulla superficie interna e di tutti i flussi convettivi nell'aria della zona. La semplificazione dello scambio radiativo del RTSM si basa su due approssimazioni: in primo luogo ipotizza che le temperature delle altre superfici possano essere ragionevolmente approssimate con la temperatura dell'aria interna e, in secondo luogo che la dipendenza delle temperature superficiali possa essere approssimata con una semplice relazione lineare. Questo, a sua volta, permette alla radiazione e alla convezione di essere combinate e calcolate con un unico coefficiente (chiamato conduttanza superficiale) moltiplicato per la differenza tra la temperatura superficiale interna e la temperatura dell'aria.

Le ipotesi descritte consentono al RTSM di procedere in modo sequenziale e di poter risolvere l'equazione di bilancio nel dominio del tempo. Si potrebbe supporre che il RTSM non sia in grado di fornire esattamente la stessa risposta del HBM, ma per la maggior parte dei casi, le differenze tra i risultati dei due metodi sono poco significative. Una eccezione è il caso di edifici con basse resistenze termiche dell'involucro.

La figura che segue mostra la procedura di calcolo che definisce il RTSM.

Il RTSM ha due passaggi fondamentali: il calcolo dei guadagni di calore e il calcolo del carico di raffrescamento. Per il calcolo dei guadagni di calore sono necessari ulteriori passaggi preliminari, come mostrato nella schema della [Figura 3](#).

Il calcolo della radiazione solare incidente su ogni superficie è un primo importante passo nel calcolo dei carichi di raffreddamento per qualsiasi procedura di calcolo. Per il RTSM, è necessario anche per calcolare le temperature aria-sole.

Nel metodo RTS il guadagno di calore conduttivo per ogni superficie viene calcolato utilizzando dei *fattori di risposta*. I guadagni di calore conduttivo e gli altri guadagni di calore sono poi suddivisi in parte *radiante* e parte *convettiva*.

Tutte le parti convettive sono istantaneamente convertite in carichi di raffrescamento e sommati per ottenere la frazione oraria del carico totale di raffrescamento per convezione.

Le parti radianti dei guadagni di calore per conduzione, sorgenti interne, e trasmissione solare sono gestiti dall'RTS per determinare la frazione di guadagno di calore che verrà convertito in un carico di raffrescamento nell'ora corrente ed in quelle successive.

Questi carichi di raffrescamento si aggiungono alle porzioni convettive già calcolate per ottenere il carico totale di raffrescamento orario, come descritto dall' algoritmo nella [Figura 4](#).

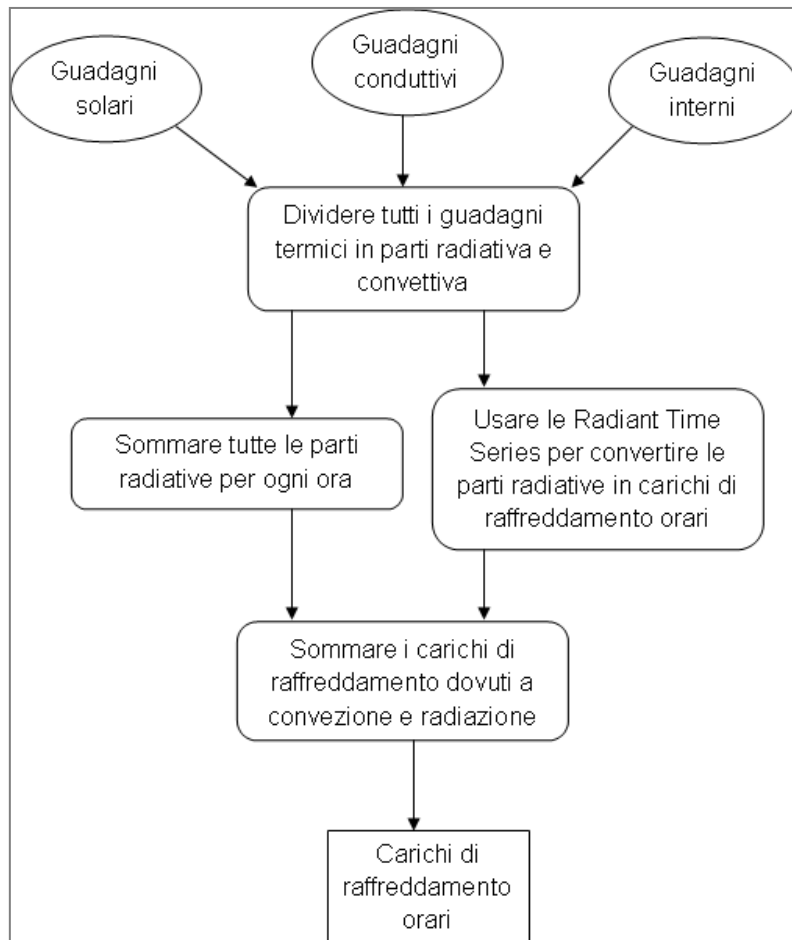


Figura 3: Procedura di calcolo del Radiant Time Series Method

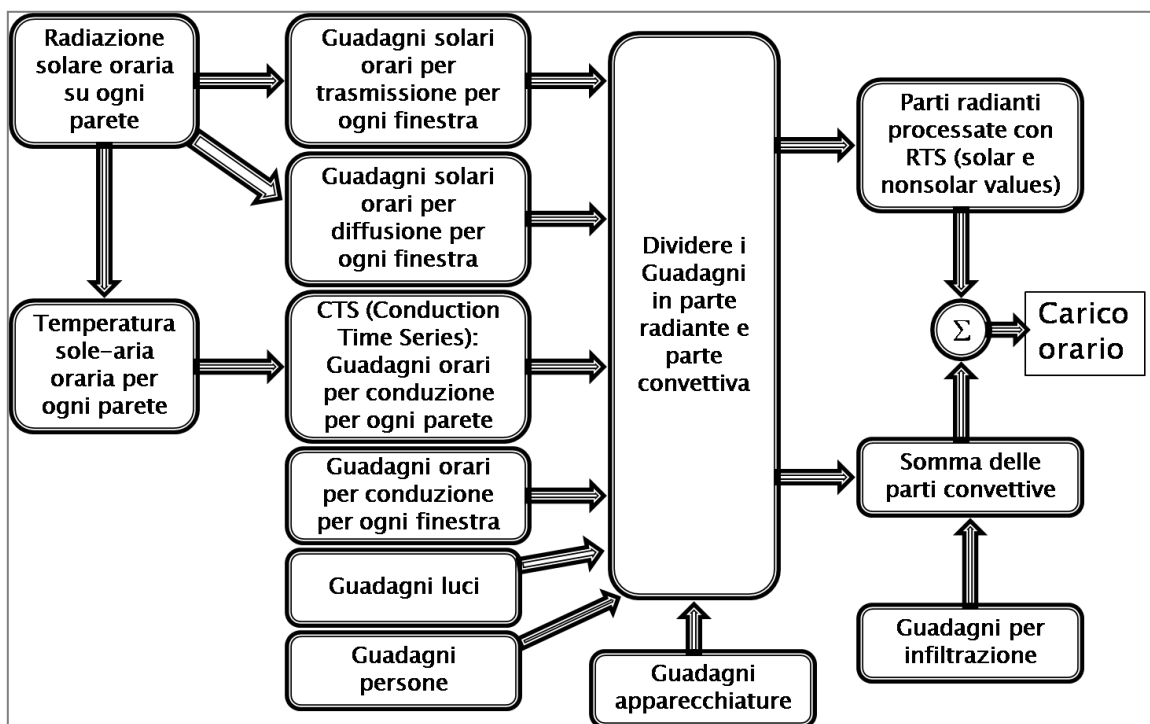


Figura 4: Descrizione del Radiant Time Series Method

La novità sostanziale introdotta da tale approccio è quella di dividere i guadagni in parte radiativa e parte convettiva ed applicare alla prima il processo RTS vero e proprio, cioè applicare quella parte dell'algoritmo che, attraverso una "pesatura", tiene conto della massa dell'edificio.

#### 4.3.3 Guadagni conduttivi pareti opache

Il guadagno di calore conduttivo è calcolato per ogni tipo di parete e copertura con l'utilizzo di una serie temporale (CTS - *conduction time series*). I 24 coefficienti della CTS sono fattori di risposta periodici chiamati appunto *conduction time series factors* (CTSFs). Questa formulazione offre una soluzione al problema del transitorio del trasferimento di calore conduttivo, con serie temporali, periodiche e unidimensionali. Per ogni ora  $\theta$ , il guadagno di calore conduttivo per la superficie  $q_\theta$  è data dalla sommatoria dei fattori CTSFs moltiplicati per il valore  $UA$  e per la differenza di temperatura sulla superficie, come mostrato in (3).

$$q_\theta = \sum_{j=0}^{23} c_j UA (t_{e,\theta-j\delta} - t_{rc}) \quad (3)$$

o

$$q_\theta = c_0 UA (t_{e,\theta} - t_{rc}) + c_1 UA (t_{e,\theta-\delta} - t_{rc}) + c_2 UA (t_{e,\theta-2\delta} - t_{rc}) + \dots + c_{23} UA (t_{e,\theta-23\delta} - t_{rc}) \quad (2)$$

dove

- $q_\theta$  = guadagno di calore conduttivo orario per la superficie,  $W$
- $U$  = coefficiente globale di scambio termico per la superficie,  $W/(m^2K)$
- $A$  = superficie,  $m^2$
- $c_j = j^{imo}$  fattore CTSF
- $t_{e,\theta-j\delta}$  = temperatura aria-sole  $j$  ore prima,  $^\circ C$
- $t_{rc}$  = temperatura dell'aria,  $^\circ C$
- $\theta$  = ora corrente
- $\delta$  = time step (un'ora)

Si noti che la quantità  $UA(t_{e,\theta-j\delta} - t_{rc})$  rappresenta il trasferimento di calore ad ogni passo, sotto l'ipotesi di essere in stati stazionari. In pratica i fattori CTSF possono essere pensati come un adeguamento allo stato stazionario del calcolo del trasferimento di calore. Questi fattori ci dicono come gran parte del calore precedentemente immagazzinato nel muro o nelle coperture viene rilasciato. La figura 5 descrive i CTSF di tre pareti differenti, la prima leggera (in blu), la seconda pesante (in rosso) e la terza intermedia tra le due (in verde). Come si può vedere, i CTSFs per la parete leggera sono molto elevati per le prime ore e quasi zero per le ore successive: relativamente poco calore è immagazzinato in questo muro leggero. D'altra parte, la parete più pesante ha valori minori di CTSFs nelle prime ore ma questi rimangono diversi da zero per molte ore, indicando appunto il ritardo temporale di questa parete (più pesante).

Nelle figure seguenti sono rappresentate le stratigrafie delle murature considerate.

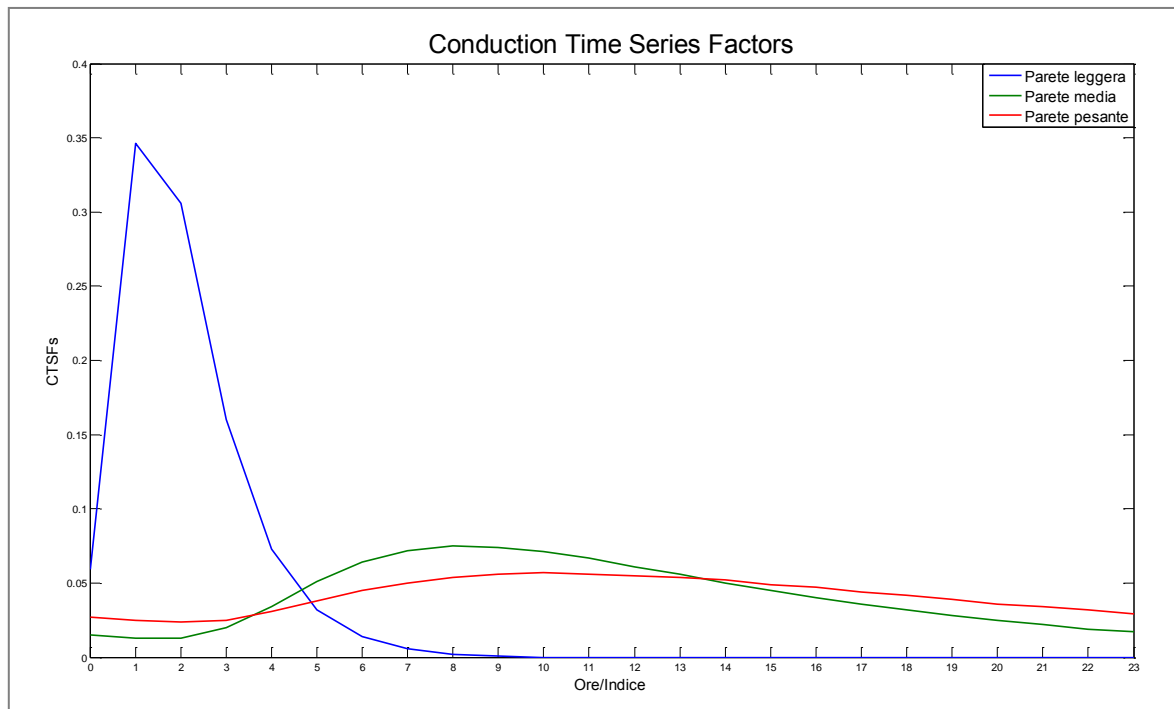


Figura 5: Fattori CTSF per murature da leggere a pesanti



Caratteristiche strutturali parete esterna ACCIAIO									
	s	λ	p	cs	massa frostata	resistenza	hi	he	trasmissione
	(m)	(W/mK)	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> )	(m <sup>2</sup> /W)	(m <sup>2</sup> /W)	(m <sup>2</sup> /W)	(W/m <sup>2</sup> ·K)
INTONACO	0.02	0.7	1400	1.09	28	0.03	7.69		
ISOLANTE	0.04	0.12	450	0.92	18	0.33			
GUAINA	0.012	0.7	2100	1.47	25.2	0.02			
ACCIAIO	0.001	52	7800	1.99	7.8	0.00002			
<b>TOTALE</b>	<b>0.073</b>				<b>79</b>	<b>0.549</b>		<b>26</b>	<b>1.821</b>

Figura 6: Murature considerate nel calcolo dei fattori CTSF (parete leggera)



Caratteristiche strutturali parete esterna <b>CARTONGESSO</b>									
	s	λ	ρ	cs	massa frontale	resistenza	hi	he	trasmissione
	(m)	(W/mK)	(Kg/m³)	(kJ/kg K)	(Kg/m²)	(m²K/W)	(m²K/W)	(m²K/W)	(W/m²K)
INTONACO	0.02	0.7	1400	1.09	28	0.03	7.69		
CARTONGESSO	0.1	0.21	900	0.837	90	0.48			
ISOLANTE	0.04	0.12	450	0.92	18	0.33			
CARTONGESSO	0.1	0.21	900	0.837	90	0.48			
INTONACO	0.02	0.7	1400	1.09	28	0.03			
<b>TOTALE</b>	<b>0.28</b>				<b>254</b>	<b>1.513</b>		25	<b>0.661</b>

Figura 7: Murature considerate nel calcolo dei fattori CTSF (parete media)



Caratteristiche strutturali parete esterna <b>MATTONI</b>									
	s	λ	ρ	cs	massa frontale	resistenza	hi	he	trasmissione
	(m)	(W/mK)	(Kg/m³)	(kJ/kg K)	(Kg/m²)	(m²K/W)	(m²K/W)	(m²K/W)	(W/m²K)
INTONACO	0.02	0.7	1400	1.09	28	0.03	7.69		
MATTONI PIENI	0.12	0.90	2000	0.84	240	0.13			
CAMERA D'ARIA	0.1	0	1.03	1.00	0.103	0.180			
ISOLANTE	0.06	0.12	450	0.92	27	0.50			
INTONACO	0.02	0.7	1400	1.09	28	0.03			
MATTONI FACCIA A VISTA	0.12	0.90	2000	0.84	240	0.13			
<b>TOTALE</b>	<b>0.44</b>				<b>563.103</b>	<b>1.174</b>		25	<b>0.852</b>

Figura 8: Murature considerate nel calcolo dei fattori CTSF (parete pesante)

#### 4.3.4 Guadagni parti vetrate

Le parti vetrate generano guadagni di calore attraverso la radiazione solare trasmessa, la radiazione solare assorbita, e la conduzione. La frazione della radiazione solare assorbita che va verso l'interno e la conduzione sono correlate, ma ai fini del risultato calcolarle separatamente è una approssimazione che può ritenersi giustificabile.

Un problema nel calcolo dei guadagni termici delle parti vetrate è la mancanza di dati disponibili. Considerando che le varie tipologie di vetro si caratterizzano attraverso diverse variabili, come i valori dei coefficienti di guadagno di calore solare (SHGCs - *solar heat gain coefficients*) e le trasmittanze, in molte situazioni sarà difficile se non impossibile, scegliere la finestra corretta.

Alcune approssimazioni ci permettono di fare affidamento esclusivamente sui dati che vengono effettivamente forniti dai produttori delle finestre, tra cui:

- Numero di strati.
- Descrizioni del tipo vetro (colorazione, rivestimento basso-emissivo, ecc...).
- Trasmittanza (U-factor).
- SHGCs per angolo d'incidenza normale.
- Trasmittanza visiva.

Una volta che è stata determinata la tipologia di vetro sono definiti i coefficienti SHGCs dipendenti dall'angolo di incidenza. Questi valori, insieme con la Trasmittanza (U-factor) specificata dal produttore, sono utilizzati per calcolare i guadagni dovuti alle parti finestrate. Nel modello, questa fase è resa trasparente all'utente dall'interfaccia che ha in memoria i dati di diverse tipologie di finestre esistenti.

Il guadagno di calore per conduzione è calcolato separatamente dai guadagni di calore solare trasmesso e assorbito.

Dato che la massa termica del vetro è molto bassa, anche per le finestre la conduzione può approssimarsi con stati stazionari. Di conseguenza, per ogni ora, il guadagno di conduzione di calore può essere calcolato come:

$$q_{\theta} = UA(t_{0,\theta} - t_{rc})$$

dove

- $q_{\theta}$  = guadagno di calore conduttivo orario per la finestra,  $W$ ;
- $U$  = coefficiente globale di scambio termico per la finestra, come specificato dal produttore della finestra,  $W/(m^2 K)$ ;
- $A$  = area della finestra, incluso il telaio,  $m^2$ ;
- $t_{0,\theta}$  = temperatura dell'aria esterna,  $^{\circ}C$ ;
- $t_{rc}$  = temperatura dell'aria della zona presunta costante,  $^{\circ}C$ ;
- $\theta$  = ora attuale.

I guadagni di calore solare trasmesso e assorbito sono calcolati per ogni ora con la seguente procedura:

1. Si calcola l'angolo di incidenza, l'angolo di azimut della superficie, l'irraggiamento diretto incidente (beam), e diffuso sulla finestra.
2. Se c'è ombreggiamento esterno, determinare l'area soleggiata e quella ombreggiata.
3. Senza ombreggiamento interno, l'irraggiamento diretto, diffuso, e i guadagni di calore solare trasmesso e assorbito, sono dati da:

$$q_{SHG,D} = E_D A_{sunlit} SHGC(\theta)$$

$$q_{SHG,d} = (E_d + E_r) A \cdot SHGC_{diffuse}$$

$$q_{SHG} = q_{SHG,D} + q_{SHG,d}$$

dove

- $q_{SHG,D}$  = guadagno di calore solare diretto (beam),  $W/m^2$
- $q_{SHG,d}$  = guadagno di calore solare diffuso,  $W/m^2$
- $q_{SHG}$  = guadagno di calore solare totale,  $W/m^2$
- $E_D$  = radiazione diretta (beam),  $W/m^2$
- $E_d$  = radiazione diffusa dal cielo,  $W/m^2$
- $E_r$  = radiazione diffusa riflessa,  $W/m^2$
- $SHGC(\theta)$  = SHGC dipendente dall'angolo di
- $SHGC_{diffuse}$  = SHGC per irraggiamento diffuso, determinato moltiplicando SHGC normale del costruttore per il fattore di correzione per la diffusa
- $A_{sunlit}$  = superficie della finestra non ombreggiata,  $m^2$
- $A$  = la superficie totale della finestra, compreso il telaio,  $m^2$

Se non c'è ombreggiamento interno, il calcolo del guadagno per finestra è completo.

4. Con ombreggiamento interno, come veneziane o tende, gli effetti sul guadagno di calore solare possono essere stimati con i coefficienti di attenuazione interna (IACs). Quindi in questo caso i guadagni di calore solare, determinati con le precedenti equazioni, sono moltiplicati per i coefficienti IAC per determinare i valori corretti.
- 5.

#### 4.3.5 Guadagni interni

Come con qualsiasi procedura di calcolo del carico, i guadagni termici interni dovuti agli occupanti, all'illuminazione e alle apparecchiature devono essere stimati per ogni ora. Tali dati vengono forniti attraverso *schedule* che caratterizza gli orari di assenza/presenza delle persone, gli orari di accensione delle luci e delle apparecchiature e ciò viene determinato sia per i giorni festivi che feriali.

#### 4.3.6 Guadagni per ventilazione ed infiltrazione

Il carico termico dovuto all'effetto dei ricambi d'aria per ventilazione è valutato attraverso la portata d'aria corrispondente al numero di ricambi orari fissato in funzione della destinazione d'uso dell'edificio e dell'attività degli occupanti; il calore specifico a pressione costante dell'aria; la densità della stessa e la differenza tra la temperatura interna ed esterna dell'aria.

#### 4.3.7 Convezione e Radiazione

Il calcolo del guadagno di calore convettivo è reso complesso dallo scambio radiativo tra superfici, mobili e pareti divisorie. Infatti il trasferimento di calore radiativo introduce una dipendenza dal tempo nel processo che non è facilmente quantificabile, funzione delle temperature superficiali e dell'emissività. In altre parole si deve determinare la componente dissipativa e le sorgenti per lo scambio radiativo. Tipicamente tali procedure si basano su delle stime per separare parte radiativa e convettiva.

La procedura *radiant time series* semplifica il bilancio termico, dividendo tutti i guadagni di calore in parti radiativa e convettiva, invece di risolvere contemporaneamente ed istantaneamente la convezione e il trasferimento di calore radiativo per ogni superficie. Nella Tabella in seguente sono descritte le raccomandazioni dell'ASHRAE per la divisione di ciascuna delle componenti del guadagno di calore.

Recommended Radiative/Convective Splits for Internal Heat Gains			
Heat Gain Type	Recommended Radiative Fraction	Recommended Convective Fraction	Comments
Occupants, typical office conditions	0.6	0.4	See Table 1 for other conditions.
Equipment	0.1 to 0.8	0.9 to 0.2	See Tables 6 to 12 for details of equipment heat gain and recommended radiative/convective splits for motors, cooking appliances, laboratory equipment, medical equipment, office equipment, etc. Varies; see Table 3.
Office, with fan	0.10	0.9	
Without fan	0.3	0.7	
Lighting			
Conduction heat gain			
Through walls and floors	0.46	0.54	
Through roof	0.60	0.40	
Through windows	0.33 (SHGC > 0.5) 0.46 (SHGC < 0.5)	0.67 (SHGC > 0.5) 0.54 (SHGC < 0.5)	
Solar heat gain through fenestration			
Without interior shading	1.0	0.0	Varies; see Tables 13A to 13G in Chapter 15.
With interior shading			
Infiltration	0.0	1.0	

Source: Nigusse (2007).

Figura 9: Raccomandazioni dell'ASHRAE per la divisione in parti radiativa/convettiva

Secondo la procedura *RTS*, i guadagni di calore sono prima suddivisi in parti radiativa e convettiva, poi convertiti in carichi di raffrescamento.

Per quanto riguarda la parte radiativa possiamo affermare che una porzione di radiazione è assorbita dalla massa termica della zona e poi trasmessa per convezione nello spazio. Questo processo crea un effetto di sfasamento e smorzamento.

La parte convettiva, al contrario, si presume diventi immediatamente carico di raffrescamento e, di conseguenza, va solo sommata per dare il suo contributo al carico orario.

#### 4.3.8 Conversione delle parti radiative dei guadagni di calore in carichi di raffrescamento

Il metodo *RTSM* converte la parte radiativa dei guadagni di calore in carichi di raffrescamento orari utilizzando i fattori di tempo radiativi (*RTFS - radiant time factors*). Il *Radiant Time Series* calcola il carico di raffrescamento per l'ora corrente sulla base dei guadagni termici presenti e passati. Per una particolare zona fornisce una risposta, dipendente dal tempo, di un impulso di energia radiativa. La serie mostra la parte di impulso radiativo, che è trasmessa per convezione all'aria della zona per ogni ora. Così,  $r_0$  rappresenta la frazione dell'impulso radiativo trasmessa per convezione nell'ora attuale,  $r_1$  nell'ora precedente, e così via. E' quindi tale serie generata (*radiant time series*) che viene utilizzata per convertire la parte dei guadagni di calore radiativi in carichi di raffrescamento orari:

$$Q_{\theta} = r_0 q_{\theta} + r_1 q_{\theta-\delta} + r_2 q_{\theta-2\delta} + \dots + r_{23} q_{\theta-23\delta}$$

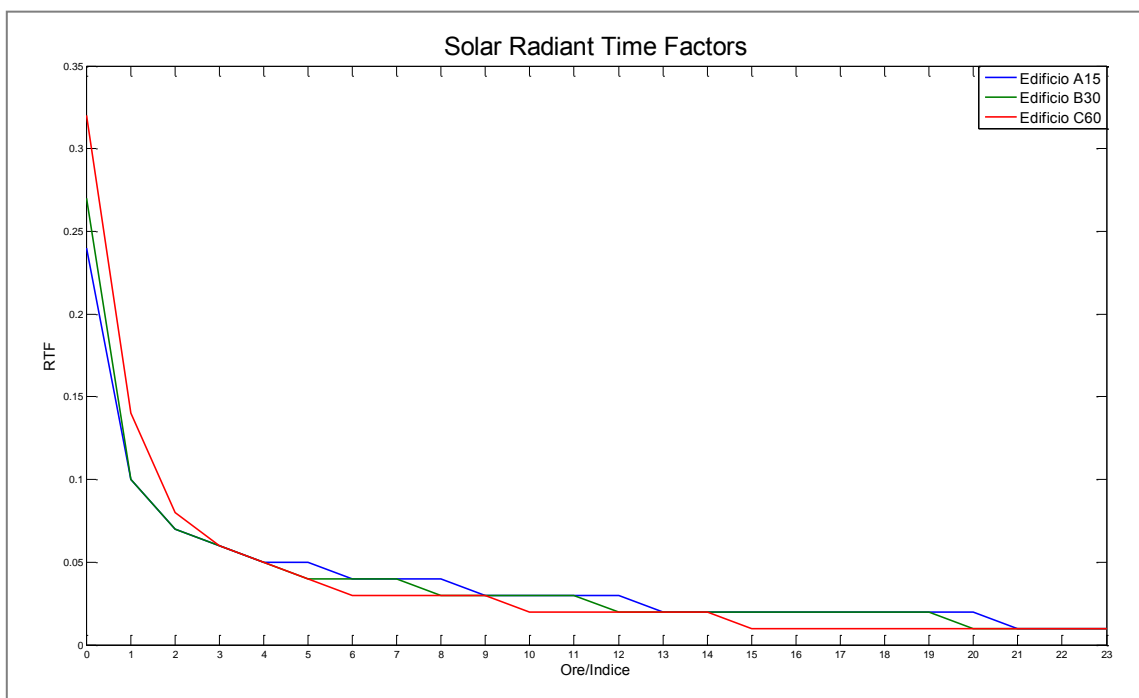
dove

- $Q_{\theta}$  = carico di raffreddamento ( $Q$ ) per l'ora corrente,  $\theta$
- $q_{\theta}$  = guadagno di calore per l'ora corrente
- $q_{\theta-n\delta}$  = guadagno di calore  $n$  ore prima
- $r_0, r_1, ecc \dots$  = RTFS

I fattori RTFS sono unici per ogni zona e dipendono della geometria della stessa, dall'involucro dell'edificio, dalle partizioni interne e dalla massa termica. Inoltre, gli RTFS dipendono anche dalla distribuzione dell'energia radiativa entrante nella zona: in molti casi, la radiazione solare diretta trasmessa attraverso le finestre in primo luogo colpisce il pavimento, mentre la radiazione emessa da occupanti e apparecchiature, tenderà ad essere distribuita a tutte le superfici nella zona.

Nel caso in cui il pavimento sia termicamente massivo mentre le pareti e il soffitto siano leggeri, si può avere una differenza significativa nella risposta termica tra radiazioni solare e non-solare. Come conseguenza debbono essere utilizzati due diversi gruppi di fattori RTFs. Un set che si applica alla radiazione solare trasmessa e un altro set che si applica alle radiazioni provenienti da guadagni di calore interno e da superfici dell'involucro dell'edificio. Il primo set è chiamato *solar*, mentre il secondo *nonsolar*. I valori di questi set sono ottenuti tramite tabelle (viene selezionata la zona che più si avvicina a quelle tabellate) oppure si possono utilizzare programmi specifici.

Lo scopo principale dei RTFs è quello di quantificare la risposta termica della zona. In Figura 10 ad esempio sono riportati i fattori RTFs applicabili per determinare il guadagno di calore per alcuni degli edifici usati per testare il software. Le curve rappresentano la risposta degli edifici: più alto è il valore iniziale, più veloce è la risposta e più il carico di raffrescamento segue i guadagni di calore. In generale, la zona risponde più lentamente quando la massa termica è maggiore.



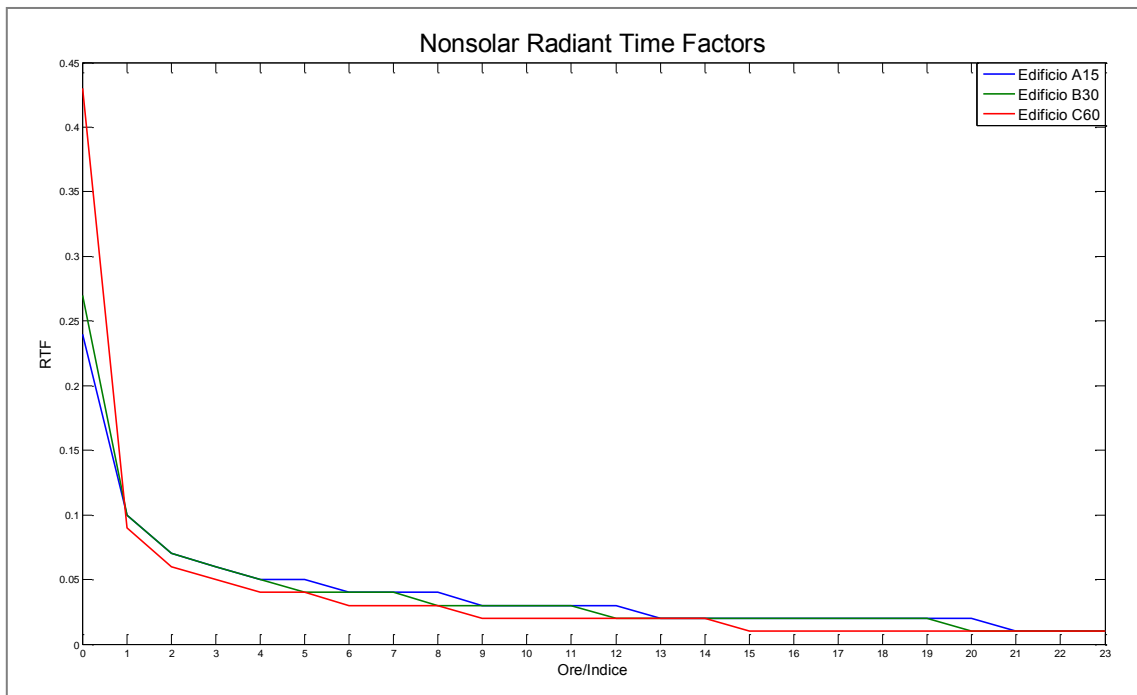


Figura 10: Radiant Time factor solar e nonsolar

#### 4.3.9 Risultati

Per verificare la validità degli algoritmi implementati sono state effettuate una serie di simulazioni comparative con altri due software, ENERGY PLUS e TRNSYS, fra i più quotati *tool* di simulazione dinamica, su tre edifici “benchmark”, caratterizzati dalla stessa tipologia di involucro e da differenti caratteristiche geometriche.

Gli edifici, denominati A, B e C hanno le seguenti caratteristiche:

- rapporto Superficie/Volume pari, rispettivamente, a 0,28; 0,4; 0,5;
- percentuale di superfici finestrate (rispetto alla superficie totale di ciascuna parete) del 15%, 30%, 60%.

Sono state, inoltre, assunte le seguenti ipotesi:

- edificio con un'unica zona;
- dati meteo (temperatura ambiente, irraggiamento sulle superfici): file meteo “epw” per la località di Roma (Ciampino)<sup>2</sup>;
- guadagni interni (persone, apparecchi elettrici e luci) e carico latente nulli;
- *Timestep* simulazione pari a 1h.

Nella figura seguente sono riportati i dati identificativi degli edifici:

<sup>2</sup> I file epw sono reperibili su: [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather\\_data.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data.cfm)

		edificio "A"	edificio "B"	edificio "C"
<b>DATI EDIFICIO</b>				
% finestratura		15%	30%	60%
Altezza (h)	m	10	10	20
Lunghezza (L)	m	10	10	10
Profondità (P)	m	10	20	20
numero piani	n	3	3	6
Trasmittanza pareti	W/m <sup>2</sup> K	0.326	0.326	0.326
Massa Frontale pareti	kg/m <sup>2</sup>	379	379	379
Trasmittanza infissi	W/m <sup>2</sup> K	2.29	2.29	2.29
<b>PARETI NORD/SUD</b>				
Superficie Totale	m <sup>2</sup>	100	100	200
Superficie Opaca	m <sup>2</sup>	85	70	80
Superficie Trasparente	m <sup>2</sup>	15	30	120
Superficie Vetro	m <sup>2</sup>	10.65	21.3	85.2
<b>PARETI EST/OVEST</b>				
Superficie Totale	m <sup>2</sup>	100	200	400
Superficie Opaca	m <sup>2</sup>	85	140	160
Superficie Trasparente	m <sup>2</sup>	15	60	240
Superficie Vetro	m <sup>2</sup>	10.65	42.6	170.4
<b>SOLAIO DI CALPESTIO</b>				
Superficie Totale	m <sup>2</sup>	100	200	200
Massa Frontale	kg/m <sup>2</sup>	551.8	551.8	551.8
Trasmittanza	W/m <sup>2</sup> K	0.362	0.362	0.362
<b>SOLAIO DI COPERTURA</b>				
Superficie Totale	m <sup>2</sup>	100	200	200
Massa Frontale	kg/m <sup>2</sup>	556.2	556.2	556.2
Trasmittanza	W/m <sup>2</sup> K	0.322	0.322	0.322
<b>S/V</b>		<b>0.6</b>	<b>0.5</b>	<b>0.4</b>

Figura 11: Caratteristiche edifici benchmark

I confronti hanno riguardato la temperatura interna media (annuale), i fabbisogni termici invernale ed estivo e sono visibili negli istogrammi di seguito riportati.

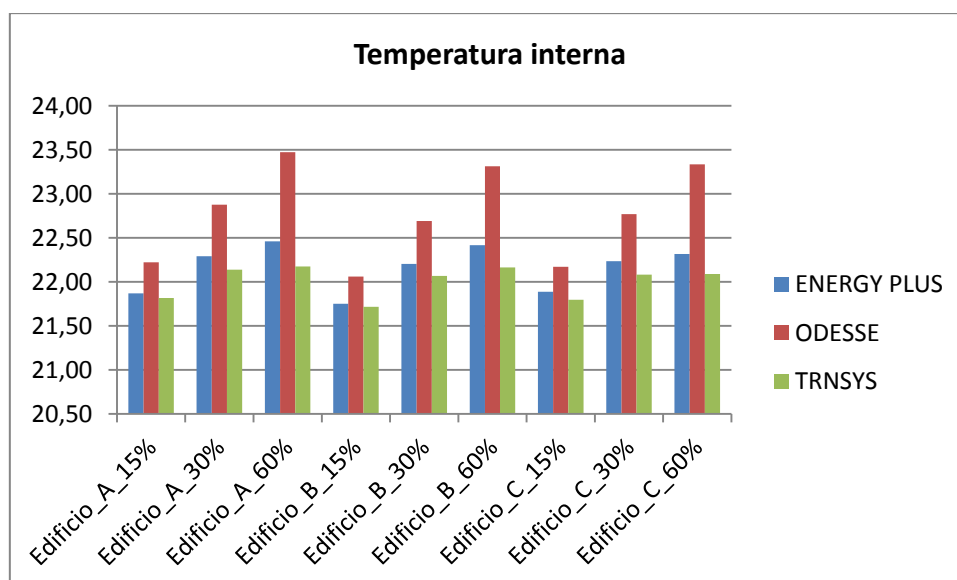


Figura 12 - Temperatura interna [°C]

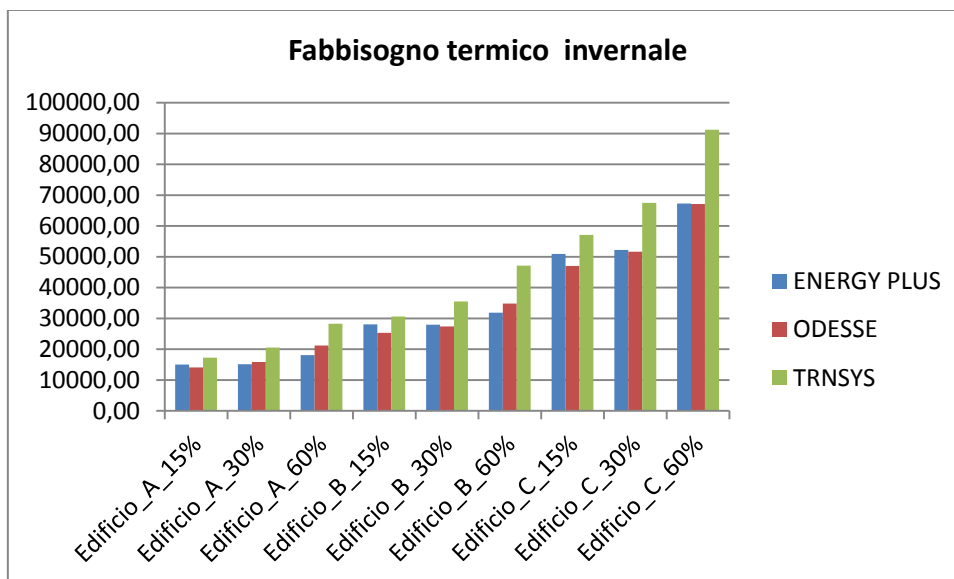


Figura 13 - Fabbisogno termico invernale [kWh/a]

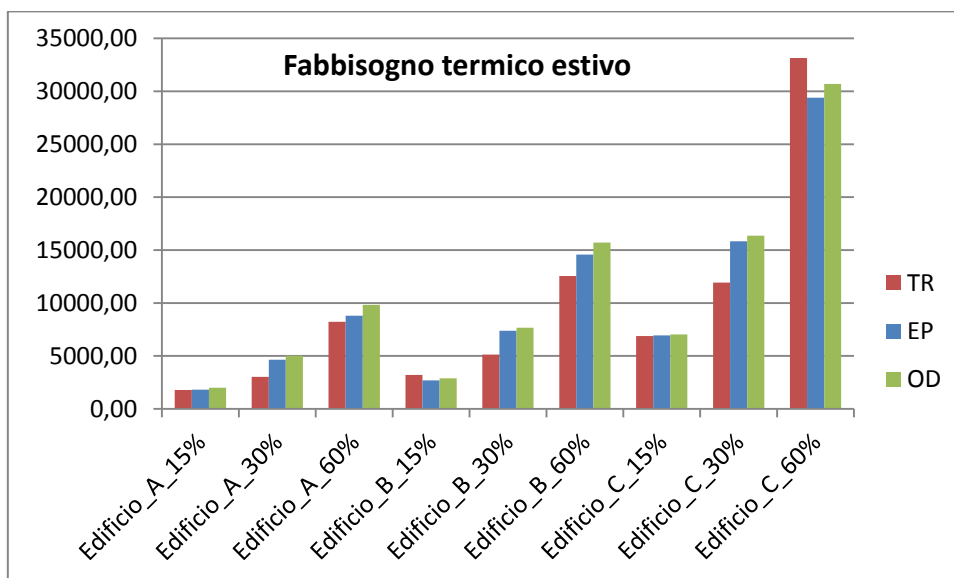


Figura 14 - Fabbisogno termico estivo [kWh/a]

La differenza fra il fabbisogno energetico annuale determinato con ODESSE e con gli altri due software varia a seconda della percentuale di superficie finestrata, passando da una sottostima per basse percentuali ad una sovrastima per valori alti.

L'errore medio sugli edifici "A", "B" e "C", calcolato come:

$$1 - \frac{E_{loadsw}}{E_{loadOD}}$$

con  $E_{loadsw}$ : fabbisogno energetico,  
sw: Energy Plus o Trnsys o ODESSE

è circa il 10% rispetto a Energy Plus e il 15% rispetto a Trnsys; per depurare il dato dalle compensazioni dovute al segno dell'errore si è calcolato anche il valore assoluto dell'errore delle singole simulazioni, ottenendo un errore rispetto a Energy Plus del 20% e del 24% rispetto a Trnsys.

Si rimanda al report [2] per la descrizione dettagliata dei confronti effettuati e dei risultati ottenuti.

#### 4.4 Criticità

La determinazione dei coefficienti CTSf e RTSf è stata effettuata con i fogli di calcolo forniti come allegato del Foundmental Handbook dell’Ashrae e si basa sulle caratteristiche dimensionali e termofisiche dei singoli materiali che compongono le strutture edilizie.

Ad ogni materiale è associato un codice identificativo (Figura 15) che viene poi richiamato ed utilizzato nei fogli in cui vengono lanciate le macro per il calcolo dei coefficienti (Figura 16 e **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

Original	ID	Description	Thickness (mm)	Conductivity (W/m <sup>2</sup> K)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Specific Heat (kJ/kg K)	Resistance (m <sup>2</sup> K/W)
119	F24	Bariera al vapore (154)	60.0	0.05	33.0	2.210	1.250
120	F25	Forato (107) 12cm	120.0	0.59	1600.0	0.840	0.203
121	F26	Intonaco esterno (97)	20.0	0.70	1400.0	1.090	0.029
122	F27	Piastrella porcellana (237)	20.0	1.00	2300.0	0.800	0.020
123	F28	Allettamento cls (21)	40.0	1.48	2200.0	0.880	0.027
124	F29	Malta cementizia di sottofondo (99)	40.0	1.40	2000.0	0.670	0.029
125	F30	Isolante (174)	70.0	0.03	40.0	1.600	2.188
126	F31	isolante (159)	70.0	0.40	30.0	1.340	0.175
127	F32	Intonaco (97)	20.0	0.70	1400.0	1.090	0.029
128	F33	Solaio laterocemento (156)	220.0	0.69	1800.0	0.880	0.320
129	F34	Isolante (174)	80.0	0.03	40.0	1.600	2.500
130	F35	Malta cementizia di sottofondo (99)	60.0	1.40	2000.0	0.670	0.043
131	F36	Allettamento cls (21)	30.0	1.48	2200.0	0.880	0.020
132	F37	pavimento cls (22)	30.0	1.91	2400.0	0.920	0.016
133	F38	hi parete	0	0	0	0	0.130
134	F39	he parete	0	0	0	0	0.040
135	F40	hi calpestio	0	0	0	0	0.170
136	F41	hi tetto	0	0	0	0	0.100
137	F42	he tetto	0	0	0	0	0.040
138	F43	ARIA CTS	100.0	1.73	0.0	0.000	0.058
139	F44	ARIA UNI	100.0	0.00	0.0	0.000	0.180
140	F45	Isolante (174)	60.0	0.03	40.0	1.600	1.875
141	F46	Isolante (174)	40.0	0.03	40.0	1.600	1.250
142	F47	MATTONI PIENI faccia a vista (109)	120	0.9	2000	0.84	0.133
143	F48	Intonaco interno (97)	15.0	0.70	1400.0	1.090	0.021
144	F49	Isolante (67)	60.0	0.05	100.0	0.800	1.132
145	F50	Isolante (67)	40.0	0.05	100.0	0.800	0.755
146	F51	Isolante (139)	60.0	0.12	450.0	0.920	0.500
147	F52	Isolante (139)	40.0	0.12	450.0	0.920	0.333
148	F53	Isolante (141)	60.0	0.07	100.0	1.340	0.909
149	F54	Isolante (141)	40.0	0.07	100.0	1.340	0.606
150	F55	ACQUAPANEL	12.0	0.35	1250.0	0.837	0.034
151	F56	PANNELLI FIBRA VETRO	140.0	0.04	20.0	0.837	3.256
152	F57	LANA DI LEGNO	120.0	0.07	400.0	2.100	1.846
153	F58	CARTONGESSO LASTRE	12.0	0.21	900.0	0.837	0.057
154	F59	CARTONGESSO LASTRE	12.0	0.21	900.0	0.837	0.057
155	F60	CARTONGESSO LASTRE	100.0	0.21	900.0	0.837	0.476
156	F61	ACCIAIO	1.0	52.00	7800.0	1.990	0.000
157	F62	GUAINA	12.0	0.70	2100.0	1.470	0.017
158	F63	Forato (107) 8cm	80.0	0.59	1600.0	0.840	0.136
159	F64	Allettamento cls (57)	30.0	0.58	1400.0	0.880	0.052
160	F65	Isolante (175)	40.0	0.03	50.0	1.600	1.250
161	F66	Vespaio - Pietrame (147)	15.0	0.70	1400.0	1.090	0.021
162	F67	Pavimento cls (21)	20.0	1.48	2200.0	0.880	0.014
163	F68	Allettamento cls (57)	20.0	0.58	1400.0	0.880	0.034

Figura 15 - Codici identificativi e caratteristiche termofisiche dei materiali

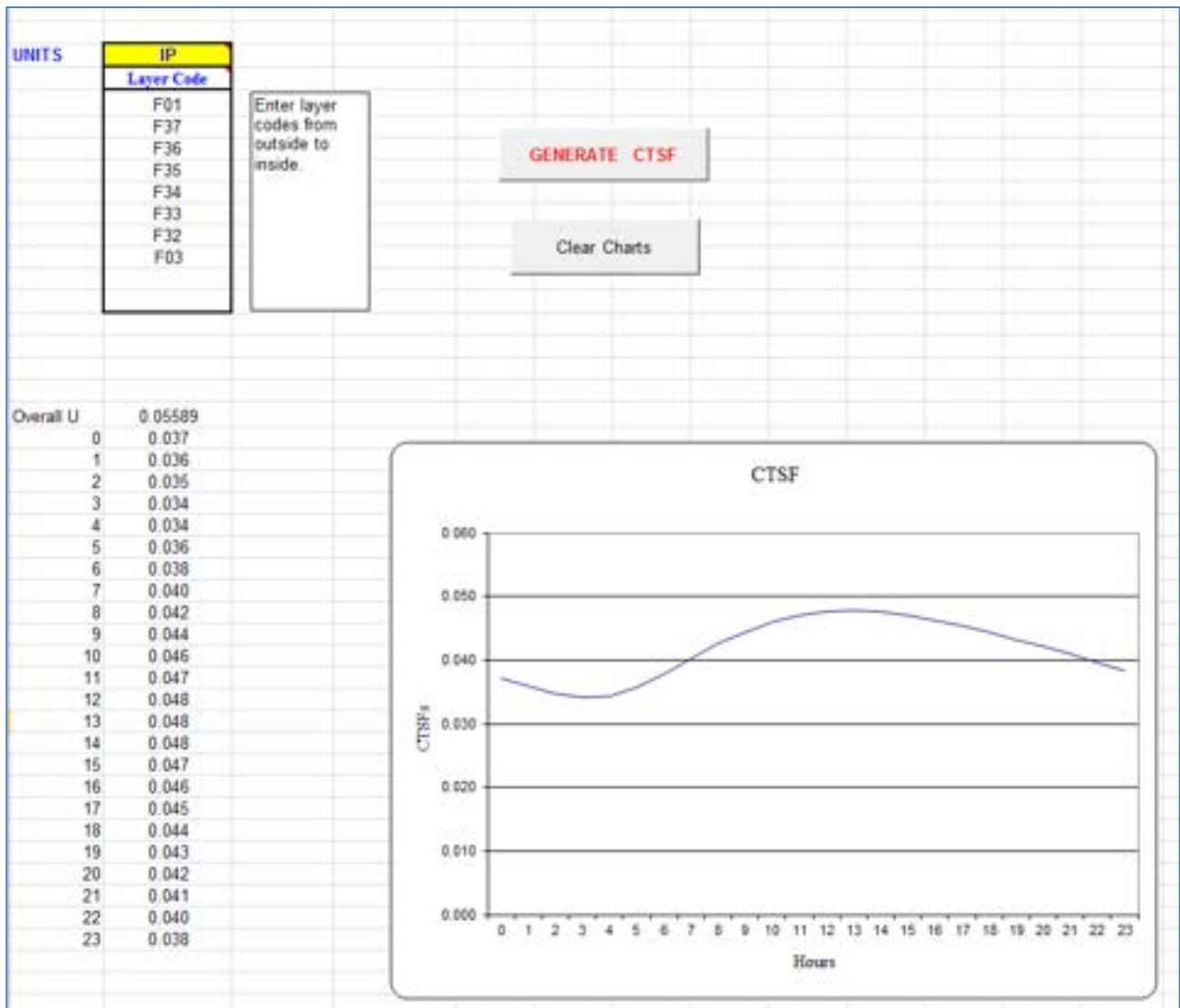


Figura 16 - Foglio di calcolo per i CTSf

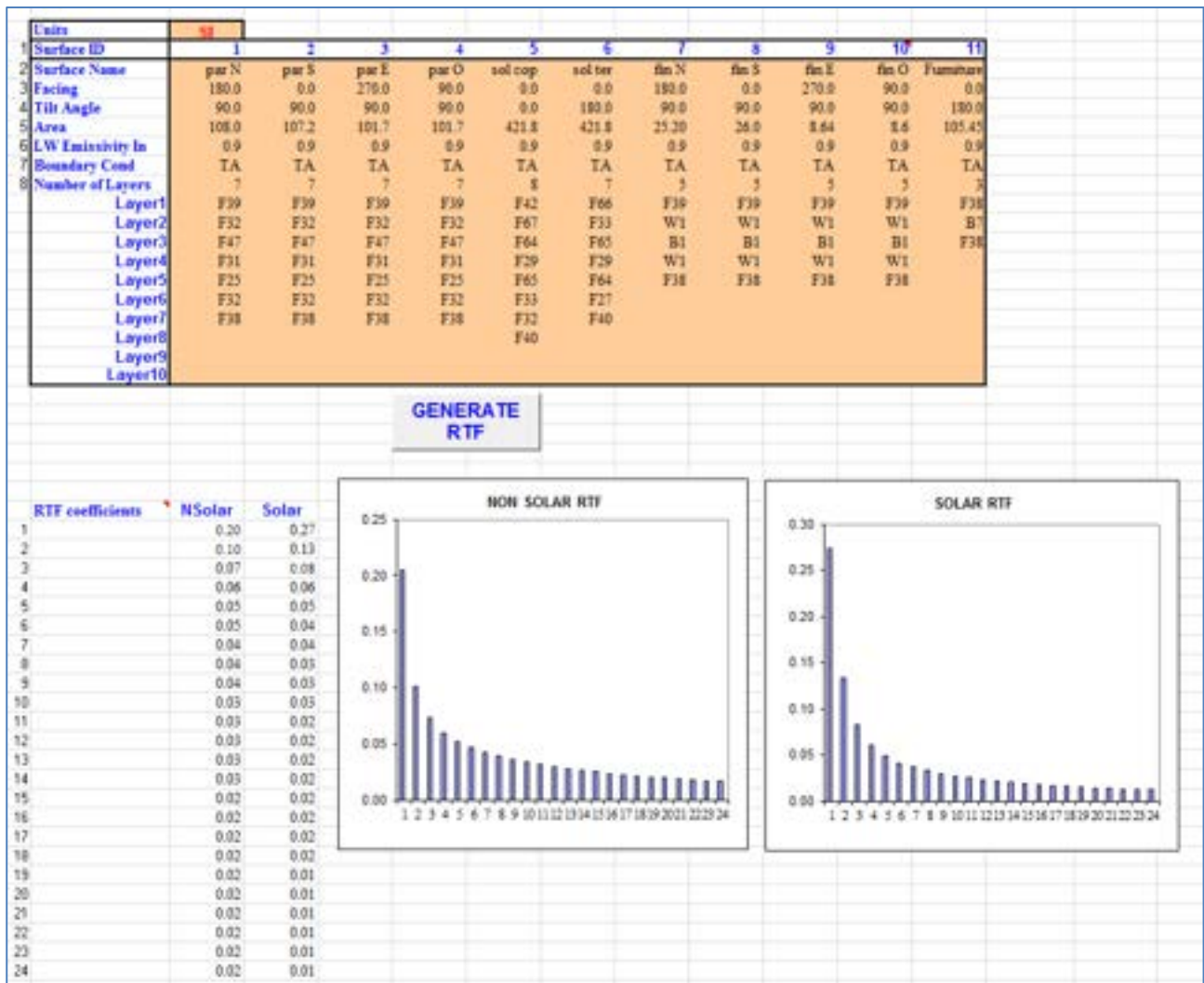


Figura 17 - Foglio di calcolo per i RTSf

Il calcolo dei CTSf è abbastanza semplice e non comporta la richiesta di informazioni aggiuntive a quelle normalmente richieste dai codici di calcolo dinamici, relative alla ricostruzione delle strutture opache; inoltre la procedura è facilmente automatizzabile e trasparente per l'utente.

Viceversa la preparazione del foglio per il calcolo degli RTSf si rivela molto complessa in quanto richiede informazioni che l'utente medio non dispone e di non facile reperibilità, quale l'emissività delle strutture opache e trasparenti; richiede altresì un elevato dettaglio nell'inserimento degli infissi poiché è necessario ricostruire i singoli componenti che lo costituiscono; se per esempio si deve inserire un vetro doppio bisogna immettere le caratteristiche termofisiche del vetro esterno, di quello interno, del gas presente all'interno dei vetri e del telaio.

A queste difficoltà va aggiunta la non semplice comprensione del significato fisico dei coefficienti RTSf che rende non immediata la verifica sull'esattezza del calcolo degli stessi coefficienti, fondamentale per l'importanza che rivestono nella determinazione del fabbisogno termico estivo.

## 5 Conclusioni

Da quanto descritto nei paragrafi precedenti e dalle analisi comparative effettuate con Trnsys ed Energy Plus (software di riferimento per il calcolo dinamico delle prestazioni energetiche degli edifici), si può affermare che il software O.DES.S.E. e, quindi, il metodo RTS sono eleggibili a metodologia per la determinazione delle prestazioni degli edifici necessari per la certificazione energetica degli stessi. In particolare, i confronti effettuati hanno evidenziato come il metodo sviluppato dall'Ashrae sia perfettamente adattabile alle esigenze normative e costruttive italiane; infatti nello sviluppo del codice O.DES.S.E. sono state assunte le procedure di calcolo (trasmittanza, caratteristiche termofisiche, capacità termica, etc.) previste dalla normativa vigente senza pregiudicare l'affidabilità del software.

Il grosso limite di tale metodo risiede nella difficoltà di calcolo dei coefficienti RTSf e (meno) CTSf che rendono l'intera procedura non idonea a rappresentare una metodologia di calcolo semplificata. Inoltre il metodo RTS, a parere degli scriventi, richiede una conoscenza dei fenomeni dinamici che governano lo scambio termico di un edificio non comune nell'utente-tecnico medio.

Si può, pertanto, concludere che alla luce dei risultati emersi dall'attività svolta dall'Università di Catania sull'implementazione della metodologia del calcolo orario prevista dalla UNI EN 13790 (metodo R5C1) [4] quest'ultima è reputata più idonea alle esigenze di semplicità e precisione richieste alla metodologia di calcolo per la certificazione dinamica degli edifici.

## 6 Riferimenti bibliografici

1. Report RdS/2009/188, Sviluppo dell'ambiente di progettazione Optimal DESign for Smart Energy - ODESSE
2. Report RdS/2010/251, ODESSE: simulazione dinamica del sistema edificio-impianti per la climatizzazione estiva
3. Report RdS/2011/178, Integrazione di layout impiantistici nella piattaforma di simulazione ODESSE (Optimal DESignfor Smart Energy)
4. Report RSE/PAR2013/119.