



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO



Ricerca di Sistema elettrico

Approfondimento teorico del modello di calcolo orario semplificato (UNI EN ISO 52016-1:2018) e applicazione al settore residenziale

V. Corrado, I. Ballarini, G. De Luca, M.P. Tootkaboni



Report RdS/PTR2019/035

APPROFONDIMENTO TEORICO DEL MODELLO DI CALCOLO ORARIO SEMPLIFICATO (UNI EN ISO 52016-1:2018) E APPLICAZIONE AL SETTORE RESIDENZIALE

V. Corrado, I. Ballarini, G. De Luca, M.P. Tootkaboni (Politecnico di Torino – Dipartimento Energia)

Con il contributo di: E. Fabrizio (Politecnico di Torino – Dipartimento Energia)

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto: *1.5 - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti*

Work package: *1 - Edifici ad alta efficienza energetica*

Linea di attività: *LA1.9 - Approfondimento teorico del modello di calcolo orario semplificato (UNI EN 52016-1:2018) e applicazione al settore residenziale*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work package: Domenico Iatauro, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *"Applicazioni del modello di calcolo orario semplificato (UNI EN 52016-1:2018) e aggiornamento della metodologia di calcolo dei livelli ottimali di prestazione energetica in funzione dei costi"*

Responsabile scientifico ENEA: Paolo Signoretti

Responsabile scientifico Politecnico di Torino – Dipartimento Energia: Vincenzo Corrado

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
1.1 STATO DELL'ARTE NAZIONALE E INTERNAZIONALE.....	5
1.2 OBIETTIVI SCIENTIFICI E TECNOLOGICI ATTESI	6
1.3 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	6
2 IL MODELLO DI CALCOLO	8
2.1 IPOTESI GENERALI DI CALCOLO, CONDIZIONI AL CONTO RNO E SEMPLIFICAZIONI DI MODELLAZIONE.....	8
2.1.1 <i>Requisiti della valutazione di prestazione energetica</i>	8
2.1.2 <i>Ipotesi generali e condizioni al contorno</i>	8
2.1.3 <i>Bilancio di energia termica e di vapore sull'aria</i>	9
2.2 IL METODO DI CALCOLO ORARIO DELLA UNI EN ISO 52016-1	13
2.2.1 <i>Ipotesi di calcolo</i>	14
2.2.2 <i>Procedura di calcolo</i>	14
2.2.3 <i>Bilancio di energia di una zona termica</i>	15
2.2.4 <i>Modalità di discretizzazione degli elementi edilizi in nodi (modello RC)</i>	16
3 IL CASO STUDIO.....	19
3.1 DESCRIZIONE DELL'EDIFICIO.....	19
3.1.1 <i>Informazioni generali e contesto esterno</i>	19
3.1.2 <i>Descrizione del fabbricato</i>	21
3.1.3 <i>Descrizione dell'impianto</i>	22
3.2 ASSUNZIONI DI CALCOLO E CONDIZIONI AL CONTO RNO PER LE SIMULAZIONI.....	23
3.2.1 <i>Dati climatici</i>	23
3.2.2 <i>Zonizzazione</i>	24
3.2.3 <i>Condizioni al contorno</i>	25
3.2.4 <i>Profili di utenza</i>	25
3.2.5 <i>Semplificazioni</i>	28
3.3 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI	29
4 LINEE GUIDA PER L'APPLICAZIONE DELLA SIMULAZIONE TERMO ENERGETICA IN AMBITO NORMATIVO	36
4.1 REPERIMENTO DEI DATI DI INPUT	36
4.2 SPECIFICHE MODALITÀ DI MODELLAZIONE.....	37
5 CONCLUSIONI.....	38
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	39
7 NOMENCLATURA	41
APPENDICE.....	42

Sommario

La ricerca, in corso di svolgimento e riferita alle tre annualità, è volta ad analizzare l'applicabilità del modello di calcolo orario semplificato del fabbisogno di energia degli edifici introdotto dalla UNI EN ISO 52016-1:2018 in un contesto legale, ovvero per la verifica dei requisiti energetici degli edifici e per la certificazione energetica.

L'attività prevede sia una fase di approfondimento teorico sul modello orario della UNI EN ISO 52016-1, sia l'applicazione ad alcuni casi studio, di diversa categoria d'uso, e analizzati in diversi contesti climatici.

In aggiunta, il modello di calcolo orario della UNI EN ISO 52016-1 verrà applicato, nella terza annualità, ai fini dello sviluppo e l'aggiornamento della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi.

L'attività del primo anno, oggetto del presente rapporto, è finalizzata all'approfondimento teorico del modello di calcolo orario semplificato del fabbisogno termico degli edifici introdotto dalla norma tecnica UNI EN ISO 52016-1:2018. È stata sviluppata l'analisi e la catalogazione delle ipotesi generali di calcolo, delle condizioni al contorno e delle equazioni dei modelli di calcolo della prestazione termo-energetica degli edifici, che caratterizzano il modello di calcolo orario della UNI EN ISO 52016-1. Sono stati realizzati fogli di calcolo MS Excel per l'applicazione del modello orario della UNI EN ISO 52016-1, implementando un modulo standard mono-zona.

Il modello di calcolo è stato applicato ad un caso studio di edilizia residenziale e l'edificio è stato analizzato in diversi contesti climatici italiani. Nell'applicazione del modello di calcolo sono state testate due diverse tipologie di valutazione energetica, come definite all'interno del quadro normativo vigente, per ciò che concerne i dati di ingresso relativi all'utilizzo dell'edificio: una valutazione energetica standard e una valutazione energetica adattata all'utenza (*tailored*). Nello specifico, nella prima valutazione è stato ipotizzato il funzionamento continuo dell'impianto di climatizzazione, mentre nella seconda un regime di intermittenza. I risultati sono stati espressi in termini di fabbisogno di energia termica utile per il riscaldamento e il raffrescamento. È stato inoltre analizzato il profilo orario del carico termico in condizioni invernali ed estive, ed il profilo della temperatura operativa interna in condizioni di non funzionamento dell'impianto. Alla luce della procedura di modellazione seguita, sono state redatte linee guida per la corretta applicazione della simulazione termo energetica in ambito normativo.

1 Introduzione

La ricerca, in corso di svolgimento e riferita alle tre annualità, è volta ad analizzare l'applicabilità del modello di calcolo orario semplificato del fabbisogno di energia degli edifici introdotto dalla UNI EN ISO 52016-1:2018 in un contesto legale, ovvero per la verifica dei requisiti energetici degli edifici e per la certificazione energetica.

L'attività prevede sia una fase di approfondimento teorico sul modello orario della UNI EN ISO 52016-1, sia l'applicazione ad alcuni casi studio, di diversa categoria d'uso, e analizzati in diversi contesti climatici.

In aggiunta, il modello di calcolo orario della UNI EN ISO 52016-1 verrà applicato, nella terza annualità, ai fini dello sviluppo e l'aggiornamento della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi.

1.1 *Stato dell'arte nazionale e internazionale*

I metodi di calcolo della prestazione energetica degli edifici sono ampiamente utilizzati nel contesto legale, sia per verificare la conformità ai requisiti minimi di prestazione energetica fissati dai regolamenti, sia per certificare la prestazione energetica degli edifici. I metodi di calcolo sono usualmente classificati in:

- dinamici dettagliati,
- orari semplificati,
- in condizioni (quasi-)stazionarie (mensili, stagionali).

Tra le norme tecniche sviluppate all'ambito del Mandato M/480 al CEN [1], in ottemperanza alla Direttiva 2010/31/UE (EPBD recast) [2], la recente norma UNI EN ISO 52016-1 [3] fornisce procedure aggiornate per il calcolo del fabbisogno termico utile degli edifici per il riscaldamento e il raffrescamento. Nello specifico, è stato introdotto un nuovo metodo di calcolo orario che si basa su assunzioni semplificative e una ridotta quantità di dati di ingresso rispetto ad uno strumento di simulazione energetica dinamica dettagliata.

Nella letteratura scientifica esistono numerosi lavori di ricerca che affrontano il tema del confronto tra i diversi metodi di calcolo della prestazione energetica degli edifici, spesso approfondendo le condizioni e gli scopi per i quali un modello di calcolo semplificato possa, con un sufficiente livello di accuratezza, stimare la prestazione energetica dell'edificio, se confrontato con un modello di simulazione numerica dettagliata (Ballarini et al., 2018 [4]). D'altro canto, un metodo di calcolo dettagliato, seppur più accurato, si fonda su un cospicuo quantitativo di dati di ingresso che non sempre è disponibile, mentre i modelli semplificati utilizzano dati che sono facilmente reperibili e forniscono output che possono essere verificati facilmente (Millet, 2007 [5]).

Tra i metodi semplificati, il modello orario proposto dalla norma UNI EN ISO 13790 [6] – ora ritirata e sostituita dalla UNI EN ISO 52016-1 – è stato approfondito in molti lavori di ricerca. Questo metodo, pur applicando un regime dinamico, non aumenta considerevolmente il tempo computazionale, se confrontato con un metodo di calcolo in condizioni quasi-stazionarie. Sebbene si fondi su un numero di dati di ingresso molto più ridotto rispetto ad un metodo di calcolo dinamico dettagliato, il metodo orario semplificato ha condotto a risultati più vicini ad un modello di simulazione dinamica rispetto ad un metodo stazionario (Michalak, 2014 [7]).

Alcuni lavori di ricerca hanno sviluppato dei confronti tra i risultati derivanti dall'applicazione dei diversi metodi di calcolo. Per esempio, Kokogiannakis et al. (2008) [8] hanno confrontato gli esiti – in termini di fabbisogno termico utile per il riscaldamento e il raffrescamento – tra il metodo di calcolo stazionario su base mensile, il metodo orario semplificato della EN ISO 13790 e due strumenti di simulazione energetica dettagliata (EnergyPlus e ESP-r). Lo studio è stato condotto su un edificio a tre piani, associando un'analisi parametrica nella quale sono stati indagati diversi profili degli apporti termici interni, diverse condizioni climatiche e diverse caratteristiche dell'involucro edilizio. I risultati hanno mostrato come, per ciò che concerne il fabbisogno termico utile per il riscaldamento, non ci siano significative deviazioni tra i modelli, mentre differenze più sensibili si possono riscontrare nella valutazione del fabbisogno termico utile per il raffrescamento.

Michalak (2014) [7] ha invece sviluppato un modello energetico del metodo orario semplificato della EN ISO 13790 in ambiente Matlab/Simulink per la stima della domanda energetica annua per il riscaldamento e il raffrescamento di una casa monofamiliare in dieci diverse località della Polonia. Gli output sono stati poi confrontati con i risultati ottenuti applicando, da un lato, EnergyPlus e, dall'altro, il metodo mensile della EN

ISO 13790. Il metodo orario semplificato è stato considerato affidabile solo per la determinazione del fabbisogno di riscaldamento, evidenziando la necessità di ulteriori approfondimenti per la valutazione del fabbisogno di raffrescamento.

Atmaca et al. (2011) [9] hanno invece approfondito le deviazioni che sussistono tra il metodo orario semplificato ed una simulazione dinamica dettagliata (EnergyPlus) nella determinazione del fabbisogno termico dell'edificio variando la massa termica dell'edificio. L'analisi, sviluppata per un appartamento con cinque diversi tipi di parete esterna, ha confermato che il metodo orario semplificato può essere affidabile nella modellazione della capacità termica dell'edificio in edifici non molto complessi. La generale attendibilità del modello orario della norma UNI EN ISO 13790 è stata confermata in uno studio condotto da Costantino et al. (2017) [10] per la stima del fabbisogno termico di riscaldamento e di raffrescamento di un edificio per ricovero zootecnico. I risultati, confrontati con quelli uscenti da una simulazione dinamica dettagliata, hanno mostrato leggere deviazioni dovute ad una diversa valutazione della capacità termica dell'edificio all'interno dei due metodi.

Attualmente, il modello orario semplificato della UNI EN ISO 13790 è stato rivisitato nella nuova norma UNI EN ISO 52016-1, che ha introdotto le modifiche descritte nella Sezione 2.2. Al momento sono in corso attività di ricerca volte ad indagare il nuovo metodo, ma non esistono ancora esiti significativi circa la sua validazione. Sono stati conseguiti risultati preliminari da Ballarini et al. (2019) [11], attraverso il confronto del nuovo metodo orario con il vecchio modello della UNI EN ISO 13790 e un modello di simulazione dinamica dettagliata (EnergyPlus). L'analisi è volta a comprendere se e in quale misura il nuovo modello orario possa rappresentare un buon compromesso tra la facilità di applicazione – tipica di un metodo di calcolo semplificato – e l'accuratezza dei risultati – caratteristica di un calcolo dinamico dettagliato. Limitatamente al caso studio presentato, ossia un piano-tipo di una casa monofamiliare, i risultati hanno evidenziato che il metodo orario della UNI EN ISO 52016-1, con dati di ingresso opportunamente dettagliati, fornisce risultati più vicini agli output della simulazione dinamica dettagliata rispetto al metodo orario della UNI EN ISO 13790, soprattutto in riferimento ai carichi termici di riscaldamento e di raffrescamento. Entrambi i metodi semplificati si sono dimostrati, tuttavia, validi per stimare il fabbisogno termico dell'edificio, mentre si registrano sensibili deviazioni tra le costanti di tempo termiche ottenute applicando i vari metodi di calcolo.

1.2 Obiettivi scientifici e tecnologici attesi

Per quanto riguarda l'approfondimento teorico del modello di calcolo orario semplificato del fabbisogno termico degli edifici introdotto dalla UNI EN ISO 52016-1:2018, il presente lavoro mira ad affrontare i requisiti di accuratezza, robustezza, flessibilità, trasparenza, riproducibilità e sicurezza legale.

Sono analizzate in dettaglio le possibili cause di perdita di accuratezza nella valutazione della prestazione energetica effettuata con il modello dinamico della UNI EN ISO 52016-1, quali: a) le semplificazioni nella modellazione matematica dei fenomeni fisici; b) le semplificazioni nella specificazione dei dati di input; c) le ambiguità di interpretazione dei dati di input; d) le incertezze relative ai dati di input. Dall'applicazione, nella prima annualità, del modello di calcolo ad un caso studio di edilizia residenziale e per i diversi contesti climatici considerati, si analizzano gli andamenti sia della temperatura in assenza di climatizzazione, sia dei carichi termici, sia dei fabbisogni di energia, considerando differenti profili di funzionamento dell'impianto di climatizzazione (continuo, intermittente).

Tra gli obiettivi è prevista la stesura di indicazioni per la corretta applicazione della simulazione termo-energetica in ambito normativo, con specifico riferimento agli edifici residenziali e con l'obiettivo di rispondere nel modo migliore ai requisiti di accuratezza, di semplicità e di riproducibilità di una valutazione energetica.

1.3 Descrizione delle attività svolte

L'attività del primo anno, oggetto del presente rapporto, è finalizzata all'approfondimento teorico del modello di calcolo orario semplificato del fabbisogno termico degli edifici introdotto dalla norma tecnica UNI EN ISO 52016-1:2018. È stata sviluppata l'analisi e la catalogazione delle ipotesi generali di calcolo, delle condizioni al contorno e delle equazioni dei modelli di calcolo della prestazione termo-energetica degli edifici, che caratterizzano il modello di calcolo orario della UNI EN ISO 52016-1 (Sezione 2). Sono stati realizzati fogli

di calcolo MS Excel per l'applicazione del modello orario della UNI EN ISO 52016-1, implementando un modulo standard mono-zona. Il modello di calcolo è stato applicato ad un caso studio di edilizia residenziale e l'edificio è stato analizzato in diversi contesti climatici italiani (Sezione 3.1). Nell'applicazione del modello di calcolo sono state testate due diverse tipologie di valutazione energetica, come definite all'interno del quadro normativo vigente, per ciò che concerne i dati di ingresso relativi all'utilizzo dell'edificio: una valutazione energetica standard e una valutazione energetica adattata all'utenza (*tailored*). Nello specifico, nella prima valutazione è stato ipotizzato il funzionamento continuo dell'impianto di climatizzazione, mentre nella seconda un regime di intermittenza (Sezione 3.2). Infine, sono stati analizzati i risultati ottenuti (Sezione 3.3) e, alla luce della procedura di modellazione seguita, sono state redatte linee guida per la corretta applicazione della simulazione termo energetica in ambito normativo (Sezione 4).

2 Il modello di calcolo

2.1 Ipotesi generali di calcolo, condizioni al contorno e semplificazioni di modellazione

2.1.1 Requisiti della valutazione di prestazione energetica

La valutazione della prestazione energetica di un edificio in un contesto legale deve soddisfare un insieme di requisiti che talvolta sono in contrasto tra loro:

- *Accuratezza*, legata sia alla robustezza e alla flessibilità del modello di calcolo, sia all'accuratezza dei dati d'ingresso;
- *Semplicità*, legata alla semplicità dei dati di ingresso e alla *user friendliness* degli strumenti di calcolo;
- *Riproducibilità*, legata sia alla trasparenza del modello, sia alla non ambiguità dei dati d'ingresso e dei risultati.

Le norme tecniche EPB, sviluppate dal CEN (*European Committee for Standardization*) per buona parte in collaborazione con l'ISO (*International Organization for Standardization*), rappresentano una risposta ai suddetti requisiti. La qualità del risultato dipende comunque da molti fattori, quali la dimensione e le caratteristiche dell'edificio, la destinazione d'uso, le condizioni climatiche, il tipo di applicazione del calcolo.

2.1.2 Ipotesi generali e condizioni al contorno

La norma tecnica UNI EN ISO 52017:2018 [12] specifica le ipotesi generali, le condizioni al contorno e le equazioni per il calcolo, in condizioni orarie o sub-orarie transitorie, delle temperature interne (aria e operativa) e/o dei carichi di riscaldamento, raffrescamento, umidificazione e deumidificazione per mantenere uno specifico *set point* (temperatura, umidità), in una singola zona dell'edificio.

Di seguito sono riportate le principali ipotesi di calcolo.

Dati geometrici

- Un ambiente è generalmente considerato come uno spazio chiuso delimitato da elementi di chiusura;
- La descrizione degli elementi dell'involucro può presentare alcune semplificazioni in presenza di elementi non piani;
- Vi sono possibili alternative sulle dimensioni di ciascun elemento (ad esempio, misurazione sulla superficie interna o sulla superficie esterna dell'involucro).

Ipotesi di modellazione termica

- Le varie superfici degli elementi costruttivi di chiusura sono isoterme;
- Gli scambi termici convettivi e radianti ad alta lunghezza d'onda sulle superfici interne sono considerati separatamente;

Conduzione termica attraverso l'involucro

- Le proprietà termofisiche dei materiali che formano gli elementi di chiusura sono indipendenti dal tempo e isotropiche;
- La conduzione termica attraverso ciascun elemento di chiusura è monodimensionale;
- I ponti termici sono trattati mediante calcoli in condizioni stazionarie, trascurando eventuali fenomeni di accumulo termico; essi sono rappresentati da flussi termici lineari o mediante un elemento equivalente monodimensionale, le cui caratteristiche termiche e di massa sono derivate, tuttavia, da calcoli in stato stazionario;
- La conduttanza termica al suolo attraverso gli elementi dell'edificio viene trattata attraverso un flusso di calore monodimensionale equivalente;
- Gli strati d'aria all'interno degli elementi dell'involucro sono delimitati da due superfici isoterme;

Scambi termici convettivi

- La temperatura dell'aria nell'ambiente interno è uniforme;

- I coefficienti di scambio termico convettivo sulla superficie esterna dipendono dalla velocità e dalla direzione del vento, sulla superficie interna dipendono dalla direzione del flusso termico;

Scambi di calore per radiazioni a bassa lunghezza d'onda

- La distribuzione spaziale della radiazione solare nell'ambiente è fissa e indipendente dal tempo;
- La dipendenza angolare delle proprietà di radiazione solare dei vetri è calcolata sulla base dei dati del produttore;
- Sono considerati dispositivi di ombreggiamento mobili esterni;

Scambi di calore per radiazioni ad alta lunghezza d'onda

- La temperatura radiante dell'ambiente esterno (escluso il cielo) è uguale alla temperatura dell'aria esterna;
- I coefficienti di trasferimento del calore radiativo sulla superficie esterna sono indipendenti dal tempo;

Guadagni di calore interni

- I guadagni sensibili di calore interni includono una parte convettiva scambiata con l'aria interna e una parte radiativa che viene emessa nella custodia sotto forma di radiazione elettromagnetica;
- La distribuzione spaziale del flusso di calore radiante dovuto alle fonti interne è uniforme sulle superfici interne degli elementi dell'edificio;

Scambi termici per ventilazione

- Il tasso di cambio dell'aria per infiltrazione e ventilazione tiene conto della variazione nel tempo dell'effetto camino e dell'effetto del vento.

Comfort termico

- La temperatura media radiante interna viene calcolata come la media pesata sulle aree delle temperature della superficie interna di ciascun componente;
- La temperatura operativa interna è la media aritmetica della temperatura dell'aria interna e della temperatura media radiante;

2.1.3 Bilancio di energia termica e di vapore sull'aria

Il comportamento termico dell'edificio è simulato considerando il sistema termodinamico formato dall'aria all'interno dell'ambiente costruito. Il volume di controllo è racchiuso dalla superficie interna dell'involucro dell'edificio e dalle superfici interne (arredi, persone, attrezzature), che rappresentano la superficie di controllo (o area di confine) del sistema.

Gli strumenti per modellare il comportamento termico di ambienti confinati si riferiscono essenzialmente ai seguenti bilanci:

- bilancio di massa dell'aria
- bilancio di massa del vapore acqueo
- bilancio di energia

Bilancio di massa dell'aria

Gli scambi di massa d'aria tra l'ambiente costruito e l'ambiente esterno sono dovuti a due distinti fenomeni:

- infiltrazione
- ventilazione

L'infiltrazione è l'ingresso incontrollato di aria esterna attraverso l'involucro dell'edificio a causa dell'esistenza di aperture (fessure, battenti, ...). Questo fenomeno si verifica a causa di una differenza nella pressione dell'aria tra l'ambiente interno e quello esterno dovuta a forze di galleggiamento causate da differenze di temperatura tra l'esterno e l'interno e dall'effetto del vento. Si chiama esfiltrazione quando l'aria fluisce dall'interno verso l'esterno.

La ventilazione è l'ingresso d'aria esterna (probabilmente più pulita di quella interna) finalizzato a garantire il controllo della qualità dell'aria interna (IAQ). La ventilazione è definita naturale quando avviene attraverso aperture (finestre, griglie) a causa delle forze naturali (galleggiamento, vento); è definita meccanica quando deriva dall'effetto di macchine (ventilatori) e con consumo di energia.

Il bilancio di massa d'aria dell'ambiente può essere scritto come

$$\sum \dot{m}_{a;V;sup} - \sum \dot{m}_{a;V;ex} = \frac{dm_a}{dt} \cong 0$$

dove:

$\dot{m}_{a;V;sup}$ è il generico flusso d'aria immesso nell'ambiente;

$\dot{m}_{a;V;ex}$ è il generico flusso d'aria estratto dall'ambiente

m_a è la massa d'aria contenuta nell'ambiente

Poiché la variazione della massa d'aria interna nell'unità di tempo (dm_a / dt) è trascurabile, l'equazione del bilancio della massa d'aria afferma che la somma delle portate d'aria in ingresso nella stanza (per ventilazione naturale, ventilazione meccanica, infiltrazione) deve essere uguale alla somma delle portate d'aria uscenti dall'ambiente (per ventilazione naturale, estrazione meccanica, esfiltrazione).

Bilancio di massa del vapore acqueo

Gli scambi di massa di vapore acqueo avvengono attraverso la ventilazione e la presenza di fonti interne di vapore (persone, animali, piante, attività). Lo scambio di vapore acqueo relativo alla ventilazione è collegato alla diversa umidità delle portate d'aria in entrata e in uscita (vedere l'equazione del bilancio di massa).

In assenza di fenomeni di inerzia igrica (ovvero l'accumulo e il rilascio di umidità dai materiali da costruzione e dall'arredamento) e trascurando i fenomeni di diffusione del vapore attraverso ambienti a diverse pressioni parziali di vapore, il bilancio di massa del vapore nell'ambiente può essere scritto come

$$\sum q_{V;sup} \cdot \rho_{sup;a} \cdot x_{sup;a} - \sum q_{V;ex} \cdot \rho_{int;a} \cdot x_{int;a} + G_{int;a} - G_{abs;a} + G_{(D)HU;ld} = \rho_{int;a} \cdot V_{int;a} \cdot \frac{dx_{int;a}}{dt} \cong 0$$

dove:

- $\rho_{int;a}$ è la densità dell'aria secca interna;
- $\rho_{sup;a}$ è la densità dell'aria secca che entra nella zona dell'edificio;
- $q_{V;sup}$ è la portata volumica di aria che entra nella zona dell'edificio;
- $q_{V;ex}$ è la portata volumica totale di aria estratta dalla zona dell'edificio;
- $x_{sup;a}$ è l'umidità specifica dell'aria di mandata;
- $x_{int;a}$ è l'umidità specifica dell'aria interna;
- $G_{int;a}$ è la produzione di umidità nella zona;
- $G_{abs;a}$ è l'assorbimento di umidità (valore positivo) o il desorbimento (valore negativo) nei materiali all'interno della zona;
- $G_{(D)HU;ld}$ è il carico (mandata) di vapore di umidificazione (se positivo), o il carico (rimozione) di vapore di deumidificazione (se negativo);
- $V_{int;a}$ è il volume dell'aria interna;
- t è il tempo.

L'equazione di bilancio di massa del vapore può essere risolta per determinare se eseguire o meno operazioni di umidificazione o deumidificazione o, in assenza di un controllo di sistema, per determinare il valore dell'umidità che deve essere stabilita all'equilibrio

Bilancio di energia

Il bilancio di energia include un sistema di equazioni che rappresentano rispettivamente:

- il bilancio di energia termica dell'aria;
- il bilancio di energia termica sulla superficie interna dell'elemento edilizio;
- il bilancio di energia termica sulla superficie esterna dell'involucro edilizio;
- la conduzione termica attraverso l'involucro;
- la accumulazione di calore delle strutture esterne ed interne.

L'equazione che esprime il bilancio di energia termica sensibile sull'aria interna può essere scritta come

$$\sum_{j=1}^N (A_j \cdot q_{c,i}) + \Phi_v + \Phi_{int,c} + \Phi_{HC;ld;c} + \Phi_{sa} + \Phi_{va} + \Phi_{tb} = c_a \cdot \rho_{int;a} \cdot V_{int;a} \cdot \frac{d\theta_{int;a}}{dt} \cong 0$$

dove

- N è il numero di superfici interne che delimitano l'aria interna;
- A_j è l'area dell'elemento edilizio j ;
- $q_{c,i}$ è il flusso termico areico per convezione sulla superficie interna;
- Φ_v è il flusso termico per ventilazione;
- $\Phi_{int,c}$ è la frazione convettiva del flusso termico dovuto alle sorgenti interne;
- $\Phi_{HC;ld;c}$ è la parte convettiva del flusso termico dovuto ai carichi di riscaldamento o raffrescamento dell'ambiente;
- Φ_{sa} è il flusso termico di origine solare ceduto all'aria;
- Φ_{va} è il flusso termico dovuto all'aria entrante nella zona termica attraverso intercapedini d'aria interne ad elementi di confine della zona;
- Φ_{tb} è il flusso termico dovuto ai ponti termici;
- c_a è il calore specifico dell'aria;
- $\rho_{int;a}$ è la densità dell'aria secca interna;
- $V_{int;a}$ è il volume dell'aria interna;
- $\theta_{int;a}$ è la temperatura dell'aria interna;
- t è il tempo.

Lo scambio termico convettivo sulla superficie di un elemento è

$$q_c = h_c \cdot (\theta_s - \theta_{int;a})$$

dove

- h_c è il coefficiente di scambio termico convettivo
- θ_s è la temperatura della superficie

- Il flusso termico dovuto alla ventilazione è

$$\Phi_V = c_a \cdot \rho_a \cdot q_{V;in} \cdot (\theta_{sup;a} - \theta_{int;a})$$

Sostituendo i flussi termici scambiati per convezione e ventilazione con le espressioni date nelle equazioni precedenti, l'equazione di bilancio termico sensibile dell'aria interna diviene

$$\sum_{j=1}^N (A \cdot h_{c;i})_j (\theta_{s,j} - \theta_{int;a}) + c_a \cdot \rho_a \cdot q_{V;in} (\theta_{sup;a} - \theta_{int;a}) + \Phi_{int,c} + \Phi_{HC;ld;c} + \Phi_{sa} + \Phi_{va} + \Phi_{tb} = c_a \cdot \rho_{int;a} \cdot V_{int;a} \cdot \frac{d\theta_{int;a}}{dt} \cong 0$$

Il bilancio termico sulla superficie interna del j-esimo componente edilizio può essere scritto come

$$q_{lr,j} + q_{sol,j} + q_{c,j} + q_{cd,j} + (\Phi_{int,r} + \Phi_{HC;ld;r}) / \left(\sum_{j=1}^N A_j \right) = 0$$

dove

- q_{lr} è la densità del flusso termico dovuto alla radiazione ad alta lunghezza d'onda scambiata con le altre superfici interne;
- q_{sol} è la densità del flusso termico dovuto alla radiazione solare (a bassa lunghezza d'onda) assorbita;
- q_c è la densità del flusso termico ceduto all'aria della zona dell'edificio per convezione;
- q_{cd} è la densità del flusso termico per conduzione;
- $\Phi_{int,r}$ è la frazione radiativa del flusso termico dovuto alle sorgenti interne;
- N è il numero di superfici delimitanti l'aria interna;
- A_j è l'area dell'elemento edilizio j ;
- $\Phi_{HC;ld;r}$ è il flusso termico dovuto alla componente radiativa dei carichi sensibili di riscaldamento o raffreddamento dell'ambiente.

La Figura 1 mostra i principali flussi termici che interessano il bilancio energetico sulla superficie interna dell'elemento edilizio.

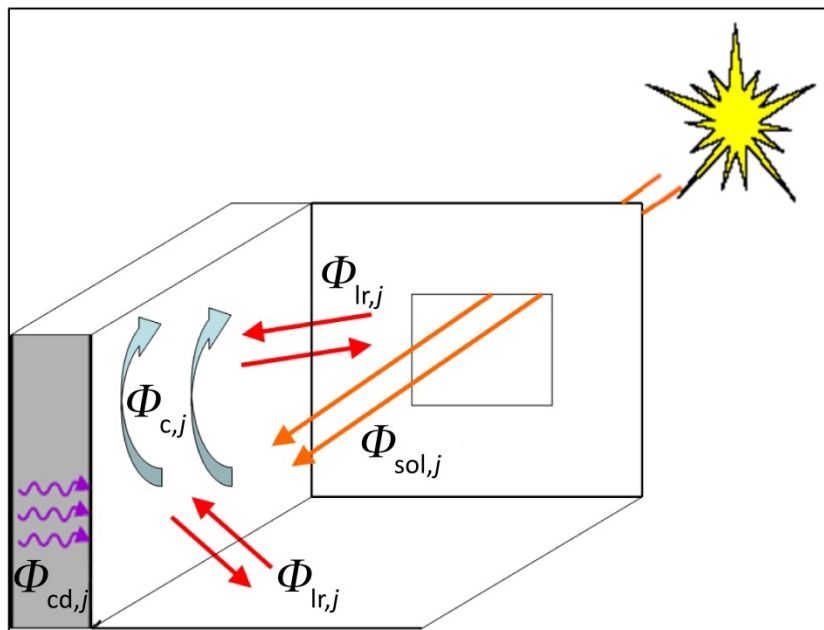


Figura 1. Bilancio energetico della superficie interna di un elemento edilizio.

La temperatura della superficie esterna di un elemento edilizio si ottiene attraverso la risoluzione della seguente equazione:

$$q_{lr,j} + q_{sol,j} + q_{c,j} + q_{cd,j} = 0$$

dove

q_{lr} è il flusso termico areico per irraggiamento ad alta lunghezza d'onda sulla superficie;

q_{sol} è il flusso termico areico dovuto alla radiazione solare (bassa lunghezza d'onda) assorbita dalla superficie;

q_c è il flusso termico areico per convezione con l'aria;

q_{cd} è il flusso termico areico per conduzione.

La Figura 2 mostra uno schema del bilancio di energia della superficie esterna di un elemento edilizio.

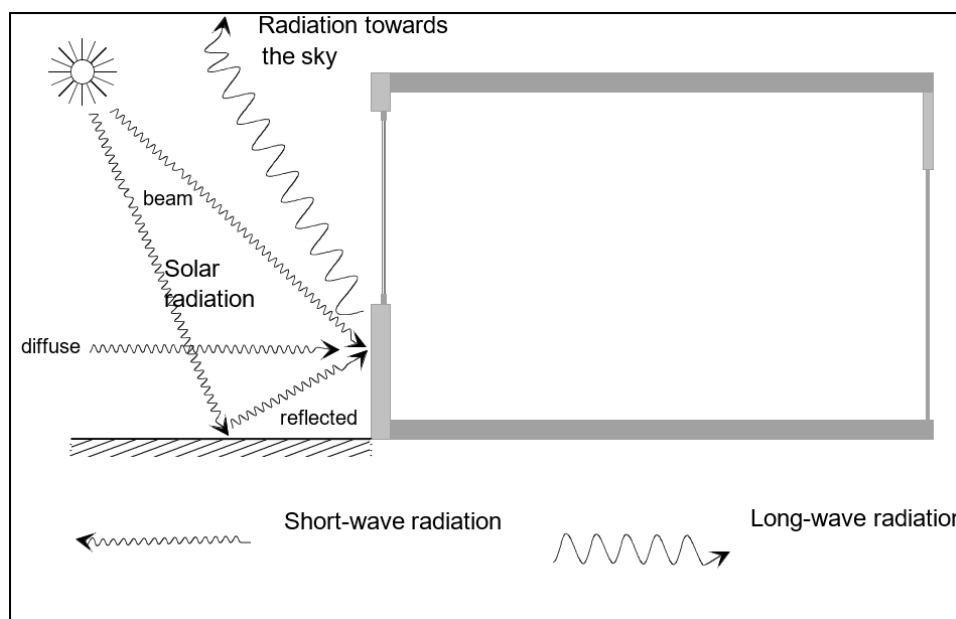


Figura 2. Bilancio energetico della superficie esterna di un elemento edilizio.

Lo scambio termico per conduzione attraverso l'involucro può essere ottenuto con diversi metodi, analitici o numerici, usando vari step temporali. I due metodi più comunemente utilizzati nei software di simulazione sono quello delle differenze finite, che esegue la discretizzazione spaziale del componente, e quello delle funzioni di trasferimento della conduzione (CTF).

La capacità termica delle strutture dell'edificio che non sono soggette a fenomeni di trasferimento di calore viene aggiunta alla capacità termica dell'aria interna (il termine che appare nel bilancio termico dell'aria).

2.2 Il metodo di calcolo orario della UNI EN ISO 52016-1

L'uso di un metodo dinamico dettagliato consente di tenere conto delle proprietà non lineari nella modellizzazione energetica dell'edificio e dei suoi impianti tecnici. Tuttavia introduce molte scelte, dettagli e complessità. L'uso di un metodo semplificato può quindi essere più adatto a ridurre la quantità di dati di ingresso.

La norma internazionale UNI EN ISO 52016:2018 specifica due metodi semplificati:

- un metodo orario semplificato
- un metodo mensile.

L'obiettivo principale del metodo di calcolo orario semplificato è permettere di tenere conto dell'influenza delle variazioni orarie e giornaliere relative alle condizioni meteorologiche, all'esercizio (schermature sole, termostati, esigenze, occupazione, accumulo, ecc.) e delle loro interazioni dinamiche per il riscaldamento e raffreddamento. Allo stesso tempo, i dati di ingresso aggiuntivi rispetto al metodo di calcolo mensile sono ridotti al minimo.

Il modello di calcolo dinamico semplificato della UNI EN ISO 52016 è applicabile per valutare su base oraria:

- a) il carico termico sensibile per il riscaldamento e il raffrescamento;
- b) il carico termico latente la (de-)umidificazione degli ambienti;
- c) la temperatura interna (dell'aria, media radiante, operativa);
- d) il fabbisogno di energia termica utile (sensibile) per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti;
- e) il fabbisogno di energia termica latente per la deumidificazione degli ambienti;
- f) il carico termico di progetto sensibile e latente per il riscaldamento e il raffrescamento;
- g) le condizioni dell'aria di mandata per garantire l'eventuale umidificazione e/o deumidificazione degli ambienti.

I calcoli sono eseguiti separatamente per le diverse zone termiche, che possono essere tra loro accoppiate o meno. La norma fornisce indicazioni per la valutazione delle zone termiche.

2.2.1 Ipotesi di calcolo

Il metodo si basa sulla risoluzione oraria del bilancio termico sull'aria, secondo le ipotesi della UNI EN ISO 15217-1, che considera la temperatura dell'aria uniforme in tutta la zona termica e la conduzione termica nei componenti edilizi (escluso il terreno) come uni-dimensionale. Si aggiungono inoltre alcune ipotesi semplificative specificate nella UNI EN ISO 52016-1:

- la zona termica è considerata uno spazio chiuso delimitato da elementi di chiusura;
- le proprietà termo-fisiche dei materiali che compongono gli elementi della zona termica sono indipendenti dal tempo, ma non sono escluse proprietà dei componenti basate su un'attivazione;
- l'ambiente radiante esterno (cielo escluso) è alla stessa temperatura dell'aria esterna;
- la distribuzione spaziale della radiazione solare all'interno della stanza è uniforme e indipendente dal tempo;
- la distribuzione della massa in ciascun componente costruttivo è semplificata;
- le proprietà solari delle finestre non dipendono dall'angolo di incidenza della radiazione solare e si presume che la trasmissione di energia solare totale sia assimilata ad una trasmissione diretta nella zona;
- la temperatura media radiante è calcolata come media ponderata sull'area delle temperature della superficie interna di ciascun componente;
- i coefficienti di scambio termico convettivo, sia sulla superficie esterna sia interna, e i coefficienti di scambio termico radiativo nell'infrarosso della superficie esterna degli elementi di chiusura esterna sono considerati invarianti nel tempo.

2.2.2 Procedura di calcolo

Esistono due tipi di calcolo dei carichi termici e dei fabbisogni: *di base* e *con impianto specifico*.

Il calcolo *di base* non tiene conto dell'influenza di uno specifico impianto di climatizzazione: si assumono condizioni ambientali standard e il riscaldamento/raffrescamento avviene in modo ideale con potenza disponibile illimitata totalmente convettiva e regime continuo.

Il calcolo *con impianto specifico* può prevedere potenze di riscaldamento o raffrescamento limitate, valori specifici per la frazione convettiva del sistema di riscaldamento e raffrescamento; perdite di calore recuperabili, profili di set-point di temperatura, limitazioni della stagione di riscaldamento o di raffreddamento; assenza di impianto di riscaldamento o raffrescamento.

Nel calcolo dei carichi termici di riscaldamento e raffrescamento e delle temperature possono verificarsi cinque possibili situazioni (vedi Figura 8):

- 1) La zona termica richiede riscaldamento e la potenza di riscaldamento non è sufficiente per raggiungere il set-point. Questo di solito accade nel periodo di ripresa (*boost period*).
- 2) La zona termica richiede riscaldamento e la potenza di riscaldamento è sufficiente. La temperatura interna è uguale al set-point.
- 3) La zona termica non richiede né riscaldamento né raffreddamento (condizioni di fluttuazione libera). Viene calcolata la temperatura interna.
- 4) La zona termica richiede raffreddamento e la potenza di raffreddamento è sufficiente. La temperatura interna è uguale al set-point.
- 5) La zona termica richiede raffreddamento e la potenza di raffreddamento non è sufficiente. La temperatura interna calcolata è superiore al set-point.

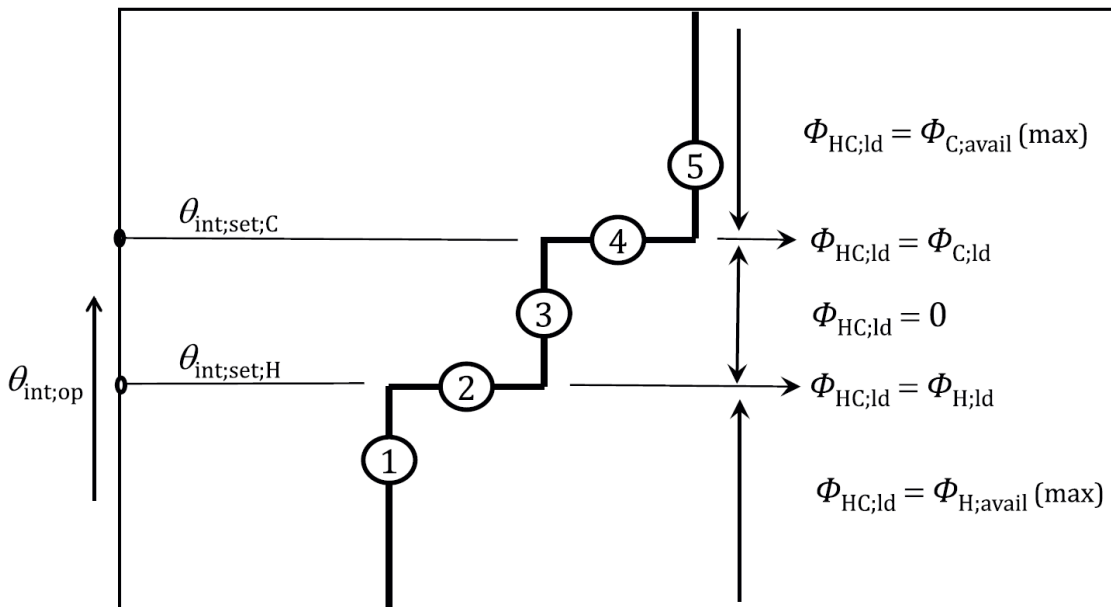


Figura 3. Controllo ambientale e determinazione dei carichi termici e della temperatura in una zona termica
(fonte: UNI EN ISO 52016-1 [3]).

2.2.3 Bilancio di energia di una zona termica

Per quanto riguarda il bilancio di energia termica della zona, il metodo riportato nella norma è una rivisitazione del metodo a tre nodi (5RC1), già presente nella UNI EN ISO 13790. La differenza principale è che gli elementi costruttivi non sono aggregati ai parametri concentrati di zona, ma considerati separatamente.

Bilancio di energia a livello di zona termica

Il bilancio di energia per la zona ztc e l'intervallo di tempo t si scrive come:

$$\begin{aligned}
 & \left[\frac{C_{int;ztc}}{\Delta t} + \sum_{eli=1}^{eln} (A_{eli} \cdot h_{ci;eli}) + \sum_{vei=1}^{ven} H_{ve;vei;t} + H_{tr;tb;ztc} \right] \cdot \theta_{int;a;ztc;t} - \sum_{eli=1}^{eln} (A_{eli} \cdot h_{ci;eli} \cdot \theta_{pln;eli;t}) \\
 &= \frac{C_{int;ztc}}{\Delta t} \cdot \theta_{int;a;ztc;t-1} + \sum_{vei=1}^{ven} (H_{ve;vei;t} \cdot \theta_{sup;vei;t}) + H_{tr;tb;ztc} \cdot \theta_{e;a;t} \\
 &+ f_{int,c} \cdot \Phi_{int;ztc;t} + f_{sol,c} \cdot \Phi_{sol;ztc;t} + f_{H/C,c} \cdot \Phi_{HC;ztc;t}
 \end{aligned}$$

Bilancio di energia a livello di elemento edilizio

Per il nodo $pli = pln$ della superficie che si affaccia sulla zona di calcolo ztc :

$$\begin{aligned}
 & - \left(h_{pli-1;eli} \cdot \theta_{pli-1;eli;t} \right) + \left[\frac{\kappa_{pli;eli}}{\Delta t} + h_{ci;eli} + h_{ri;eli} \cdot \sum_{elk=1}^{eln} \left(\frac{A_{elk}}{A_{tot}} \right) + h_{pli-1;eli} \right] \cdot \theta_{pli;eli;t} \\
 & - h_{ci;eli} \cdot \theta_{int;a;zt;t} - \sum_{elk=1}^{eln} \left(\frac{A_{elk}}{A_{tot}} \cdot h_{ri;eli} \cdot \theta_{pli;elk;t} \right) \\
 & = \frac{\kappa_{pli;eli}}{\Delta t} \cdot \theta_{pli;eli;t-1} + \frac{1}{A_{tot}} \cdot \left[\left(1 - f_{int,c} \right) \cdot \Phi_{int;ztc;t} + \left(1 - f_{sol,c} \right) \cdot \Phi_{sol;ztc;t} + \left(1 - f_{H/C,c} \right) \cdot \Phi_{HC;ztc;t} \right]
 \end{aligned}$$

Per il nodo $pli = 1$ della superficie che si affaccia all'esterno:

$$\begin{aligned}
 & \left(\frac{\kappa_{pli;eli}}{\Delta t} + h_{ce;eli} + h_{re;eli} + h_{pli;eli} \right) \cdot \theta_{pli;eli;t} - h_{pli;eli} \cdot \theta_{pli+1;eli;t} \\
 & = \frac{\kappa_{pli;eli}}{\Delta t} \cdot \theta_{pli;eli;t-1} + \left(h_{ce;eli} + h_{re;eli} \right) \cdot \theta_{e;t} \\
 & + a_{sol;pli;eli} \cdot \left(I_{sol;dif;eli;t} + I_{sol;dir;eli;t} F_{sh;obst;eli;t} \right) - \Phi_{sky;eli;t}
 \end{aligned}$$

2.2.4 Modalità di discretizzazione degli elementi edilizi in nodi (modello RC)

Vi sono due possibili approcci:

- Approccio originale della EN ISO 52016-1
- Approccio adottato nell'appendice nazionale della UNI EN ISO 52016

Componenti opachi – Proprietà dei nodi secondo l'approccio originale

Per elementi costruttivi opachi, il numero di nodi è 5 (nodo $pli = 1 \dots 5$), rispettivamente un nodo di superficie esterno, tre nodi all'interno dell'elemento di costruzione e un nodo di superficie interno (rivolto verso la zona). Si veda a tal proposito la Figura 4, che rappresenta il modello a parametri concentrati di un generico componente dell'involucro.

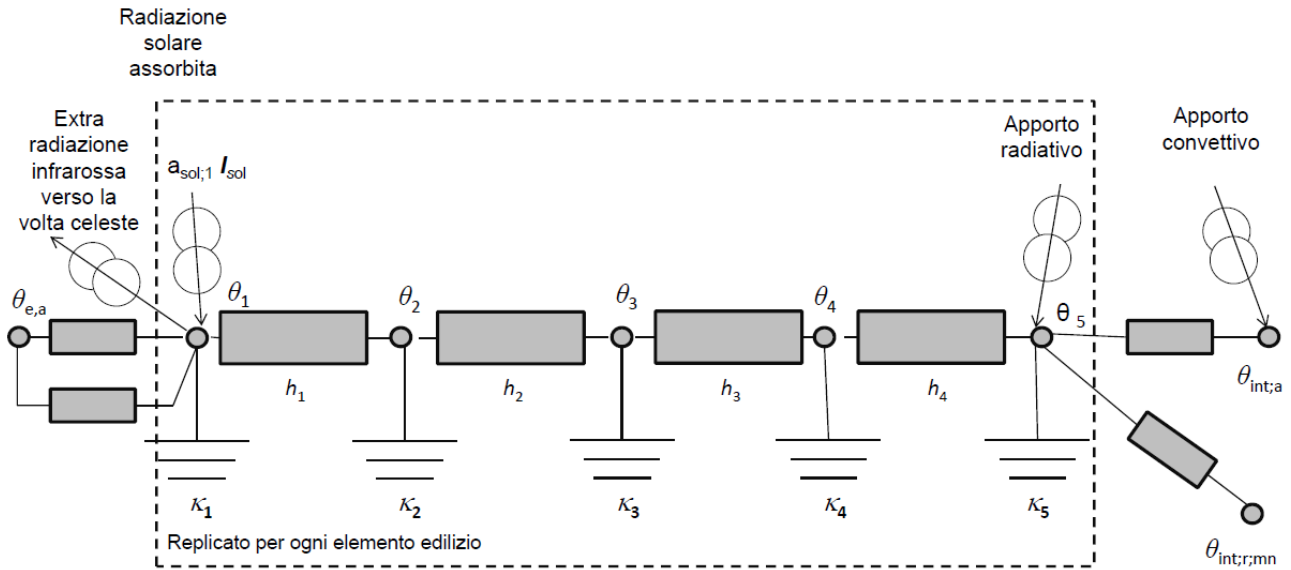


Figura 4. Modello a parametri concentrati per un componente di involucro opaco (fonte: UNI EN ISO 52016-1 [3]).

La conduttanza tra i nodi pli e il nodo $pli-1$ è data da:

$$h_{p14;eli} = h_{p11;eli} = \frac{6}{R_{c;eli}}$$

$$h_{p12;eli} = h_{p13;eli} = \frac{3}{R_{c;eli}}$$

Dove $pl\#$ indica lo strato, eli indica l'elemento i -esimo.

A seconda della classe di costruzione rispetto alla distribuzione della massa nella costruzione, la capacità di calore areale del nodo pli dell'elemento opaco eli per unità di area è suddivisa sui nodi.

Componenti opachi - Proprietà dei nodi secondo l'approccio nazionale

Il metodo descritto nell'appendice nazionale opera una diversa discretizzazione della parete in nodi, in modo più aderente alle caratteristiche fisiche degli strati (si veda la Figura 5).

Si applica la procedura seguente:

- Per lo strato j -esimo il numero di Fourier è definito come $Fo_j = \Delta t \cdot \lambda_j / (\rho_j \cdot c_j) / d_j^2$.
- Il numero di Fourier di riferimento (Fo_{ref}) è fissato pari a 0,5.
- Il numero di nodi capacitivi nello strato j -esimo è calcolato come:

$$Ncn_j = \max \left\{ 1; \left\lfloor \sqrt{Fo_{ref} / Fo_j + 0,999999} \right\rfloor \right\}$$

- Il numero totale di nodi capacitivi è calcolato come $\sum_{j=1}^N Ncn_j$
- Il numero di nodi (p/n) è uguale al numero totale di nodi capacitivi più due.
- ρ_j, c_j sono rispettivamente la densità [kg/m^3] e la capacità termica per unità di massa [$\text{J}/(\text{kg K})$] del materiale dello strato j -esimo dell'elemento edilizio.
- $R_{c;j;eli}$ è la resistenza conduttiva [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$] dello strato j -esimo dell'elemento edilizio, calcolata come d_j/λ_j dove d_j è lo spessore dello strato [m], e λ_j è la conduttività termica del materiale dello strato [$\text{W}/(\text{m K})$].
- $\Delta x_j = d_j/Ncn_j$ è lo spessore [m] della porzione di strato associata a ciascun nodo capacitivo nello strato j -esimo dell'elemento edilizio.

- i. $\rho_j \cdot c_j \cdot \Delta x_j$ è la capacità termica areica [$\text{J}/\text{m}^2 \text{K}$] associate a ciascun nodo capacitivo nello strato j -esimo dell'elemento edilizio.
- j. $R_{c,j;eli}/Ncn_j$ è la resistenza conduttiva [$\text{m}^2 \text{K}/\text{W}$] della porzione di strato associata a ciascun nodo capacitivo nello strato j -esimo dell'elemento edilizio, calcolata come $\Delta x_j/\lambda_j$.
- k. Se uno strato interno è un'intercapedine d'aria, la capacità termica areica $\kappa_{pli;eli}$ deve essere zero e le conduttanze internodali sono calcolate come $h_{pli-1;eli} = h_{pli;eli} = h_a \cdot 2$, dove h_a , in $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$, è la conduttanza mista convettiva-radiativa dello strato d'aria.

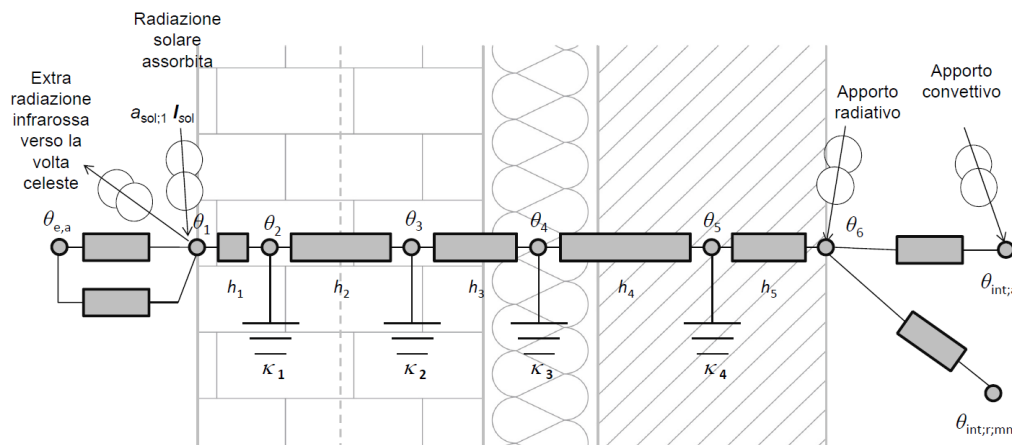


Figura 5. Modello a parametri concentrati per un componente di involucro opaco (fonte: UNI EN ISO 52016-1 – Appendice NA [13]).

Elementi a contatto con il terreno

Anche per gli elementi a contatto con il suolo il numero di nodi è 5, utilizzato per una combinazione degli strati: lo strato di terra fisso e il pavimento; con i coefficienti di scambio termico della superficie esterna sostituiti dalla conduttanza termica dello strato virtuale del terreno.

Componenti trasparenti

Per i componenti trasparenti il numero di nodi è pari a 2. Viene inoltre trascurata la massa del componente.

3 Il caso studio

3.1 Descrizione dell'edificio

Nei successivi paragrafi vengono illustrate le informazioni e i dati relativi al contesto in cui sorge l'edificio oggetto di analisi, alle caratteristiche del fabbricato e degli impianti esistenti. La documentazione fornita da ENEA e le assunzioni coordinate con le altre università partecipanti al progetto sono state utilizzate come riferimento per la caratterizzazione e la modellazione dell'edificio.

3.1.1 Informazioni generali e contesto esterno

L'edificio oggetto di analisi è un edificio residenziale condominiale sito nel quartiere San Lorenzo (Roma), tra le stazioni ferroviarie di Roma Termini e Roma Tiburtina (Figura 6).



Figura 6. Inquadramento territoriale (da Google Maps).

L'edificio è caratterizzato da una forma trapezoidale (Figura 7) con un lato adiacente all'edificio confinante; gli altri tre lati affacciano rispettivamente su Via degli Enotri, Via dei Reti e Viale dello Scalo San Lorenzo. È orientato principalmente verso nord-ovest (il prospetto su Via degli Enotri è orientato a 55° nord-ovest). È inserito in un contesto prevalentemente residenziale e commerciale con edifici più bassi o di pari altezza rispetto al caso studio, che non risulta, quindi, particolarmente ombreggiato dagli edifici circostanti. Infatti, le facciate esposte ad est e sud-est si affacciano su ampi spazi aperti privi di edifici costruiti (Figura 7).



Figura 7. Individuazione dell'edificio (da Google Maps).

L'edificio oggetto di analisi è costituito da 7 piani fuori terra (Figura 8) e un piano seminterrato. Le principali caratteristiche geometriche dell'edificio sono riportate in Tabella 1. Il piano terra, non oggetto di analisi, ospita quattro locali commerciali (in grigio in Figura 8) e un locale condominiale, mentre gli altri sei piani fuori terra ospitano 3 alloggi ciascuno, per un totale di 18 alloggi, e gli spazi di servizio (vano scala comune). I piani intermedi (dal piano 1 al piano 4) sono caratterizzati da piante simili, con alloggi di 48, 57 e 87 m² (rispettivamente in azzurro, arancione e giallo in Figura 8). Gli ultimi due piani, invece, presentano un arretramento della facciata su Via dei Reti per la creazione di un terrazzo (sulla copertura del quarto piano) sul piano quinto e di un balcone sul piano sesto. Gli alloggi presentano metrature inferiori rispetto ai piani sottostanti, in particolare di 39, 47 e 85 m² (rispettivamente in verde, rosso e blu in Figura 8). In Figura 9 vengono riportati i prospetti dell'edificio oggetto di analisi.

Tabella 1. Principali caratteristiche geometriche dell'edificio.

Parametro	Simbolo	U.M.	Valore
Volume lordo riscaldato	V_l	m ³	5280
Superficie netta di pavimento riscaldato	A_f	m ²	1091
Superficie d'involucro disperdente	A_{env}	m ²	1958
Rapporto di forma	A_{env} / V_l	m ⁻¹	0,37



Figura 8. Pianta del piano terra, piani 1-4 (pianta tipo) e piani 5/6 (pianta tipo).



Figura 9. Prospetti sud-est (a – Viale dello Scalo San Lorenzo), nord-est (b – Via dei Reti) e nord-ovest (c – Via degli Enotri).

3.1.2 Descrizione del fabbricato

L'edificio, edificato nel 1926, presenta una struttura a setti portanti in laterizio e pietra, e un involucro edilizio prevalentemente non isolato. La classificazione dei componenti d'involucro è stata realizzata a partire dalla documentazione fornita da ENEA e secondo le specifiche delle norme tecniche.

Per quanto riguarda l'involucro opaco, si è fatto riferimento alla descrizione della stratigrafia riportata nella documentazione tecnica, e le caratteristiche dei materiali sono state ricavate dalla normativa tecnica. Le principali caratteristiche termofisiche dei componenti edilizi opachi sono riportate in Tabella 2 e Tabella 3.

Le pareti perimetrali esterne, ad esclusione degli ultimi due piani, hanno uno spessore di 70 cm e sono caratterizzate da due filari di laterizi pieni separati da uno strato di ciottoli e pietre frantumati, con rivestimento interno ed esterno in intonaco di calce e sabbia. A seguito di una probabile sopraelevazione, le pareti esterne degli ultimi due piani si presentano più leggere rispetto alle pareti sottostanti. Sono caratterizzate, infatti, da uno spessore minore (33 cm) e sono caratterizzate da due filari di mattoni semipieni separati da un'intercapedine d'aria non ventilata, e rivestimenti in intonaco. In corrispondenza del sottofinestra, le pareti esterne presentano una stratigrafia (unico filare di laterizi semipieni e rivestimento in intonaco di calce e sabbia) e uno spessore differenti (27 cm). In Tabella 2 sono riportate le caratteristiche termofisiche dei componenti opachi verticali (partizioni interne comprese).

Tabella 2. Caratteristiche dei componenti edilizi opachi verticali.

Cod	Descrizione	s	U	M_s	Y_{ie}	κ_i
		[m]	[W·m ⁻² K ⁻¹]	[kg·m ⁻²]	[W·m ⁻² K ⁻¹]	[kJ·m ⁻² K ⁻¹]
M1	Parete esterna (piani terra-4)	0,70	0,90	1220	0,02	62,51
M2	Tramezzo interno (1)	0,10	2,25	114	1,72	55,59
M3	Tramezzo interno (2)	0,20	1,55	284	0,63	64,16
M4	Parete esterna (piani 5-6)	0,33	1,14	364	0,390	59,67
M5	Parete esterna sottofinestra	0,27	1,70	411	0,65	67,13

Per quanto riguarda i componenti opachi orizzontali, le strutture disperdenti sono rappresentate dal solaio che separa il piano terra (non oggetto d'analisi) e il primo piano, e il solaio di copertura. Si tratta, in generale, di solai in laterocemento con tavelloni portanti o blocchi in laterizio e sottofondo in calcestruzzo. I solai interpiano sono caratterizzati da spessori di 20 cm (tra il piano terra e i piani 1-4) e di 30 cm (tra gli ultimi due piani), entrambi rivestiti con piastrelle in marmo. La copertura piana calpestabile è invece caratterizzata da uno spessore di 33 cm e rivestimento in piastrelle in ceramica. In Tabella 3 sono riportate le caratteristiche termofisiche dei componenti opachi orizzontali (partizioni interne comprese).

Tabella 3. Caratteristiche dei componenti edilizi opachi orizzontali.

Cod	Descrizione	s	U	M_s	Y_{ie}	κ_i
		[m]	[W·m ⁻² K ⁻¹]	[kg·m ⁻²]	[W·m ⁻² K ⁻¹]	[kJ·m ⁻² K ⁻¹]
S1	Solaio p. terra/p. primo	0,20	1,66	316	1,07	100,17
S2	Solaio di copertura	0,33	1,66	486	0,57	106,88
S3	Solaio interpiano (piani 1-4)	0,20	1,94	283	1,08	91,95
S4	Solaio interpiano (piani 5-6)	0,30	1,62	413	0,61	96,44

I serramenti presenti nel fabbricato sono composti da telaio in metallo e vetri singoli (per i serramenti dei piani 1-4) e telaio in legno e vetri doppi (per i serramenti dei piani 5 e 6). Le chiusure oscuranti sono invece costituite da persiane in legno a doppia anta, e sono installate su tutte le aperture, ad eccezione delle finestre di dimensione 0,5 × 1,8 m nei piani intermedi. In Tabella 4 vengono riportate le principali caratteristiche dei componenti vetrati.

Tabella 4. Caratteristiche dei componenti edilizi trasparenti.

Cod	Descrizione	A_w	F_F	U_w	U_{w+shut}	$g_{gl,n}$	g_{gl+sh}
		[m ²]	[-]	[W·m ⁻² K ⁻¹]	[W·m ⁻² K ⁻¹]	[-]	[-]
W1	Finestra a due ante con vetro singolo	1,80	0,23	5,979	4,144	0,75	0,75
W2	Finestra a un'anta con vetro singolo	0,90	0,24	6,004	4,168	0,75	0,75
W3	Finestra a due ante con vetro doppio	1,80	0,23	3,188	2,555	0,85	0,85
W4	Finestra a un'anta con vetro doppio	0,90	0,24	3,186	2,556	0,85	0,85
W5	Portafinestra a due ante con vetro doppio	3,36	0,18	3,120	2,500	0,85	0,85
W6	Finestra a due ante con vetro doppio	2,16	0,20	3,141	2,517	0,85	0,85
W7	Finestra a due ante con vetro doppio	5,17	0,12	3,012	2,413	0,85	0,85

3.1.3 Descrizione dell'impianto

Gli alloggi presenti nell'edificio oggetto di analisi sono serviti da un impianto centralizzato per il riscaldamento; gli spazi comuni, invece, non risultano riscaldati. Il generatore di calore per il riscaldamento è una caldaia localizzata in centrale termica. In particolare, si tratta di un generatore a basamento in ghisa con bruciatore atmosferico ad aria aspirata (Figura 10), con potenza termica utile nominale di 152,5 kW e rendimento termico utile alla potenza nominale di 0,904. I fabbisogni elettrici di generazione sono stati assunti pari a 63 W. La circolazione viene effettuata tramite elettropompe con portata massima di 26,4 m³/h ed assorbimento elettrico pari a 400 W (Figura 11).

Per quanto riguarda il sottosistema di distribuzione, i terminali di emissione sono costituiti da radiatori in ghisa posizionati sulle pareti esterne, e l'impianto di distribuzione è caratterizzato da montanti non isolati correnti nel lato interno delle pareti esterne. Risulta assente un sistema di regolazione (la regolazione avviene manualmente).



Figura 10. Generatore di calore.



Figura 11. Pompe di circolazione.

3.2 Assunzioni di calcolo e condizioni al contorno per le simulazioni

Si riportano di seguito le assunzioni di calcolo e le condizioni al contorno che sono state fissate per lo sviluppo del calcolo secondo il metodo orario introdotto dalla UNI EN ISO 52016-1.

3.2.1 Dati climatici

L'edificio è stato analizzato in tre diverse zone climatiche, corrispondenti a Milano (zona climatica E), Roma (zona climatica D) e Palermo (zona climatica B). I dati climatici per ciascuna delle tre località considerate si riferiscono all'anno climatico tipo su base oraria elaborato dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI) nel 2015 [14]. I rispettivi valori medi mensili sono contenuti nella norma UNI 10349-1 [15] e riportati in Figura 12 e in Figura 13.

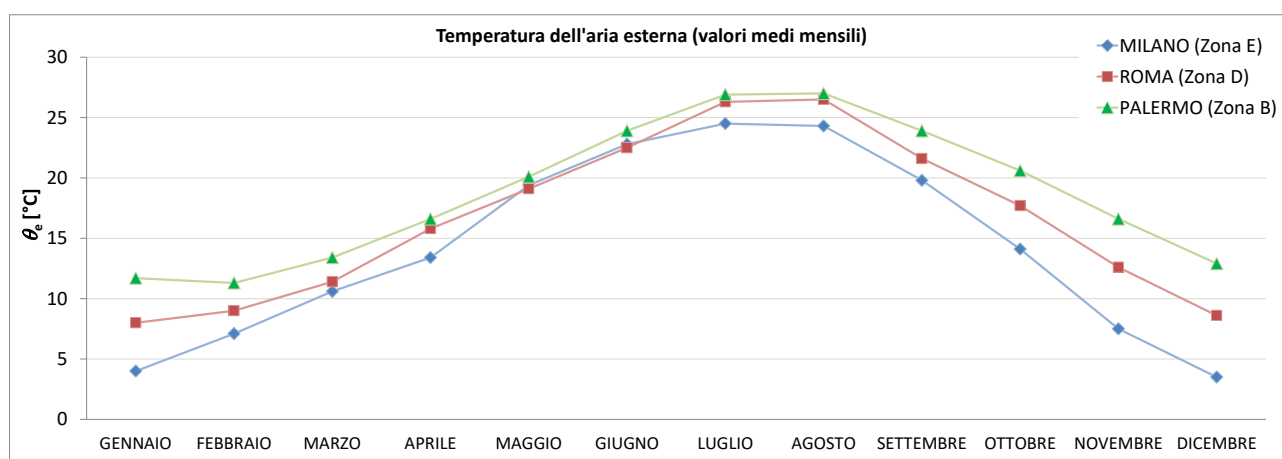


Figura 12. Valori medi mensili della temperatura dell'aria esterna (fonte: UNI 10349-1 [15]).

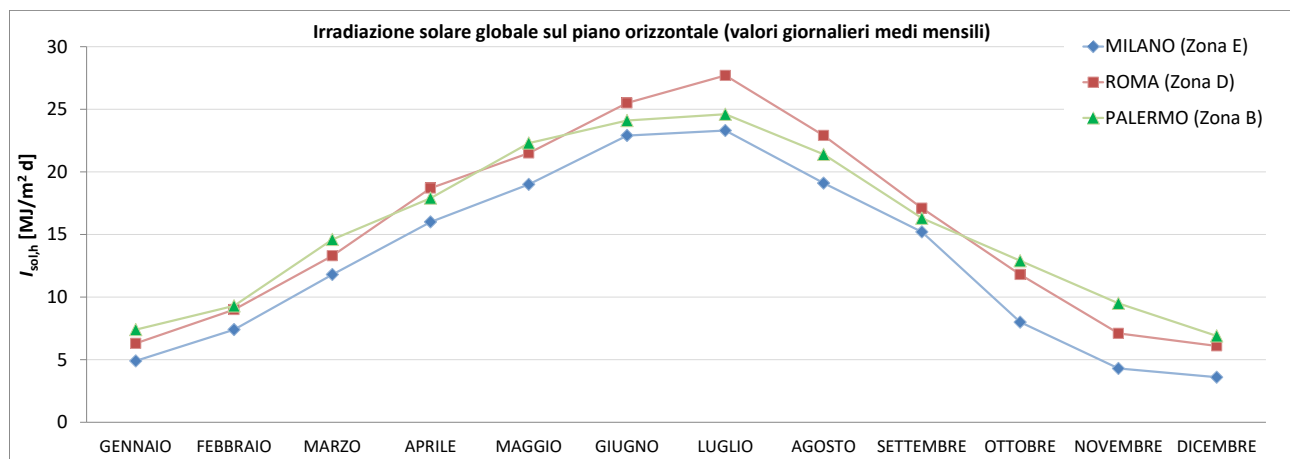


Figura 13. Valori medi mensili dell'irradiazione solare globale sul piano orizzontale (fonte: UNI 10349-1 [15]).

3.2.2 Zonizzazione

L'edificio è stato suddiviso nelle seguenti zone termiche (Figura 14):

- zona termica 1: 1° piano (2° F.T.);
- zona termica 2: dal piano 2° (3° F.T.) al piano 4° (5° F.T.);
- zona termica 3: dal piano 5° (6° F.T.) al piano 6° (7° F.T.).

Il piano terra, che ospita una diversa destinazione l'uso, è stato escluso dall'analisi poiché riscaldato non dall'impianto termico centralizzato, ma da un diverso impianto.

Si riportano in Tabella 5 i principali dati geometrici delle zone termiche.

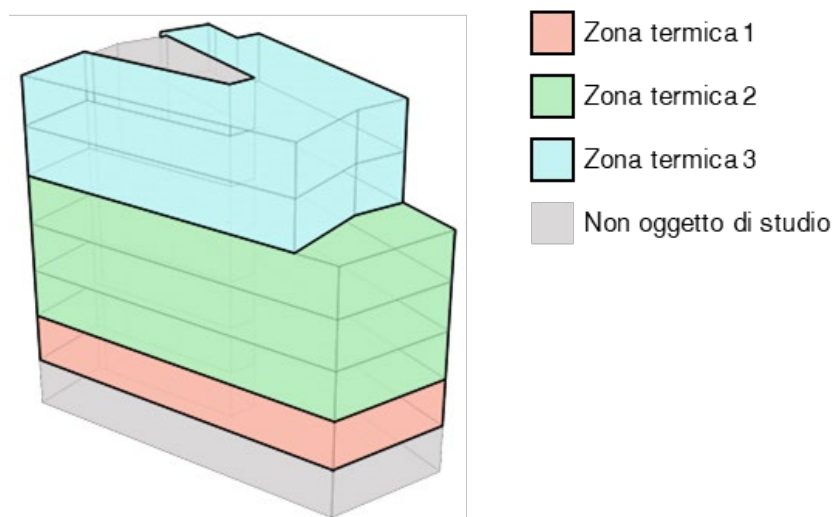


Figura 14. Schematizzazione tridimensionale delle zone termiche nelle quali è stato suddiviso lo spazio climatizzato dell'edificio.

Tabella 5. Quadro dei principali dati geometrici delle zone termiche.

	A_f [m ²]	V_i [m ³]	A_{env}/V_i [m ⁻¹]
Zona termica 1	182	940	0,31
Zona termica 2	541	2 806	0,32
Zona termica 3	368	1 535	0,51

3.2.3 Condizioni al contorno

Il piano terra è stato assunto climatizzato a temperatura costante, come segue:

- 20 °C durante la stagione invernale;
- 26 °C da giugno ad agosto;
- 23 °C nel restante periodo.

Le stesse condizioni al contorno sono state fissate per gli edifici costruiti in aderenza alle testate del caso studio che affacciano su viale dello Scalo di San Lorenzo e via degli Enotri.

Le ostruzioni del contesto circostante sono state modellate geometricamente come indicato nella UNI EN ISO 52016-1.

3.2.4 Profili di utenza

I dati relativi all'utenza sono stati ricavati prevalentemente dalla bozza di Appendice Nazionale della norma UNI EN 16798-1:2019 [16,17]. In Tabella 6 si riporta il quadro d'insieme dei dati d'utenza assunti nel calcolo, con l'indicazione, per ogni parametro, dell'equazione o del criterio per la sua determinazione, il valore numerico (in assenza di equazione), la fonte del dato e alcune note esplicative.

Si riporta in Tabella 7 il profilo di occupazione assunto per l'edificio residenziale [16]. Da Figura 15 a Figura 17 sono rappresentati i profili giornalieri su base oraria, rispettivamente, degli apporti di calore relativi alle sorgenti interne (Figura 15), del tasso di ricambio orario (Figura 16) e del funzionamento dell'impianto di riscaldamento per ciascuna località, quest'ultimo da utilizzarsi nella valutazione adattata all'utenza (Figura 17). Per semplicità i primi due profili si riferiscono alla zona termica 1; per le altre zone termiche si registrano variazioni trascurabili. Tutti i profili sono stati costruiti secondo quanto indicato in Tabella 6.

Nella valutazione adattata all'utenza (*tailored*) si è assunto che nella stagione di riscaldamento, stabilita in funzione della zona climatica, la temperatura di regolazione sia impostata a 20 °C nelle ore di funzionamento dell'impianto, e a 16 °C in regime di attenuazione. Nella valutazione standard, invece, all'interno della stagione di riscaldamento, l'impianto presenta un funzionamento continuo sulle 24 ore a temperatura di regolazione costante pari a 20 °C.

La stagione di raffrescamento è stata assunta dal 1° giugno al 31 agosto con un regime di funzionamento dell'impianto continuo sulle 24 ore e una temperatura di regolazione di 26 °C per tutte le zone climatiche.

Le chiusure oscuranti installate nell'edificio, che sono persiane in legno a doppia anta, sono considerate in funzione 12 ore al giorno, dalle ore 20:00 alle ore 08:00.

Tabella 6. Quadro riepilogativo dei dati d'utenza per l'edificio residenziale (appartamenti).

	Parametro	Equazione/criterio	Valore	Unità di misura	Fonte	Note
Periodo di utilizzo	Ora del giorno, INIZIO		0	h	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale ^(*) - Tabella 26b	
	Ora del giorno, FINE		24	h	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale ^(*) - Tabella 26b	
	Interruzioni, all'interno dell'intervallo		0	h	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale ^(*) - Tabella 26b	
	Giorni settimanali		7	d	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale ^(*) - Tabella 26b	
	Ore giornaliere		24	h	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale ^(*) - Tabella 26b	
	Ore all'anno		8760	h	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale ^(*) - Tabella 26b	
Occupanti	Numero di persone per appartamento	Per appartamento monolocale o con una sola camera da letto: 2 persone. Per ogni camera da letto aggiuntiva: - se la superficie è inferiore a 14 m ² , 1 persona in più; - se la superficie è uguale o superiore a 14 m ² , 2 persone in più.			UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale ^(*) - Tabella A.19	Per l'edificio oggetto di studio, si ipotizzano 7 persone per piano (2 persone in ciascuno dei due appartamenti con una sola camera da letto, e 3 persone nell'appartamento con una camera da letto aggiuntiva di piccole dimensioni).
	Profilo orario di occupazione				UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale ^(*) - Tabella 26b	
Apporti termici interni	Occupanti - apporti per persona (totale)		118	W	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale ^(*) - Tabella A.20	Da moltiplicare per il numero di persone, secondo il profilo di occupazione.
	Occupanti - apporti per persona (quota sensibile, convettiva)		41	W	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale ^(*) - Tabella A.20	
	Occupanti - apporti per persona (quota sensibile, radiativa)		39	W	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale ^(*) - Tabella A.20	
	Occupanti - apporti per persona (quota latente)		38	W	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale ^(*) - Tabella A.20	
	Occupanti - produzione di vapore per persona	$G_{w,v,oc} = (q_{int,oc,lat}/h_{vap}) \times 3600$	54,7	g/h	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale ^(*) - Equazione A.8 e Tabella A.20	
	Apparecchiature e illuminazione - apporti interni quota sensibile	$q_{int,eq,sen} = 2,2 + 136/A_{cf}$		W/m ²	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale ^(*) - Equazione A.5	Modulato secondo il profilo di occupazione. A_{cf} = superficie di pavimento climatizzata [m ²]
	Apparecchiature - produzione di vapore	$G_{w,v,eq} = 0,32 + 28,8/A_{cf}$		g/(h m ²)	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale ^(*) - Equazione A.6	Modulato secondo il profilo di occupazione. A_{cf} = superficie di pavimento climatizzata [m ²]
Ventilazione	Portata di ventilazione minima per la qualità dell'aria	$q_{tot} = n \cdot q_p + A_{cf} \cdot q_B$, dove: $q_p = 7 \text{ l/(s pers.)}$, $q_B = 0 \text{ l/(s m}^2\text{)}$		l/s	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale ^(*) - Tabelle A.11 e A.12	Categoria II dell'ambiente interno. Segue il profilo di occupazione
Condizioni termo-igrometriche di set-point	$T_{op,min}$ - riscaldamento		20	°C	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale ^(*) - Tabella A.2	Categoria II dell'ambiente interno
	$T_{op,max}$ - raffrescamento		26	°C	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale ^(*) - Tabella A.2	Categoria II dell'ambiente interno
	$T_{op,min}$ in regime di attenuazione		16	°C	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale ^(*) - Tabella 26b	
	$T_{op,max}$ in regime di attenuazione		32	°C	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale ^(*) - Tabella 26b	
	Umidità relativa minima		40	%	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale ^(*) - Tabella A.13	Categoria II dell'ambiente interno
	Umidità relativa massima		60	%	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale ^(*) - Tabella A.13	Categoria II dell'ambiente interno
Durata giornaliera di accensione dell'impianto	TAILORED	Riscaldamento - Milano (zona E)	14	h/d	D.P.R. 74/2013	Regime attenuato dalle 22:00 alle 06:00 e dalle 13:00 alle 15:00
		Riscaldamento - Roma (zona D)	12	h/d	D.P.R. 74/2013	Regime attenuato dalle 22:00 alle 06:00 e dalle 12:00 alle 16:00
		Riscaldamento - Palermo (zona B)	8	h/d	D.P.R. 74/2013	Regime attenuato dalle 22:00 alle 06:00 e dalle 10:00 alle 18:00
		Raffrescamento (tutte le zone climatiche)	24	h/d	-	Regime di funzionamento continuo
	STANDARD	Riscaldamento (tutte le zone climatiche)	24	h/d	Standard energy rating (UNI/TS 11300-1)	Regime di funzionamento continuo
		Raffrescamento (tutte le zone climatiche)	24	h/d	Standard energy rating (UNI/TS 11300-1)	Regime di funzionamento continuo

(*) Bozza del dicembre 2019

Tabella 7. Profilo di occupazione dell'edificio residenziale (appartamenti) (fonte: UNI EN 16798-1, Appendice Nazionale, bozza del dicembre 2019 [16,17]).

h	Profilo di occupazione - Uso residenziale, appartamenti		
	Giorni feriali	Sabato	Domenica/Festività
1	1,0	1,0	1,0
2	1,0	1,0	1,0
3	1,0	1,0	1,0
4	1,0	1,0	1,0
5	1,0	1,0	1,0
6	1,0	1,0	1,0
7	0,5	0,8	0,8
8	0,5	0,8	0,8
9	0,5	0,8	0,8
10	0,1	0,8	0,8
11	0,1	0,8	0,8
12	0,1	0,8	0,8
13	0,1	0,8	0,8
14	0,2	0,8	0,8
15	0,2	0,8	0,8
16	0,2	0,8	0,8
17	0,5	0,8	0,8
18	0,5	0,8	0,8
19	0,5	0,8	0,8
20	0,8	0,8	0,8
21	0,8	0,8	0,8
22	0,8	0,8	0,8
23	1,0	1,0	1,0
24	1,0	1,0	1,0

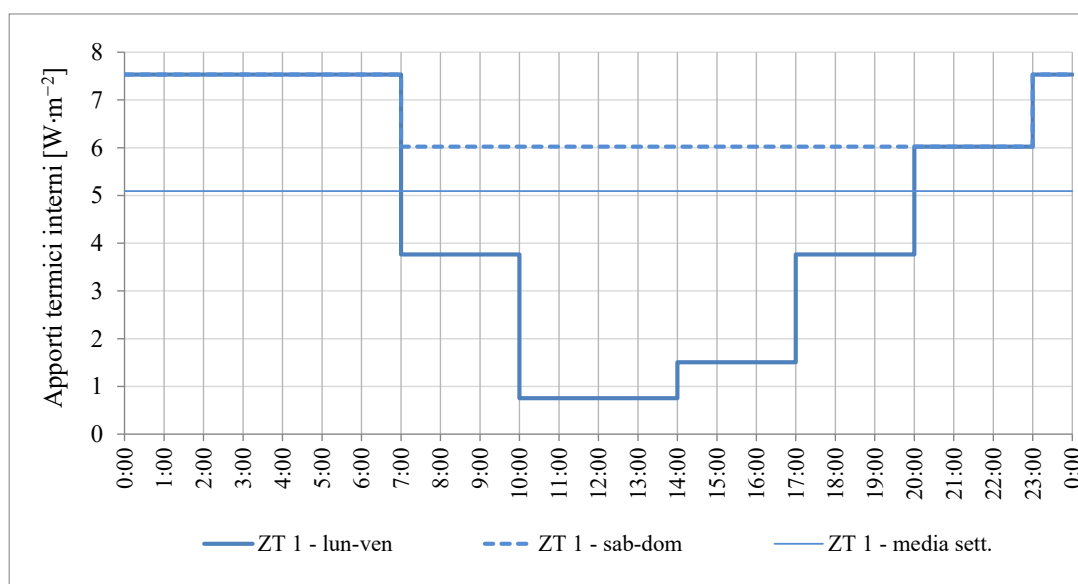


Figura 15. Profilo orario degli apporti interni di calore (quota sensibile) dovuti a occupanti, apparecchiature e illuminazione. Esempio per la zona termica 1.

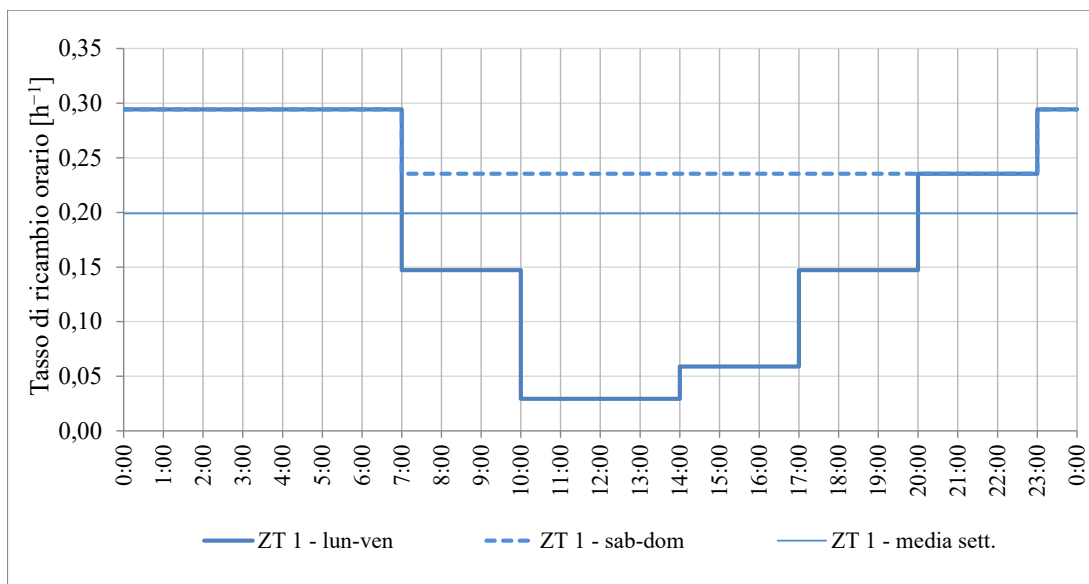


Figura 16. Profilo orario del tasso di ricambio d'aria (ventilazione naturale). Esempio per la zona termica 1.

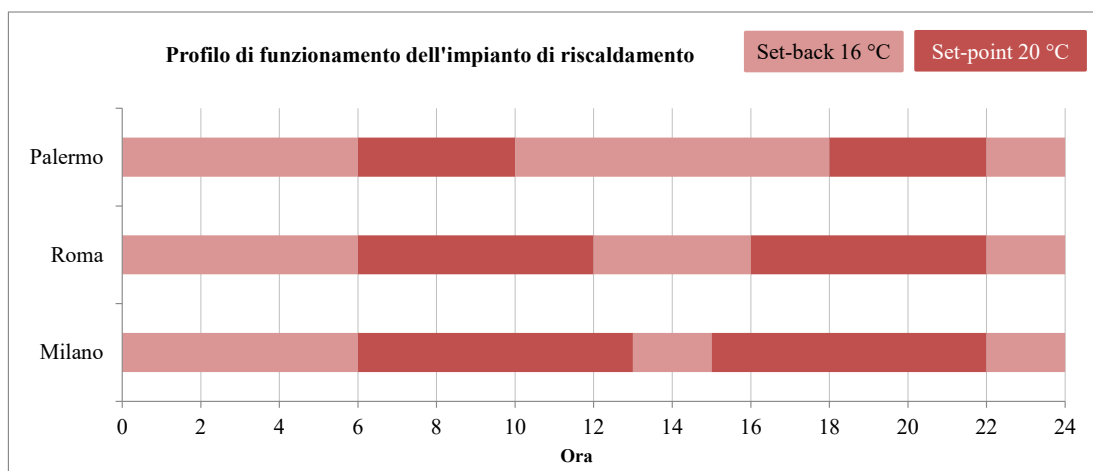


Figura 17. Profilo orario di funzionamento dell'impianto di climatizzazione invernale per le tre zone climatiche.

3.2.5 Semplificazioni

All'interno della modellazione sono state effettuate le seguenti semplificazioni:

- assenza di ponti termici;
- vano scala alla temperatura dell'aria esterna.

3.3 Risultati delle simulazioni

Si riportano di seguito i risultati delle simulazioni condotte con il metodo orario della UNI EN ISO 52016-1 per l'edificio sito a Milano, Roma e Palermo, per ciascuna delle due valutazioni energetiche considerate, adattata all'utenza e standard. Il fabbisogno annuo di energia termica utile per il riscaldamento e per il raffrescamento, riferito alla superficie di pavimento climatizzata, è riportato rispettivamente in Tabella 8 e in Tabella 9. I risultati sono coerenti con le caratteristiche dell'edificio. Infatti, l'assenza di isolamento termico nell'involucro edilizio determina un cospicuo fabbisogno di riscaldamento; l'elevata capacità termica, d'altro canto, determina una buona prestazione estiva.

Da Figura 18 a Figura 20 è riportato il confronto tra la valutazione adattata all'utenza e la valutazione standard dei fabbisogni termici di riscaldamento e raffrescamento su base mensile per l'intero edificio per ciascuna delle tre località. La valutazione energetica adattata all'utenza mostra fabbisogni di energia, sia per il riscaldamento sia per il raffrescamento, inferiori alla valutazione standard di circa il 5% in media.

Da Figura 21 a Figura 26 è rappresentato l'andamento della temperatura operativa interna nelle tre zone termiche considerate nel periodo di non accensione degli impianti (condizione di *free-floating*) per le tre località. Nello specifico sono riportate una settimana di inizio maggio e una settimana di fine settembre.

Dall'analisi di tali grafici è possibile notare come l'inerzia dovuta alla massa delle chiusure esterne dei piani intermedi (zone termiche 1 e 2) renda tali zone meno soggette alle oscillazioni della temperatura esterna; coerentemente con ciò, la gestione intermittente dell'impianto non genera dei risparmi energetici sensibili. È inoltre possibile notare l'influenza del piano terreno, la cui temperatura nei periodi di non climatizzazione è stata supposta pari a 23 °C, sul profilo della temperatura operativa interna della zona termica 1.

Si presentano, infine, da Figura 27 a Figura 29 per ciascuna località e per la zona termica 2 (ritenuta rappresentativa), i profili orari dei carichi di riscaldamento per una settimana di fine gennaio, al fine di poter apprezzare la correlazione tra la temperatura esterna e la potenza termica richiesta, nonché lo sfasamento temporale derivante dall'inerzia termica dell'edificio.

Tabella 8. Fabbisogno annuo di energia termica utile per il riscaldamento normalizzato sulla superficie di pavimento climatizzata [kWh/m²].

	Milano		Roma		Palermo	
	Valutazione standard	Valutazione adattata all'utenza	Valutazione standard	Valutazione adattata all'utenza	Valutazione standard	Valutazione adattata all'utenza
Zona termica 1	108,3	102,3	63,7	58,9	33,6	29,2
Zona termica 2	117,4	114,0	68,9	66,2	37,8	35,2
Zona termica 3	173,2	165,5	104,8	98,6	58,7	53,1
<i>Totale edificio</i>	<i>134,7</i>	<i>129,4</i>	<i>80,1</i>	<i>75,9</i>	<i>44,1</i>	<i>40,2</i>

Tabella 9. Fabbisogno annuo di energia termica utile per il raffrescamento normalizzato sulla superficie di pavimento climatizzata [kWh/m²].

	Milano	Roma	Palermo
	Valutazione standard / adattata all'utenza	Valutazione standard / adattata all'utenza	Valutazione standard / adattata all'utenza
Zona termica 1	6,3	14,1	17,7
Zona termica 2	7,0	15,1	18,9
Zona termica 3	15,9	26,6	31,0
<i>Totale edificio</i>	<i>9,9</i>	<i>18,8</i>	<i>22,8</i>

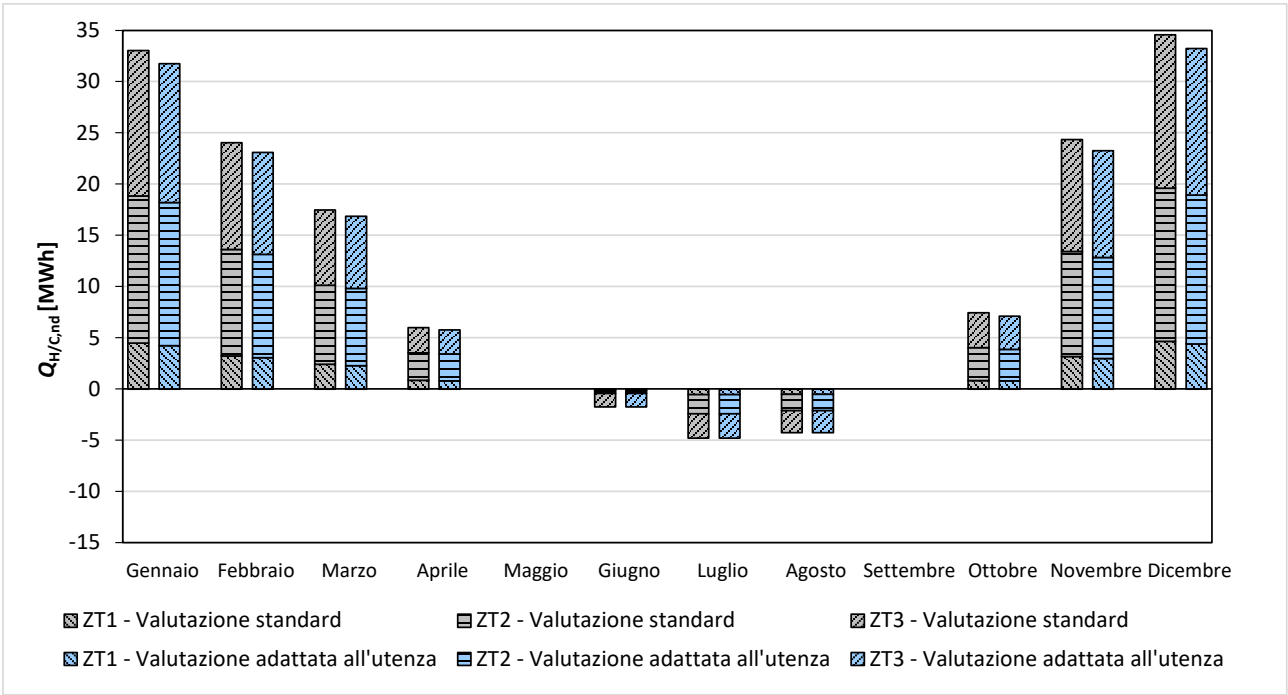


Figura 18. Fabbisogno termico utile per riscaldamento e raffrescamento – Milano.

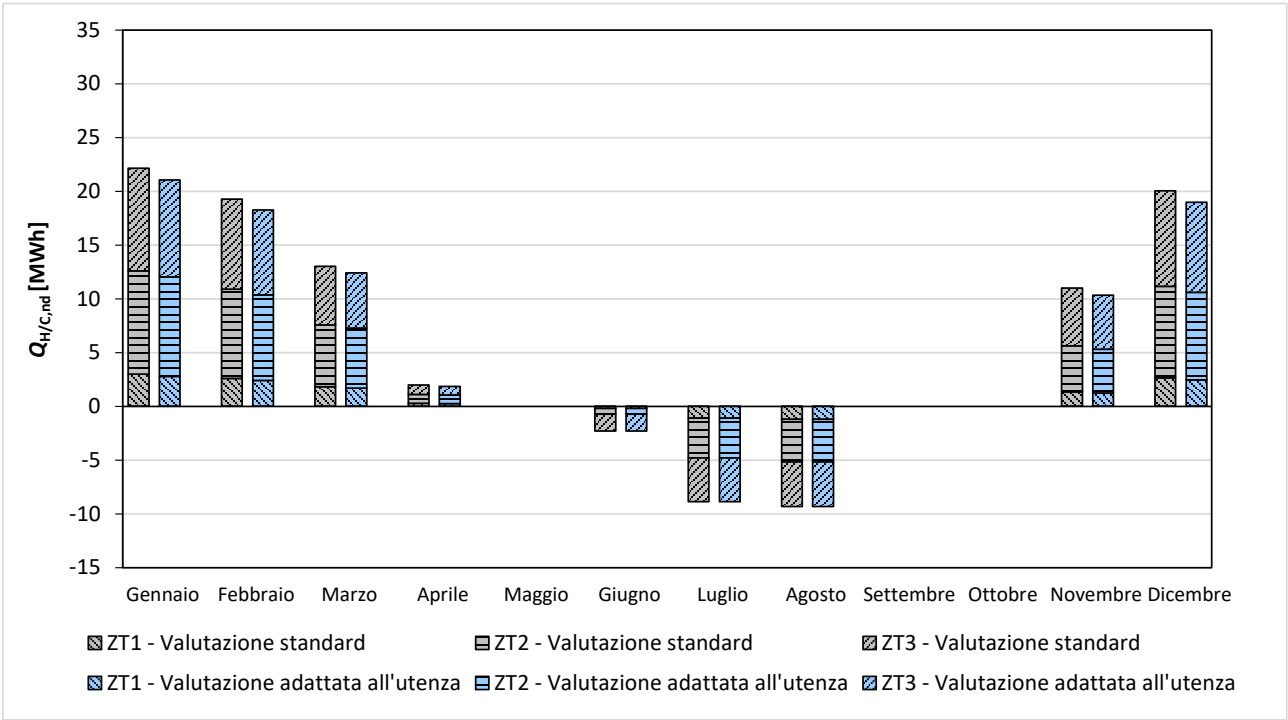


Figura 19. Fabbisogno termico utile per riscaldamento e raffrescamento – Roma.

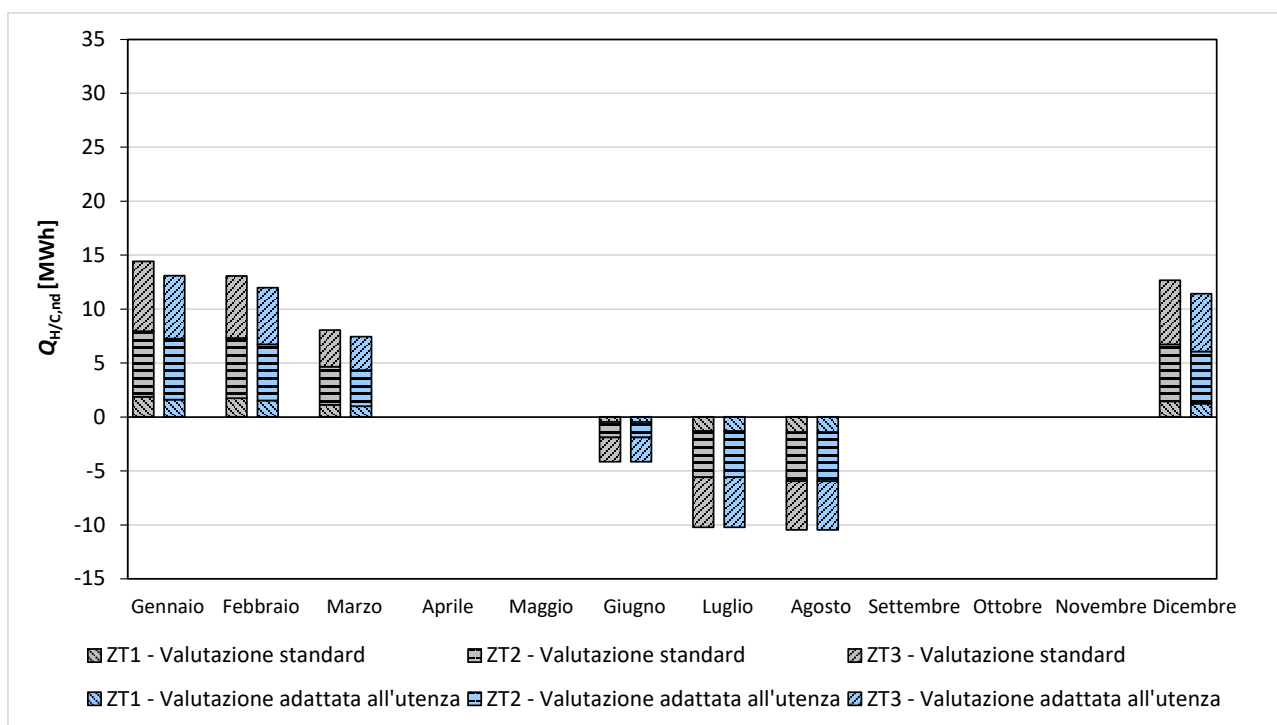


Figura 20. Fabbisogno termico utile per riscaldamento e raffrescamento – Palermo.

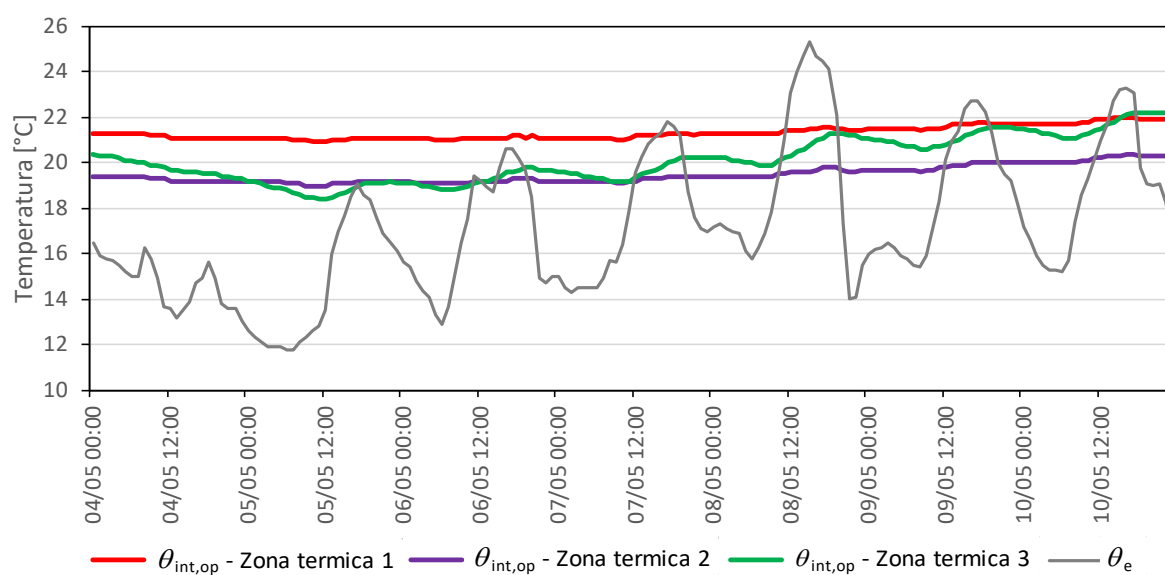


Figura 21. Temperatura operativa interna in una settimana di maggio – Milano.

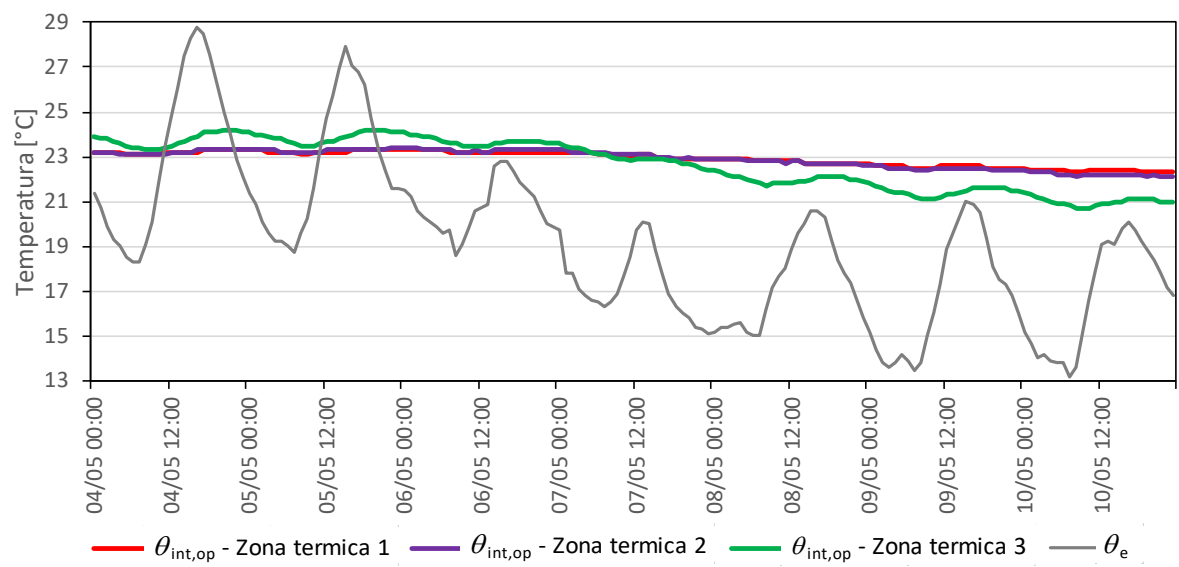


Figura 22. Temperatura operativa interna in una settimana di settembre – Milano.

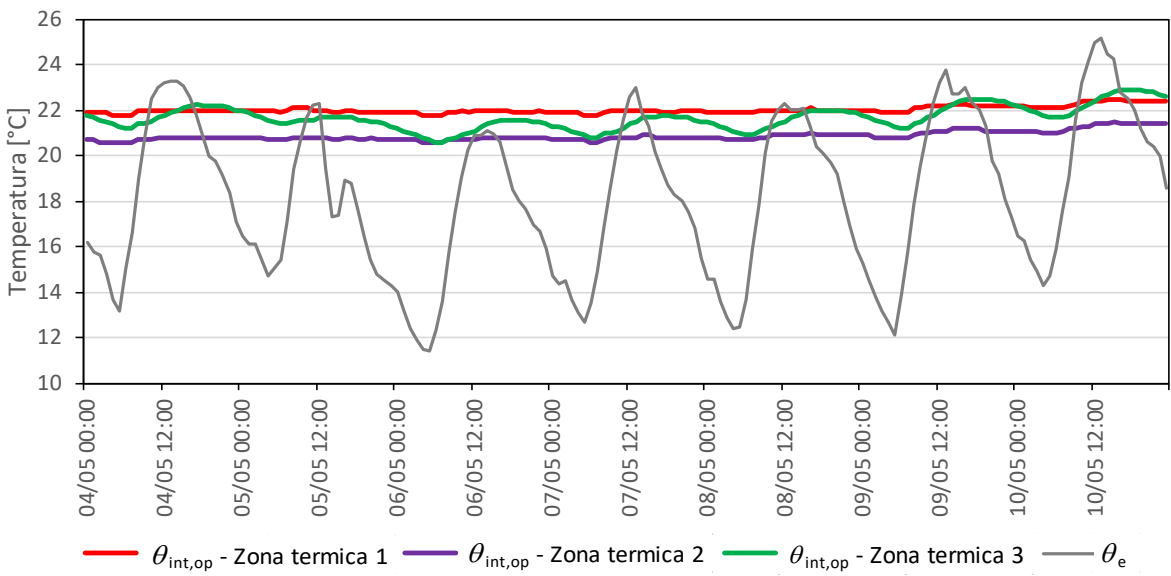


Figura 23. Temperatura operativa interna in una settimana di maggio – Roma.

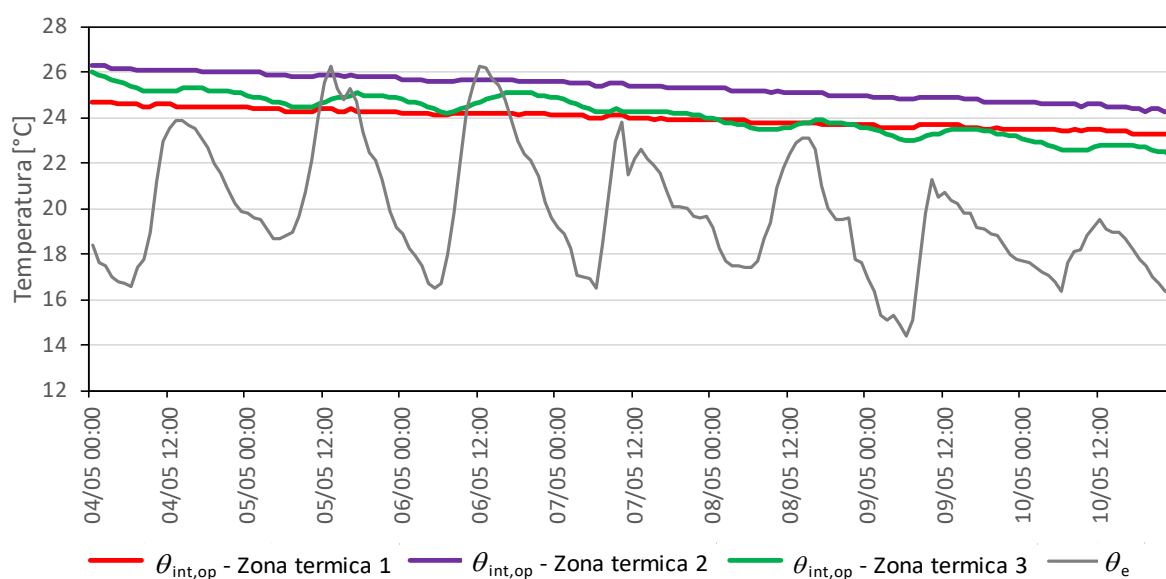


Figura 24. Temperatura operativa interna in una settimana di settembre – Roma.

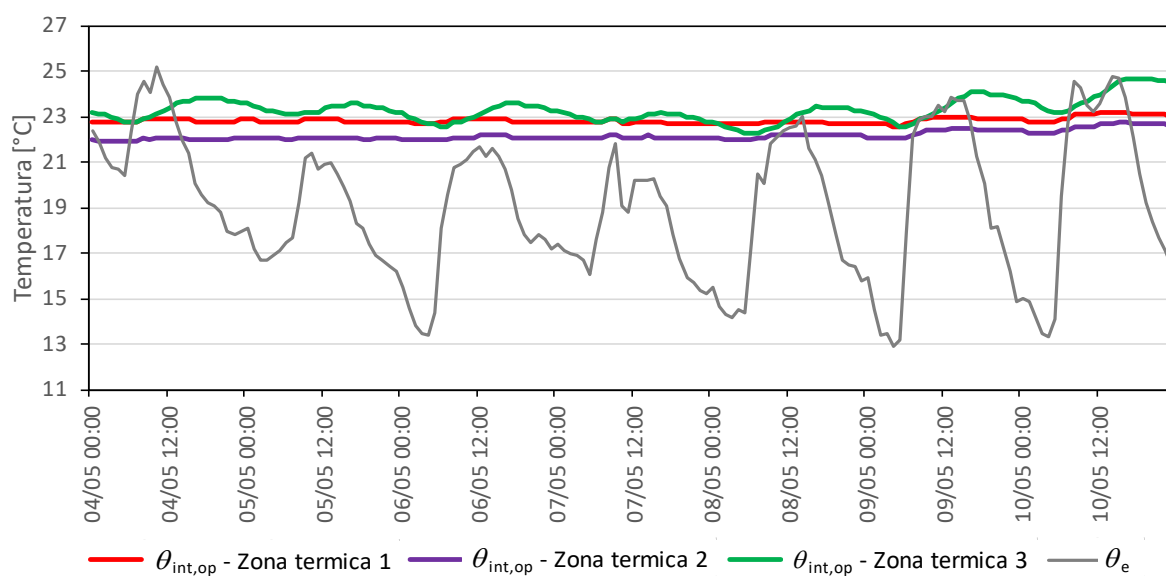


Figura 25. Temperatura operativa interna in una settimana di maggio – Palermo.

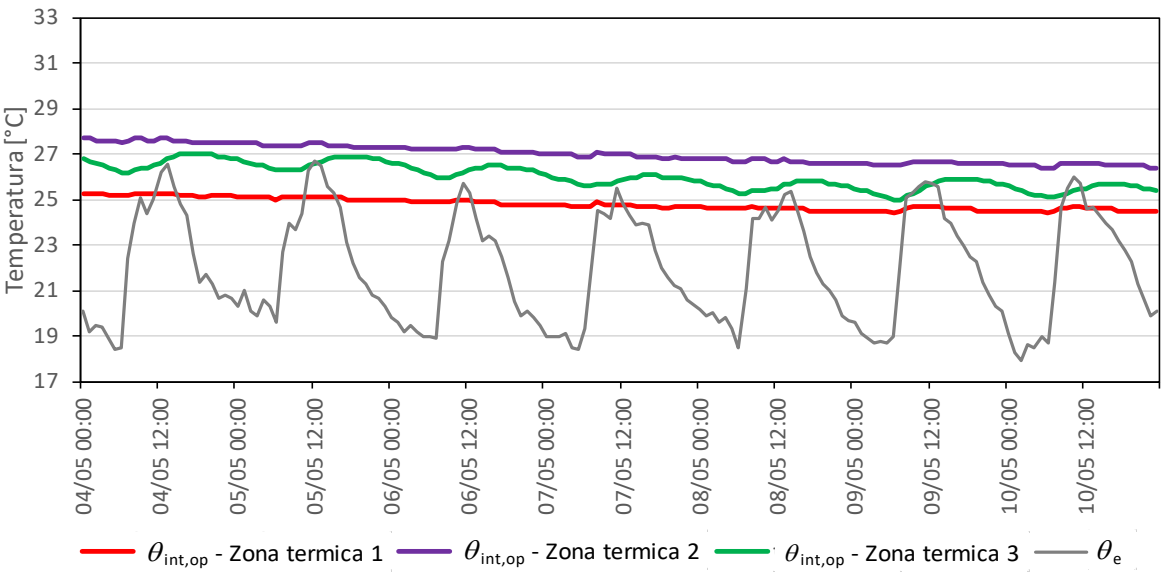


Figura 26. Temperatura operativa interna in una settimana di settembre – Palermo.

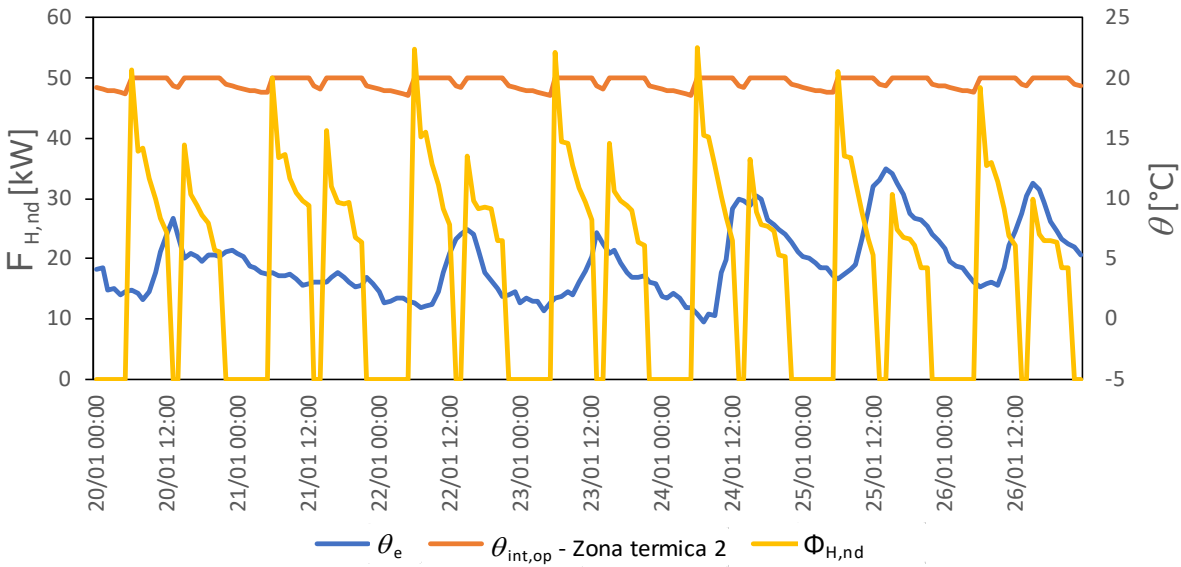


Figura 27. Profilo orario del carico termico in una settimana di gennaio per la zona termica 2 – Milano.

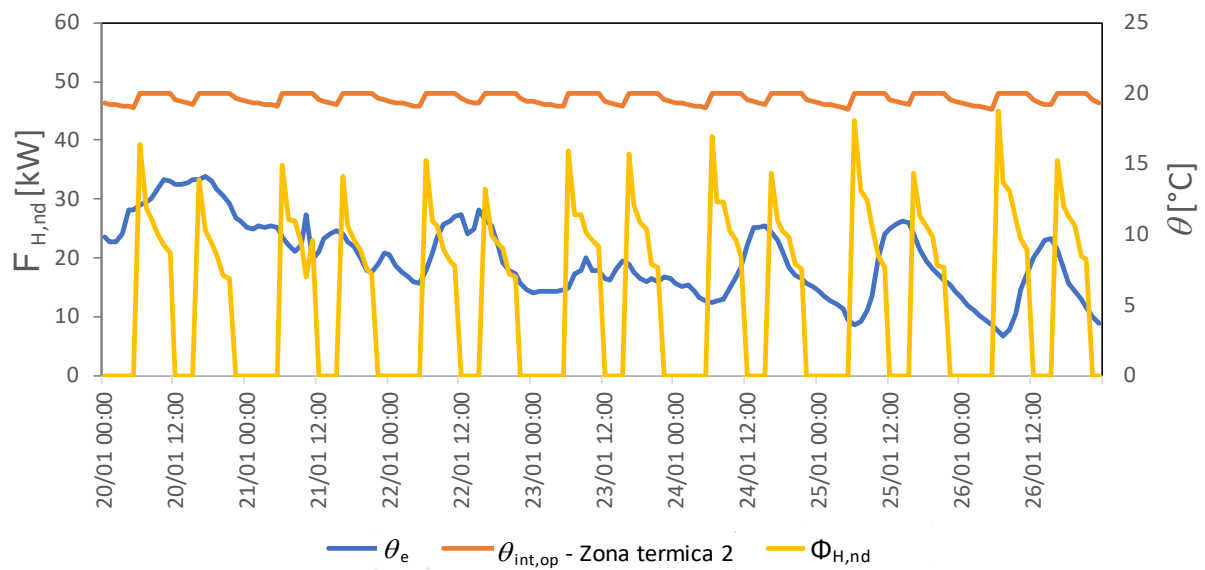


Figura 28. Profilo orario del carico termico in una settimana di gennaio per la zona termica 2 – Roma.

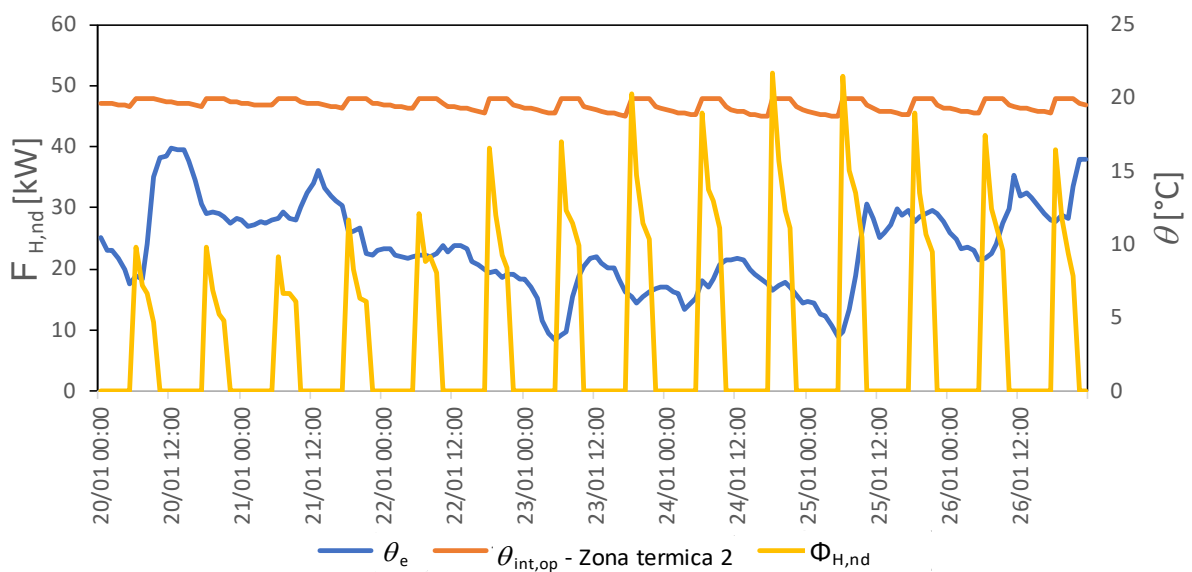


Figura 29. Profilo orario del carico termico in una settimana di gennaio per la zona termica 2 – Palermo.

4 Linee guida per l'applicazione della simulazione termo energetica in ambito normativo

Nel presente capitolo viene riportata una prima traccia delle linee guida per l'applicazione della simulazione termo energetica in ambito normativo che verrà sviluppata nel corso dell'attività di ricerca triennale.

La corretta applicazione della simulazione termo energetica è strettamente legata alla disponibilità e alla qualità dei dati input, e alle specifiche necessità di modellazione. Per quanto riguarda i dati di input, diverse disponibilità si possono presentare a seconda che la simulazione debba essere applicata ad un edificio di nuova costruzione, oppure ad un edificio esistente di cui, comunemente, si conoscono poche informazioni. Tuttavia, anche in presenza di adeguati dati di input, l'elaborazione e la trattazione dei dati da utilizzare nelle simulazioni può avvenire con diverse modalità. Soprattutto in edifici molto complessi, le diverse scelte di modellazione dei parametri e fenomeni che influenzano fortemente il comportamento termico degli edifici possono portare a risultati differenti. Ad esempio, diverse analisi di sensitività ai principali parametri d'involucro ed utenza svolte in altri lavori [18] hanno mostrato una rilevante influenza della capacità termica delle partizioni interne e degli arredi sul comportamento termico degli edifici analizzati, e le conseguenti modalità di modellazione. Sebbene l'apertura della norma a modelli di calcolo o di trattazione dei dati di input alternativi, risulta necessario definire e chiarire le procedure più adeguate da adottare a livello normativo.

4.1 Reperimento dei dati di input

I dati di input necessari alla caratterizzazione dell'edificio oggetto di studio e all'applicazione della simulazione sono relativi alle condizioni al contorno, alle proprietà geometriche, al fabbricato, all'utenza e agli impianti tecnici. Generalmente, questi dati possono essere ricavati da documentazioni tecniche. In assenza di documentazione, i dati possono essere reperiti tramite sopralluoghi e rilievi geometrici e fotografici. Di seguito vengono riportati brevemente, per ciascuna categoria, le possibili modalità di reperimento dei dati.

- a. Condizioni al contorno. I dati climatici possono essere ricavati da stazioni meteorologiche, misurazioni in campo oppure da valori standard per la corretta località. Per quanto riguarda gli edifici circostanti (o altri ostacoli esterni) che possono ombreggiare l'edificio oggetto di analisi, è importante conoscere la planimetria generale e la loro altezza. Queste informazioni possono essere ricavate da documentazione e da rilievi;
- b. Proprietà geometriche. Le proprietà geometriche (es. superficie lorda o netta, volume, etc.) possono essere ricavati da documentazione o da rilievi in campo. In particolare, risulta necessario verificare che le informazioni riportate nella documentazione (es. posizione delle finestre, orientamenti, etc.) siano esatte con i dati reperiti tramite rilievi geometrici e fotografici;
- c. Dati costruttivi. Le informazioni relative al fabbricato, tra le quali le proprietà termofisiche dei componenti d'involucro opaco e trasparente, possono essere ricavate da documentazione o da misure in campo. In particolare, risulta appropriato procedere con la creazione di un abaco dei componenti (orientamento, dimensioni, ostacoli esterni, etc.) e della loro caratterizzazione termofisica. Per quanto riguarda la caratterizzazione dei componenti d'involucro opaco, è opportuno procedere secondo quanto indicato nella norma UNI EN ISO 6946:2018 [19] se si dispone della stratigrafia dei componenti, o tramite carotaggi per stabilirne la stratigrafia e le caratteristiche dei materiali;
- d. Utenza. È opportuno determinare, tramite la documentazione fornita, i sopralluoghi e le interviste agli utenti, i profili di utilizzo degli spazi, le temperature di set-point e le ore di funzionamento degli impianti. Per quanto riguarda i profili di utilizzo degli spazi, tramite interviste o assumendo valori standard, è auspicabile conoscere i profili di occupazione, di apertura delle finestre, la gestione degli elementi oscuranti o delle schermature solari e i profili di accensione degli impianti di illuminazione. Per quanto riguarda, invece, le temperature di set-point (invernali/estive) e le ore di funzionamento degli impianti, possono essere ricavate da documentazione tecnica, da monitoraggio in campo o tramite interviste;

- e. Impianti tecnici. Le caratteristiche degli impianti necessari alla modellazione riguardano i sottosistemi di generazione, distribuzione, regolazione ed emissione, le ore di accensione e i consumi energetici.

4.2 Specifiche modalità di modellazione

L'applicazione della simulazione termo energetica è esaustivamente illustrata all'interno della norma tecnica EN ISO 52016-1 [3]. Tuttavia, la norma lascia aperta la possibilità di utilizzare modalità di modellazione su alcuni aspetti, tra cui la definizione della capacità termica degli elementi d'involucro, delle partizioni interne e degli arredi, e la definizione dei ponti termici. Vengono di seguito riportate le diverse possibilità di modellazione relative agli aspetti sopraindicati.

- a. Capacità termica dei componenti d'involucro. Come è stato riportato nella Sezione 2.2.4, la norma prevede che ciascun componente opaco appartenga ad una classe cui viene associato un valore standard di capacità termica. In alternativa, la capacità termica di ciascun componente può essere calcolata a partire dalla stratigrafia e dalle proprietà dei materiali.
- b. Capacità termica delle partizioni interne. Per quanto riguarda le partizioni interne presenti nella zona termica, la norma lascia libertà di scelta sulle relative modalità di modellazione (anche per gli elementi opachi adiacenti ad altri edifici o ad altre zone climatizzate). In particolare, le partizioni possono essere modellate come segue:
 - 1. Elementi opachi. Questa modalità prevede che le partizioni vengano modellate come i componenti opachi esterni, e prevede la raccolta dei dati di input necessari alla modellazione, quali la superficie della costruzione, la resistenza termica e la capacità termica areica. Le informazioni sulla geometria possono essere ricavate tramite calcolo manuale o dall'input grafico nei software di simulazione, mentre le proprietà termofisiche possono essere assunte conoscendo le caratteristiche generali del componente, o calcolate conoscendone la stratigrafia del e le proprietà dei materiali. Per quanto riguarda la capacità termica areica, si fa riferimento a quanto riportato al punto a;
 - 2. Capacità termica caricata sul nodo d'aria. Questa modalità prevede il calcolo della capacità termica comprensiva di tutte le partizioni interne e la successiva normalizzazione sulla superficie netta della zona termica. Il valore ricavato dev'essere successivamente aggiunto alla capacità termica dell'aria e degli arredi caricata sul nodo d'aria (valore di default o calcolato);
- c. Capacità termica degli arredi. La modellazione degli arredi può essere condotta con modalità simili a quelle illustrate precedentemente (punto b). In particolare, l'arredo può essere modellato come superficie esposta considerando un materiale fittizio in grado di simulare l'effettiva capacità termica dell'arredo (calcolo tramite valutazione volumetrica, della massa volumica e del calore specifico degli arredi), secondo quanto indicato da Raftery et al. [20], oppure caricandone la capacità termica sul nodo d'aria;
- d. Ponti termici. Le trasmittanze termiche lineiche dei ponti termici possono essere desunte da abachi dei ponti termici, oppure calcolati secondo modelli dettagliati, come indicato nella norma tecnica UNI EN ISO 10211:2018 [21].

5 Conclusioni

L'attività condotta nella prima annualità si è focalizzata su un'analisi dettagliata del modello di calcolo orario semplificato del fabbisogno termico degli edifici introdotto dalla norma tecnica UNI EN ISO 52016-1:2018. Nello specifico è stata indagata la teoria del modello e sono state approfondite le principali equazioni di calcolo e i parametri di ingresso.

Alla luce dei risultati ottenuti applicando il nuovo metodo orario semplificato ad un edificio residenziale è emerso un considerevole effetto della capacità termica dell'edificio sul profilo orario della temperatura operativa interna nei periodi di non funzionamento dell'impianto termico. Quest'influenza è tanto maggiore in edifici, come il caso studio, che presentano un involucro massivo. Questo aspetto merita ulteriori approfondimenti nel proseguo dell'attività di ricerca, soprattutto circa le specifiche di modellazione della capacità termica dell'edificio all'interno del nuovo metodo di calcolo orario della UNI EN ISO 52016-1.

L'attività futura include inoltre la comparazione del modello con gli altri metodi di calcolo della prestazione energetica degli edifici – quasi-stazionario e dinamico dettagliato – attraverso il confronto con le altre unità di ricerca coinvolte nell'attività. Verranno sviluppate analisi di sensibilità rispetto ai parametri che maggiormente influenzano la prestazione termica dell'edificio, e verrà approfondito l'effetto delle semplificazioni con l'obiettivo ultimo di validazione della norma.

6 Riferimenti bibliografici

1. Commissione Europea, "M/480 Mandate to CEN, CENELEC and ETSI for the elaboration and adoption of standards for a methodology calculating the integrated energy performance of buildings and promoting the energy efficiency of buildings, in accordance with the terms set in the recast of the Directive on the energy performance of buildings (2010/31/EU)", Bruxelles, 14 dicembre 2010.
2. Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, "Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione)", Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea L153/13, 18 giugno 2010.
3. Ente Italiano di Normazione, UNI EN ISO 52016-1. Prestazione energetica degli edifici - Fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne e carichi termici sensibili e latenti - Parte 1: Procedure di calcolo, marzo 2018.
4. I. Ballarini, E. Primo, V. Corrado, "On the limits of the quasi-steady-state method to predict the energy performance of low-energy buildings", Thermal Science, 22 (2018), S1117-S1127.
5. J. R. Millet, "The simple hourly method of prEN 13790: a dynamic method for the future", Proceedings of Clima 2007 WellBeing Indoors, 10-14 giugno 2007, Helsinki (Finlandia).
6. Ente Italiano di Normazione, UNI EN ISO 13790. Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento, giugno 2008.
7. P. Michalak, "The simple hourly method of EN ISO 13790 standard in Matlab/Simulink: A comparative study for the climatic conditions of Poland", Energy, 75 (2014), 568-578.
8. G. Kokogiannakis, P. Strachan, J. Clarke, "Comparison of the simplified methods of the ISO 13790 standard and detailed modelling programs in a regulatory context", Journal of Building Performance Simulation, 1 (2008), 209-219.
9. M. Atmaca, E. Kalaycioglu, Z. Yilmaz, "Evaluation of the heating & cooling energy demand of a case residential building by comparing the national calculation methodology of Turkey and EnergyPlus through thermal capacity calculations", Technical Report, 2011, Energy Systems Laboratory, Texas A&M University.
10. A. Costantino, I. Ballarini, E. Fabrizio, "Comparison between simplified and detailed methods for the calculation of heating and cooling energy needs of livestock housing: a case study", Proceedings of 3rd IBPSA Conference Italy, 8-10 febbraio 2017, Bolzano (Italia).
11. I. Ballarini, A. Costantino, E. Fabrizio, V. Corrado, "The Dynamic Model of EN ISO 52016-1 for the Energy Assessment of Buildings Compared to Simplified and Detailed Simulation Methods", Proceedings of 16th IBPSA Building Simulation Conference BS2019, 2-4 settembre 2019, Roma (Italia), *in stampa*.
12. Ente Italiano di Normazione, UNI EN ISO 52017-1. Prestazione energetica degli edifici - Carichi termici sensibili e latenti e temperature interne - Parte 1: Procedure generali di calcolo, marzo 2018.
13. Comitato Termotecnico Italiano (CTI), Documento n. 020200109, Bozza di Appendice Nazionale UNI EN ISO 52016-1, dicembre 2018.
14. Comitato Termotecnico Italiano (CTI), Anno tipo climatico, Milano, 2015.
15. Ente Italiano di Normazione, UNI 10349-1. Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradianza solare nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradianza solare su di una superficie inclinata, marzo 2016.
16. Comitato Termotecnico Italiano (CTI), Documento n. 024100181, Bozza di Appendice Nazionale UNI EN 16798-1, dicembre 2019.

17. Ente Italiano di Normazione, UNI EN 16798-1. Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica - Modulo M1-6, giugno 2019.
18. A. Angelotti, M. Ballabio, L. Mazzarella, C. Cornaro, G. Parente, F. Frasca, A. Prada, P. Baggio, I. Ballarini, G. De Luca, V. Corrado, "Dynamic Simulation of existing buildings: considerations on the Model Calibration", Proceedings of 16th IBPSA Building Simulation Conference BS2019, 2-4 settembre 2019, Roma (Italia), *in stampa*.
19. Ente Italiano di Normazione, UNI EN ISO 6946. Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodi di calcolo, marzo 2018.
20. P. Raftery, E. Lee, T. Webster, T. Hoyt, F. Bauman, "Effects of furniture and contents on peak cooling load", Energy and Buildings, 85 (2014), 445-457.
21. Ente Italiano di Normazione, UNI EN ISO 10211. Ponti termici in edilizia - Flussi termici e temperature superficiali - Calcoli dettagliati, marzo 2018.

7 Nomenclatura

Simbolo	Grandezza	Unità di misura
A	area	m^2
F	fattore	-
g	coefficiente di trasmissione solare totale	-
h	conduttanza termica	$W \cdot m^{-2} K^{-1}$
I	irradianza	$W \cdot m^{-2}$
M	massa	kg
$\dot{m}$	portata in massa	$kg \cdot s^{-1}$
Q	energia termica	Wh
q	portata volumetrica	$m^3 \cdot s^{-1}$
R	resistenza termica	$m^2 K \cdot W^{-1}$
s	spessore	m
U	trasmittanza termica	$W \cdot m^{-2} K^{-1}$
V	volume	m^3
Y	trasmittanza termica periodica	$W \cdot m^{-2} K^{-1}$
Φ	potenza termica	W
κ	capacità termica areica	$J \cdot m^{-2} K^{-1}$
θ	Temperatura	$^{\circ}C$

Pedici

C	Raffrescamento
e	Esterno
env	Involucro
F	Telaio
f	Pavimento
gl	Vetro
H	Riscaldamento
h	Orizzontale
i, int	interno
l	lordo
ld	carico termico
n	normale, perpendicolare
nd	fabbisogno
op	operativa (temperatura)
s	superficiale
set	regolazione
sh	schermatura solare
shut	chiusura oscurante
sol	solare
w	finestra

Acronimi

CEN	European Committee for Standardisation
F.T.	Fuori Terra
IAQ	Indoor Air Quality
ISO	International Organisation for Standardisation
ZT	Zona Termica

Appendice

Curriculum scientifico dei componenti del gruppo di lavoro.

prof. Vincenzo Corrado

Ingegnere Civile, Professore ordinario di *Fisica tecnica ambientale* presso il Politecnico di Torino, dove è vice-coordinatore del Collegio di Ingegneria Edile e responsabile di un'unità di ricerca del Gruppo di ricerca TEBE (*Technology Energy Building Environment*) che svolge attività di ricerca nell'ambito della termofisica dell'edificio, della modellazione termo-energetica degli edifici, delle procedure di diagnosi e certificazione energetica degli edifici, della qualità dell'ambiente interno, della legislazione e normativa tecnica. Già presidente di IBPSA-Italia (sezione italiana dell'*International Building Performance Simulation Association*), è referente italiano del CEN/TC 89 (*Thermal performance of buildings and building components*) e dell'ISO/TC 163 (*Thermal performance and energy use in the built environment*).

dott. Ilaria Ballarini

Laureata in Architettura e Dottore di Ricerca in *Innovazione Tecnologica per l'Ambiente costruito* presso il Politecnico di Torino. È ricercatore nel campo della fisica tecnica ambientale ed energetica edilizia presso il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino, Gruppo di ricerca TEBE (*Technology Energy Building Environment*). Svolge attività di ricerca nel campo della fisica tecnica dell'edificio, con particolare riferimento alla modellazione termo-energetica degli edifici e dei parchi edilizi, alle procedure di diagnosi e certificazione energetica e di valutazione economica degli edifici. Ha partecipato a progetti di ricerca europei e nazionali, contratti di ricerca e accordi di partnership.

arch. Giovanna De Luca

Architetto, Laurea Magistrale in Architettura per il progetto sostenibile presso il Politecnico di Torino. Attualmente è dottoranda in Energetica presso il Politecnico di Torino, Dipartimento di Energia, Gruppo di ricerca TEBE (*Technology Energy Building Environment*). L'attività di Dottorato si concentra sui modelli di calcolo della prestazione energetica degli edifici, sulla validazione delle assunzioni dei modelli semplificati e sulla loro implementazione con moduli di calcolo più dettagliati al fine di aumentarne l'accuratezza, garantendone la semplicità e la trasparenza. Nell'attività di ricerca collabora con l'azienda EdilClima Engineering & Software e con gruppi di ricerca appartenenti ad altre università nazionali. Ha partecipato a progetti di ricerca nazionali e contratti di ricerca.

dott. Mamak P.Tootkaboni

Laurea Magistrale in Architettura per il progetto sostenibile presso il Politecnico di Torino. Attualmente è dottoranda in Energetica presso il Politecnico di Torino, Dipartimento di Energia, Gruppo di ricerca TEBE (*Technology Energy Building Environment*). L'attività di Dottorato si concentra sullo studio e ottimizzazione delle prestazioni energetiche e del comfort termico degli edifici in caso di ondate di calore. I suoi principali interessi di ricerca sono: efficienza energetica degli edifici e dei parchi edilizi, sostenibilità e resilienza ai cambiamenti climatici, dati climatici futuri, strategie di adattamento e analisi delle prestazioni energetiche degli edifici. Partecipa all'IEA-EBC (*International Energy Agency-Energy in Buildings and Communities*) Annex 80 sul "Resilient Cooling".