



Ricerca di Sistema elettrico

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

V. Corrado, I. Ballarini, F. Bianco Mauthe Degerfeld, G. De Luca,
M.P. Tootkaboni



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

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

Con il contributo di: E. Fabrizio

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II 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: *LA1.10 - Implementazione del modello di calcolo orario semplificato (UNI EN 52016-1:2018) e applicazione al settore terziario*

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: Ing. Paolo Signoretti

Responsabile scientifico Politecnico di Torino – Dipartimento di Energia: Prof. Vincenzo Corrado

Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE.....	6
1.1 STATO DELL'ARTE NAZIONALE E INTERNAZIONALE.....	6
1.2 OBIETTIVI SCIENTIFICI E TECNOLOGICI ATTESI.....	7
1.3 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	8
2 IL MODELLO DI CALCOLO DEL FABBISOGNO DI ENERGIA TERMICA.....	9
2.1 IPOTESI GENERALI DI CALCOLO, CONDIZIONI AL CONTORNO E SEMPLIFICAZIONI DI MODELLAZIONE.....	9
2.1.1 <i>Requisiti della valutazione di prestazione energetica</i>	9
2.1.2 <i>Ipotesi generali e condizioni al contorno</i>	9
2.1.3 <i>Bilancio di energia termica e di vapore sull'aria</i>	10
2.2 IL METODO DI CALCOLO ORARIO DELLA UNI EN ISO 52016-1.....	15
2.2.1 <i>Ipotesi di calcolo</i>	15
2.2.2 <i>Procedura di calcolo</i>	16
2.2.3 <i>Bilancio di energia di una zona termica</i>	17
2.2.4 <i>Modalità di discretizzazione degli elementi edilizi in nodi (modello RC)</i>	18
2.3 L'APPENDICE ITALIANA DELLA UNI EN ISO 52016-1.....	19
3 I MODELLI DI CALCOLO DELL'ENERGIA EROGATA.....	23
3.1 I SISTEMI DI GENERAZIONE.....	23
3.1.1 <i>La pompa di calore</i>	23
3.1.2 <i>Il gruppo frigorifero</i>	25
3.1.3 <i>La caldaia</i>	26
3.2 SISTEMI DI ILLUMINAZIONE.....	28
4 GLI STRUMENTI DI CALCOLO.....	31
4.1 CALCOLO DEL FABBISOGNO DI ENERGIA TERMICA PER LA CLIMATIZZAZIONE.....	31
4.2 CALCOLO DEL FABBISOGNO DI ENERGIA EROGATA PER LA CLIMATIZZAZIONE.....	36
4.2.1 <i>Il foglio di lavoro del modulo sostitutivo della UNI EN 15316-4-2</i>	36
4.2.2 <i>Il foglio di lavoro della UNI EN 16798-13</i>	38
4.2.3 <i>Il foglio di lavoro della UNI EN 15316-4-1</i>	39
4.3 CALCOLO DEL FABBISOGNO DI ENERGIA PER L'ILLUMINAZIONE.....	40
5 IL CASO STUDIO.....	45
5.1 DESCRIZIONE DELL'EDIFICIO.....	45
5.1.1 <i>Informazioni generali e contesto esterno</i>	45
5.1.2 <i>Descrizione del fabbricato</i>	48
5.1.3 <i>Descrizione dell'impianto di climatizzazione</i>	49
5.1.4 <i>Descrizione dell'impianto di illuminazione</i>	50
5.2 DESCRIZIONE DEL MODELLO, ASSUNZIONI E CONDIZIONI AL CONTORNO PER LE SIMULAZIONI.....	50
5.2.1 <i>Dati climatici</i>	50
5.2.2 <i>Il fabbricato</i>	51
5.2.3 <i>Zonizzazione</i>	52
5.2.4 <i>Profili di utenza</i>	53
5.2.5 <i>Sistemi impiantistici</i>	56
5.3 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI.....	59
5.3.1 <i>Fabbisogno di energia termica utile per la climatizzazione</i>	59
5.3.2 <i>Applicazione dell'appendice italiana della UNI EN ISO 52016-1</i>	67
5.3.3 <i>Fabbisogni di energia erogata e primaria per la climatizzazione</i>	70
5.3.4 <i>Analisi dei valori medi di efficienza dei generatori</i>	77
5.3.5 <i>Analisi dei costi energetici relativi alla climatizzazione</i>	80

5.3.6	<i>Fabbisogno di energia per l'illuminazione</i>	81
5.4	LA SENSITIVITÀ DEI PARAMETRI	82
6	LINEE GUIDA PER L'APPLICAZIONE DELLA SIMULAZIONE TERMO ENERGETICA IN AMBITO NORMATIVO	84
6.1	REPERIMENTO DEI DATI DI INPUT	84
6.2	SPECIFICHE MODALITÀ DI MODELLAZIONE	85
6.2.1	<i>Le condizioni al contorno</i>	85
6.2.2	<i>Il fabbisogno di energia utile</i>	85
6.2.3	<i>I sistemi impiantistici</i>	86
7	CONCLUSIONI	87
8	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	88
9	RICONOSCIMENTI	91
10	NOMENCLATURA	91
	APPENDICE A - COMPONENTI	93
	APPENDICE B - DATI DI INPUT NEL CALCOLO DEL FABBISOGNO DI ENERGIA DEGLI IMPIANTI	103
	CURRICULUM SCIENTIFICO DEI COMPONENTI DEL GRUPPO DI LAVORO	106

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 secondo anno, oggetto del presente rapporto, è stata 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 con applicazione in edifici ad uso terziario. I fogli di calcolo MS Excel per l'applicazione del modello orario della UNI EN ISO 52016-1, già sviluppati, sono stati implementati al fine di corrispondere pienamente alle necessità della simulazione.

Il modello di calcolo è stato applicato ad un caso studio di edilizia per uffici 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 con funzionamento continuo dell'impianto e una valutazione energetica con funzionamento intermittente. Nello specifico, nella seconda valutazione è stato ipotizzato un regime di intermittenza con attenuazione delle temperature nel periodo invernale e spegnimento nel periodo estivo. 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. Sono state quindi effettuate valutazioni dei fabbisogni di energia primaria dell'edificio considerando diverse soluzioni impiantistiche, analizzando i risultati sia in funzione delle diverse componenti dell'energia primaria sia in funzione dei costi dei vettori energetici.

Alla luce della procedura di modellazione seguita, sono state aggiornate le linee guida per la corretta applicazione della simulazione termo energetica in ambito normativo.

1 Introduzione

La ricerca, in corso di svolgimento, organizzata in 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 l'attestazione della prestazione energetica (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,
- (quasi-)stazionari (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. Delle prime valutazioni in questo senso sono state fatte da Zakula et al. (2019) [11] i quali, hanno comparato i risultati dell'intero modello di calcolo con TRANSYS al fine di testare l'accuratezza del metodo; analizzando quindi svariati livelli di isolamento e di tipologia di destinazione d'uso, hanno messo in evidenza la grande influenza delle proprietà dei componenti trasparenti nei risultati di fabbisogno energetico. Sono stati inoltre conseguiti risultati preliminari da Ballarini et al. (2019) [12], 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.

In un'indagine successiva (Ballarini et al., 2020 [13]), sono stati analizzate alcune significative cause di deviazione tra il metodo orario della UNI EN ISO 52016-1 e la simulazione numerica dettagliata (EnergyPlus), mediante scomposizione dei diversi contributi al bilancio termico dell'edificio in funzione delle diverse sollecitazioni (temperatura esterna, irradianza solare, sorgenti interne di calore).

Gli effetti delle singole assunzioni del modello di calcolo della UNI EN ISO 52016-1, in particolare il modello di conduzione del calore, sono stati analizzati da Mazzarella et al. (2020) [14] mediante un confronto con i risultati di un approccio analitico e con un nuovo modello di calcolo studiato per l'appendice italiana alla norma.

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. Nella seconda annualità, l'applicazione del modello di calcolo ad un caso studio di edilizia ad uso terziario e per i diversi contesti climatici considerati ha permesso di analizzare 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).

1.3 Descrizione delle attività svolte

L'attività del secondo anno, oggetto del presente rapporto, è finalizzata all'approfondimento del calcolo orario semplificato del fabbisogno termico degli edifici introdotto dalla UNI EN 52016-1:2018 per la sua applicazione in edifici ad uso terziario. 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). I fogli di calcolo MS Excel per l'applicazione del modello orario elaborati il primo anno sono stati ampliati, implementando moduli multi-zona e introducendo le opzioni di calcolo necessarie per il corretto svolgimento delle simulazioni, nel rispetto delle caratteristiche e delle particolarità del modello analizzato nello studio di caso. Il modello di calcolo è stato quindi applicato ad un caso studio di edificio ad uso uffici, che è stato analizzato in diversi contesti climatici italiani (Sezione 5.1). Nell'applicazione del modello di calcolo sono state testate due diverse tipologie di valutazione energetica per ciò che concerne i dati di ingresso relativi all'utilizzo dell'edificio: una prima con funzionamento continuo dell'impianto e una seconda con funzionamento intermittente (Sezione 5.2). È stata inoltre effettuata un'analisi della qualità dei dati di input, con l'obiettivo di limitare le perdite di accuratezza nella valutazione energetica, attraverso un'analisi di sensibilità volta a evidenziare la significatività dei diversi dati di input, sia dei parametri progettuali, sia delle condizioni al contorno.

2 Il modello di calcolo del fabbisogno di energia termica

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 costruttive 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 [15] 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

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

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 dell'elemento edilizio j ;
- 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

- $q_{lr,j}$ è la densità del flusso termico dovuto alla radiazione ad alta lunghezza d'onda scambiata dalla superficie interna del componente j con le altre superfici interne;
- $q_{sol,j}$ è la densità del flusso termico dovuto alla radiazione solare (a bassa lunghezza d'onda) assorbita dalla superficie interna del componente j ;
- $q_{c,j}$ è la densità del flusso termico ceduto all'aria della zona dell'edificio per convezione dalla superficie interna del componente j ;
- $q_{cd,j}$ è la densità del flusso termico per conduzione scambiato dalla superficie interna del componente j ;
- $\Phi_{int,r}$ 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 raffrescamento dell'ambiente.

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

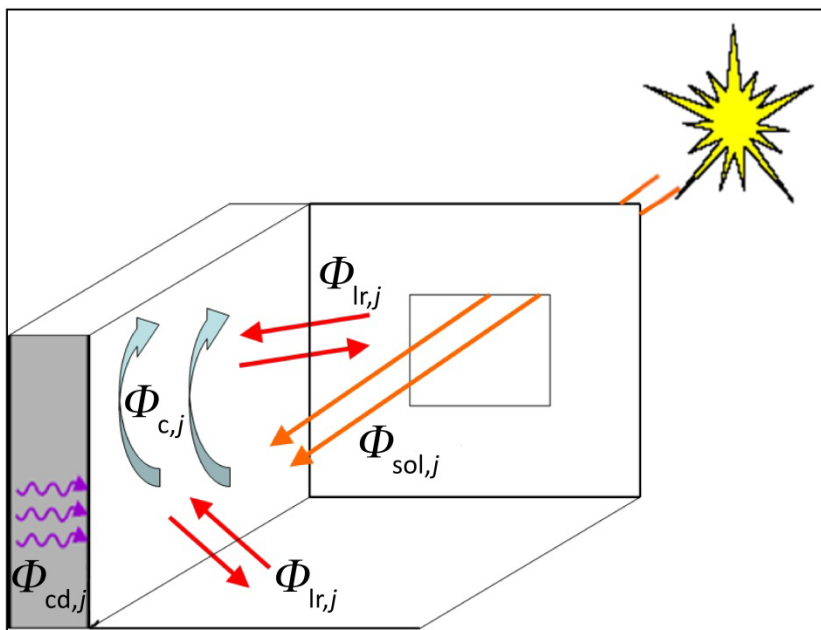


Figura 1. Bilancio energetico della superficie interna di un elemento edilizio.

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

$q_{lr,j}$ è il flusso termico areico per irraggiamento ad alta lunghezza d'onda sulla superficie esterna del componente j ;

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

$q_{c,j}$ è il flusso termico areico per convezione con l'aria dalla superficie esterna del componente j ;

$q_{cd,j}$ è il flusso termico areico per conduzione dalla superficie esterna del componente j .

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

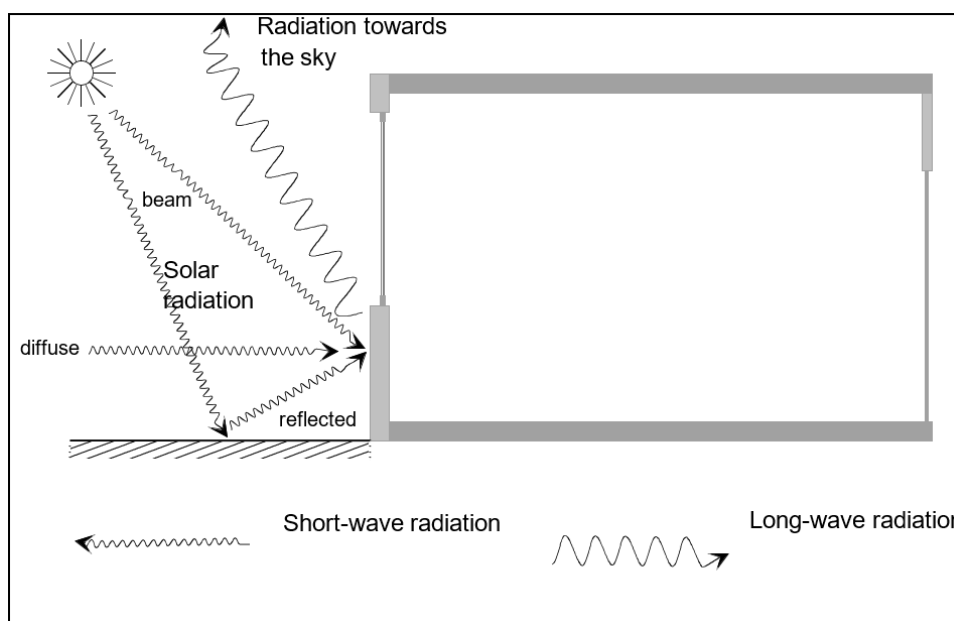


Figura 2. Bilancio energetico della superficie esterna di un elemento edilizio.

Lo scambio termico per conduzione attraverso l'involucro può essere ottenuto con diversi metodi, analitici o numerici, usando vari passi 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 invariati 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 34):

- 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.

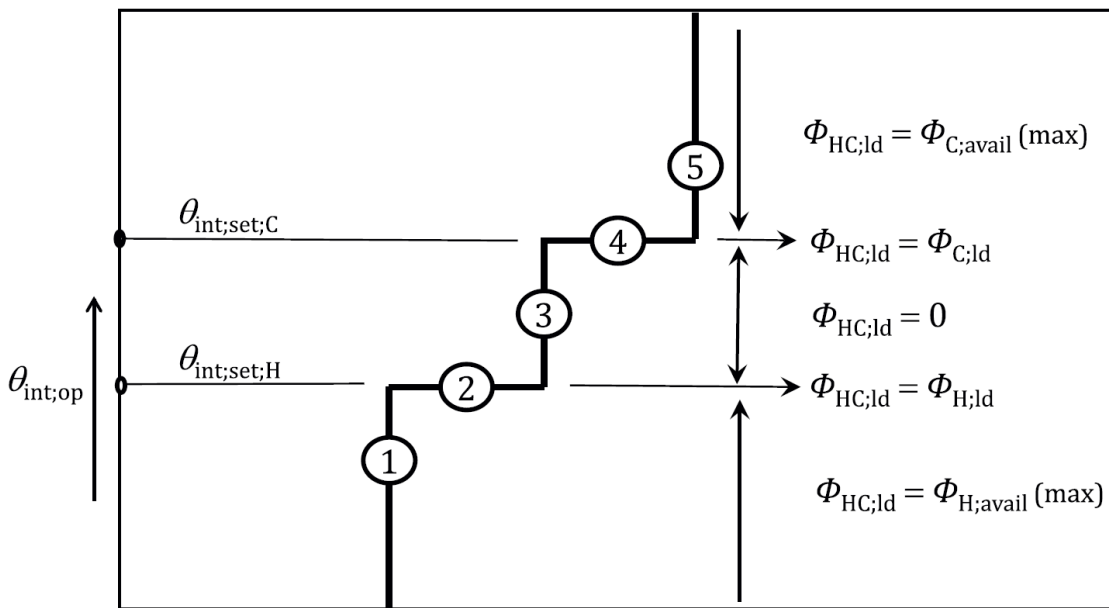


Figura 3. Controllo ambientale e determinazione dei carichi termici e della temperatura in una zona termica (fonte: UNI EN ISO 52016-1 [3]).

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:

$$\left[\frac{C_{int;ztc}}{\Delta t} + \sum_{eli=1}^{eln} (A_{eli} \cdot h_{ci;eli}) + \sum_{vei=1}^{ven} H_{ve;vei;t} + H_{tr;tb;ztc} \right] \cdot \theta_{int;a;ztc;t} - \sum_{eli=1}^{eln} (A_{eli} \cdot h_{ci;eli} \cdot \theta_{pln;eli;t})$$

$$= \frac{C_{int;ztc}}{\Delta t} \cdot \theta_{int;a;ztc;t-1} + \sum_{vei=1}^{ven} (H_{ve;vei;t} \cdot \theta_{sup;vei;t}) + H_{tr;tb;ztc} \cdot \theta_{e;a;t}$$

$$+ f_{int,c} \cdot \Phi_{int;ztc;t} + f_{sol,c} \cdot \Phi_{sol;ztc;t} + f_{H/C,c} \cdot \Phi_{HC;ztc;t}$$

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)

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.

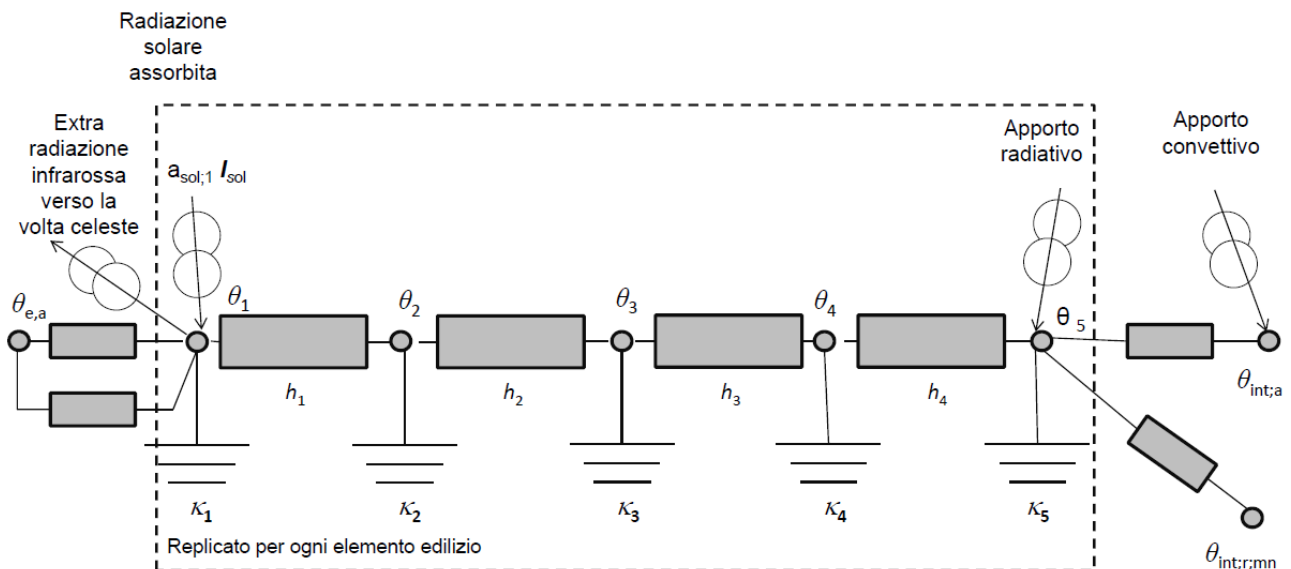


Figura 4. Modello a parametri concentrati per un componente di involucro opaco (fonte: UNI EN ISO 52016-1 [3]).

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.

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.

2.3 L'appendice italiana della UNI EN ISO 52016-1

Nell'appendice italiana alla norma EN ISO 52016-1 sono indicati, in accordo con quanto previsto dalla norma stessa, i valori di input di default e le procedure di calcolo scelte per l'applicazione della norma in Italia. Le principali differenze ed assunzioni riferite al metodo orario rispetto all'appendice B alla norma sono indicate nella Tabella 1.

Tabella 1. Principali differenze tra l'appendice nazionale e l'appendice B (parametri di default) della norma

N°	Tabelle di riferimento	Principali punti di differenziazione dell'appendice NA rispetto all'appendice B
1	NA.4 – B.4	Non sono ammesse zone termiche non climatizzate della tipologia <i>Internal</i> , sono inoltre definiti diversi valori di default per i coefficienti b_{ztu}
2	NA.5 – B.5	Non è ammesso un coefficiente di default per la definizione del contributo di ventilazione per le zone termiche non climatizzate adiacenti
3	NA.6 – B.6	Non è ammessa la procedura di calcolo della media spaziale della temperatura di set-point per gli edifici residenziali
4	NA.7 – B.7	Sono ammesse ambedue le opzioni di calcolo: zone termicamente accoppiate o disaccoppiate
5	NA.10/NA.10-bis – B.10	È presentato un metodo sostitutivo per la conversione delle proprietà dei componenti edilizi secondo il modello R-C
6	NA.11 – B.11	È presente un ampio numero di opzioni nella definizione della frazione convettiva del apporti degli impianti di climatizzazione
7	NA.12 – B.12	Non è ammessa l'assunzione di valori di default per la definizione delle proprietà termiche delle partizioni interne
8	NA.13 – B.13	Non è ammesso l'uso delle classi semplificative di massa per la caratterizzazione termica dei componenti opachi
9	NA.14 – B.14	Non è ammesso l'uso di valori di default per la definizione della capacità termica areica dei componenti opachi
10	NA.18 – B.18	È specificata una formula per il calcolo del fattore di vista di superfici comunque inclinate verso la volta celeste
11	NA.19 – B.19	È specificata una formula per il calcolo della differenza di temperatura tra l'ambiente esterno e la volta celeste
12	NA.21 – B.21	È modificato il valore di default per il fattore telaio
13	NA.22 – B.22	Sono indicate le procedure per il calcolo dei fattori correttivi dei parametri di trasmissione solare dei componenti trasparenti in funzione dell'angolo di incidenza della radiazione solare diretta

Nell'appendice nazionale (con riferimento ai punti 5, 10, 11, 13 della Tabella 1) vengono presentate nuove procedure di calcolo, di seguito esplicitate.

Componenti opachi - Proprietà dei nodi secondo l'approccio nazionale (punto 5)

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:

$$Ncn_j = \max \left\{ 1; \left\lceil \sqrt{\frac{Fo_{ref}}{Fo_j}} + 0,999999 \right\rceil \right\}$$

- Il numero totale di nodi capacitivi è calcolato come $\sum_{j=1}^N Ncn_j$
- Il numero di nodi (ρ/n) è uguale al numero totale di nodi capacitivi più due.
- ρ_j, c_j sono rispettivamente la densità [kg/m³] e la capacità termica per unità di massa [J/(kg K)] del materiale dello strato j -esimo dell'elemento edilizio.

- g. $R_{c;j;eli}$ è la resistenza conduttiva [m^2K/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 [$W/(m K)$].
- h. $\Delta x_j = d_j/Nc_n_j$ 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 [$J/m^2 K$] associate a ciascun nodo capacitivo nello strato j -esimo dell'elemento edilizio.
- j. $R_{c;j;eli}/Nc_n_j$ è la resistenza conduttiva [$m^2 K/W$] 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 $W/(m^2K)$, è la conduttanza mista convettiva-radiativa dello strato d'aria.

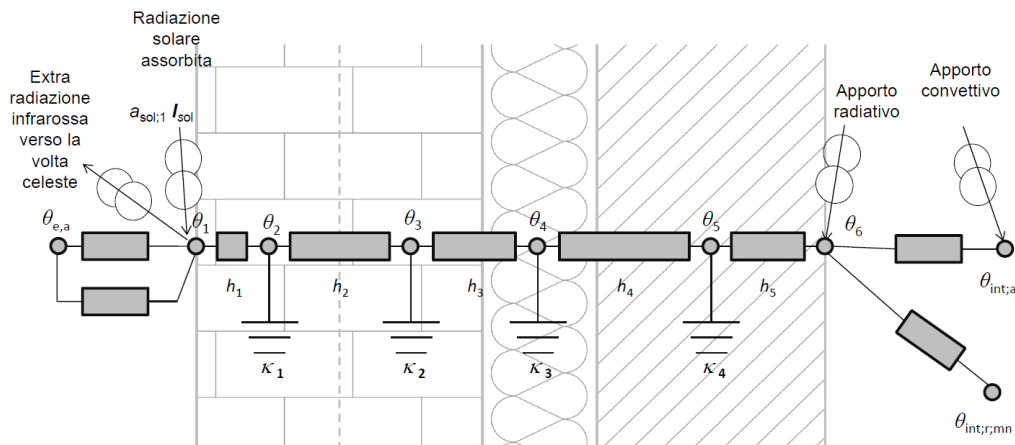


Figura 5. Modello a parametri concentrati per un componente di involucro opaco (fonte: UNI EN ISO 52016-1 – Appendice NA [16]).

Fattore di vista per superfici comunque inclinate (punto 10)

Il metodo descritto nell'appendice nazionale propone una formula aggiuntiva necessaria alla definizione del fattore di vista per superfici non orizzontali o verticali, per le quali sono invece definiti dei valori di default.

$$F_{sky} = (1 + \cos\beta_{eli})/2$$

dove

β_{eli} è l'inclinazione del componente [°].

La differenza di temperatura tra l'ambiente esterno e la volta celeste (punto 11)

In sostituzione dei valori costanti definiti dall'appendice B, nell'appendice italiana è presentata la seguente formula per il calcolo orario della differenza tra la temperatura esterna e la temperatura della volta celeste:

$$\Delta\theta_{sky;t} = \theta_{e;a;t} - \left(18 - 51,6 \cdot e^{-\frac{p_{e;t}}{1000}}\right)$$

dove

$\theta_{e;a;t}$ è la temperatura dell'aria esterna [°C]

$p_{e;t}$ è la pressione di vapore esterna [Pa].

I fattori correttivi associati ai parametri di trasmissione solare dei componenti trasparenti (punto 13)

Nell'appendice nazionale alla norma viene definito il calcolo del fattore correttivo della trasmissione solare per i componenti vetrati F_w , definito su base oraria come di seguito indicato.

$$F_w = \frac{F_{w,dif} \cdot I_{sol,dif,wi,t} + F_{w,dir} \cdot I_{sol,dir,wi,t} \cdot F_{sh,obst,wi,t}}{F_{w,dif} + F_{w,dir} \cdot F_{sh,obst,wi,t}}$$

$$F_{w,dir} = 1 - 8 \cdot z^{5,2+0,7 \cdot q} - (0,25/q) \cdot z^2 + (7 + 0,25/q) \cdot z^{[(5,26+0,06 \cdot p)+(0,73+0,04 \cdot p) \cdot q]}$$

$$F_{w,dif} = 0,8$$

dove:

$I_{sol,dif,wi,t}$ è l'irradianza solare diffusa incidente sulla superficie vetrata al tempo t [W/m²]

$I_{sol,dir,wi,t}$ è l'irradianza solare diretta incidente sulla superficie vetrata al tempo t [W/m²]

$F_{sh,obst,wi,t}$ è il fattore correttivo riferito all'ombreggiamento del componente finestrato al tempo t [-]

z è l'angolo di incidenza della radiazione solare normalizzato rispetto all'angolo retto [-]

q è un coefficiente di calcolo riferito alla tipologia di rivestimento delle lastre del componente finestrato [-]

p è il numero di lastre presenti nel componente finestrato.

3 I modelli di calcolo dell'energia erogata

3.1 I sistemi di generazione

Ad oggi il quadro normativo inerente ai sistemi di generazione per il riscaldamento e raffrescamento risulta essere non ancora completamente definito.

Per quanto concerne la generazione di calore mediante pompa di calore, è presente una norma europea, la UNI EN 15316-4-2:2018 [17], la cui correttezza è però dibattuta; in sostituzione ad essa, è in corso di pubblicazione un modulo sostitutivo realizzato dal CTI [18], che propone un metodo considerato più accurato e basato sulle precedenti versioni del pacchetto UNI/TS 11300.

Per il calcolo della generazione di raffrescamento, nello specifico per i gruppi frigoriferi, è presente la norma UNI EN 16798-13:2018 [19], il cui Allegato Nazionale [20] risulta però ancora in fase di pubblicazione, ma sostanzialmente coincidente con l'appendice B della norma.

Per i sistemi di generazione di calore a combustione risulta infine disponibile, ma in corso di revisione CEN, la norma UNI EN 15316-4-1:2018 [21] con l'Allegato Nazionale [22] in fase di pubblicazione. Nella Tabella 2 è presentato un quadro riassuntivo del panorama normativo, con indicate le norme impiegate ai fini delle simulazioni.

Tabella 2. Quadro normativo per i sistemi di generazione

Generatore	Periodo	Norma europea	Norma nazionale
Pompa di calore	Invernale	UNI EN 15316-4-2:2018 ¹	Modulo sostitutivo ^{2,3}
	Estivo	UNI EN 16798-13:2018 ³	Allegato nazionale ^{2,3}
Gruppo frigorifero	Estivo	UNI EN 16798-13:2018 ³	Allegato nazionale ^{2,3}
Caldaia	Invernale	UNI EN 15316-4-1:2018 ^{1,3}	Allegato nazionale ^{2,3}

¹ documento in corso di revisione CEN, ² documento in fase di pubblicazione, ³ norma impiegata ai fini della simulazione

3.1.1 La pompa di calore

La norma ha lo scopo di fornire un metodo di calcolo per le prestazioni energetiche di pompe di calore per il riscaldamento, la produzione di acqua calda sanitaria o combinate; le macchine considerate sono le pompe di calore ad assorbimento nonché quelle a compressione di vapore con azionamento elettrico o tramite motore endotermico.

La norma prevede la scelta di due differenti intervalli di calcolo permettendo un calcolo orario oppure per bin; per ciascun intervallo di calcolo sono presenti quattro differenti applicazioni:

- calcolo del servizio acqua calda sanitaria;
- calcolo del servizio riscaldamento;
- calcolo del servizio acqua calda sanitaria per sistemi con pompa di calore BISER in serie con un altro generatore;
- calcolo del servizio riscaldamento per sistemi con pompa di calore BISER in serie con un altro generatore.

Il modello permette inoltre, per ciascuno dei servizi elencati, di valutare:

- il COP o GUE nelle condizioni effettive di funzionamento;
- l'energia richiesta in ingresso per il funzionamento della macchina per ogni vettore energetico utilizzato;

- l'energia estratta dalla sorgente fredda oppure recuperata da un differente servizio freddo del sistema di climatizzazione considerato;
- l'energia termica recuperabile dal motore endotermico e utilizzabile per altri servizi.

Procedura di calcolo

Nella norma è fornita la procedura di calcolo per il servizio di riscaldamento, la cui scaletta è di seguito riassunta:

- determinazione dell'energia richiesta alla pompa di calore tenendo conto dell'eventuale energia accumulata nel vaso inerziale e dell'energia eventualmente non fornita nel precedente intervallo di calcolo;
- controllo dei limiti di operabilità della macchina in base alle temperature minime e massime di funzionamento;
- calcolo del rendimento di secondo principio effettivo, nonché il COP o GUE a pieno carico;
- definizione delle potenze massime e minime erogabili dalla macchina, in funzione delle prestazioni della stessa;
- calcolo della copertura del fabbisogno, in funzione della frazione di tempo disponibile, e del tempo effettivo di funzionamento;
- calcolo della capacità di accumulo del vaso inerziale;
- calcolo del fattore di carico LR della pompa di calore;
- calcolo del COP o GUE effettivo;
- calcolo dell'energia in ingresso per il funzionamento della macchina.

Il calcolo del COP per le pompe di calore a compressione di vapore

Il calcolo del coefficiente di prestazione a pieno carico per le pompe di calore a compressione di vapore viene così definito:

$$COP_{H,LR=1,i} = [(\theta_{H,c} + 273,15) \times (\theta_{H,c} - \theta_{H,f})^{-1}] \times \eta_{II,i}$$

dove

$\theta_{H,c}$ è la temperatura del pozzo caldo [°C]

$\theta_{H,f}$ è la temperatura della sorgente fredda [°C]

$\eta_{II,i}$ è il rendimento di secondo principio [-].

Il calcolo del coefficiente di prestazione a carico parziale per le pompe di calore a compressione di vapore viene invece definito in funzione dei dati noti della macchina, pertanto:

$$COP_{LR<1} = COP_{LR=1} \times Fc$$

(Utilizzabile in tutti i casi, solo con dati dettagliati della macchina noti.)

$$COP_{LR<1} = COP_{LR=1} \times [1 - Cd \times (1 - LR)]$$

(Utilizzabile per le pompe l'aria come pozzo caldo, con dati dettagliati della macchina non noti.)

$$COP_{LR<1} = COP_{LR=1} \times LR / [(1 - Cc) \times LR + Cc]$$

(Utilizzabile per le pompe con l'acqua come pozzo caldo, con dati dettagliati della macchina non noti.)

dove

Fc è un coefficiente di correzione del COP a pieno carico in funzione del LR della macchina [-]

Cd e Cc sono dei coefficienti di correzione del COP a pieno carico [-]

LR è il fattore di carico della pompa di calore [-].

Il calcolo dell'energia in ingresso per il funzionamento della macchina

Il calcolo dell'energia necessaria per il funzionamento della macchina viene definito in funzione del coefficiente di prestazione a carico parziale, nonché della potenza termica richiesta e del tempo effettivo di funzionamento, come di seguito enunciato.

$$Q_{H,pdc,in,ic} = [\Phi_{H,pdc,out} \times (t_H + t_{sto})] / COP_{H,LR<1}$$

dove

$\Phi_{H,pdc,out}$ è la potenza termica richiesta alla pompa di calore [kW]

t_H è il tempo di funzionamento effettivo della pompa di calore [h]

t_{sto} è il tempo d'accumulo [h]

$COP_{H,LR<1}$ è il coefficiente di prestazione a carico parziale [-].

3.1.2 Il gruppo frigorifero

La norma ha lo scopo di fornire un metodo di calcolo per le prestazioni energetiche di gruppi frigoriferi per il raffrescamento. Le macchine considerate sono i gruppi frigoriferi a compressione o ad assorbimento.

La norma prevede la scelta fra tre differenti intervalli di calcolo permettendo un calcolo orario, mensile od annuale.

Il modello permette di valutare:

- l'energia, elettrica o termica, richiesta per il funzionamento della macchina;
- l'energia termica recuperabile;
- il consumo di energia ausiliaria per la climatizzazione.

Sono inoltre presenti due differenti metodologie di calcolo di seguito descritte.

- Metodo 1 – Presenta un intervallo di calcolo orario o per bin ed è pensato per gruppi frigoriferi a compressione o assorbimento. È consigliato l'uso in presenza di dati dettagliati delle macchine impiegate.
- Metodo 2 – Presenta un intervallo di calcolo orario o mensile ed è pensato per il calcolo di gruppi frigoriferi, *split e multi-split*, nonché per sistemi a portata variabile di gas refrigerante (VRF). È consigliato l'uso in assenza di dati dettagliati delle macchine impiegate.

Procedura di calcolo (Metodo 2)

Viene di seguito presentata la procedura di calcolo per un gruppo frigorifero a compressione di vapore:

- determinazione dei fattori di carico parziale riferiti all'unità di refrigerazione, al sistema di smaltimento del calore, al fenomeno di *free-cooling* e alle eventuali unità multiple;
- calcolo del fattore di carico parziale (PLV);
- calcolo del fattore di correzione del rapporto di efficienza energetica;
- calcolo dell'energia ausiliaria;
- calcolo dell'energia termica estratta dalla macchina
- calcolo dell'energia in ingresso per il funzionamento della macchina.

Il valore del carico parziale (Metodo 2)

Il valore del carico parziale viene definito per ogni intervallo di calcolo secondo le seguenti formule:

$$PLV = f_{C;PL,k} \cdot f_{hr;PL} \cdot f_{hr;fc} \cdot f_{C;mult}$$

$$f_{C;PL,k} = \frac{Q_{C;gen,in,req}}{t_{C;gen;op} \cdot \Phi_{C;gen,n}}$$

$$f_{hr;PL} = a_0 + a_1 \cdot \theta + a_2 \cdot \theta^2$$

$$f_{hr;fc} = 1$$

$$f_{C;mult} = 1$$

dove

$f_{C;PL,k}$ è il fattore di carico parziale dell'unità di refrigerazione per lo stadio di carico parziale k -esimo [-]

$f_{hr;PL}$ è il fattore di carico parziale del sistema di smaltimento del calore [-]

$f_{hr;fc}$ è il fattore di carico parziale per *free-cooling* [-]

$f_{C;mult}$ è il fattore di carico parziale per unità di refrigerazione multiple nel caso di singolo generatore [-]

$Q_{C;gen,in;req}$ è l'energia termica che il gruppo frigorifero deve estrarre nell'intervallo di tempo [kWh]

$t_{C;gen,op}$ è il tempo di funzionamento del gruppo frigorifero [h]

$\Phi_{C;gen,n}$ è la potenza termica nominale estratta dal sistema di distribuzione dal gruppo frigorifero [kW]

a_0 è un coefficiente numerico per il calcolo di $f_{hr;PL}$ [-]

a_1 è un coefficiente numerico per il calcolo di $f_{hr;PL}$ [°C⁻¹]

a_2 è un coefficiente numerico per il calcolo di $f_{hr;PL}$ [°C⁻²]

θ è la temperatura esterna, nel caso in cui lo smaltimento del calore sia fatta nell'ambiente esterno [°C].

Il calcolo dell'energia in ingresso per il funzionamento del gruppo frigorifero

L'energia necessaria per il funzionamento della macchina nell'intervallo di tempo viene definita come:

$$E_{C;gen;el;in} = \frac{Q_{C;gen,in}}{PLV \cdot EER_n \cdot f_{EER;corr}}$$

dove

$Q_{C;gen,in}$ è l'energia termica estratta dal gruppo frigorifero [kWh]

EER_n è il rapporto di efficienza energetica nominale [-]

$f_{EER;corr}$ è il fattore di correzione del rapporto di efficienza energetica [-].

3.1.3 La caldaia

La norma ha lo scopo di fornire un metodo di calcolo per le prestazioni energetiche per sistemi di produzione di calore per ambienti e per la produzione di acqua calda sanitaria. Le macchine considerate sono sistemi a combustione (caldaie).

Il modello permette di valutare:

- Le perdite di calore del sistema di generazione;
- l'energia termica recuperabile per il riscaldamento degli ambienti;
- il consumo di energia ausiliaria per la climatizzazione e la produzione di acqua calda sanitaria.

Sono inoltre presenti tre differenti metodologie di calcolo di seguito descritte.

- Valori di default - È consigliato l'uso in assenza di dati dettagliati delle caldaie impiegate.
- Valori dettagliati - È consigliato l'uso in presenza di dati dettagliati delle caldaie impiegate.
- Valori misurati – Utilizzabile per caldaie tradizionali e a condensazione esistenti, con fini di verifica.

Procedura di calcolo (Valori di default)

Viene di seguito presentata la procedura di calcolo per una caldaia:

- determinazione delle caratteristiche della caldaia;
- calcolo del fattore di carico;
- calcolo dell'efficienza a pieno carico, a carico parziale, a carico nullo e a carico specifico;
- calcolo della potenza richiesta dai sistemi ausiliari;
- calcolo dell'energia termica recuperata dalle perdite del generatore e dai sistemi ausiliari;
- calcolo dell'energia in ingresso per il funzionamento della caldaia.

L'equazione di bilancio energetico del sistema di generazione

L'energia in ingresso per il funzionamento della caldaia viene definita come:

$$E_{\text{gen};\text{in}} = Q_{\text{gen};\text{out}} - Q_{\text{gen};\text{aux};\text{rvd}} + Q_{\text{gen};\text{ls}}$$

dove

$Q_{\text{gen};\text{out}}$ è l'energia prodotta dal generatore [kWh]

$Q_{\text{gen};\text{aux};\text{rvd}}$ è l'energia termica recuperata dal sistema ausiliario [kWh]

$Q_{\text{gen};\text{ls}}$ sono le perdite del generatore [kWh].

Il calcolo delle perdite di generazione

Le perdite di generazione della caldaia sono definite in funzione del fattore di carico come di seguito indicato:

Se $0 \leq \beta_{\text{H};\text{gen}} \leq \beta_{\text{Pint}}$

$$P_{\text{H};\text{gen};\text{ls};\text{Px}} = \frac{\beta_{\text{H};\text{gen}}}{\beta_{\text{Pint}}} \cdot (P_{\text{H};\text{gen};\text{ls};\text{Pint};\text{corr}} - P_{\text{H};\text{gen};\text{ls};\text{P0};\text{corr}}) + P_{\text{H};\text{gen};\text{ls};\text{P0};\text{corr}}$$

Se $\beta_{\text{Pint}} \leq \beta_{\text{H};\text{gen}} \leq 1$

$$P_{\text{H};\text{gen};\text{ls};\text{Px}} = \frac{\beta_{\text{H};\text{gen}} - \beta_{\text{Pint}}}{\beta_{\text{Pn}} - \beta_{\text{Pint}}} \cdot (P_{\text{H};\text{gen};\text{ls};\text{Pn};\text{corr}} - P_{\text{H};\text{gen};\text{ls};\text{Pint};\text{corr}}) + P_{\text{H};\text{gen};\text{ls};\text{Pint};\text{corr}}$$

dove

$\beta_{\text{H};\text{gen}}$ è il fattore di carico reale [-]

β_{Pint} è il fattore di carico a carico parziale [-]

β_{Pn} è il fattore di carico a pieno carico [-]

$P_{\text{H};\text{gen};\text{ls};\text{P0};\text{corr}}$ sono le perdite di generazione a carico nullo [kW]

$P_{\text{H};\text{gen};\text{ls};\text{Pint};\text{corr}}$ sono le perdite di generazione a carico parziale [kW]

$P_{\text{H};\text{gen};\text{ls};\text{Pn};\text{corr}}$ sono le perdite di generazione a pieno carico [kW]

3.2 Sistemi di illuminazione

Per ciò che concerne il calcolo della prestazione energetica degli impianti di illuminazione, la norma di riferimento è la UNI EN 15193-1:2017 [23]. In essa, come mostrato nella Figura 6, sono presentati tre metodologie di calcolo che si differenziano sia per il livello di dettaglio che per la tipologia di informazioni richieste. Il metodo 1, applicato nella sezione 5.3.6, ed il metodo 2 sono metodi calcolati a partire da dati dettagliati, nel primo caso, o dati di default, nel secondo caso. L'ultimo metodo è invece finalizzato al calcolo dell'energia per l'illuminazione a partire da dati misurati.

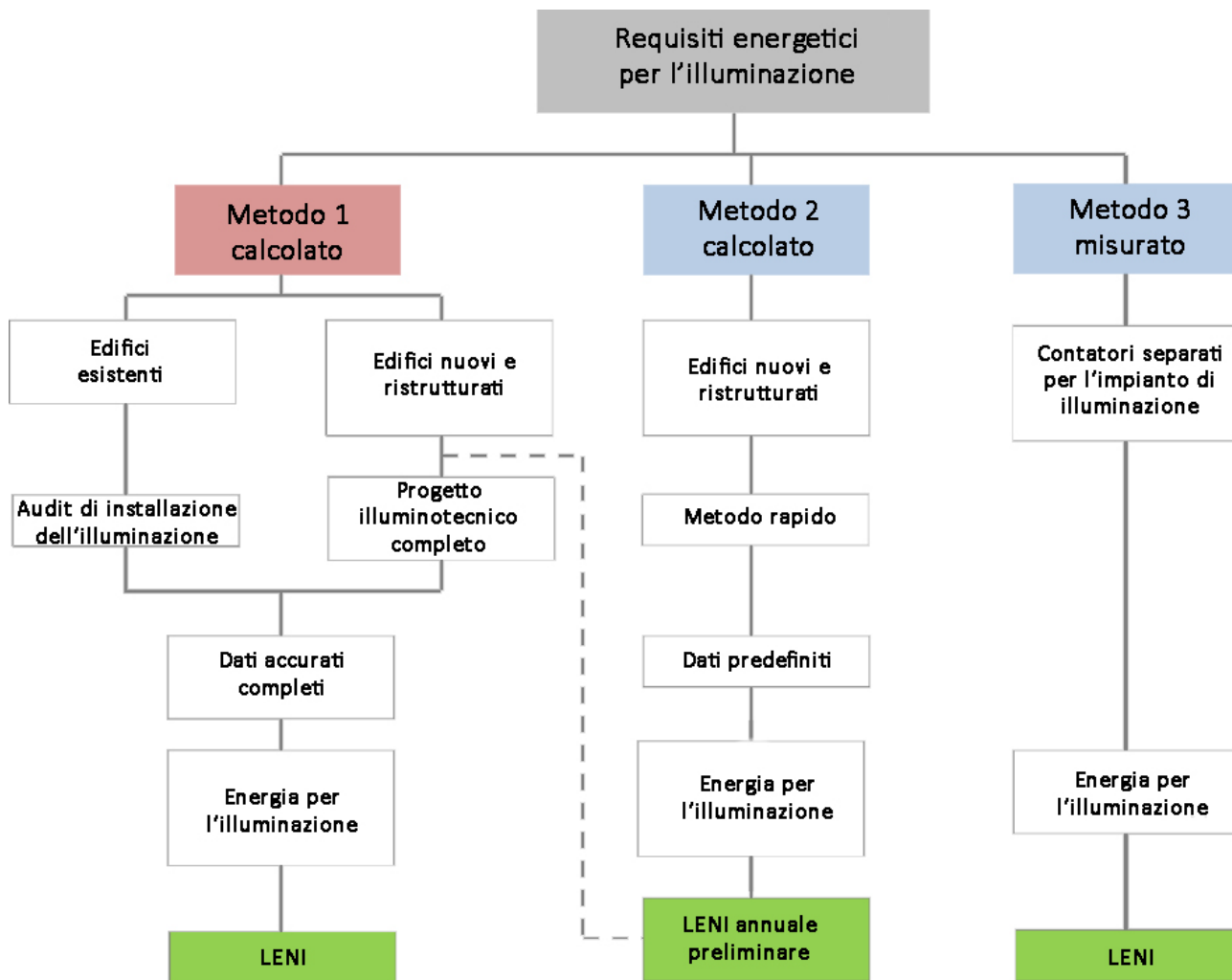


Figura 6. Metodi per determinare i requisiti energetici per l'illuminazione secondo la UNI EN 15193-1:2017 (fonte: UNI/PdR 77 [24]).

Procedura di calcolo (Metodo 1)

Nella Figura 7 è presentata la procedura di calcolo secondo il metodo 1:

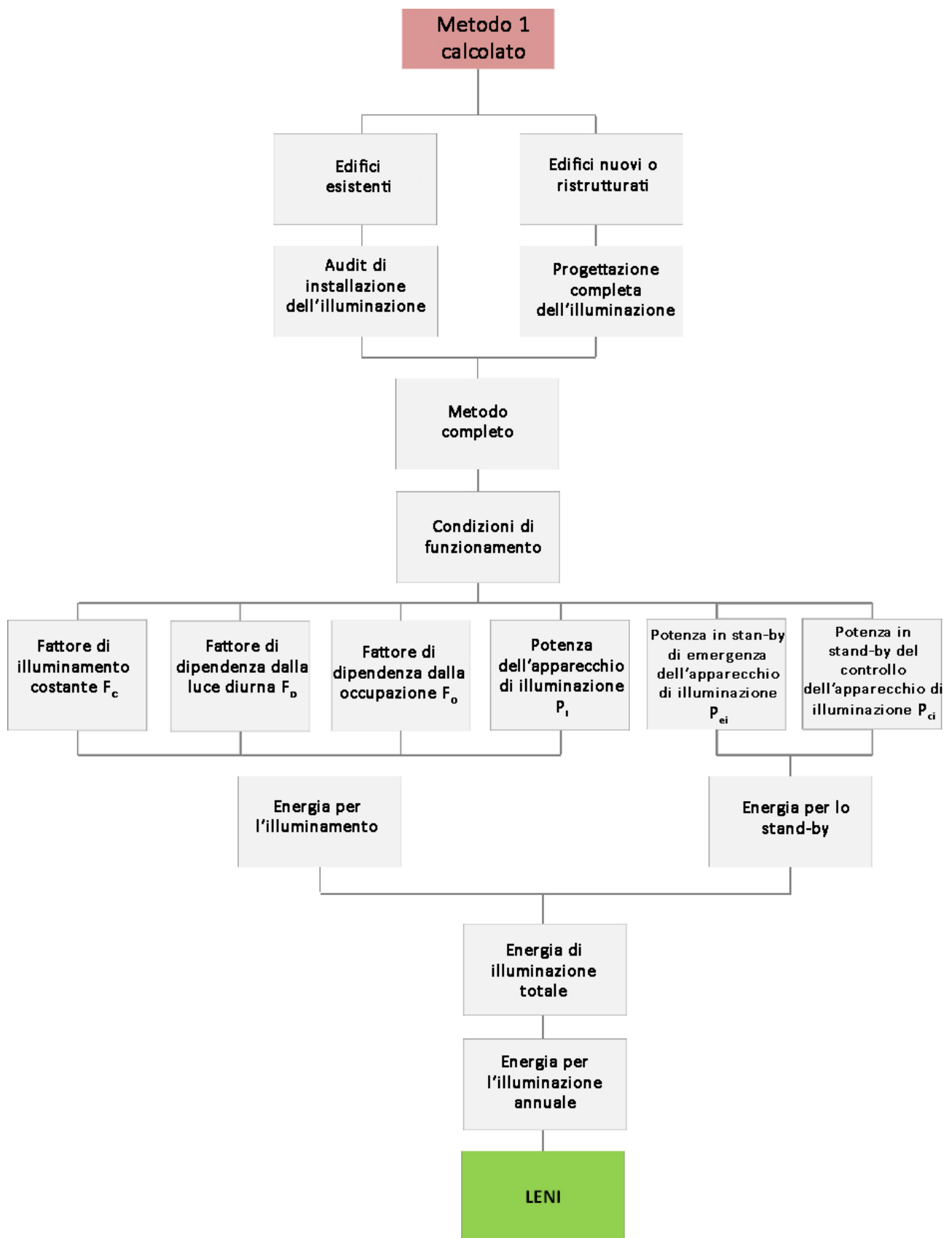


Figura 7. Descrizione del metodo 1 per la determinazione dei requisiti energetici per l'illuminazione secondo la UNI EN 15193-1:2017 (fonte: UNI/PdR 77 [24]).

L'energia richiesta per l'illuminazione

L'energia richiesta per l'illuminazione risulta essere ricavata a partire dai dati parziali riferiti all'illuminazione effettiva ed ai servizi di stand-by, secondo le seguenti formule:

$$W_t = W_{L,t} + W_{P,t}$$

$$W_{L,t} = \sum \{(P_n \cdot F_c) \cdot F_o \cdot [(t_D \cdot F_D) + t_N]\} / 1000$$

$$W_{P,t} = \sum \{(P_{pc} \cdot t_s) + (P_{em} \cdot t_e)\} / 1000$$

$$W = \sum 8760 / t_s \cdot W_t$$

$$LENI = W / A$$

dove

W_t è l'energia stimata totale richiesta per l'illuminazione in un periodo temporale in un'area o in una zona di un edificio [kWh/ t_s]

$W_{L,t}$ è l'energia di illuminazione stimata necessaria per soddisfare la funzione di illuminamento in un'area o in una zona dell'edificio [kWh/ t_s]

$W_{P,t}$ è l'energia per lo stand by stimata necessaria durante i periodi di non-illuminazione per fornire l'energia di caricamento di illuminazione di emergenza e l'energia di attivazione per i comandi di illuminazione in un'area o in una zona di un edificio [kWh/ t_s]

P_n è la potenza collegata o installata richiesta per l'impianto di illuminazione [W]

F_c è il fattore di dipendenza dall'illuminamento costante [-]

F_o è il fattore di dipendenza dall'occupazione [-]

t_D è l'ora di luce diurna [h]

F_D è il fattore di dipendenza dalla luce diurna [-]

t_N è il tempo di assenza della luce diurna [h]

P_{pc} è la potenza in stand by dei controlli totale [W]

t_s è la fase temporale specificata (ora, mese o anno)

P_{em} è la potenza di stand by di emergenza totale [W]

t_e è il tempo di carica della sola batteria [h]

W è l'energia annuale totale richiesta per l'illuminazione dell'edificio [kWh]

$LENI$ è l'indicatore numerico dell'energia per illuminazione di un edificio è [kWh/m²]

A è l'area a pavimento utile totale dell'edificio [m²]

4 Gli strumenti di calcolo

4.1 Calcolo del fabbisogno di energia termica per la climatizzazione

Le procedure di calcolo presentate nella UNI EN ISO 52016-1:2018 sono state applicate mediante l'impiego di fogli di calcolo MS Excel.

Il foglio di calcolo, realizzato dall'EPB Center (Paesi Bassi), l'ente ufficialmente incaricato dello sviluppo della norma EN ISO 52016-1, nella sua forma originale presentava diverse semplificazioni che non ne rendevano possibile la diretta applicazione al caso studio considerato. Si è pertanto proceduto completando ed implementando il foglio di calcolo con integrazioni che hanno reso possibili le seguenti procedure:

- calcolo in parallelo di più zone termiche
- calcolo della trasmissione del calore verso zone non climatizzate
- calcolo della trasmissione del calore verso zone climatizzate a temperatura fissa
- calcolo orario della differenza di temperatura tra l'aria esterna e la volta celeste
- calcolo orario dei coefficienti di scambio termico liminare
- modellazione dei nodi termici associati ai componenti edilizi e delle rispettive proprietà, in accordo con la bozza all'appendice italiana alla UNI EN ISO 52016-1:2018
- calcolo su base oraria del fattore F_w per la correzione del coefficiente di trasmissione solare g dei componenti finestrati

Il foglio di calcolo, sia nella sua versione originale sia in quella implementata, sfrutta una combinazione di formule e algoritmi scritti in Visual Basic e impiegati mediante l'utilizzo di macro.

Di seguito sono elencati e descritti i principali fogli di calcolo distinguendo i fogli di input (I), i fogli di output (O) ed i fogli contenenti calcoli intermedi (C); alcuni fogli sono ripetuti per ogni zona termica considerata (n).

- *Components*. (I) - Contiene la tabella descrittiva delle proprietà termofisiche dei componenti (trasmissione termica, resistenza termica, capacità termica areica, ecc.), queste vengono automaticamente richiamate nei fogli di input delle varie zone.
- *Clim_Data*. (I) - Contiene i dati climatici riferiti alla località analizzata (temperatura dell'aria esterna, velocità del vento, irradianza diffusa e globale sul piano orizzontale in funzione dell'orientamento, ecc.) espressi su base oraria per l'intero anno di riferimento.
- *ZTC* (I, C) - Contiene il numero di zone climatizzate e non climatizzate presenti nell'edificio oggetto della simulazione, nonché le opzioni di scelta per le differenti procedure di calcolo ammesse dal foglio di lavoro. Sono inoltre presenti tre pulsanti finalizzati alla creazione dei fogli necessari per il calcolo multizona, nonché per il calcolo dei fattori di distribuzione per il calcolo delle temperature delle zone non climatizzate con coefficienti liminari costanti.
- *AF_zones* (I) - Contiene i dati orari della temperatura dell'aria interna delle zone climatizzate a temperatura fissa adiacenti alle zone di interesse.
- *U_zones* (I) - Contiene i dati degli apporti interni e dei coefficienti di dispersione delle zone non climatizzate adiacenti alle zone termiche; il calcolo del coefficiente correttivo b_{ztu} è calcolato su base oraria, ma è possibile inserire, come ammesso dalla normativa, valori costanti desunti da tabelle.
- *Method_inputZn*. (I, n) - Contiene tutti i dati di input generali della zona come la superficie utile ed il volume, nonché i valori delle costanti fisiche e di calcolo. Sono inoltre presenti due pulsanti, un primo per avviare la procedura di calcolo, un secondo per importare da un foglio di lavoro esterno i dati di input necessari per il foglio di calcolo *Input_OZn*.
- *Input_OZn*. (I, C, n) - Contiene i dati dei componenti edilizi che compongono la zona termica analizzata. Per ogni componente sono inclusi i dati generali riguardanti le proprietà termofisiche

# of ZTC in the building	5	Input zone Sheets Creation	ZTU distribution factor calculation
# of ZTU in the building	4		
Create a new zone			

Calculation procedures	
Surface resistance	1 1 for input0 fixed values, 2 for variable values
Theta Sky	3 1 for input0 fixed values, 2 for monthly variable values based on pve, 3 for hourly variable values based on pve
Node creation	2 1 for european calculation 2 for italian calculation
g value correction	2 1 for fixed value, 2 for hourly correction (italian method)

... | Graphs | Calc_H_m | Calc_C_m | Clipboard | Components | ClimData | ClimDat_m | **ZTC** | AF_zones | U_zones | Method_inputZ1 | Input_0Z1 | Input_pZ1 | Input_tZ1 | Inf ...

Figura 10. Il foglio ZTC

month	day/month	day/week	hours/day	1 Internal operative temperatu re °C	2 Internal operative temperatu re °C	3 Internal operative temperatu re °C	4 Internal operative temperatu re °C	5 Internal operative temperatu re °C
12	17	1	1	20	20	20	20	20
12	17	1	2	20	20	20	20	20
12	17	1	3	20	20	20	20	20
12	17	1	4	20	20	20	20	20
12	17	1	5	20	20	20	20	20
12	17	1	6	20	20	20	20	20
12	17	1	7	20	20	20	20	20
12	17	1	8	20	20	20	20	20
12	17	1	9	20	20	20	20	20
12	17	1	10	20	20	20	20	20
12	17	1	11	20	20	20	20	20
12	17	1	12	20	20	20	20	20
12	17	1	13	20	20	20	20	20
12	17	1	14	20	20	20	20	20
12	17	1	15	20	20	20	20	20
12	17	1	16	20	20	20	20	20
12	17	1	17	20	20	20	20	20
12	17	1	18	20	20	20	20	20
12	17	1	19	20	20	20	20	20
12	17	1	20	20	20	20	20	20
12	17	1	21	20	20	20	20	20
12	17	1	22	20	20	20	20	20

... | Graphs | Calc_H_m | Calc_C_m | Clipboard | Components | ClimData | ClimDat_m | **ZTC** | AF_zones | U_zones | Method_inputZ1 | Input_0Z1 | Input_pZ1 | Input_tZ1 | Inf ...

Figura 11. Il foglio AF_zones

Number of ZTU:	4										
Other input values	Zone	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
fixed bztu											
Hztc:ztu:year	1058	953	1321	1014	0	0	0	0	0	0	0
Hztu:zle:year	7533	1791	1185	1563	0	0	0	0	0	0	0

Zone 1				Zone 2				Zone 3				Zone 4					
month	week	day/week	hours/day	Phi gn	Hztc:ztu	Hztu:e	Hztu:tot	bztu	Phi gn	Hztc:ztu	Hztu:e	Hztu:tot	bztu	Phi gn			
				W	W/K	W/K	W/K	-	W	W/K	W/K	W/K	-	W			
12	51	1	1	1058	7533	8590	0.88	0.88	953	1791	2744	0.65	0.65	1321	1185	2507	0.47
12	51	1	2	1058	7533	8590	0.88	0.88	953	1791	2744	0.65	0.65	1321	1185	2507	0.47
12	51	1	3	1058	7533	8590	0.88	0.88	953	1791	2744	0.65	0.65	1321	1185	2507	0.47
12	51	1	4	1058	7533	8590	0.88	0.88	953	1791	2744	0.65	0.65	1321	1185	2507	0.47
12	51	1	5	1058	7533	8590	0.88	0.88	953	1791	2744	0.65	0.65	1321	1185	2507	0.47
12	51	1	6	1058	7533	8590	0.88	0.88	953	1791	2744	0.65	0.65	1321	1185	2507	0.47
12	51	1	7	1058	7533	8590	0.88	0.88	953	1791	2744	0.65	0.65	1321	1185	2507	0.47
12	51	1	8	1058	7533	8590	0.88	0.88	953	1791	2744	0.65	0.65	1321	1185	2507	0.47
12	51	1	9	1058	7533	8590	0.88	0.88	953	1791	2744	0.65	0.65	1321	1185	2507	0.47
12	51	1	10	1058	7533	8590	0.88	0.88	953	1791	2744	0.65	0.65	1321	1185	2507	0.47
12	51	1	11	1058	7533	8590	0.88	0.88	953	1791	2744	0.65	0.65	1321	1185	2507	0.47
12	51	1	12	1058	7533	8590	0.88	0.88	953	1791	2744	0.65	0.65	1321	1185	2507	0.47
12	51	1	13	1058	7533	8590	0.88	0.88	953	1791	2744	0.65	0.65	1321	1185	2507	0.47
12	51	1	14	1058	7533	8590	0.88	0.88	953	1791	2744	0.65	0.65	1321	1185	2507	0.47

... | Graphs | Calc_H_m | Calc_C_m | Clipboard | Components | ClimData | ClimDat_m | **ZTC** | AF_zones | U_zones | Method_inputZ1 | Input_0Z1 | Input_pZ1 | Input_tZ1 | Inf ...

Figura 12. Il foglio U_zones

This sheet provides all input acco ISO 52016-1, 6.3, unless indicated otherwise

XLS on ISO 52016-1 version 2,0 (to enable a check on compatibility of input data sets)

The macro assembles and solves for each hour the matrix of equations acco ISO 52016-1, 6.5.5 and 6.5.6

Thermally conditioned zone considered for this calculation: 1

Input complete? Start macro with hourly calculation method

Examples:

Full year:	Single month:		
(incl. init.31 days)	Test winter (as shown in graph)	Test summer (as shown in graph)	
1	745	4369	
9504	1488	5088	

Time period for hourly calculation

First timestep	1
Last timestep	9504

Start macro with hourly calculation method: use button or: Control q

ATTENTION: the expected calculation time is 1 minute per month, depending on the complexity of the case

Only column D and column K are for input

Name of pre-prepared Excel file with all input data to be copied to this Excel file: Demo_ISO_52016-1_Input_RomaZ1.xlsx

File has to be in template that is compatible with this version of the spre

Input copied at date and time: 2020/04/28 // 11:28:36

Instead of manual input in this calculation file: Copy all input data automatically from pre-prepared input data Excel file

This includes reduced sections with input values for the sheets: Method_input, Input_grFl, Input_0, Input_p, Input_shad

Note that the climatic data file has to be manually copy-pasted into sheet ClimData

Name	Symbol	Unit	value	Validity interval ^a	Origin ^b	Varying ^c	Calculation method ^d
General data on the assessed object and application (ISO 52016-1:2017, Table 11)							
Object type (more than one choice possible)	EPB_OBJECT_TYPE	n/a	[not needed in this spreadsheet]		ISO 52000-1	NO	H+M

... Graphs Calc_H_m Calc_C_m Clipboard Components ClimData ClimDat_m ZTC AF_zones U_zones Method_inputZ1 Input_0Z1 Input_pZ1 Input

Figura 13. Il foglio Method_inputZn

Name	Symbol	Value	Unit	Comment
Useful (floor) area	$A_{use,z}$	329,7	m ²	Input: see "Method_Input"
	$C_{int,z}/A_{use,z}$	10000	J/(m ² K)	Same $\Rightarrow C_{int,z}$
	$f_{int,z}$	0,4	-	Input: see "Method_Input"
	$f_{sol,z}$	0,1	-	Input: see "Method_Input"
	$f_{H,z}$	0,4	-	Input: see "Method_Input"
	$f_{C,z}$	0,4	-	Input: see "Method_Input"
Max heating power	$\Phi_{H,max,z}$	1E+12	W	Input: see "Method_Input"
Max. cooling power	$\Phi_{C,max,z}$	1E+12	W	Input: see "Method_Input"
Sum of Thermal Bridges (clause 6.6.5.3)	H_{tb}	0,000000000	WK	Input: see "Method_Input"
ATTENTION: current total number of nodes (max=51): 71 plus "Input_GrFl"				
For monthly method only	$C_{m,z}/A_{use,z}$	260000	J/(m ² K)	Input: see "Method_Input"

per t

Data per element	Eli	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Comment	Name	Unit	ano scale M9	ano scale M9	in mattoni M2	e in mattoni M2	in mattoni M2	spandrel M3	he interna M4	rio in cls M7	Porta REI M8
Other Informations	Subtype	-	U	U	OP	OP	OP	OP	AD	AD	U
Explan. in table above	Subtype	-	2	3							2
Adjacent zone	Subtype	-									

... Graphs Calc_H_m Calc_C_m Clipboard Components ClimData ClimDat_m ZTC AF_zones U_zones Method_inputZ1 Input_0Z1 Input_pZ1

Figura 14. Il foglio Input_0Zn

The tempe	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7
1	17,12	18,66	19,47	19,44	19,15	17,37	18,77	19,51	19,47	19,17	9,67	11,52	12,35	16,82	17,51	18,21	19,08
2	16,76	17,89	18,85	18,83	18,52	17,38	18,23	18,98	18,95	18,61	6,65	7,84	8,52	13,92	14,98	16,04	17,78
3	16,06	17,18	18,21	18,19	17,92	16,82	17,68	18,45	18,42	18,09	4,86	5,76	6,34	11,69	12,89	14,09	16,41
4	15,40	16,51	17,57	17,56	17,34	16,27	17,13	17,92	17,89	17,58	3,63	4,38	4,89	9,98	11,22	12,45	15,12
5	14,79	15,87	16,94	16,94	16,78	15,75	16,60	17,40	17,37	17,09	2,78	3,42	3,88	8,66	9,89	11,13	14,00
6	14,35	15,41	16,75	17,06	18,59	15,39	16,24	17,31	17,58	18,96	2,27	2,84	3,27	7,95	9,28	10,62	14,42
7	14,27	15,16	16,52	16,81	18,15	15,54	16,14	17,18	17,43	18,59	2,19	2,68	3,07	7,59	8,97	10,34	14,41
8	14,13	14,97	16,31	16,60	17,96	15,49	16,06	17,07	17,31	18,48	2,31	2,73	3,09	7,45	8,82	10,18	14,32
9	14,03	14,82	16,15	16,47	18,00	15,46	16,01	17,01	17,28	18,58	2,63	3,00	3,34	7,49	8,84	10,18	14,37
10	14,01	14,74	16,07	16,43	18,15	15,50	16,01	17,01	17,31	18,79	3,65	3,88	4,14	7,86	9,14	10,43	14,60
11	13,98	14,69	16,03	16,40	18,21	15,53	16,02	17,04	17,35	18,90	4,40	4,62	4,86	8,34	9,57	10,80	14,89
12	14,03	14,69	16,01	16,40	18,28	15,60	16,07	17,08	17,41	19,01	5,06	5,28	5,52	8,85	10,04	11,22	15,23
13	14,13	14,74	16,04	16,44	18,40	15,75	16,17	17,16	17,50	19,17	5,68	5,90	6,13	9,36	10,52	11,67	15,60
14	14,20	14,79	16,04	16,40	18,20	15,87	16,26	17,21	17,51	19,00	6,02	6,28	6,52	9,75	10,88	12,01	15,77
15	14,25	14,82	16,03	16,39	18,13	15,97	16,35	17,25	17,54	18,97	6,16	6,45	6,72	10,01	11,13	12,25	15,89
16	14,27	14,83	15,99	16,31	17,86	16,01	16,40	17,25	17,50	18,72	5,47	5,92	6,26	9,91	11,07	12,22	15,79
17	14,16	14,78	15,94	16,27	17,83	15,91	16,37	17,24	17,49	18,72	4,81	5,31	5,67	9,63	10,84	12,05	15,69
18	14,07	14,71	15,87	16,18	17,68	15,84	16,32	17,19	17,43	18,58	4,50	4,97	5,32	9,36	10,59	11,82	15,50
19	13,95	14,57	15,57	15,72	16,30	15,73	16,20	16,91	16,99	17,22	4,48	4,88	5,21	9,03	10,18	11,33	14,56
20	13,58	14,29	15,24	15,35	15,80	15,33	15,91	16,59	16,63	16,73	3,97	4,42	4,77	8,54	9,64	10,74	13,73
21	13,30	14,00	14,91	15,01	15,41	15,02	15,61	16,26	16,29	16,34	3,83	4,22	4,54	8,10	9,15	10,19	13,04
22	13,00	13,70	14,58	14,68	15,07	14,69	15,29	15,93	15,96	16,00	3,66	4,03	4,33	7,72	8,72	9,72	12,49
23	12,66	13,38	14,29	14,41	14,94	14,35	14,96	15,64	15,69	15,87	3,16	3,58	3,89	7,31	8,31	9,31	12,14
24	12,40	13,10	14,03	14,17	14,79	14,08	14,67	15,37	15,44	15,71	2,98	3,35	3,65	6,99	7,99	8,99	11,88
25	12,19	12,86	13,79	13,94	14,64	13,85	14,42	15,12	15,20	15,56	2,86	3,21	3,49	6,76	7,76	8,76	11,69
26	11,96	12,63	13,57	13,74	14,51	13,63	14,18	14,90	15,00	15,42	2,62	2,99	3,28	6,55	7,56	8,56	11,54

Figura 18. Il foglio TplI_Zn

4.2 Calcolo del fabbisogno di energia erogata per la climatizzazione

Al fine del calcolo del fabbisogno di energia erogata per la climatizzazione sono stati sviluppati tre distinti fogli di calcolo MS finalizzati all'esecuzione delle procedure presentate nel modulo sostitutivo della UNI EN 15316-4-2 e nelle norme UNI EN 16798-13 e UNI EN 15316-4-1

4.2.1 Il foglio di lavoro del modulo sostitutivo della UNI EN 15316-4-2

Il documento di lavoro si compone di tre fogli:

- *Heat Pumps*. In esso vengono inseriti i dati di potenza erogata, richiesta ed il COP alle varie temperature di calcolo per la macchina utilizzata.
- *COP_Heating*. Contiene le interpolazioni necessarie per definire i valori di COP a pieno carico, riferiti all'effettiva temperatura della sorgente fredda e calcolati in funzione dei valori presenti nel foglio *Heat Pumps*.
- *HP_Hourly*. In questo foglio vengono richiesti gli ultimi dati di input, ossia le temperature dell'aria esterna e le potenze richieste alla macchina. Sfruttando poi quanto già definito nei precedenti fogli viene processato il calcolo orario delle potenze richieste dalla macchina e dei valori di COP raggiunti.

	A	B	C	D	E	F	
1	AERMEC - HA 3600						
2							
3	Tin = 35						
4	Te	kWt	kWe	COP			
5	-15	630,3	244,8	2,57			
6	-10	709,3	248,4	2,86			
7	-5	719,1	249,5	2,88			
8	0	743,7	251,3	2,96			
9	5	911,8	256,9	3,55			
10	7	1018,2	257,5	3,95			
11	10	1097,8	263,2	4,17			
12	15	1221,1	268,7	4,54			
13	20	1327,3	269,9	4,92			
14	25	1409,9	267,9	5,26			
15	Tin = 45						
16	Te	kWt	kWe	COP			
17	-15						
18	-10	700,2	299	2,34			
19	-5	708,6	300,2	2,36			
20	0	729,2	302,3	2,41			
21	5	890,9	308,4	2,89			
22	7	999,6	311,6	3,21			
23	10	1076,9	316,3	3,40			
24	15	1194	320,3	3,73			
25	20	1295,7	320,4	4,04			
26	25	1375,5	317,6	4,33			
27	Tin = 55						
28	Te	kWt	kWe	COP			
29	-15						
30	-10						

Figura 19. Il foglio Heat pumps

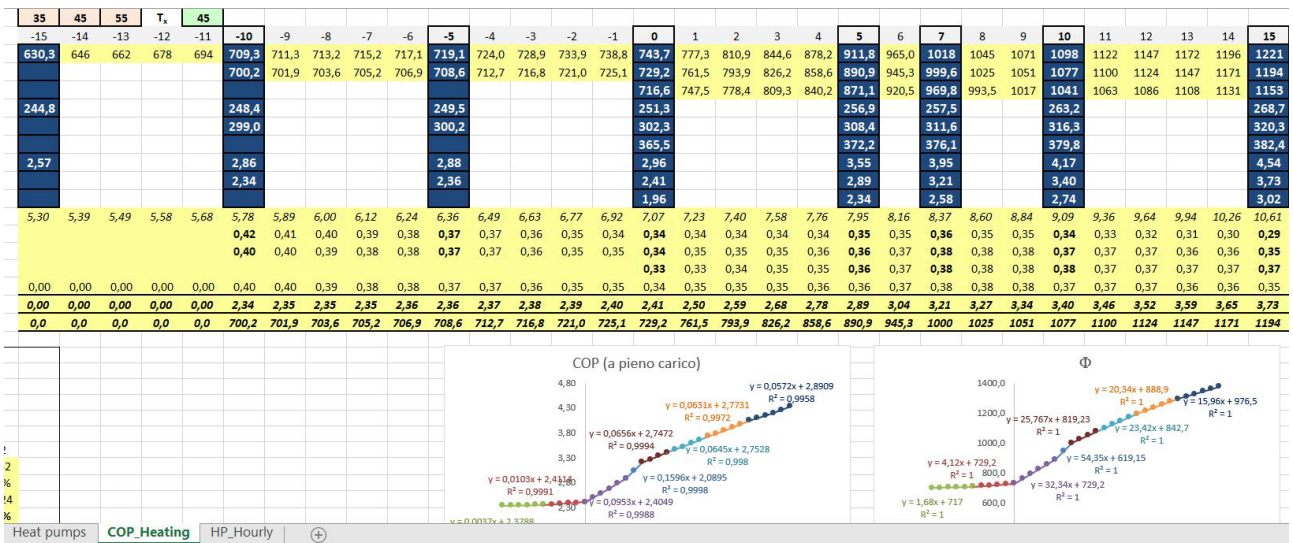


Figura 20. Il foglio COP_Heating

Data	Ora	$\Phi_{lhp,out}$ [kW]	θ_e [°C]	$\Phi_{lhp,out,max}$ [kW]	$\Phi_{lhp,out,max,1\ comp}$ [kW]	N. compressori CR=1	$\Phi_{lhp,out,CR=1}$ [kW]	COP* [-]	$\Phi_{lhp,out,CR=1}$ [kW]	CR	COP [-]	$\Phi_{lhp,out}$ [kW]	$\Phi_{lhp,in}$ [kW]	$\Phi_{lhp,not\ covered}$ [kW]	$\Phi_{lhp,gn,in}$ [kW]
01-gen	01:00:00	150,12	6,9	994,17	165,7	0	0,00	3,19	150,12	0,91	3,16	150,12	47,05	0,00	103,07
01-gen	02:00:00	160,88	6,2	956,12	159,4	1	159,35	3,08	1,33	0,01	0,24	160,88	52,19	0,00	108,50
01-gen	03:00:00	164,08	5,9	939,82	156,6	1	156,64	3,03	7,44	0,05	1,01	164,08	54,13	0,00	109,95
01-gen	04:00:00	165,95	5,8	934,38	155,7	1	155,73	3,02	10,22	0,07	1,24	165,95	55,04	0,00	110,91
01-gen	05:00:00	175,51	4,9	887,67	147,9	1	147,94	2,87	27,57	0,19	2,00	175,51	61,11	0,00	114,40
01-gen	06:00:00	180,26	4,5	874,73	145,8	1	145,79	2,83	34,47	0,24	2,14	180,26	63,61	0,00	116,65
01-gen	07:00:00	187,37	3,9	855,33	142,6	1	142,55	2,78	44,81	0,31	2,28	187,37	67,48	0,00	119,88
01-gen	08:00:00	185,79	4,0	858,56	143,1	1	143,09	2,79	42,70	0,30	2,26	185,79	66,68	0,00	119,10
01-gen	09:00:00	208,55	4,0	858,56	143,1	1	143,09	2,79	65,46	0,46	2,49	208,55	74,85	0,00	133,70
01-gen	10:00:00	98,75	4,2	865,03	144,2	0	0,00	2,81	98,75	0,68	2,68	98,75	35,20	0,00	63,55
01-gen	11:00:00	70,53	4,7	881,20	146,9	0	0,00	2,85	70,53	0,48	2,57	70,53	24,72	0,00	45,81
01-gen	12:00:00	44,19	5,2	901,77	150,3	0	0,00	2,92	44,19	0,29	2,35	44,19	15,14	0,00	29,05
01-gen	13:00:00	38,19	4,9	887,67	147,9	0	0,00	2,87	38,19	0,26	2,23	38,19	13,30	0,00	24,89
01-gen	14:00:00	76,84	5,2	901,77	150,3	0	0,00	2,92	76,84	0,51	2,66	76,84	26,32	0,00	50,52
01-gen	15:00:00	35,67	6,0	945,25	157,5	0	0,00	3,05	35,67	0,23	2,27	35,67	11,71	0,00	23,97
01-gen	16:00:00	47,57	6,3	961,56	160,3	0	0,00	3,09	47,57	0,30	2,50	47,57	15,37	0,00	32,20
01-gen	17:00:00	85,79	5,2	901,77	150,3	0	0,00	2,92	85,79	0,57	2,72	85,79	29,38	0,00	56,40
01-gen	18:00:00	182,73	4,8	884,43	147,4	1	147,41	2,86	35,32	0,24	2,17	182,73	63,84	0,00	118,89
01-gen	19:00:00	166,24	4,3	868,26	144,7	1	144,71	2,81	21,53	0,15	1,79	166,24	59,06	0,00	107,18
01-gen	20:00:00	174,00	3,9	855,33	142,6	1	142,55	2,78	31,44	0,22	2,05	174,00	62,67	0,00	111,33
01-gen	21:00:00	180,87	3,7	848,86	141,5	1	141,48	2,76	39,39	0,28	2,19	180,87	65,59	0,00	115,28
01-gen	22:00:00	184,89	3,7	848,86	141,5	1	141,48	2,76	43,42	0,31	2,25	184,89	67,05	0,00	117,84
01-gen	23:00:00	189,15	3,6	845,62	140,9	1	140,94	2,75	48,21	0,34	2,30	189,15	68,83	0,00	120,32
01-gen	00:00:00	190,91	3,7	848,86	141,5	1	141,48	2,76	49,44	0,35	2,32	190,91	69,23	0,00	121,68
02-gen	01:00:00	192,32	3,8	852,09	142,0	1	142,02	2,77	50,31	0,35	2,34	192,32	69,50	0,00	122,82
02-gen	02:00:00	192,41	4,0	858,56	143,1	1	143,09	2,79	49,31	0,34	2,34	192,41	69,06	0,00	123,35
02-gen	03:00:00	195,02	3,9	855,33	142,6	1	142,55	2,78	52,47	0,37	2,37	195,02	70,24	0,00	124,78

Figura 21. Il foglio HP_Hourly

4.2.2 Il foglio di lavoro della UNI EN 16798-13

Nel documento di lavoro sono presenti tre fogli principali:

- *Input*. Contiene diversi menu a tendina e celle compilabili finalizzate alla descrizione delle caratteristiche della macchina scelta.
- *Prelim_calcul*. Contiene i calcoli preliminari, variabili a seconda delle caratteristiche tipologiche della macchina considerata.
- *Hourly_calc*. Contiene i dati di input orari, come la temperatura degli ambienti interessati dai flussi di calore della macchina, nonché i risultati orari dei fabbisogni e dei rendimenti associati.

Sono inoltre presenti diversi fogli contenenti i valori tabellati nella norma e nelle sue appendici.

PRODUCT DATA				Code
Refrigeration system type	Air-cooled chiller system			AIR_CLG_CHLL
Generation system type	Compression type chiller system			COMP
Compressor type	Scroll compressor			SCRL
Compressor control type	Staged capacity control (various capacity stages)			STAGED
Air-cooled heat rejection	Heat rejection into external air, i.e. at external air temperature			EXTERNAL
		Assigned input value		Assumed input value (def. val. for missing input)
Nominal thermal power of the refrigeration system	$\Phi_{C,gen,n}$	944,9 kW		944,9
Nominal energy efficiency ratio	EER_n	2,89		2,89
Nominal cooling generation output temperature	$\theta_{C,gen,out,n}$	7 °C		7,0
Ambient temperature for air cooled system at nominal conditions	$\theta_{e,n}$	35 °C		35,0
Electrical power for control, actors, sensors	$P_{ctrl/el}$	0 kW		0,0
SYSTEM DESIGN DATA				Code
Cooling generation control	Controlled compressor and thermostatic or electric expansion valve			TRUE
Multiple cooling generation arrangement	A single cooling generator only			SINGLE

Figura 22. Il foglio Input

Cooling generation operation time	Temperature difference within the condenser	Temperature difference within the evaporator	Part-load factor ($f_{C,PL,k}$)									
$t_{Cgen,op}$	$\Delta\theta_{cond}$	$\Delta\theta_{evap}$	Part-load stage (k)									
[h]	[K]	[K]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1	10	6	0,87	1,03	1,05	1,06	1,03	1,08	1,09	1,07	1,03	1,00

Coefficients and temperature of heat rejection system part-load factor formula (eq. 40)		
α_0	α_1	α_2
[°C]	[°C ⁻¹]	[°C ⁻²]
2,64	-0,07753	0,00083

Figura 23. Il foglio Prelim_calcul

Time				Part-load operation						Temp. correction		Output data	
Date	Month	Day	Time	Part-load factor of the refrigerant unit at part-load stage k	Temperature of the heat rejection system	Part-load factor of the heat rejection system	Free-cooling factor	Factor for multiple refrigeration units	Part-load value	Energy efficiency ratio correction factor	Thermal energy to be extracted by refrigeration system	Cooling generation electrical input	
(yyyy-mm-dd)	[mo]	[d]	[h]	$f_{CPL,k}$	θ	$f_{hr,PL}$	$f_{hr,fc}$	f_{Cmult}	PLV	$f_{EER,corr}$	$Q_{Cgen,in}$	$E_{Cgen,in}$	
				[-]	[°C]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kWh]	[kWh]	
2015-07-01	7	1	0:00	1,00	21,8	1,34	1,00	1,00	1,34	1	0,0	0,0	
2015-07-01	7	1	1:00	1,00	21,4	1,36	1,00	1,00	1,36	1	0,0	0,0	
2015-07-01	7	1	2:00	1,00	21,0	1,38	1,00	1,00	1,38	1	0,0	0,0	
2015-07-01	7	1	3:00	1,00	20,8	1,39	1,00	1,00	1,39	1	0,0	0,0	
2015-07-01	7	1	4:00	1,00	20,7	1,39	1,00	1,00	1,39	1	16,6	4,1	
2015-07-01	7	1	5:00	1,00	20,7	1,39	1,00	1,00	1,39	1	27,5	6,8	
2015-07-01	7	1	6:00	0,87	20,7	1,39	1,00	1,00	1,21	1	77,6	22,2	
2015-07-01	7	1	7:00	0,87	22,3	1,32	1,00	1,00	1,15	1	135,1	40,6	
2015-07-01	7	1	8:00	0,87	23,6	1,27	1,00	1,00	1,11	1	140,6	43,9	
2015-07-01	7	1	9:00	0,87	24,5	1,24	1,00	1,00	1,08	1	123,7	39,7	
2015-07-01	7	1	10:00	1,03	25,7	1,20	1,00	1,00	1,23	1	144,4	40,6	
2015-07-01	7	1	11:00	1,03	26,3	1,18	1,00	1,00	1,21	1	197,9	56,6	
2015-07-01	7	1	12:00	1,05	27,0	1,15	1,00	1,00	1,21	1	242,0	69,2	
2015-07-01	7	1	13:00	1,05	27,8	1,13	1,00	1,00	1,18	1	284,5	83,3	
2015-07-01	7	1	14:00	1,05	28,4	1,11	1,00	1,00	1,16	1	300,3	89,4	
2015-07-01	7	1	15:00	1,05	28,5	1,10	1,00	1,00	1,16	1	274,6	81,9	
2015-07-01	7	1	16:00	1,03	29,0	1,09	1,00	1,00	1,12	1	216,5	66,8	
2015-07-01	7	1	17:00	1,03	28,3	1,11	1,00	1,00	1,14	1	141,9	42,9	
2015-07-01	7	1	18:00	0,87	28,0	1,12	1,00	1,00	0,97	1	94,7	33,6	
2015-07-01	7	1	19:00	0,87	27,2	1,15	1,00	1,00	1,00	1	57,9	20,1	
2015-07-01	7	1	20:00	1,00	26,7	1,16	1,00	1,00	1,16	1	37,4	11,1	

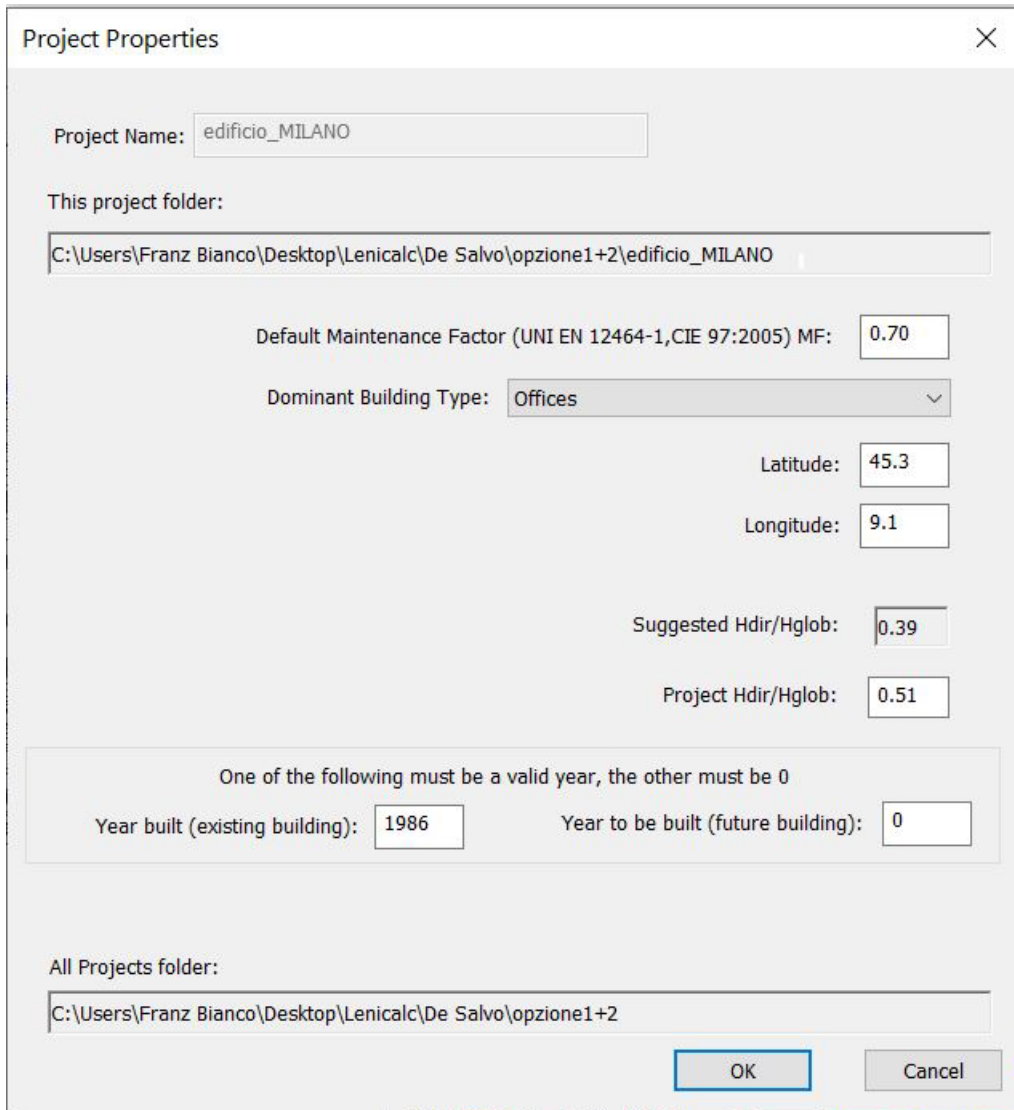
Figura 24. Il foglio Hourly_calc

4.2.3 Il foglio di lavoro della UNI EN 15316-4-1

Sono presenti due fogli:

- **Dati input.** Contiene tutti i dati del generatore di calore considerato, nonché le temperature dell'aria, del fluido termovettore e le potenze richieste alla macchina. Nel caso alcuni parametri non fossero disponibili sono presenti dei valori di default sostitutivi.
- **Calcoli orari.** Contiene i calcoli parziali e totali dei fabbisogni di generazione della macchina ora per ora, nonché i rendimenti associati.

fabbisogno di energia per illuminazione, espresso in LENI o in kWh, e presentato su base mensile od annuale.



Project Properties

Project Name: edificio_MILANO

This project folder:
C:\Users\Franz Bianco\Desktop\Lenicalc\De Salvo\opzione1+2\edificio_MILANO

Default Maintenance Factor (UNI EN 12464-1, CIE 97:2005) MF: 0.70

Dominant Building Type: Offices

Latitude: 45.3

Longitude: 9.1

Suggested Hdir/Hglob: 0.39

Project Hdir/Hglob: 0.51

One of the following must be a valid year, the other must be 0

Year built (existing building): 1986 Year to be built (future building): 0

All Projects folder:
C:\Users\Franz Bianco\Desktop\Lenicalc\De Salvo\opzione1+2

OK Cancel

Figura 27. Proprietà del progetto (da LENICALC)

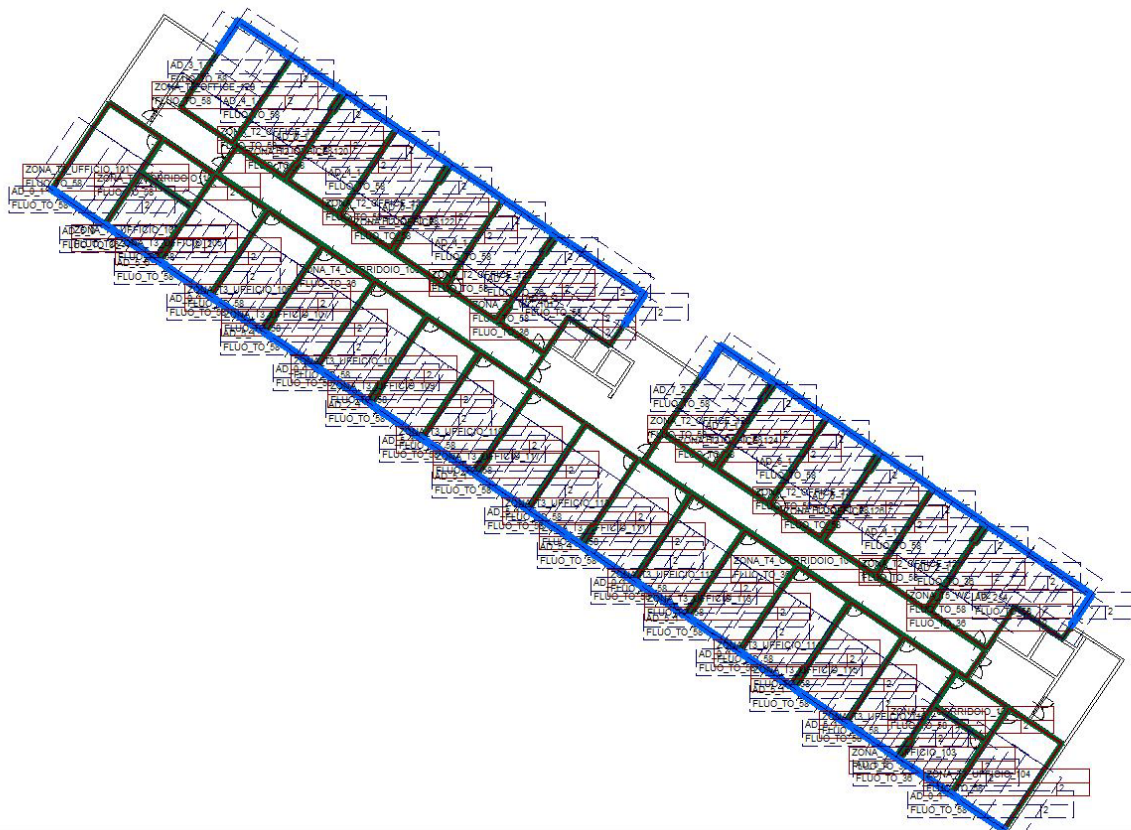


Figura 28. Modellazione dell'edificio (da LENICALC)

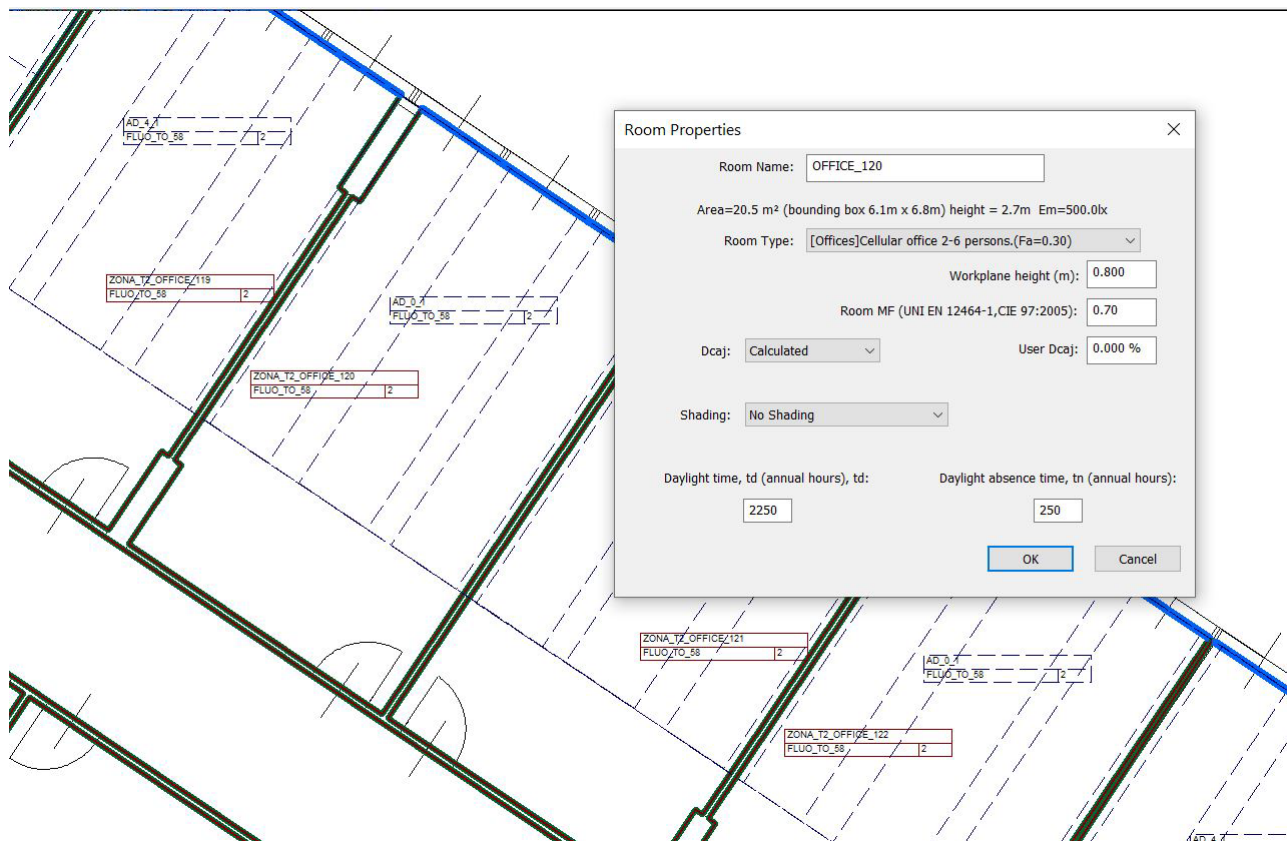


Figura 29. Proprietà della stanza (da LENICALC)

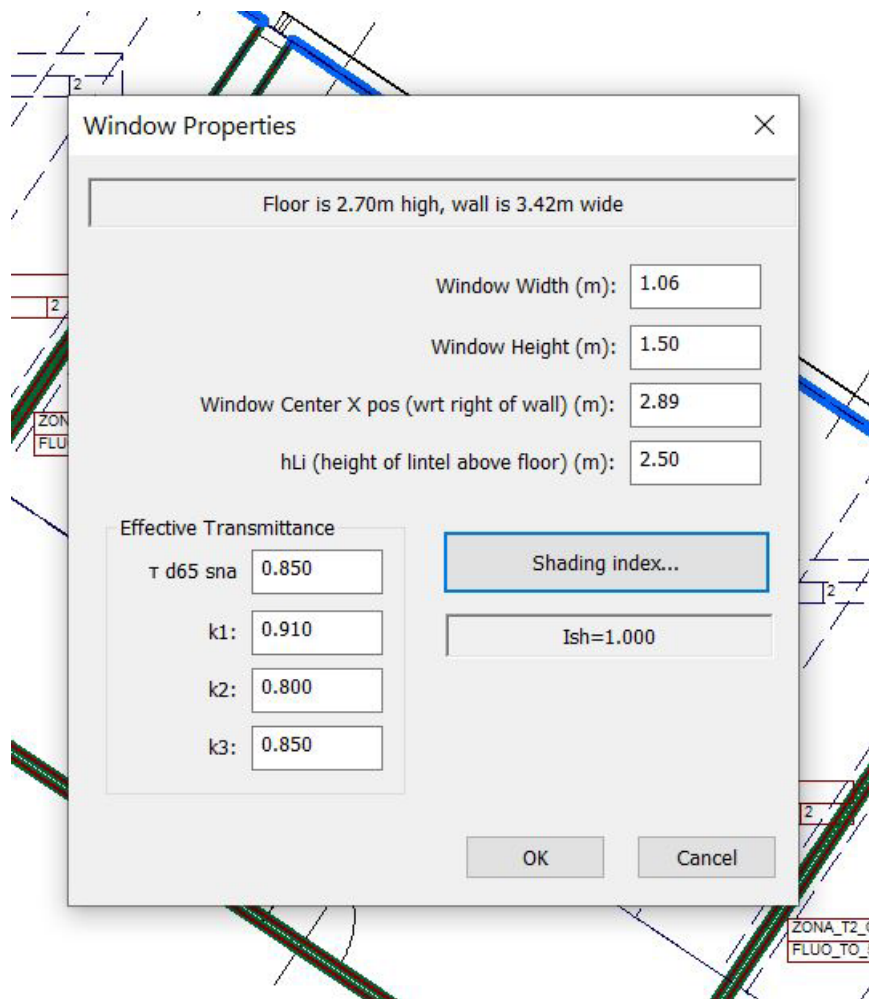


Figura 30. Proprietà delle finestre (da LENICALC)

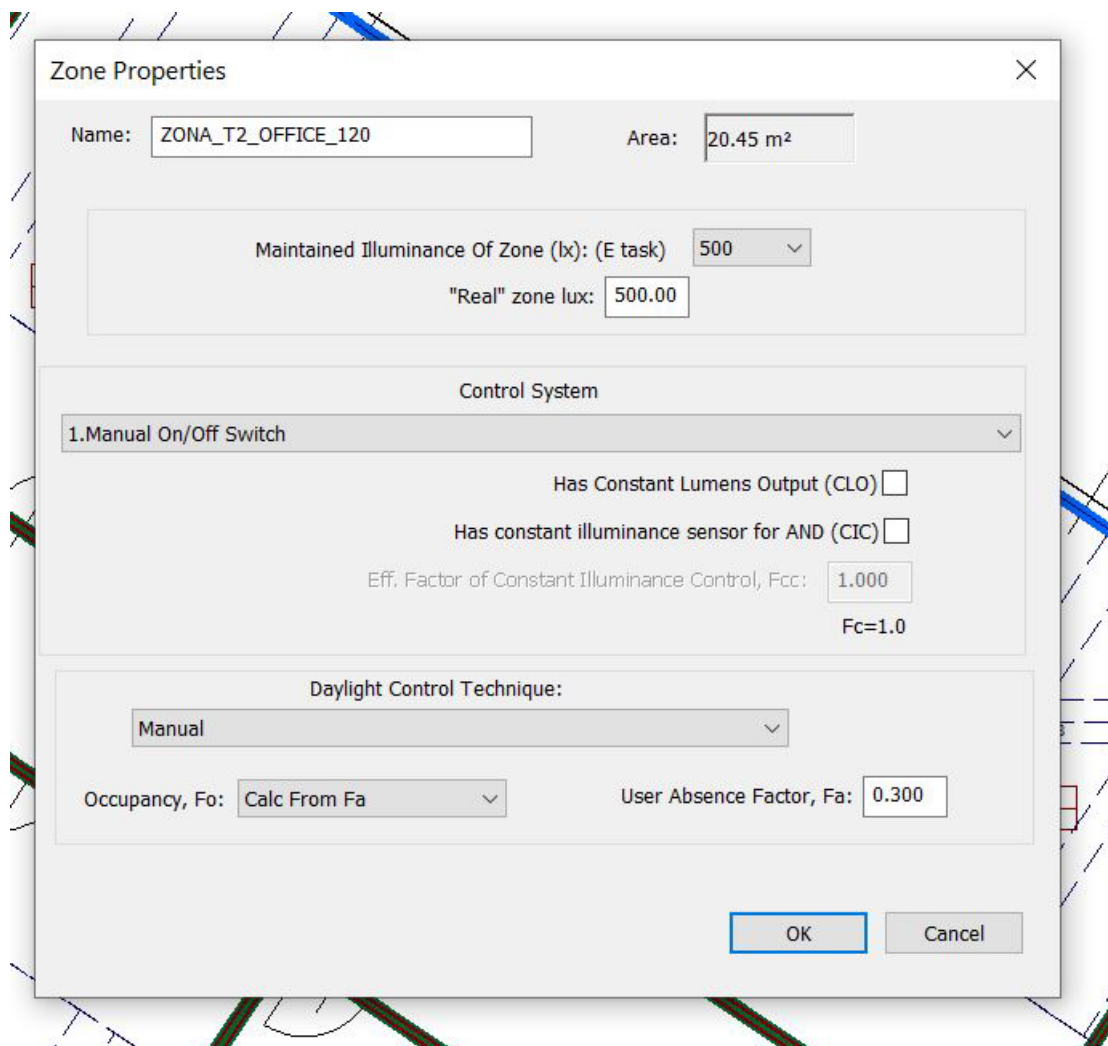


Figura 31. Proprietà delle zone (da LENICALC)

5 Il caso studio

5.1 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.

5.1.1 Informazioni generali e contesto esterno

L'edificio oggetto di analisi è un edificio per uffici sito nel quartiere Pietralata di Roma, in prossimità del fiume Aniene, tra la casa circondariale di Rebibbia e l'aeroporto di Roma Urbe (Figura 32).

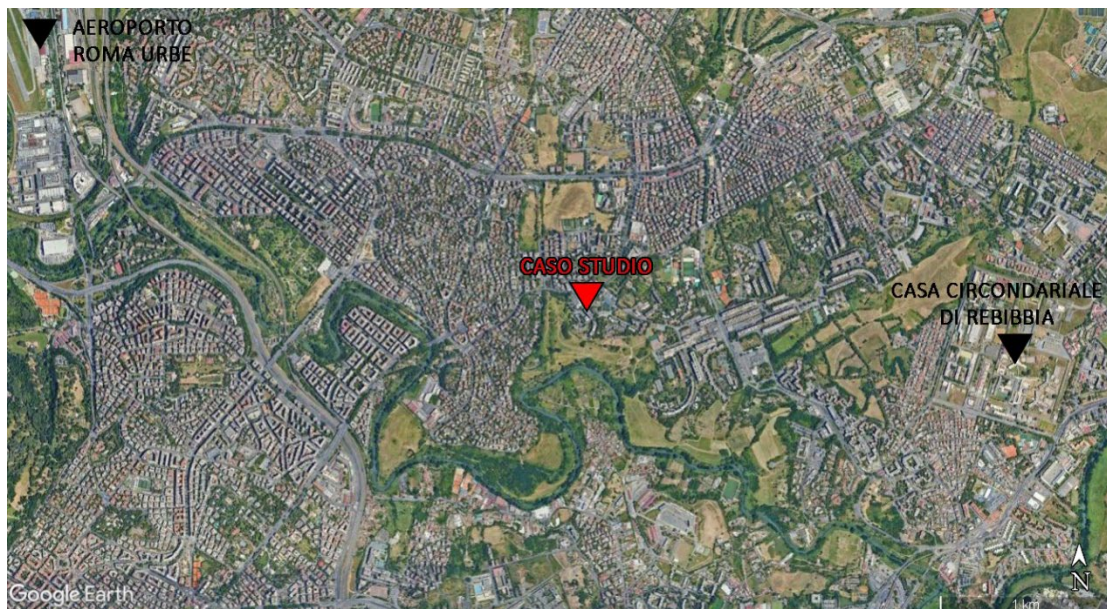


Figura 32. Inquadramento territoriale (da Google Earth).

L'edificio è caratterizzato da un'impronta rettangolare (Figura 33) con due lati affacciati sul parcheggio interno adiacente all'edificio; gli altri due lati affacciano rispettivamente su via Gaetano Licopoli e via Carlo Spegazzini. È orientato principalmente verso sud-ovest (il prospetto su via Gaetano Licopoli è orientato a 34° sud-ovest). È inserito in un contesto con edifici più bassi o posti a sufficiente distanza rispetto al caso studio, che non risulta, quindi, particolarmente ombreggiato dagli edifici circostanti. Infatti, le facciate esposte a nord-est e nord-ovest si affacciano su ampi spazi aperti privi di edifici costruiti (Figura 33).



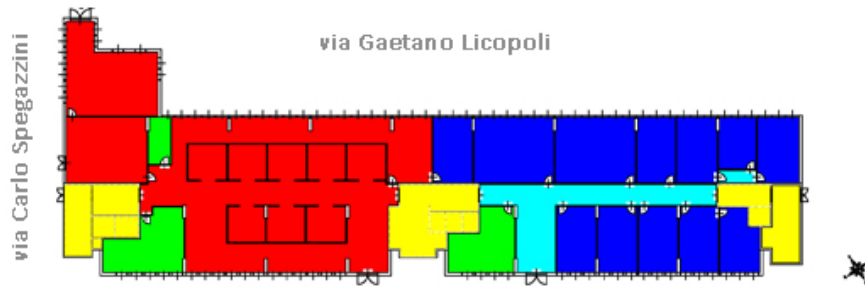
Figura 33. Individuazione dell'edificio (da Google Earth).

L'edificio oggetto di analisi è costituito da 7 piani fuori terra (Figura 34) e un piano seminterrato. L'intero edificio ospita uffici, al piano terra sono presenti una hall, gli uffici di relazione con il pubblico e la sala di attesa (in rosso in Figura 34); la restante porzione dell'edificio è occupata da uffici singoli o doppi con superfici comprese tra i 12 e i 40 m² (in blu in Figura 34) collegati tra loro da disimpegni (in ciano in Figura 34). Sono presenti tre vani scala due dei quali sono posti alle estremità dell'edificio, mentre il restante è in posizione centrale (in giallo in Figura 34); sono presenti tre bagni al piano terra e due in ciascuno dei restanti piani (in verde in Figura 34).

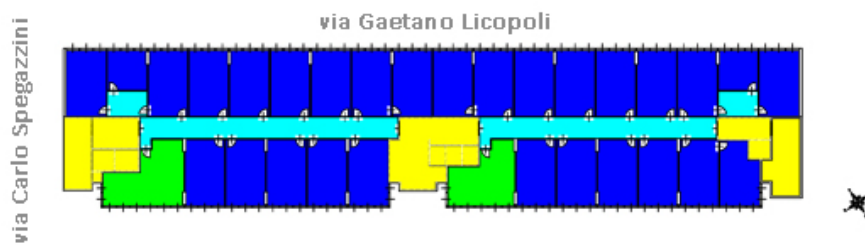
È presente un piano parzialmente interrato che confina con l'ambiente esterno per la sola porzione affacciata su via Licopoli e dei locali non climatizzati posti al livello della copertura piana.

In Figura 35 vengono riportati i prospetti dell'edificio oggetto di analisi.

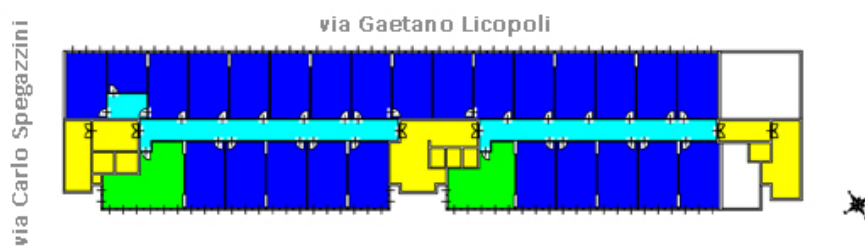
•PIANO TERRA



•PIANI 1°- 2°- 3°



•PIANO 4°



•PIANI 5°- 6°

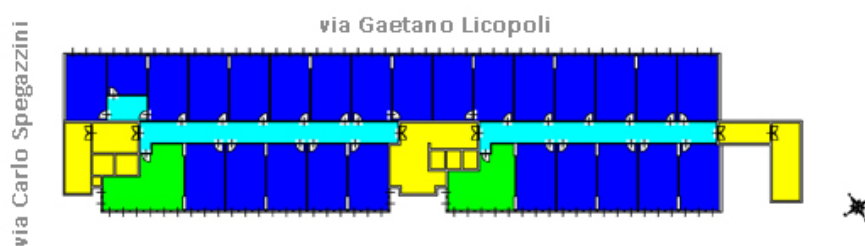


Figura 34. Piante del piano terra e dei piani 1-6 dell'edificio reale.

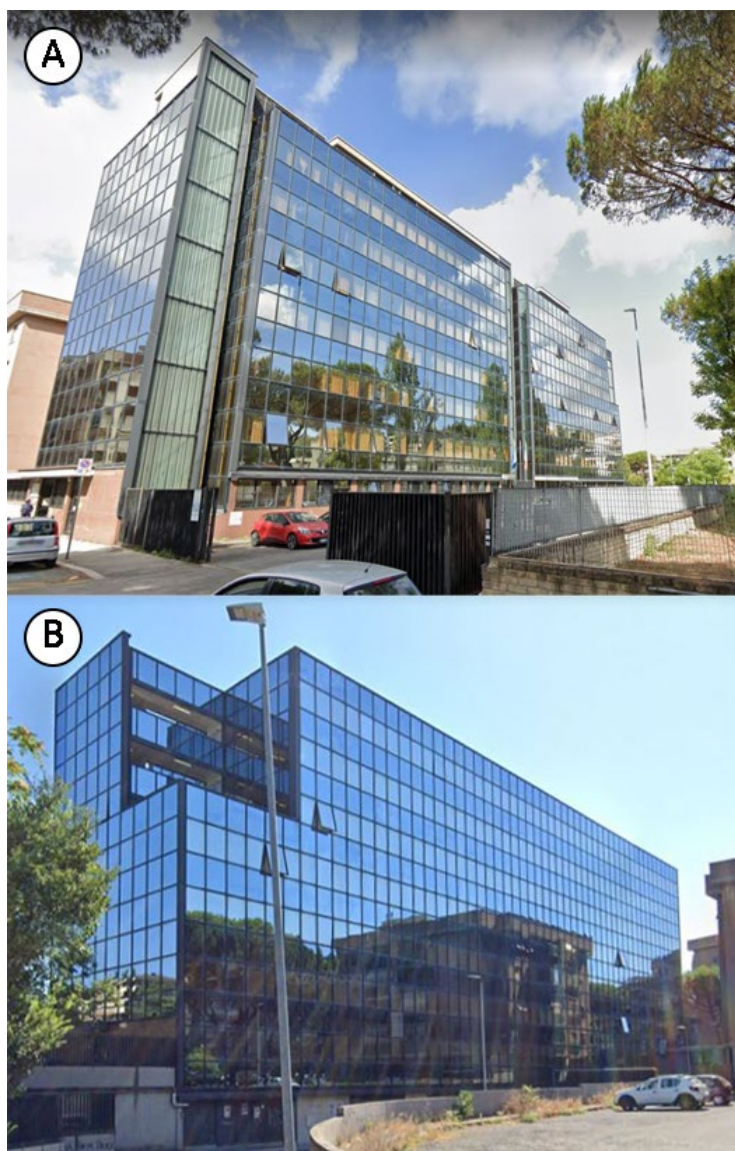


Figura 35. Prospetti sud-est (a – via Spegazzini), nord-est (b), e sud-ovest (c – via Licopoli).

5.1.2 Descrizione del fabbricato

L'edificio, edificato nel 1986, presenta una struttura a setti portanti in calcestruzzo armato, e un involucro edilizio debolmente 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 3 e Tabella 4.

Le pareti perimetrali esterne nelle facciate nord-ovest e sud-est, nonché la facciata nord-est al piano terreno, hanno uno spessore di circa 25 cm e sono caratterizzate da due filari di laterizi forati separati da un'intercapedine d'aria, esternamente sono intonacati al piano terra e rivestiti da lastre di vetro ai piani superiori. Le pareti esterne delle facciate sud-ovest, nonché la facciata nord-est ai piani superiori al terreno, presentano invece delle pareti tipo *spandrel* composte da cartongesso e isolante minerale, esternamente sono rivestite da pannelli di vetro. Le pareti dei vani scale sono in calcestruzzo armato, anch'esse rivestite esternamente con pannelli di vetro. In Tabella 3 è riportato un elenco dei componenti verticali presenti nell'edificio.

Tabella 3. Elenco dei componenti edilizi opachi verticali.

Cod	Descrizione
M1	Parete in calcestruzzo
M2	Parete in mattoni
M3	Parete spandrel
M4	Partizione interna
M5	Parete in mattoni rivestita
M6	Parete in calcestruzzo rivestita
M7	Setti in calcestruzzo
M8	Porta REI

Per quanto riguarda i componenti opachi orizzontali, le strutture disperdenti sono rappresentate dal solaio che separa il piano interrato (non climatizzato) e il primo terra, 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 29 cm e presentano rivestimento in materiale plastico, la copertura piana calpestabile è invece caratterizzata da uno spessore di 36 cm e rivestimento in piastrelle in ceramica. In Tabella 4 è riportato un elenco dei componenti orizzontali presenti nell'edificio.

Tabella 4. Elenco dei componenti edilizi opachi orizzontali.

Cod	Descrizione
P1	Solaio piano tipo
P2	Solaio piano terra
S1	Solaio di copertura

I serramenti presenti nel fabbricato sono composti da telaio in metallo e vetri doppi. Non sono presenti chiusure oscuranti. In Tabella 5 vengono riportate le tipologie dei componenti vetrati.

Tabella 5. Elenco dei componenti edilizi trasparenti.

Cod	Descrizione
W1	Porta a due ante
W2	Porta a due ante
W3	Finestra singola
W4	Finestra singola
W5	Finestra singola

5.1.3 Descrizione dell'impianto di climatizzazione

Gli ambienti presenti nell'edificio oggetto di analisi sono serviti da un impianto centralizzato per il riscaldamento e raffrescamento; i vani scale e il piano interrato, invece, non risultano riscaldati.

I terminali di emissione sono ventilconvettori. Non essendoci ulteriori informazioni in merito alle caratteristiche impiantistiche dell'edificio reale, ai fini delle simulazioni sono state fatte alcune assunzioni per quanto concerne le caratteristiche del sottosistema di distribuzione, definito come caratterizzato da montanti non isolati correnti nei vani scale, e le caratteristiche della regolazione dell'impianto, definita per singolo ambiente + climatica.

Non essendoci informazioni dettagliate, o comunque rilevanti ai fini delle simulazioni, sono state previste due soluzioni di generazione: una prima impiega una caldaia a condensazione ed un gruppo frigorifero rispettivamente per la climatizzazione invernale ed estiva; una seconda sfrutta invece una pompa di calore reversibile utilizzata sia nella stagione di riscaldamento che in quella di raffrescamento. I generatori così definiti, non corrispondenti al caso reale, sono descritti nel dettaglio nella Sezione 5.2.5.

5.1.4 Descrizione dell'impianto di illuminazione

Le caratteristiche dell'impianto di illuminazione dell'edificio reale non sono note; si è proceduto ipotizzando una distribuzione uniforme in tutto l'edificio di lampade a fluorescenza con potenze medie di 10 W/m².

5.2 Descrizione del modello, assunzioni 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.

5.2.1 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 [25]. I rispettivi valori medi mensili sono contenuti nella norma UNI 10349-1 [26] e riportati in Figura 36 e in Figura 37.

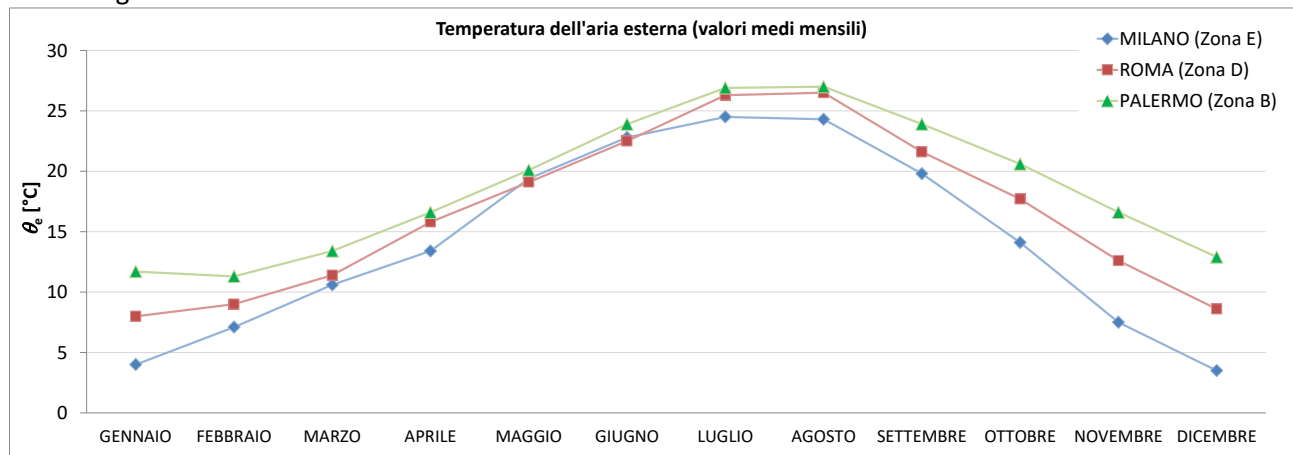


Figura 36. Valori medi mensili della temperatura dell'aria esterna (fonte: UNI 10349-1 [26]).

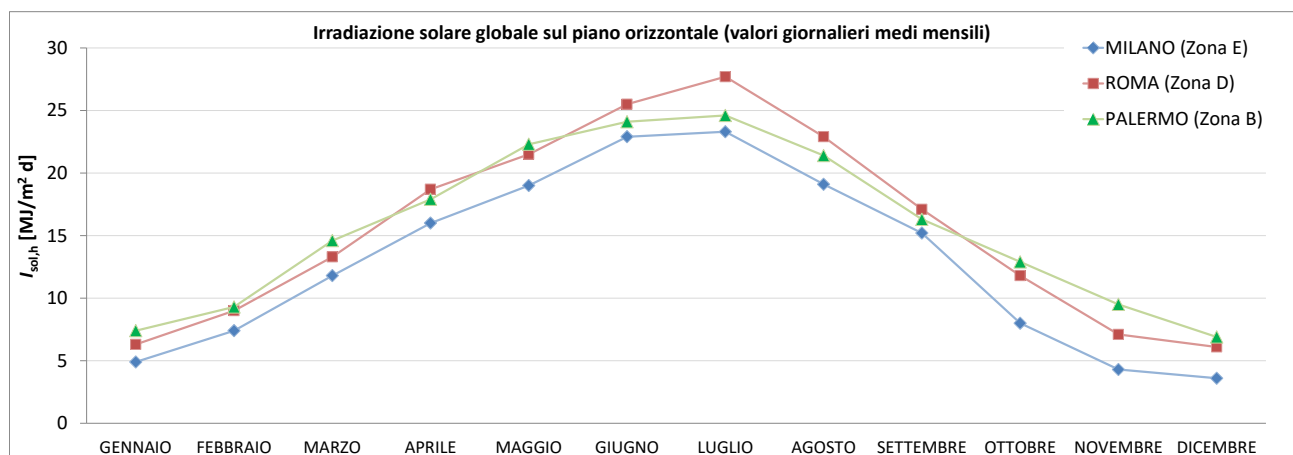


Figura 37. Valori medi mensili dell'irradiazione solare globale sul piano orizzontale (fonte: UNI 10349-1 [26]).

5.2.2 Il fabbricato

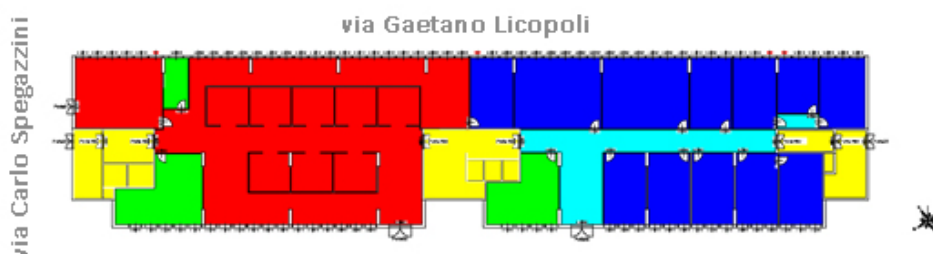
Il modello impiegato ai fini dei calcoli, le cui principali caratteristiche geometriche dell'edificio sono riportate in Tabella 6, presenta alcune differenze rispetto all'edificio reale. Alcune modifiche, apprezzabili nella Figura 38, sono state effettuate ai fini di semplificare la geometria: una porzione del piano terra è stata eliminata in modo da rendere la pianta regolare, i piani dal 1 al 6 sono stati inoltre normalizzati considerando piante identiche, i locali non climatizzati posti in copertura non sono stati considerati e il piano posto inferiormente al piano terra è stato considerato come interamente interrato e avente come componenti edilizi di involucro elementi con intercapedine fortemente ventilata.

Ai fini dei calcoli sono stati inoltre trascurate le ombre portate da edifici e ostruzioni esterne, nonché gli effetti dei ponti termici.

Tabella 6. Principali caratteristiche geometriche dell'edificio.

Parametro	Simbolo	U.M.	Valore
Volume lordo riscaldato	V_l	m ³	16.876
Superficie netta di pavimento riscaldata	A_f	m ²	5.143
Superficie d'involucro disperdente	A_{env}	m ²	5.749
Rapporto di forma	A_{env} / V_l	m ⁻¹	0,34

•PIANO TERRA



•PIANO TIPO

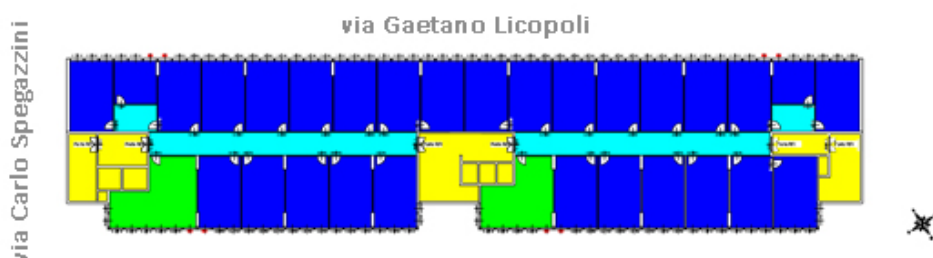


Figura 38. Piante del piano terra e dei piani 1-6 (pianta tipo) del modello.

I componenti edilizi considerati nel modello non differiscono rispetto a quelli presenti nell'edificio reale; di seguito da Tabella 7 a Tabella 9 sono presentate le caratteristiche principali dei componenti edilizi analizzati, nella Appendice A sono inoltre presenti le stratigrafie considerate.

Tabella 7. Caratteristiche dei componenti edilizi opachi verticali.

Cod	Descrizione	s	U	M_s	Y_{ie}	κ_i	Δ
		[m]	[W·m ⁻² K ⁻¹]	[kg·m ⁻²]	[W·m ⁻² K ⁻¹]	[kJ·m ⁻² K ⁻¹]	[W·m ⁻² K ⁻¹]
M1	Parete in calcestruzzo	0,17	3,46	375	2,18	64,15	8,41
M2	Parete in mattoni	0,26	1,24	186	0,91	52,38	1,57
M3	Parete spandrel	0,12	0,74	91	0,59	42,05	0,84
M4	Partizione interna	0,08	0,69	31	0,67	13,83	0,83
M5	Parete in mattoni rivestita	0,25	1,26	165	0,95	51,47	1,61
M6	Parete in calcestruzzo rivestita	0,17	3,39	390	2,03	65,67	4,73
M7	Setti in calcestruzzo	0,28	2,12	616	0,43	69,21	9,45
M8	Porta REI	0,06	0,62	25	0,61	7,90	0,69

Tabella 8. Caratteristiche dei componenti edilizi opachi orizzontali.

Cod	Descrizione	s	U	M_s	Y_{ie}	κ_i	Δ
		[m]	[W·m ⁻² K ⁻¹]	[kg·m ⁻²]	[W·m ⁻² K ⁻¹]	[kJ·m ⁻² K ⁻¹]	[W·m ⁻² K ⁻¹]
P1	Solaio piano tipo	0,29	1,41	538	0,27	62,54	2,71
P2	Solaio piano terra	0,29	1,41	538	0,27	62,54	2,71
S1	Solaio di copertura	0,36	1,81	671	0,51	68,61	2,42

Tabella 9. 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	Porta a due ante	3,24	0,38	4,13	4,13	0,85	0,85
W2	Porta a due ante	4,86	0,31	3,94	3,94	0,85	0,85
W3	Finestra singola	1,20	0,14	3,24	3,24	0,85	0,85
W4	Finestra singola	1,80	0,12	3,20	3,20	0,85	0,85
W5	Finestra singola	1,20	0,15	3,26	3,26	0,85	0,85

5.2.3 Zonizzazione

L'edificio è stato suddiviso nelle seguenti zone termiche (Figura 39):

- zona termica 1: uffici open-space (in rosso);
- zona termica 2: uffici con esposizione nord-est (in blu);
- zona termica 3: uffici con esposizione sud-ovest (in viola);
- zona termica 4: corridoi (in ciano);
- zona termica 5: bagni (in verde).

Si riportano in Tabella 10 i principali dati geometrici delle zone termiche.

•PIANO TERRA



•PIANO TIPO



Figura 39. Schematizzazione tridimensionale delle zone termiche nelle quali è stato suddiviso lo spazio climatizzato dell'edificio.

Tabella 10. Quadro dei principali dati geometrici delle zone termiche.

	A_f [m ²]	V_l [m ³]	A_{env}/V_l [m ⁻¹]
Zona termica 1	321	1.088	0,54
Zona termica 2	1.457	5.023	0,31
Zona termica 3	2.294	7.254	0,35
Zona termica 4	641	2.075	0,22
Zona termica 5	431	1.455	0,56

5.2.4 Profili di utenza

I dati relativi all'utenza sono stati ricavati prevalentemente dalla bozza di Appendice Nazionale della norma UNI EN 16798-1:2019 [27, 28]. In Tabella 11 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 12 il profilo di occupazione assunto per l'edificio per uffici (*short working week*) [27]. Da Figura 40 a Figura 42 sono rappresentati i profili giornalieri su base oraria, rispettivamente, degli apporti di calore relativi alle sorgenti interne (Figura 40), del tasso di ricambio orario (Figura 41) e del funzionamento dell'impianto di riscaldamento per ciascuna zona, quest'ultimo da utilizzarsi nel regime intermittente (Figura 42). Per semplicità i primi due profili si riferiscono alla zona termica 1; per le altre zone termiche si registrano andamenti analoghi. Tutti i profili sono stati costruiti secondo quanto indicato in Tabella 11.

Nel regime intermittente 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 (16°C per i soli corridoi), e a 16 °C in regime di attenuazione; sono state considerate due ore di preaccensione dell'impianto. Nel regime continuo, 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, per il regime intermittente è stato previsto un funzionamento di otto ore, alle quali si aggiunge un'ora di preaccensione dell'impianto, con spegnimento nelle ore di non occupazione; per il regime continuo è stato previsto invece un regime di funzionamento dell'impianto continuo sulle 24 ore. La temperatura di regolazione è di 25 °C per i corridoi e di 26°C tutte le altre zone.

Tabella 11. Quadro riepilogativo dei dati d'utenza per l'edificio uso uffici (*short working week*).

	Parametro	Equazione/criterio	Valore				Unità di misura	Fonte	Note	
			Uffici open space	Uffici singoli	Corridoi	Bagni				
Periodo di utilizzo	Ora del giorno, INIZIO		8	8	8	8	h	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale(*) - Tabella 26j		
	Ora del giorno, FINE		18	18	18	18	h	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale(*) - Tabella 26j		
	Interruzioni, all'interno dell'intervallo		0	0	0	0	h	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale(*) - Tabella 26j		
	Giorni settimanali		5	5	5	5	d	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale(*) - Tabella 26j		
	Ore giornaliere		10	10	10	10	h	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale(*) - Tabella 26j		
	Ore all'anno		2607	2607	2607	2607	h	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale(*) - Tabella 26j		
Occupanti	Numero di persone per tipologia di ambiente		0,12	(1*numero locali)/A _{tot}	0	(0,5*numero locali)/A _{tot}	Persone/m ²	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale(*) - Tabella A.19	Per bagni e corridoi si considera il medesimo valore di occupazione degli uffici	
	Profilo orario di occupazione							UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale(*) - Tabella 26j	Il profilo di occupazione è riportato nel foglio "Profilo di occupazione"	
Apporti termici interni	Occupanti - apporti per persona (totale)		118	118	118	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	41	41	41	W	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale(*) - Tabella A.20		
	Occupanti - apporti per persona (quota sensibile, radiativa)		39	39	39	39	W	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale(*) - Tabella A.20		
	Occupanti - apporti per persona (quota latente)		38	38	38	38	W	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale(*) - Tabella A.20		
	Occupanti - produzione di vapore per persona	$G_{w,v,oc} = (Q_{1,3}/h_{vap}) \times 3600$		54,7	54,7	54,7	54,7	g/h	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale(*) - Equazione A.8 e Tabella A.20	
	Apparecchiature e illuminazione - apporti interni quota sensibile			27,0	27,0	12,0	12,0	W/m ²	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale(*) - Tabella A.21	Modulato secondo il profilo di occupazione. Per corridoi e bagni si è considerata la sola illuminazione.
	Apparecchiature - produzione di vapore	$G_{w,v,eq} = 1/A_{cl} \cdot (\sum G_{w,v,eq,i})$		4,1	6,2	0,0	0,0	g/(h m ²)	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale(*) - Equazione A.7 e tabella A.22	Modulato secondo il numero di apparecchi presenti. A _{cl} = superficie di pavimento climatizzata [m ²]
Ventilazione	Portata di ventilazione minima per la qualità dell'aria	$q_{tot} = n \cdot q_p + A_{cl} \cdot q_a$ (Per tutti gli ambienti, esclusi i bagni)	$q_p = 7 \text{ l/(s pers)}$ $q_a = 0,6 \text{ l/(s m}^2\text{)}$	$q_b = 7,5 \text{ l/(s pers)}$ $q_b = 0,4 \text{ l/(s m}^2\text{)}$	$q_c = 7 \text{ l/(s pers)}$ $q_c = 0,7 \text{ l/(s m}^2\text{)}$	4	l/s	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale(*) - Tabelle A.6 e A.7b	Categoria II dell'ambiente interno. Segue il profilo di occupazione.	
Condizioni termo-igrometriche di set-point	T _{op,min} - riscaldamento		20	20	16	20	°C	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale(*) - Tabella A.2	Categoria II dell'ambiente interno	
	T _{op,max} - raffrescamento		26	26	25	26	°C	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale(*) - Tabella A.2	Categoria II dell'ambiente interno	
	T _{op,min} in regime di attenuazione		16	16	16	16	°C	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale(*) - Tabella 26j		
	T _{op,max} in regime di attenuazione		32	32	32	32	°C	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale(*) - Tabella 26j		
	Umidità relativa minima		40	40	40	40	%	UNI EN 16798-1 Appendice Nazionale(*) - Tabella A.13	Categoria II dell'ambiente interno	
	Umidità relativa massima		60	60	60	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)		13	13	13	13	h/d		Attenuazione nel periodo di non occupazione dell'ufficio
		Riscaldamento - Roma (zona D)		13	13	13	13	h/d		Attenuazione nel periodo di non occupazione dell'ufficio
		Riscaldamento - Palermo (zona B)		13	13	13	13	h/d		Attenuazione nel periodo di non occupazione dell'ufficio
		Raffrescamento (tutte le zone climatiche)		11	11	11	11	h/d		Attenuazione nel periodo di non occupazione dell'ufficio
	STANDARD	Riscaldamento (tutte le zone climatiche)		24	24	24	24	h/d	Standard energy rating (UNI/TS 11300-1)	Regime di funzionamento continuo
		Raffrescamento (tutte le zone climatiche)		24	24	24	24	h/d	Standard energy rating (UNI/TS 11300-1)	Regime di funzionamento continuo

Tabella 12. Profilo di occupazione dell'edificio uso uffici (*short working week*) (fonte: UNI EN 16798-1, Appendice Nazionale, bozza del dicembre 2019 [27,28]).

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

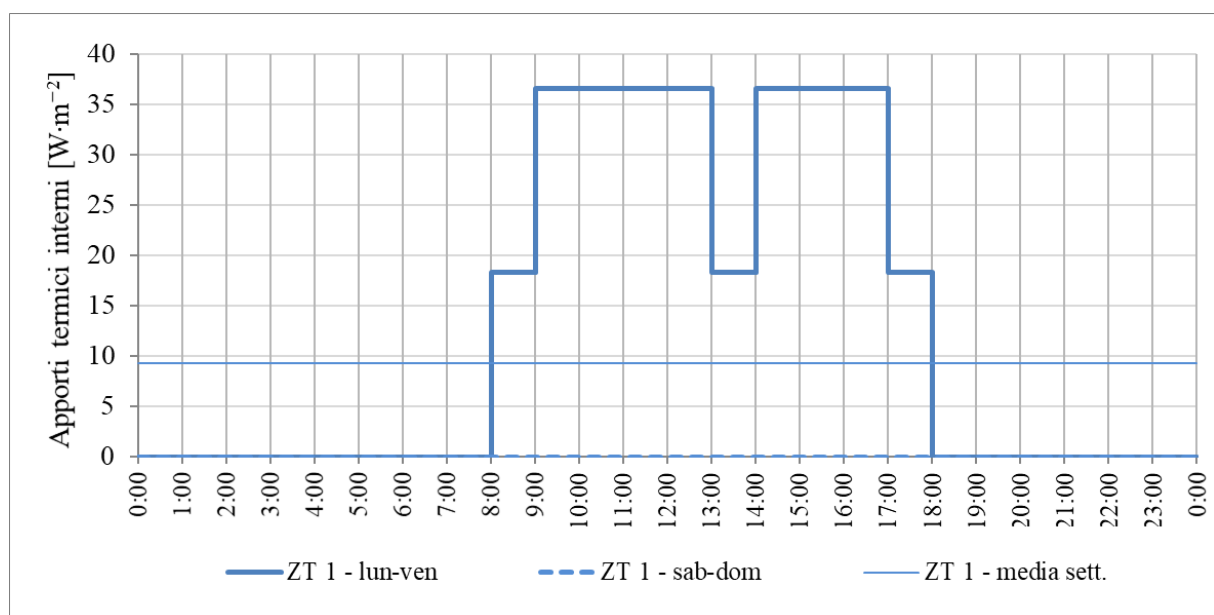


Figura 40. Profilo orario degli apporti interni di calore (quota sensibile) dovuti a occupanti, apparecchiature e illuminazione. Esempio per la zona termica 1.

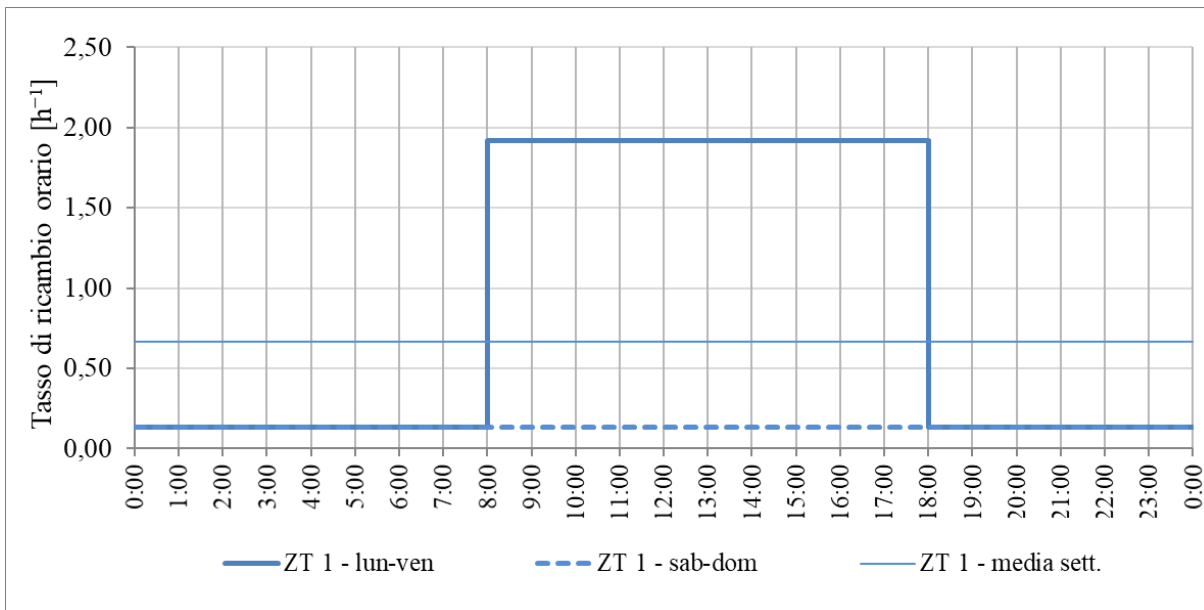


Figura 41. Profilo orario del tasso di ricambio d’aria (ventilazione naturale). Esempio per la zona termica 1.

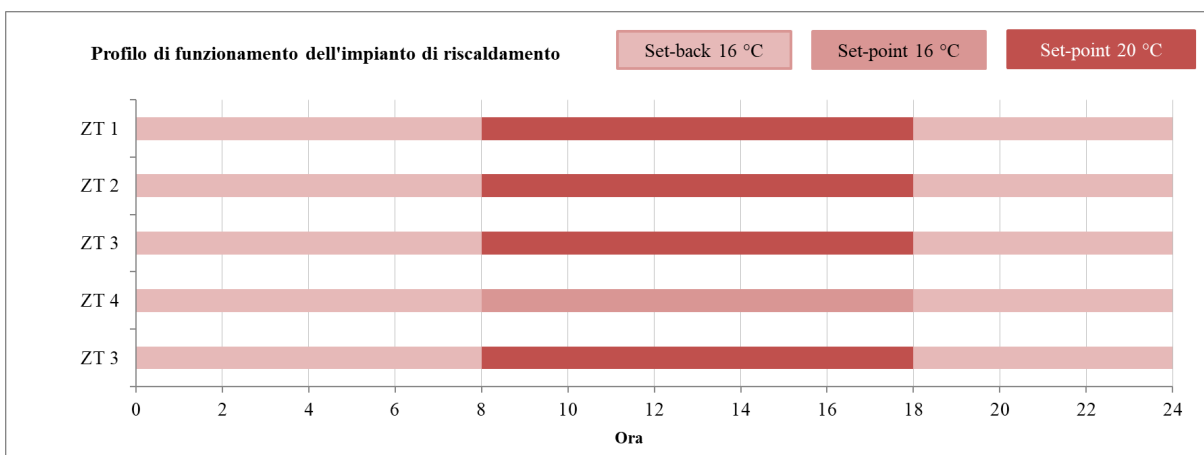


Figura 42. Profilo orario di funzionamento dell’impianto di climatizzazione invernale per le tre zone climatiche.

5.2.5 Sistemi impiantistici

Sono previste due soluzioni di generazione:

- una prima impiega una caldaia a condensazione ed un gruppo frigorifero rispettivamente per la climatizzazione invernale ed estiva;
- una seconda sfrutta invece una pompa di calore reversibile utilizzata sia nella stagione di riscaldamento che in quella di raffrescamento.

Un riepilogo dei sistemi impiantistici considerati è presente nella Tabella 13.

Nella Tabella 14 sono presentati i sistemi di emissione, regolazione e distribuzione considerati; i coefficienti di utilizzazione impiegati sono i valori riferiti all’edificio di riferimento, come presentati nel Decreto interministeriale 26 giugno 2015 (DM requisiti minimi).

La definizione delle specifiche macchine per la generazione di calore è stata fatta a partire dall’analisi delle potenze di picco per le due valutazioni di funzionamento dell’impianto nelle stagioni di riscaldamento e

raffrescamento delle tre località considerate. Nella Tabella 16 sono indicate le macchine scelte per ogni località; al fine di impiegare nei calcoli valori realistici si è proceduto considerando dei prodotti commerciali esistenti le cui proprietà sono presentate nella Figura 43 e Figura 44.

Tabella 13. Sistemi impiantistici considerati

Sistema impiantistico	Soluzione
Climatizzazione	Specificato in Tabella 14 e Tabella 15
Produzione ACS	Non considerata
Ventilazione meccanica	Non presente
Illuminazione	Lampade a fluorescenza
Trasporto persone	Non considerato

Tabella 14. Sottosistemi di emissione, regolazione e distribuzione dell'impianto di climatizzazione

Sottosistema	Descrizione	Procedura di calcolo
Emissione	Ventilconvettori	Efficienza dei sottosistemi di utilizzazione (DM requisiti minimi) $\eta_{H,u} = 0,81$ $\eta_{C,u} = 0,81$
Regolazione	Per singolo ambiente + climatica	
Distribuzione	Distribuzione a partire dal locale tecnico con colonne montanti nei vani scale	

Tabella 15. Caratteristiche dei sottosistemi di generazione

Periodo di climatizzazione	Soluzione adottata	
	Soluzione 1	Soluzione 2
Climatizzazione invernale	Caldaia a condensazione	Pompa di calore invertibile aria-acqua
Climatizzazione estiva	Gruppo frigorifero aria-acqua	

Tabella 16. Definizione delle macchine impiegate e delle potenze nominali corrispondenti

Sistema	Località		
	Milano	Roma	Palermo
Pompa di calore	AERMEC - NRB 3600 HA $P_{n,H} = 1000 \text{ kW}$ $P_{n,C} = 971 \text{ kW}$	AERMEC - NRB 3600 HA $P_{n,H} = 1000 \text{ kW}$ $P_{n,C} = 971 \text{ kW}$	AERMEC - NRB 3600 HA $P_{n,H} = 1000 \text{ kW}$ $P_{n,C} = 971 \text{ kW}$
	Gruppo frigorifero	AERMEC - NRB 3600 HA $P_n = 971 \text{ kW}$	AERMEC - NRB 3600 HA $P_n = 971 \text{ kW}$
Caldaia	Viessmann – VITOCROSSAL 300 (CR3) $P_n = 720 \text{ kW}$	Viessmann – VITOCROSSAL 300 (CT3) $P_n = 560 \text{ kW}$	Viessmann – VITOCROSSAL 300 (CT3) $P_n = 460 \text{ kW}$

NRB - HA

Size		0800	0900	1000	1100	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200	3400	3600	
Cooling performance 12 °C / 7 °C (1)																			
Cooling capacity	kW	206,2	243,8	266,9	297,0	329,2	385,5	425,3	488,4	538,3	601,4	651,3	708,6	745,3	815,1	859,0	928,0	971,4	
Input power	kW	71,8	78,2	88,1	102,2	117,2	129,2	147,2	163,7	184,8	201,3	222,3	237,4	257,9	274,4	295,7	312,0	333,6	
Cooling total input current	A	127	141	157	179	203	225	254	285	321	352	389	416	448	479	515	546	582	
EER	W/W	2,87	3,12	3,03	2,91	2,81	2,98	2,89	2,98	2,91	2,99	2,93	2,99	2,89	2,97	2,91	2,97	2,91	
Water flow rate	l/h	35459	41941	45909	51076	56618	66291	73124	83982	92547	103406	111965	121819	128140	140122	147681	159542	167008	
Pressure drops	kPa	15	21	18	22	17	23	21	27	27	34	21	25	28	28	31	35	38	
Heating performance 40 °C / 45 °C (2)																			
Heating capacity	kW	214,3	254,4	279,0	310,5	341,2	400,9	438,9	506,0	553,2	620,0	666,5	730,0	771,1	840,0	885,5	954,2	999,6	
Input power	kW	66,6	79,3	86,7	97,1	106,2	124,8	137,1	157,5	171,8	193,5	207,0	226,8	240,1	260,9	275,3	297,4	311,6	
Heating total input current	A	120	142	155	172	187	219	240	277	303	342	368	401	421	460	485	526	550	
COP	W/W	3,22	3,21	3,22	3,20	3,21	3,21	3,20	3,21	3,22	3,20	3,22	3,22	3,21	3,22	3,22	3,21	3,21	
Water flow rate	l/h	37203	44147	48435	53908	59225	69618	76225	87876	96075	107669	115771	126793	133932	145897	153804	165737	173612	
Pressure drops	kPa	16	23	20	24	18	25	22	29	29	36	22	26	30	30	33	37	41	

(1) Data 14511:2018; System side water heat exchanger 12 °C/7 °C; External air 35 °C
 (2) Data 14511:2018; System side water heat exchanger 40 °C/ 45 °C; Outside air 7 °C d.b. / 6 °C w.b.

Figura 43. Dati della pompa di calore/gruppo frigorifero

Caldaia	tipo	VITOCROSSAL 300 (CT3)						VITOCROSSAL 300 (CR3)	
		Matrix a metano oppure aria soffiata a gas							
Brucciato	tipo	Matrix a metano oppure aria soffiata a gas							
Omologazione CE	n°	CE-0085AQ0257						CE-0085AU0315	
Portata termica focolare max.	kW	177	234,5	297	385,5	479	580	742	923
Potenzialità utile (Pn) con Tm/Tr 80/60°C	kW	170	225	285	370	460	560	720	895
Potenzialità utile (Pn) con Tm/Tr 50/30°C	kW	187	248	314	408	508	615	787	978
Perdite al camino a Pn con Tm/Tr 80/60 °C	%	1,8	2,1	1,9	2,2	2,1	2,1	2,0	2,0
Perdite al mantello (in aria calma, T.amb.20°C, T.cald.70°C)	%	0,4	0,3	0,3	0,3	0,28	0,25	0,25	0,25
Rendimento utile a Pn (DL 311/96)	%	97,8	97,9	98,1	98,2	98,2	98,2	98,3	98,3
Rendimento utile a 0,3Pn (Dir.92/42/CE e DPR 412/93)	%	107,5	108,2	108,2	108	108,2	108,2	108,3	108,5
Rendimento utile a Pn con Tm/Tr 50/30°C	%	105,9	105,8	105,9	105,8	106,2	106,1	106,1	106,0

Figura 44. Dati della caldaia

5.3 Risultati delle simulazioni

I risultati delle simulazioni sono riportati come segue:

- Fabbisogni di energia termica utile per la climatizzazione ottenuti con la norma UNI EN ISO 52016-1 (par. 5.3.1)
- Fabbisogni di energia termica utile per la climatizzazione ottenuti con l'appendice italiana della norma UNI EN ISO 52016-1 (par. 5.3.2)
- Fabbisogni di energia erogata e primaria per la climatizzazione (par. 5.3.2)
- Analisi dei valori medi di efficienza dei generatori (par. 5.3.4)
- Analisi dei costi energetici relativi alla climatizzazione (par. 5.3.5)
- Fabbisogni di energia per illuminazione (par. 5.3.6)

5.3.1 Fabbisogno di energia termica utile per la climatizzazione

Si riportano di seguito i risultati delle simulazioni condotte con il metodo orario della UNI EN ISO 52016-1 per gli edifici siti a Milano, Roma e Palermo, per ciascuna delle due valutazioni energetiche considerate, con funzionamento continuo ed intermittente.

Il fabbisogno annuo di energia termica utile per il riscaldamento e per il raffrescamento, normalizzato rispetto alla superficie di pavimento climatizzata, è riportato rispettivamente in Tabella 17 e in Tabella 18. I risultati sono coerenti con le caratteristiche dell'edificio. Infatti, l'assenza di isolamento termico nell'involucro edilizio determina un cospicuo fabbisogno di riscaldamento; la modesta capacità termica, d'altro canto, determina una mediocre prestazione estiva.

Da Figura 45 a Figura 47 è riportato il confronto tra il regime intermittente e il regime continuo dei fabbisogni termici di riscaldamento e raffrescamento su base mensile per l'intero edificio per ciascuna delle tre località. La valutazione energetica con funzionamento intermittente mostra fabbisogni di energia inferiori al regime continuo, con valori compresi tra il -20% e il -35 per il riscaldamento e il -10% per il raffrescamento.

Da Figura 48 a Figura 53 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 maggio e una settimana di settembre.

Dall'analisi di tali grafici è possibile notare come l'inerzia dell'edificio non influenzi particolarmente l'andamento della temperatura interna, che risulta seguire il profilo di temperatura dell'aria esterna. I notevoli apporti interni e gli apporti solari, specialmente per la zona 3, influenzano i profili evidenziando fenomeni di surriscaldamento degli ambienti

Si presentano, infine, da Figura 54 a Figura 56 per ciascuna località e per la zona termica 2 (ritenuta rappresentativa), i profili orari dei carichi di riscaldamento per una settimana di 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 17. Fabbisogno annuo di energia termica utile per il riscaldamento normalizzato sulla superficie di pavimento climatizzata [kWh/m²].

	Milano		Roma		Palermo	
	Regime continuo	Regime intermittente	Regime continuo	Regime intermittente	Regime continuo	Regime intermittente
Zona termica 1	107,2	84,3	52,7	36,2	24,2	14,9
Zona termica 2	70,2	54,9	36,8	25,8	15,5	9,3
Zona termica 3	44,6	34,0	10,8	7,1	2,7	1,8
Zona termica 4	30,6	32,2	12,1	14,8	3,4	3,8
Zona termica 5	134,2	102,9	73,1	53,0	38,6	22,7
Totale edificio	61,5	48,6	26,2	19,0	10,7	6,7

Tabella 18. Fabbisogno annuo di energia termica utile per il raffrescamento normalizzato sulla superficie di pavimento climatizzata [kWh/m²].

	Milano	Roma	Palermo
	Regime continuo / intermittente	Regime continuo / intermittente	Regime continuo / intermittente
Zona termica 1	44,8	41,1	56,3
Zona termica 2	52,7	47,0	66,3
Zona termica 3	68,4	60,9	81,1
Zona termica 4	8,7	9,0	12,2
Zona termica 5	50,1	42,5	65,3
Totale edificio	53,5	47,7	65,5

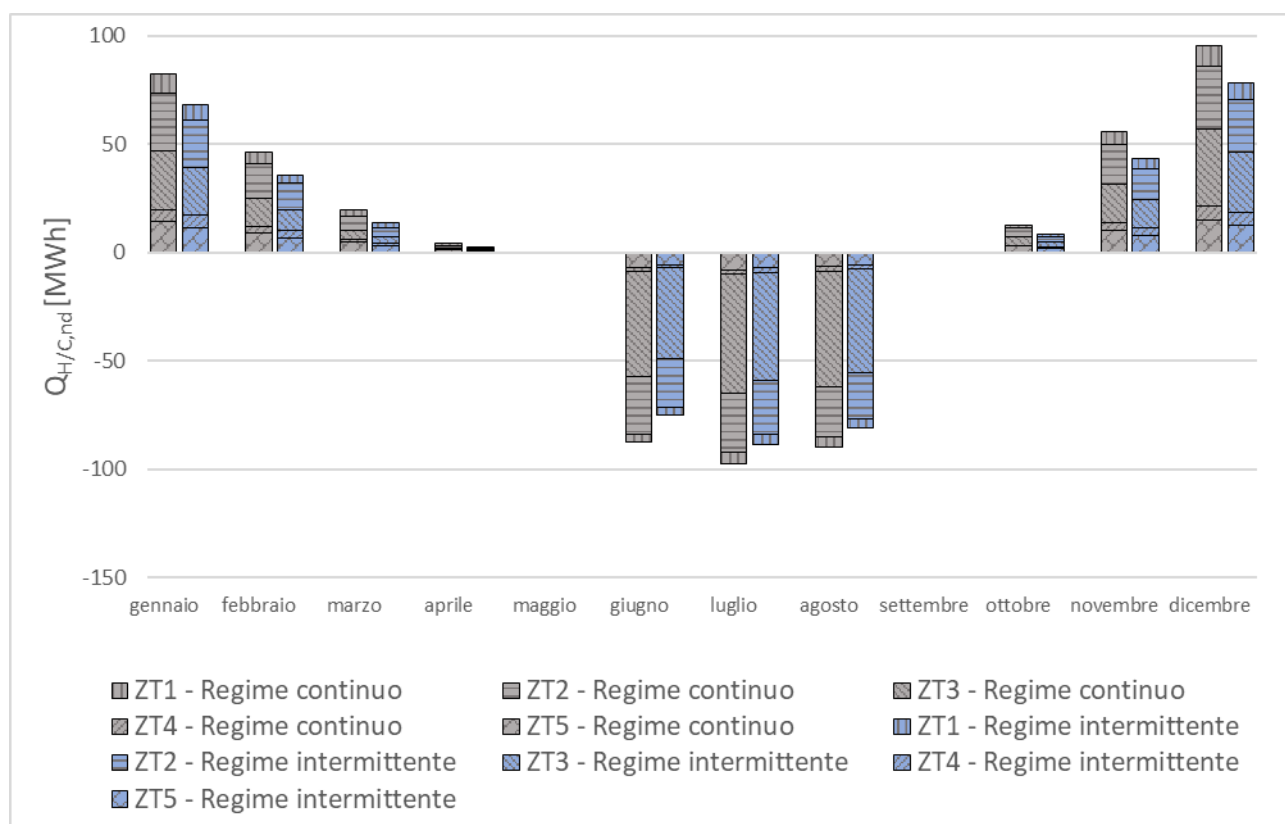


Figura 45. Fabbisogno termico utile per riscaldamento e raffrescamento – Milano.

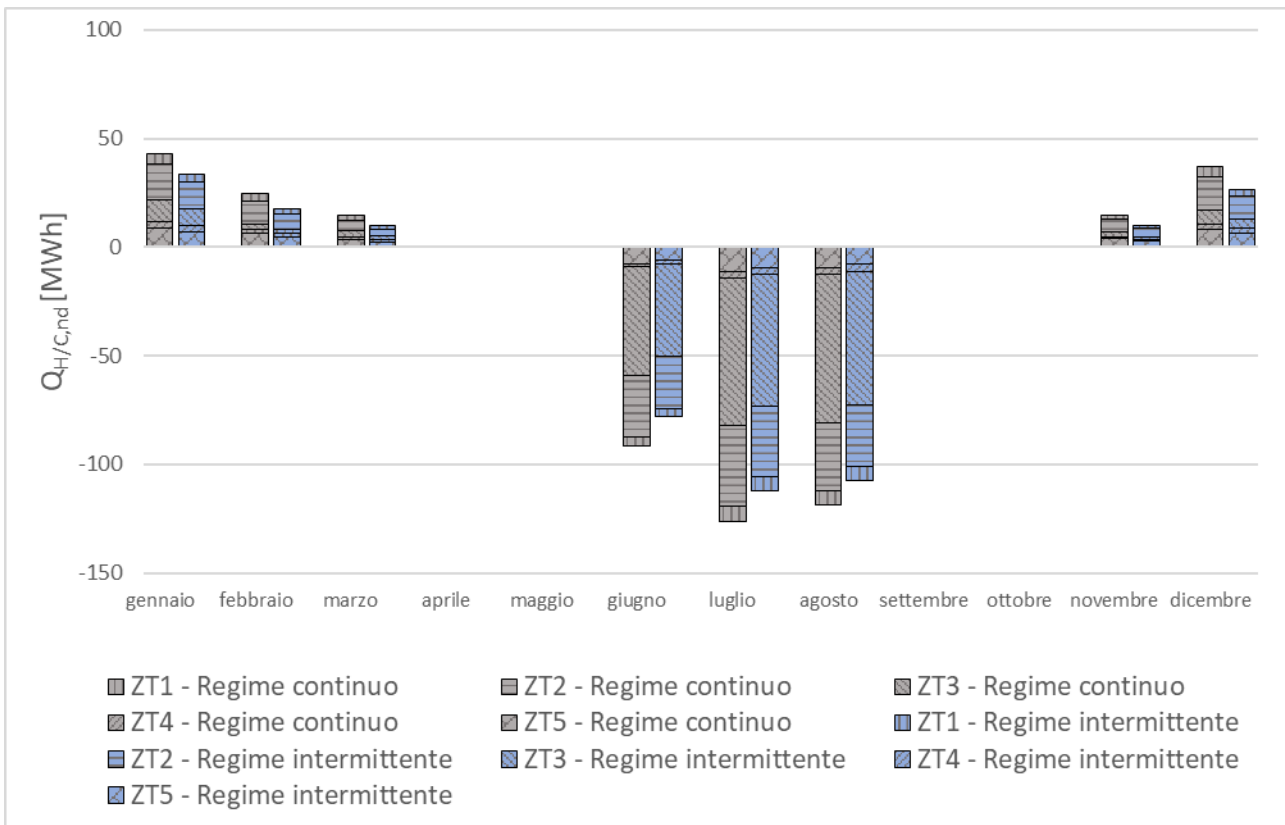


Figura 46. Fabbisogno termico utile per riscaldamento e raffrescamento – Roma.

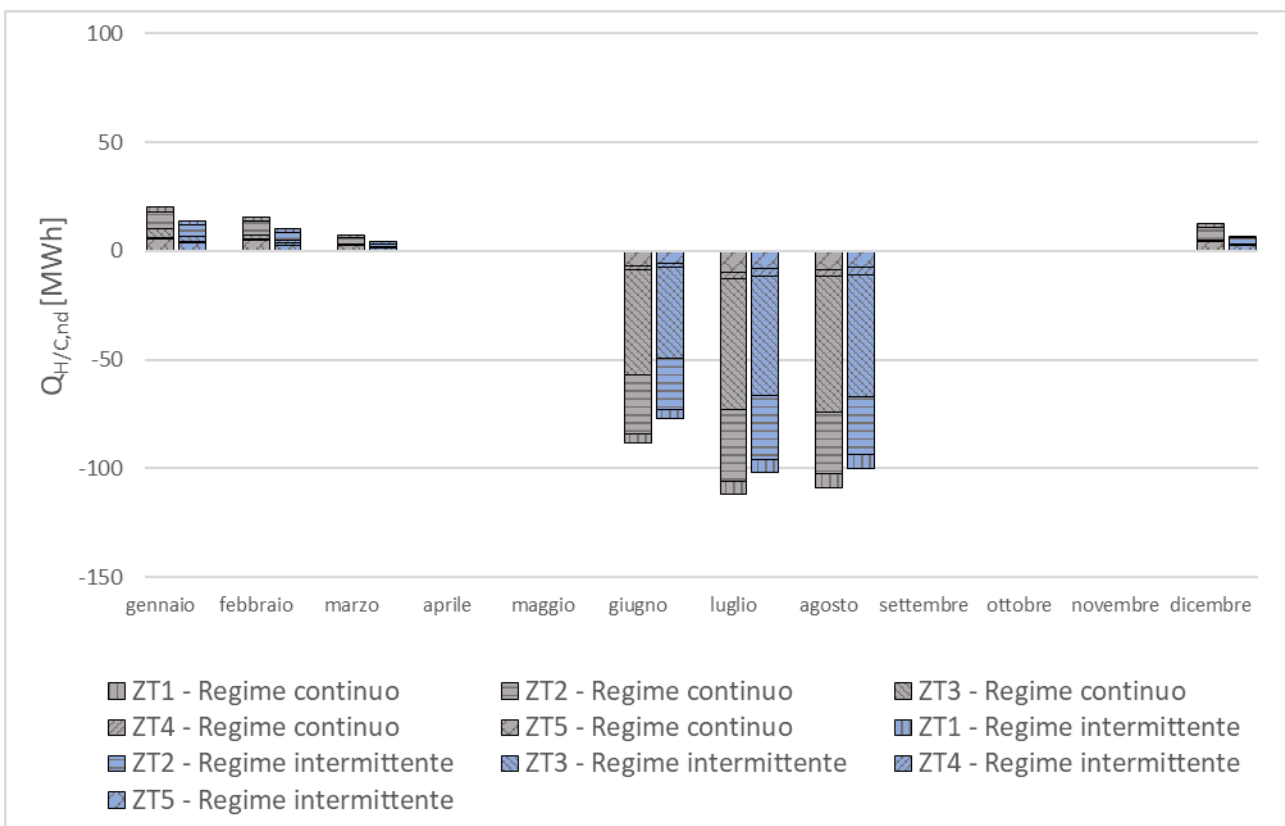


Figura 47. Fabbisogno termico utile per riscaldamento e raffrescamento – Palermo.

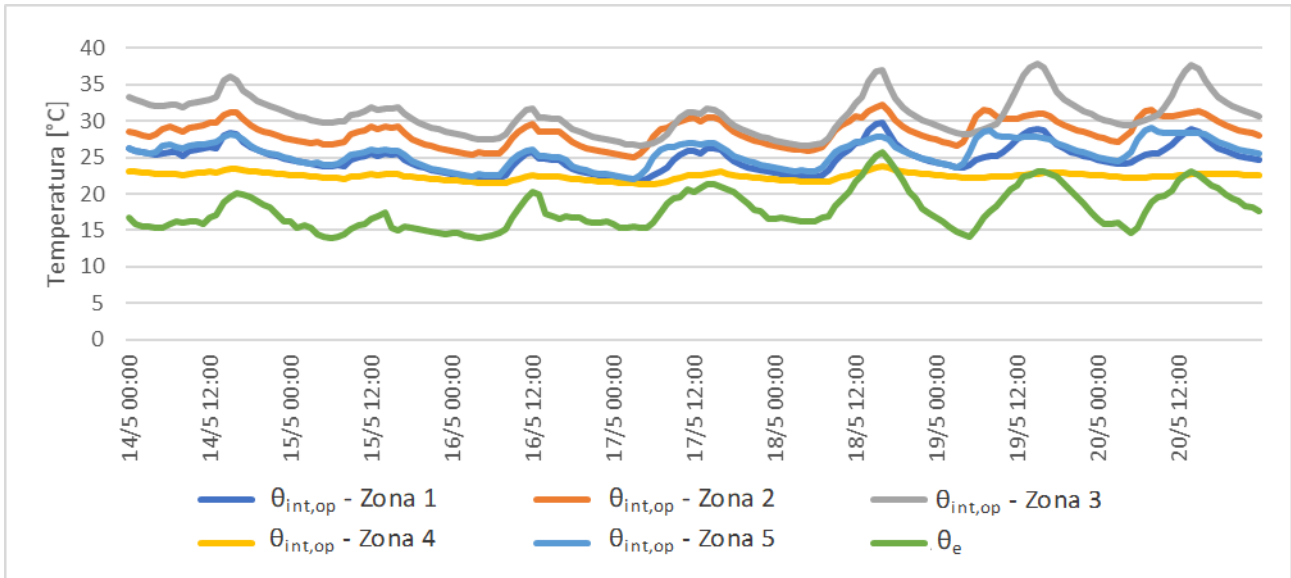


Figura 48. Temperatura operativa interna in una settimana di maggio – Milano.

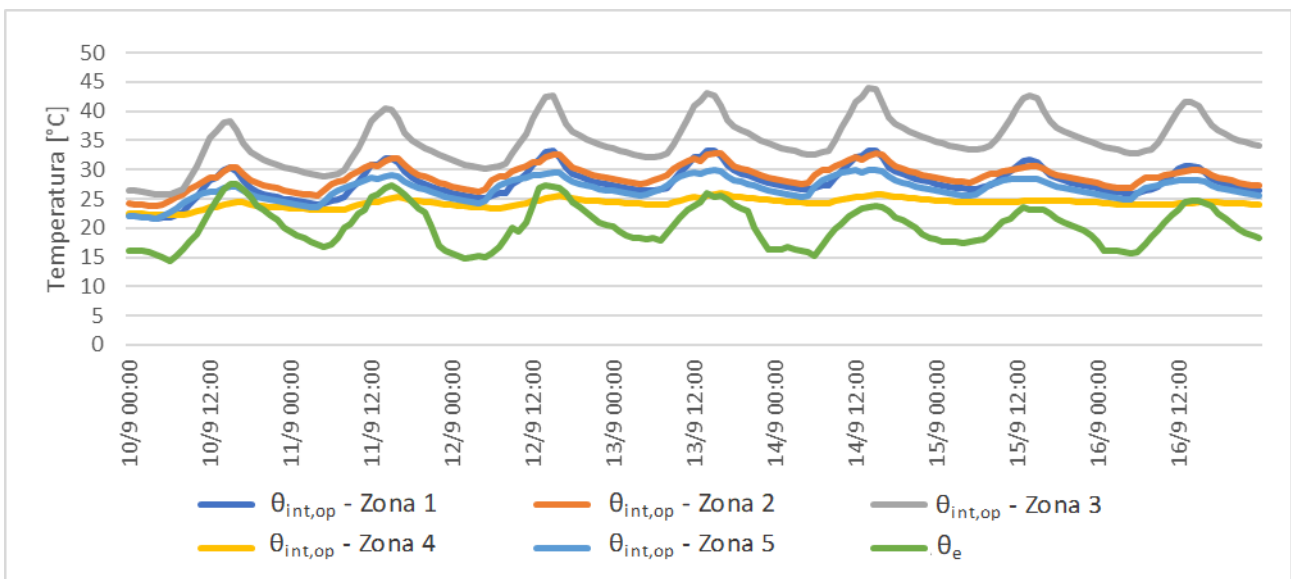


Figura 49. Temperatura operativa interna in una settimana di settembre – Milano.

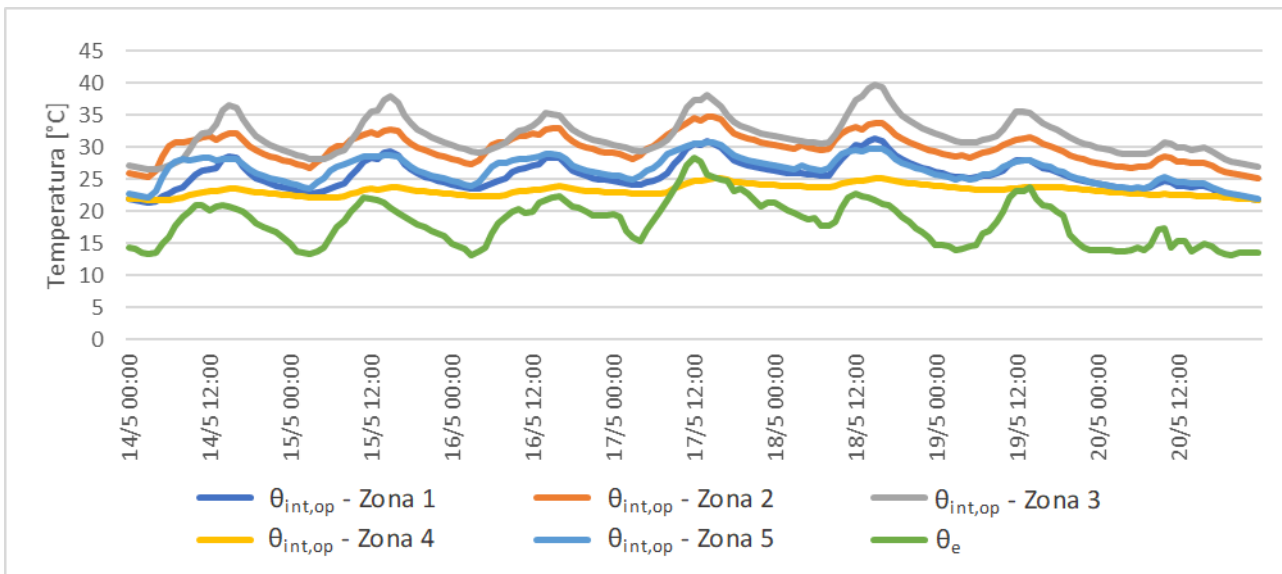


Figura 50. Temperatura operativa interna in una settimana di maggio – Roma.

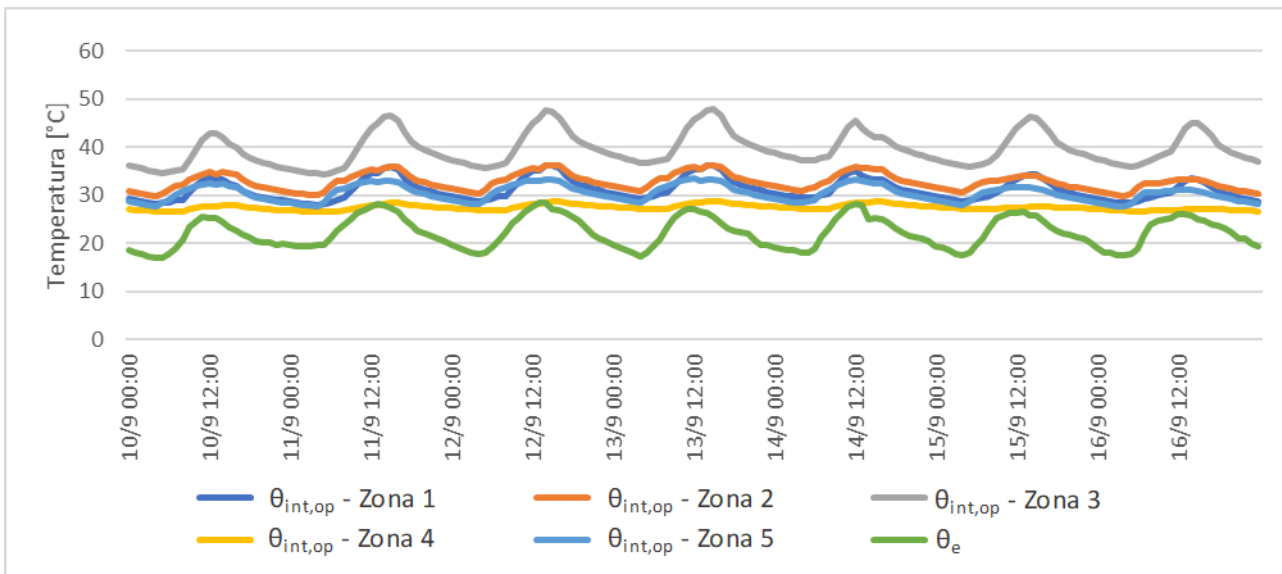


Figura 51. Temperatura operativa interna in una settimana di settembre – Roma.

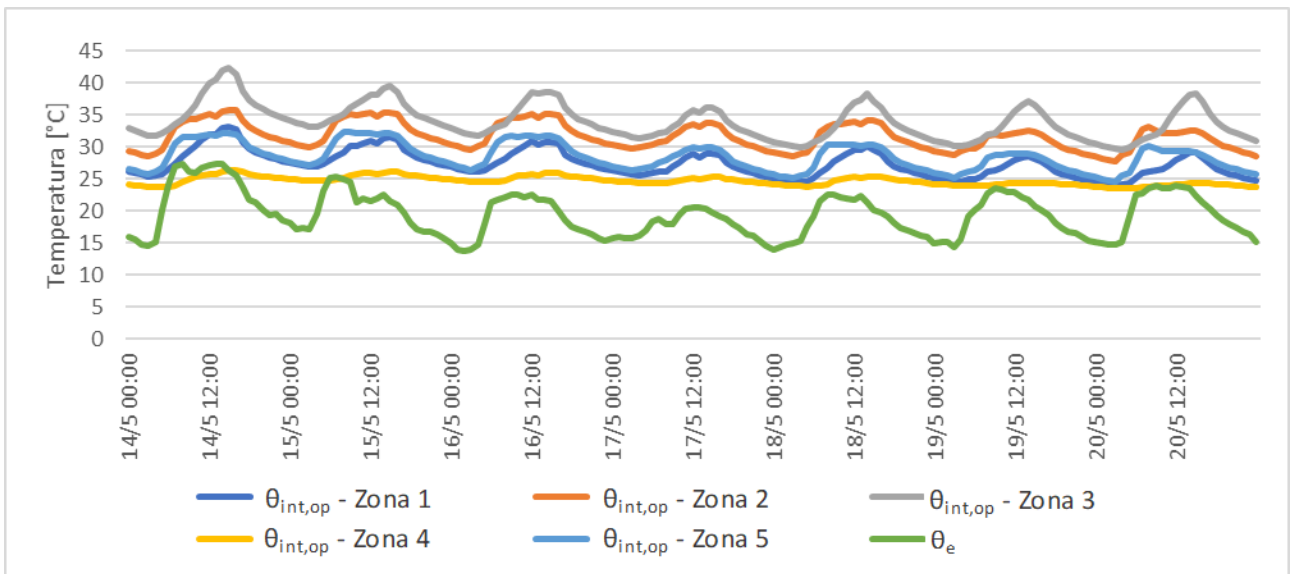


Figura 52. Temperatura operativa interna in una settimana di maggio – Palermo.

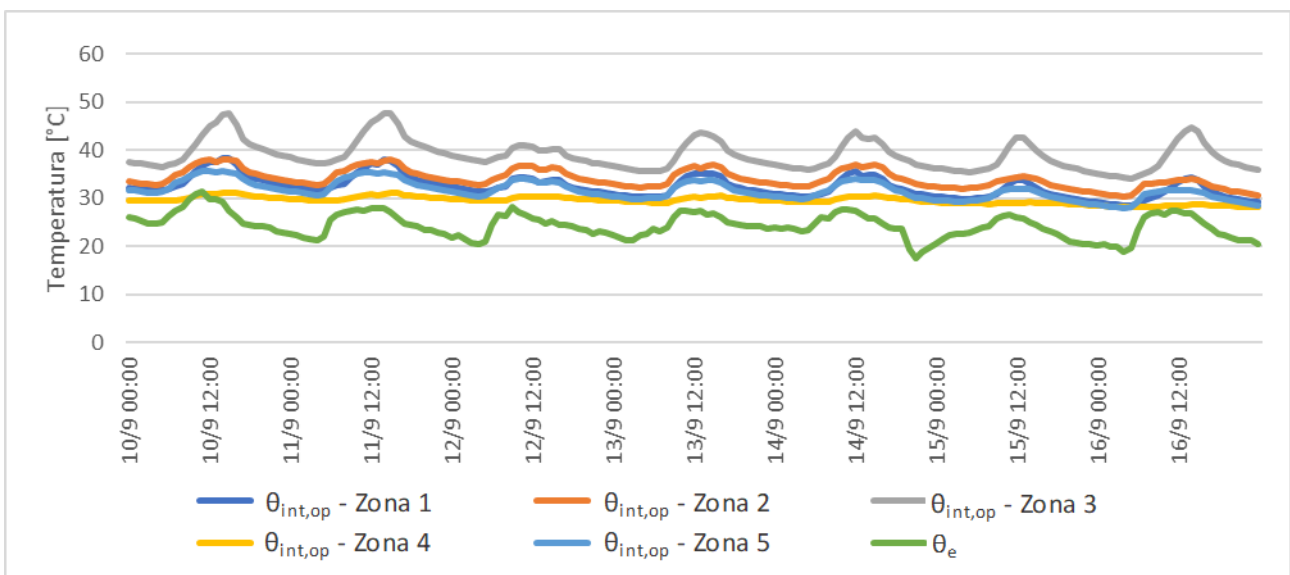


Figura 53. Temperatura operativa interna in una settimana di settembre – Palermo.

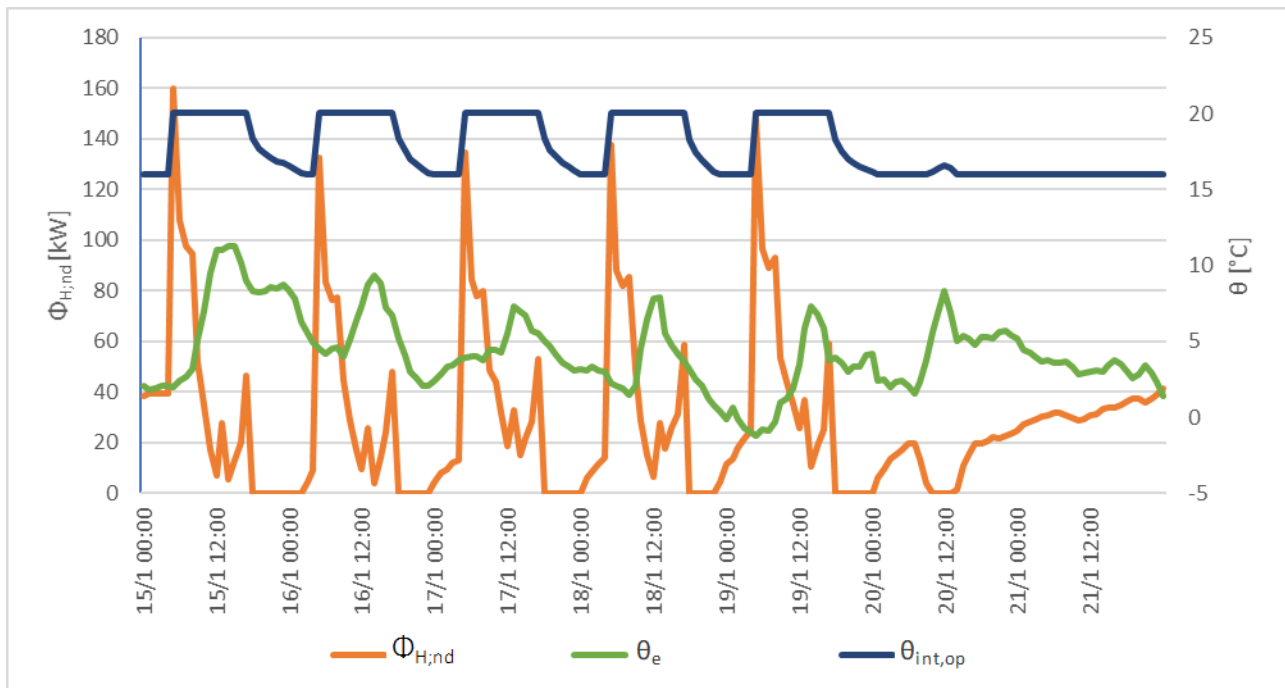


Figura 54. Profilo orario del carico termico in una settimana di gennaio per la zona termica 2 – Milano (intermittente).

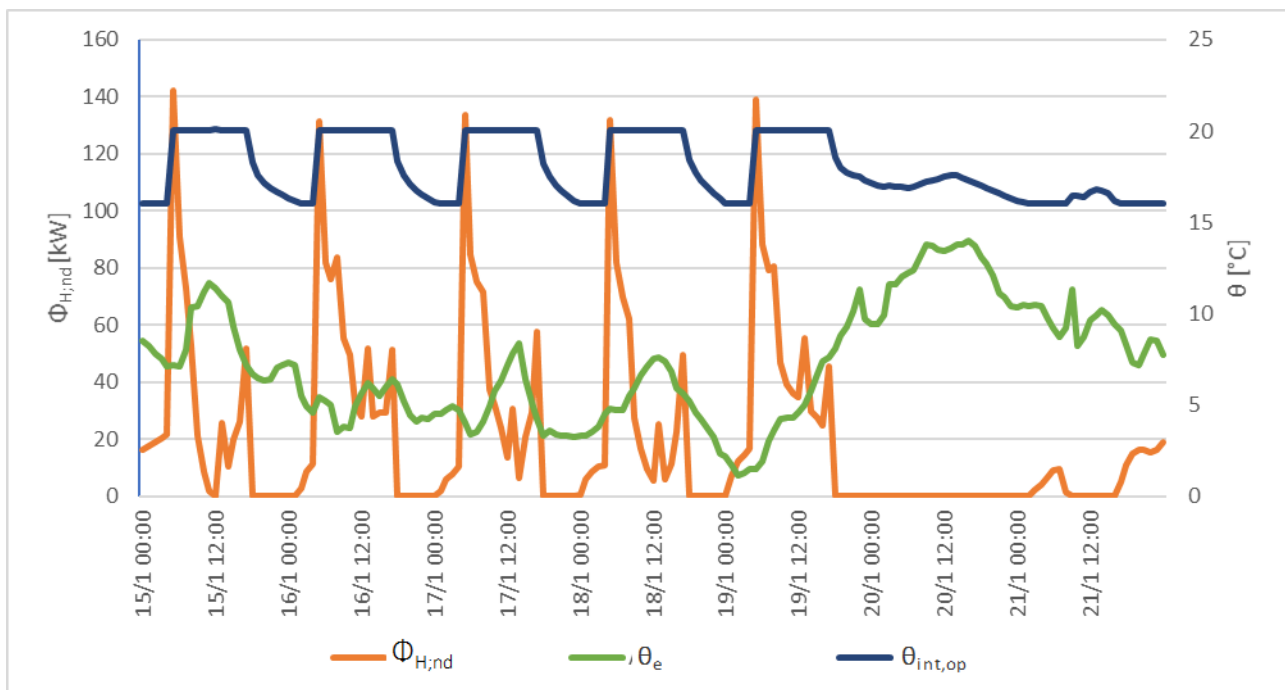


Figura 55. Profilo orario del carico termico in una settimana di gennaio per la zona termica 2 – Roma (intermittente).

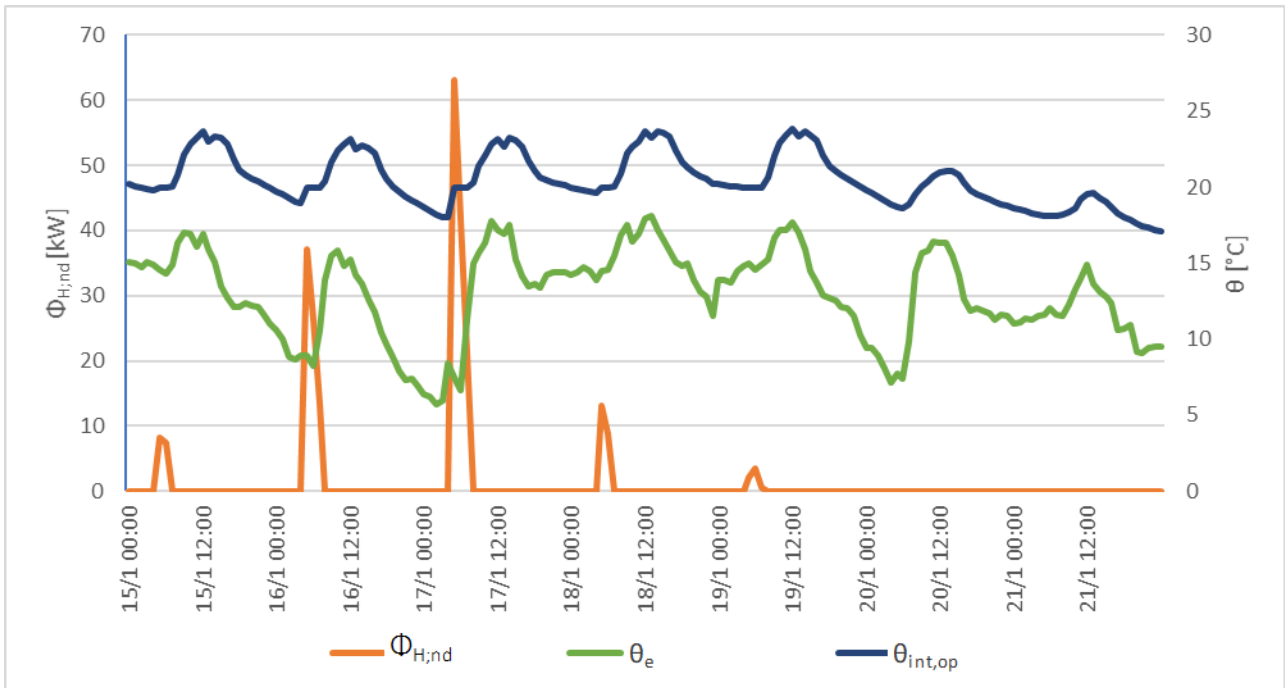


Figura 56. Profilo orario del carico termico in una settimana di gennaio per la zona termica 2 – Palermo.

5.3.2 Applicazione dell'appendice italiana della UNI EN ISO 52016-1

Si riportano di seguito da Figura 60 ai risultati di fabbisogno di energia termica utile per l'edificio sito a Milano, nei regimi continuo e intermittente dell'impianto, applicando le ipotesi presenti nell'appendice nazionale alla norma; tali risultati mettono in evidenza oltre al confronto tra i dati già presentati ed i risultati ottenuti con le ipotesi dell'appendice nazionale, l'influenza sul bilancio mensile delle tre principali ipotesi di calcolo implementate dall'appendice e applicate singolarmente. Queste risultano essere: la variazione del metodo per la conversione delle proprietà dei componenti edilizi secondo il modello R-C, la variazione del calcolo della temperatura del cielo e la variazione del calcolo del coefficiente correttivo del fattore di trasmissione solare dei componenti finestrati; con riferimento agli istogrammi seguenti sono indicate rispettivamente come modello di conduzione, temperatura della volta e fattore di esposizione.

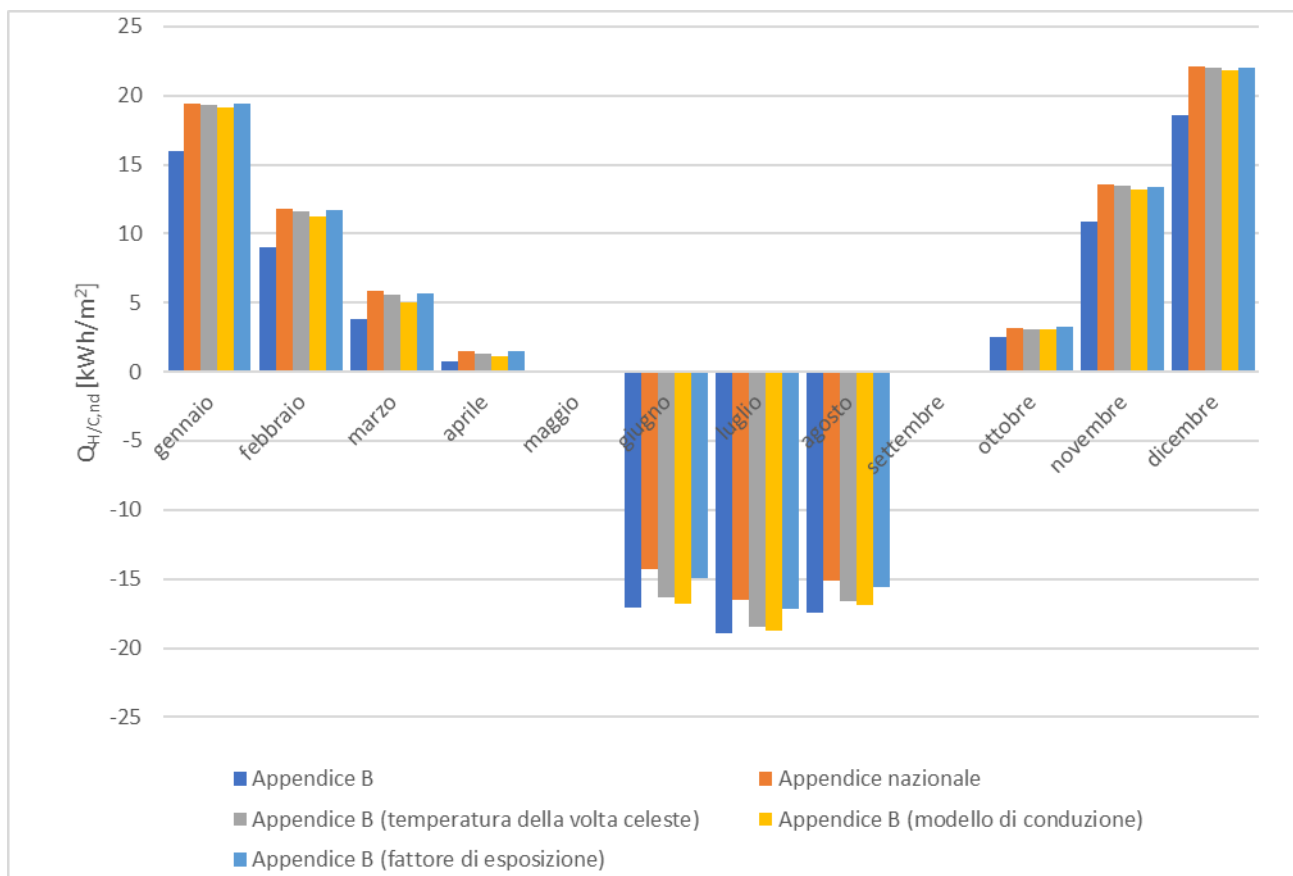


Figura 57. Confronto del fabbisogno termico utile per riscaldamento e raffrescamento nelle ipotesi dell'appendice nazionale della UNI EN ISO 52016-1– Milano (regime continuo).

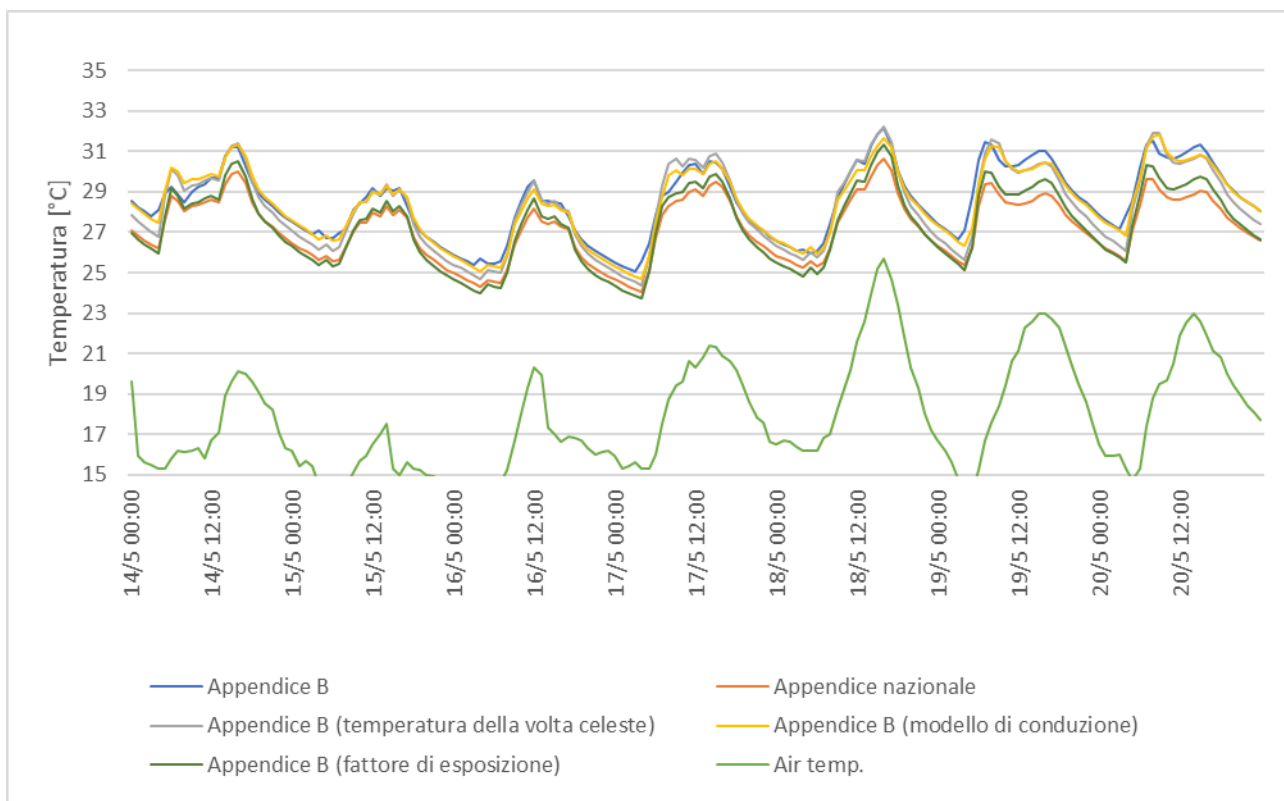


Figura 58. Temperatura operativa interna in una settimana di maggio nelle ipotesi dell'appendice nazionale della UNI EN ISO 52016-1– Milano (regime continuo).

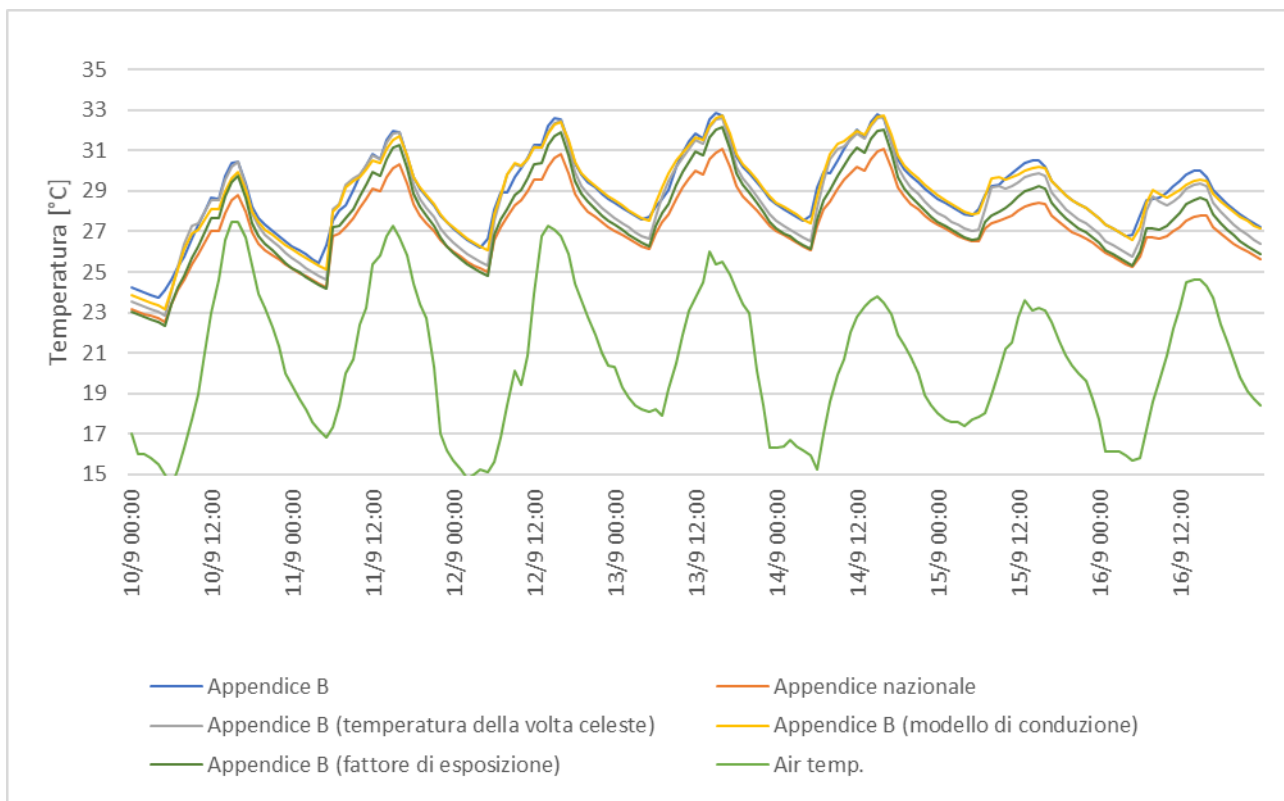


Figura 59. Temperatura operativa interna in una settimana di settembre nelle ipotesi dell'appendice nazionale della UNI EN ISO 52016-1– Milano (regime continuo).

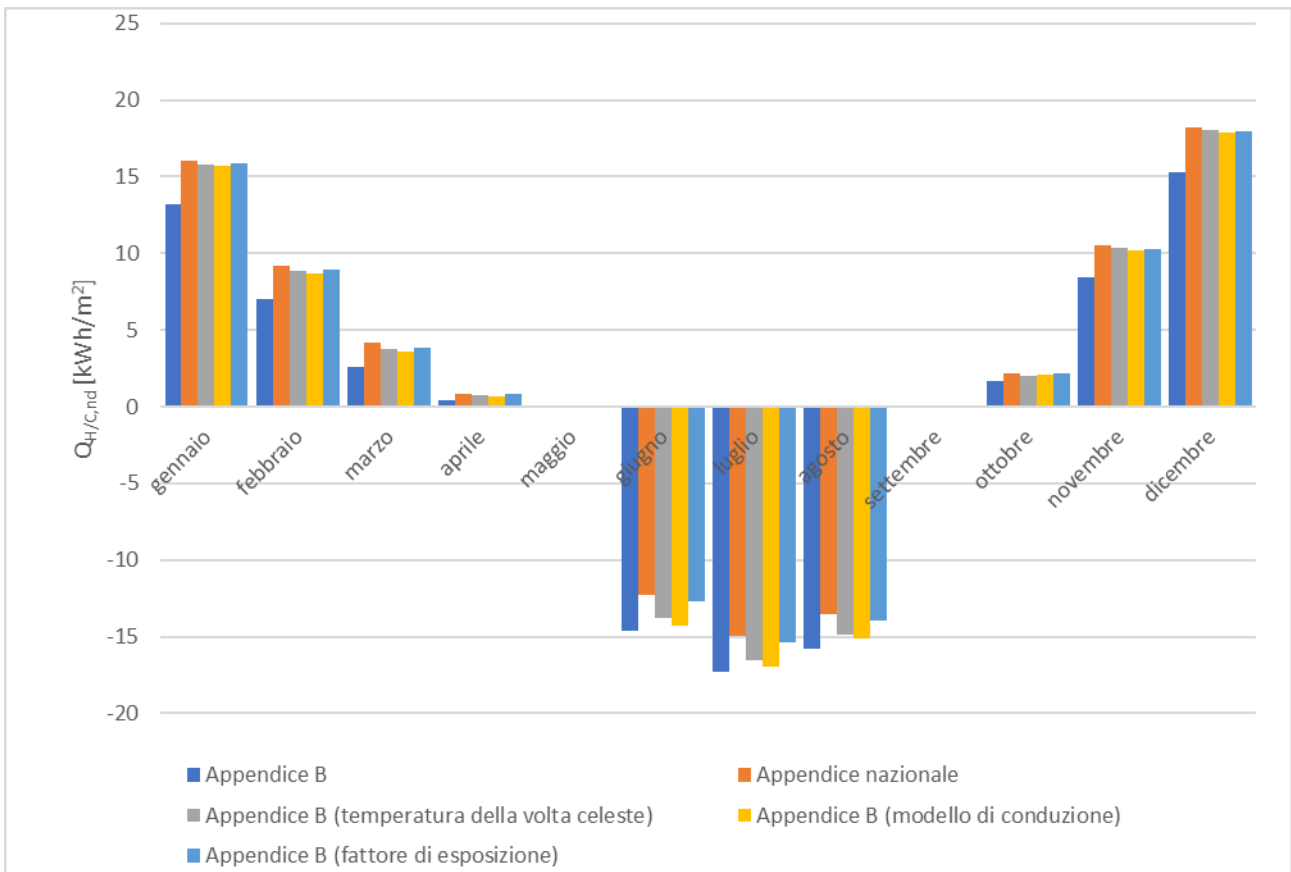


Figura 60. Confronto del fabbisogno termico utile per riscaldamento e raffrescamento nelle ipotesi dell'appendice nazionale della UNI EN ISO 52016-1– Milano (regime intermittente).

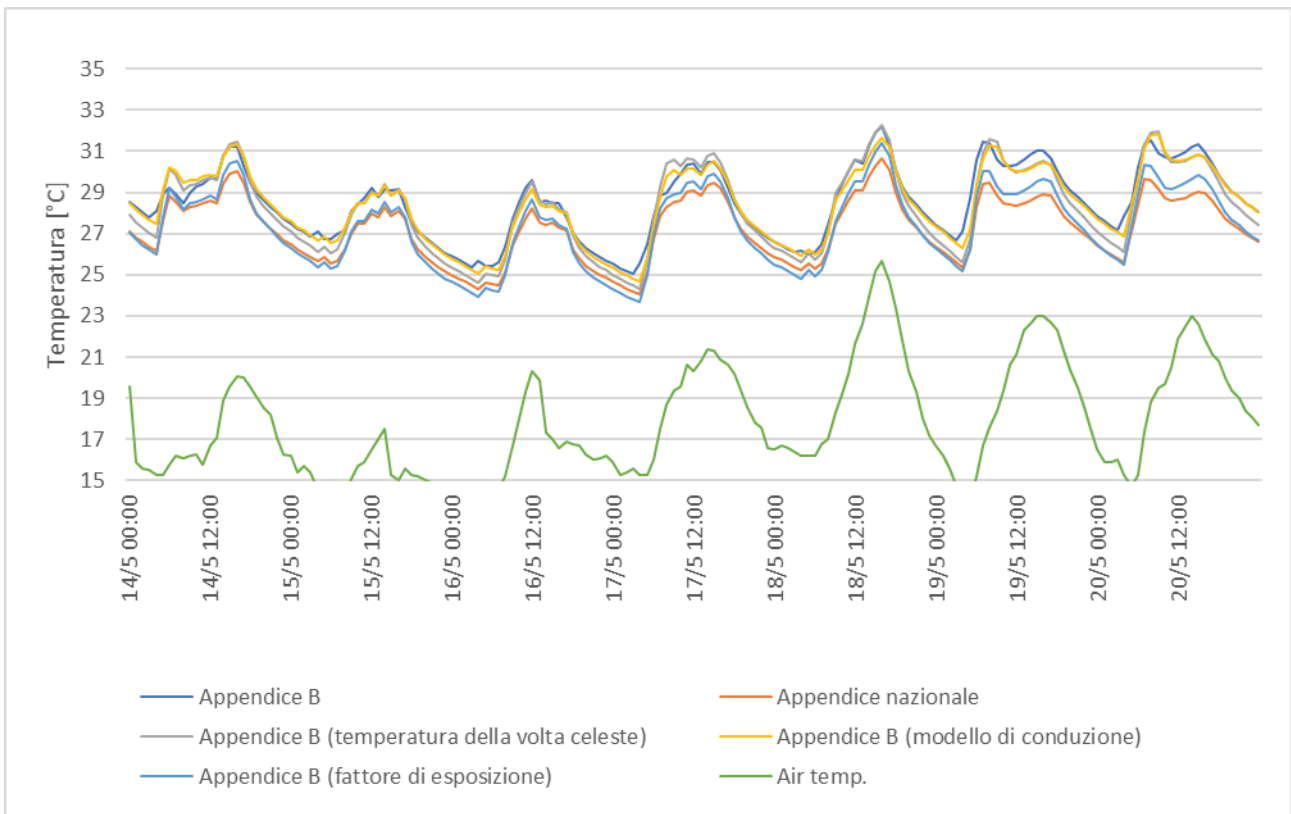


Figura 61. Temperatura operativa interna in una settimana di maggio nelle ipotesi dell'appendice nazionale della UNI EN ISO 52016-1– Milano (regime intermittente).

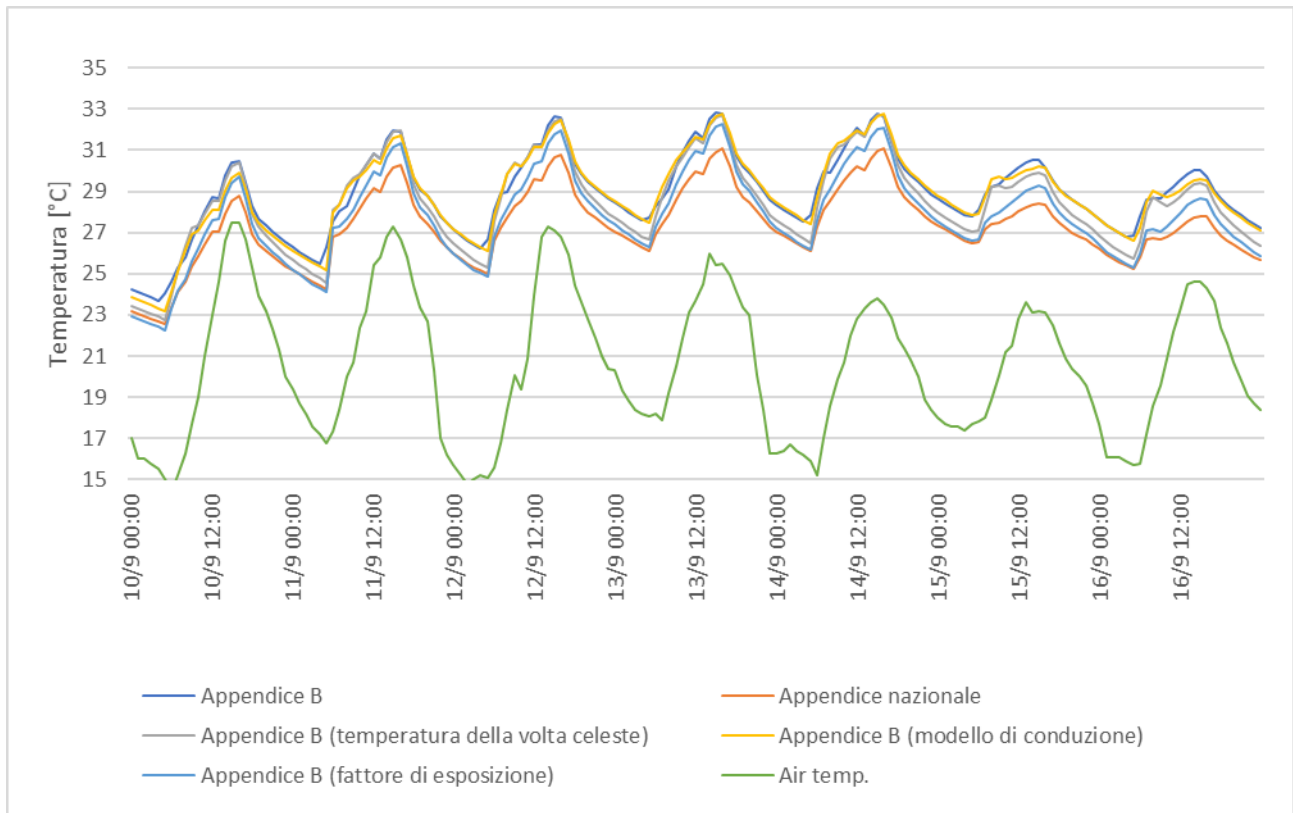


Figura 62. Temperatura operativa interna in una settimana di settembre nelle ipotesi dell’appendice nazionale della UNI EN ISO 52016-1– Milano (regime intermittente).

5.3.3 Fabbisogni di energia erogata e primaria per la climatizzazione

Si riportano di seguito i fabbisogni di energia erogata e primaria per l’edificio sito a Milano, Roma e Palermo, per ciascuna delle due valutazioni energetiche considerate, con funzionamento continuo ed intermittente.

Da Figura 63 a Figura 74 sono riportati i risultati riferiti alle tre località, nelle valutazioni con funzionamento continuo ed intermittente per le due soluzioni considerate; nella Figura 75 sono infine rappresentati gli aggregati annuali per i dodici casi considerati. I confronti tra i risultati delle due soluzioni analizzate, mettono in evidenza la notevole disproporzione tra l’energia *delivered* dovuta alle differenti efficienze delle macchine considerate. Analizzando poi l’energia primaria totale è possibile notare come la soluzione 2, che impiega la pompa di calore ai fini della climatizzazione estiva, richieda una minor richiesta sia di energia primaria non rinnovabile che di energia primaria rinnovabile (al netto dell’energia rinnovabile prelevata *on-site*).

Tabella 19. Legenda dei simboli (da Figura 63 a Figura 75)

Parametro	Simbolo
Fabbisogno di energia termica utile per la climatizzazione invernale	$Q_{H,nd}$
Perdite dei sottosistemi di utilizzazione (emissione, regolazione e distribuzione) per la climatizzazione invernale	$Q_{H,ls,u}$
Fabbisogno di energia termica utile per la climatizzazione estiva	$Q_{C,nd}$
Perdite dei sottosistemi di utilizzazione (emissione, regolazione e distribuzione) per la climatizzazione estiva	$Q_{C,ls,u}$
Energia <i>delivered</i> (gas)	$Q_{del,gas}$
Energia <i>delivered</i> (energia elettrica)	$Q_{del,el}$
Fabbisogno di energia primaria non rinnovabile	$Q_{P,nren}$
Fabbisogno di energia primaria rinnovabile (<i>off-site</i>)	$Q_{P,ren,ofs}$
Fabbisogno di energia primaria rinnovabile (<i>on-site</i>)	$Q_{P,ren,ons}$

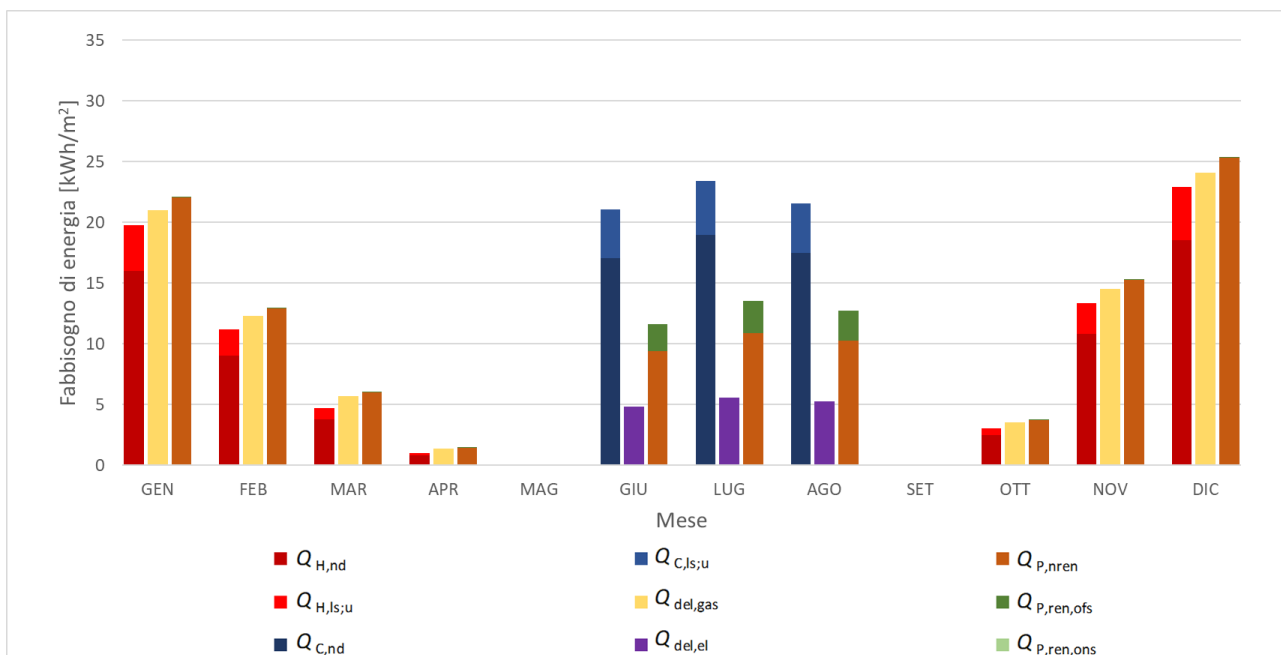


Figura 63. Fabbisogno di energia termica, erogata e primaria per riscaldamento e raffrescamento - Milano (regime continuo) Soluzione 1

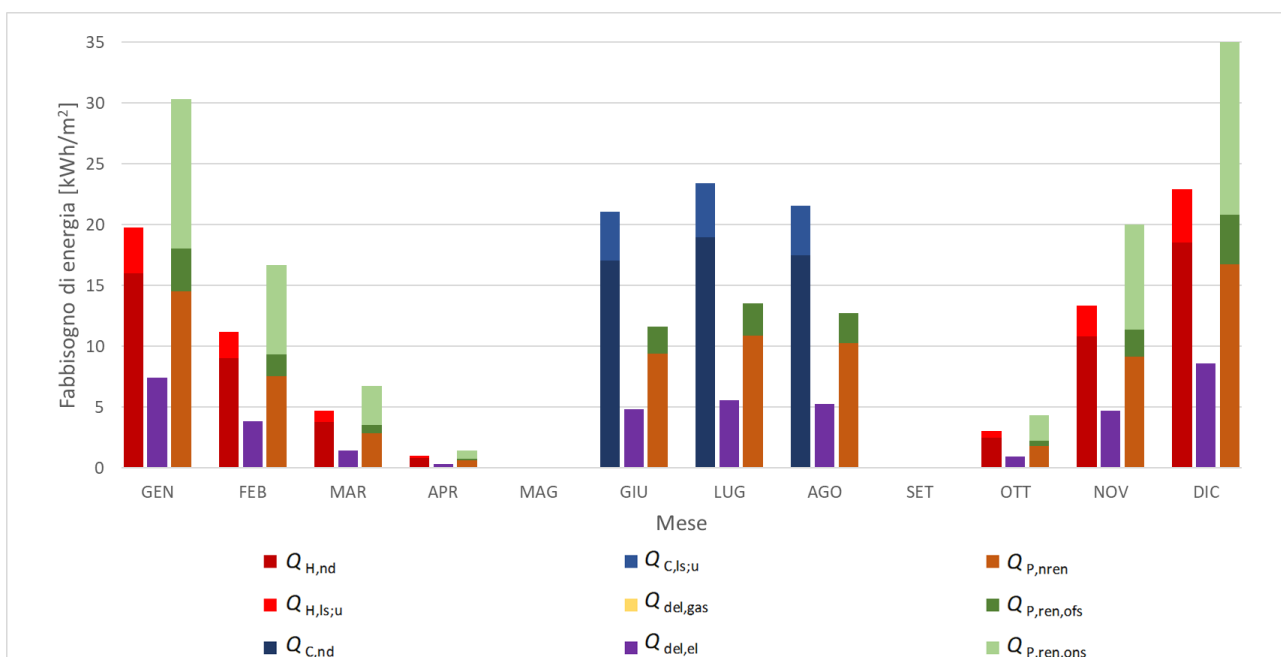


Figura 64. Fabbisogno di energia primaria per riscaldamento e raffrescamento - Milano (regime continuo) Soluzione 2

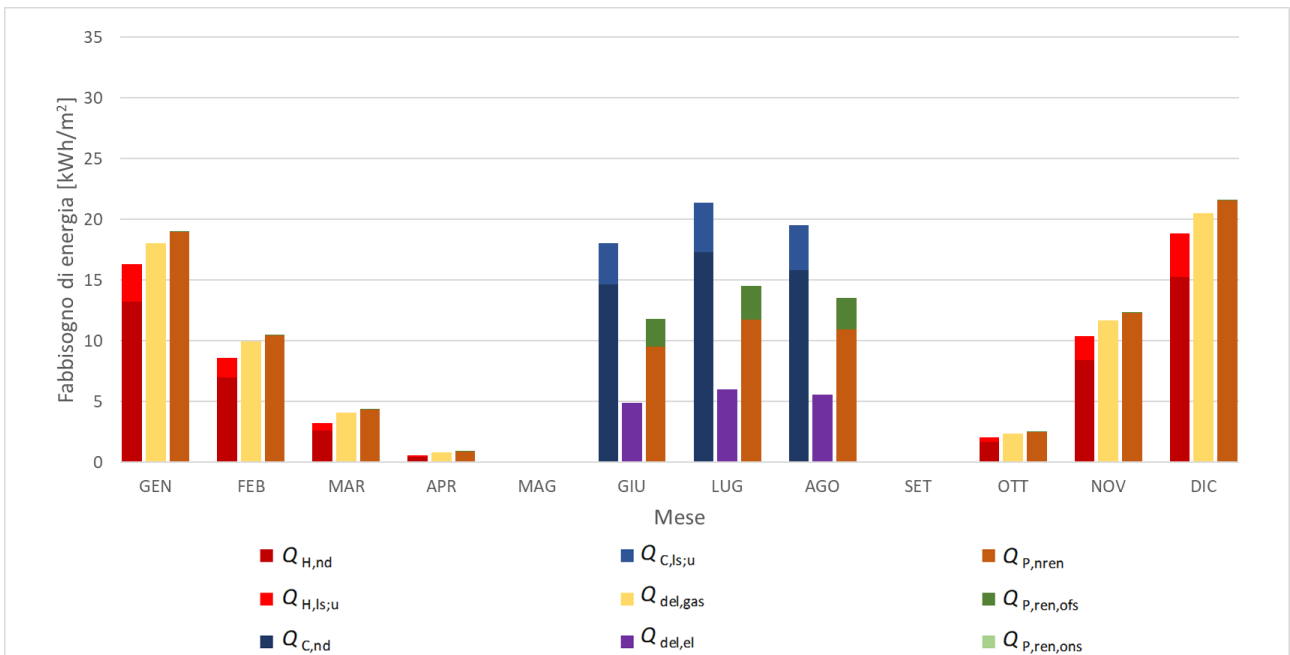


Figura 65. Fabbisogno di energia primaria per riscaldamento e raffrescamento - Milano (regime intermittente) Soluzione 1

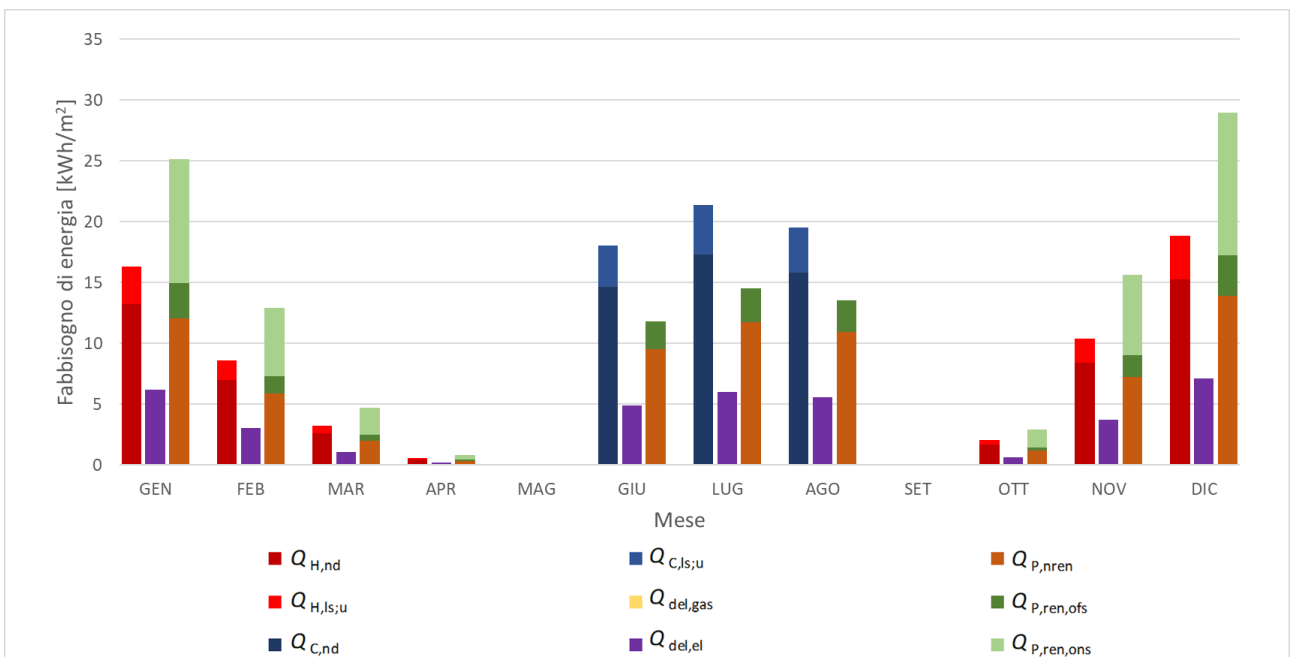


Figura 66. Fabbisogno di energia primaria per riscaldamento e raffrescamento - Milano (regime intermittente) Soluzione 2

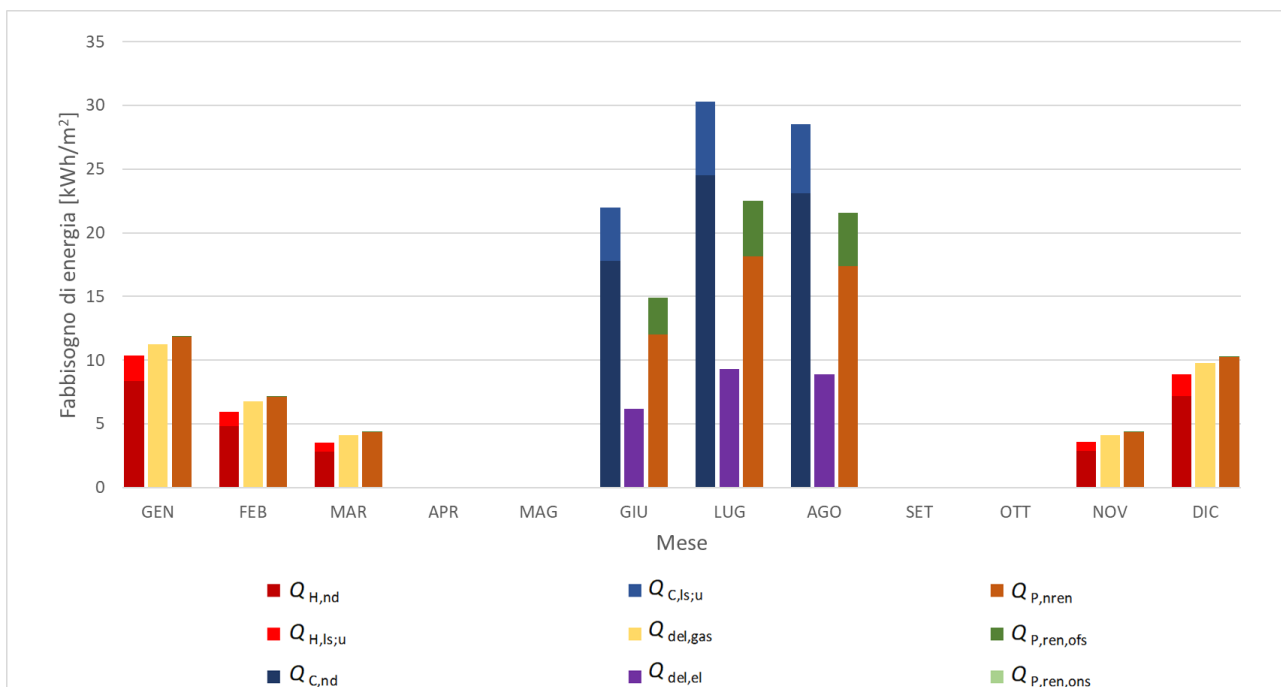


Figura 67. Fabbisogno di energia primaria per riscaldamento e raffrescamento - Roma (regime continuo) Soluzione 1

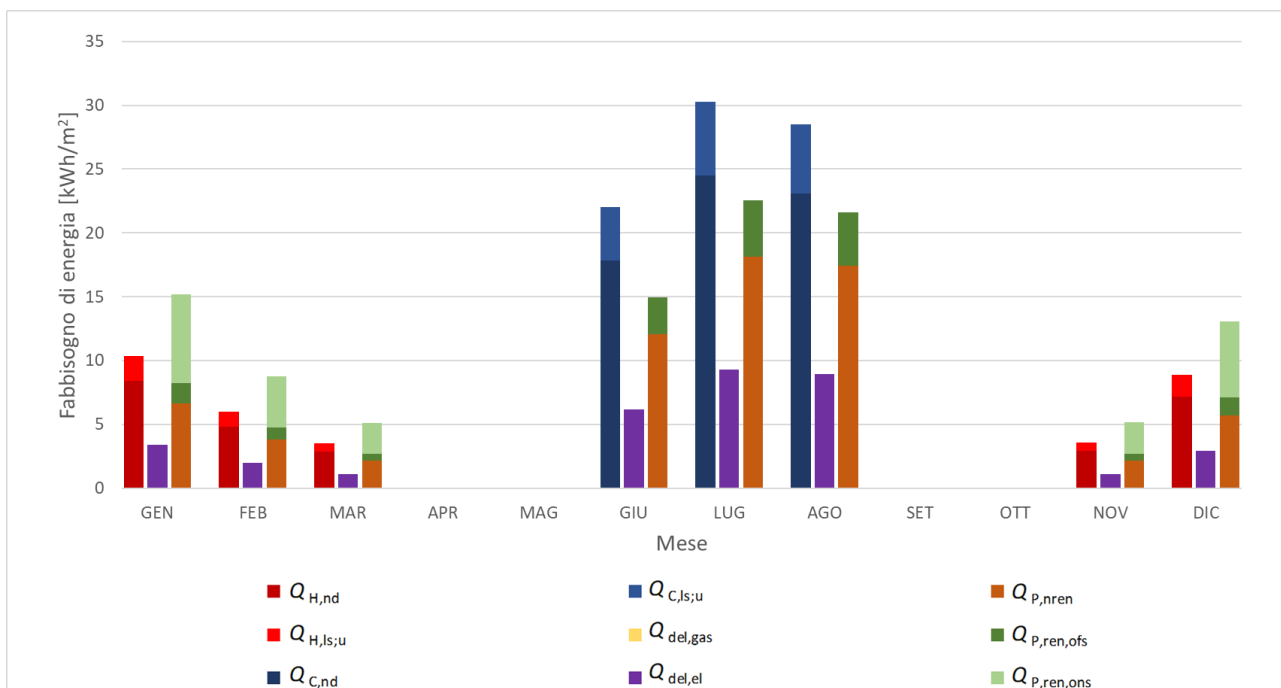


Figura 68. Fabbisogno di energia primaria per riscaldamento e raffrescamento - Roma (regime continuo) Soluzione 2

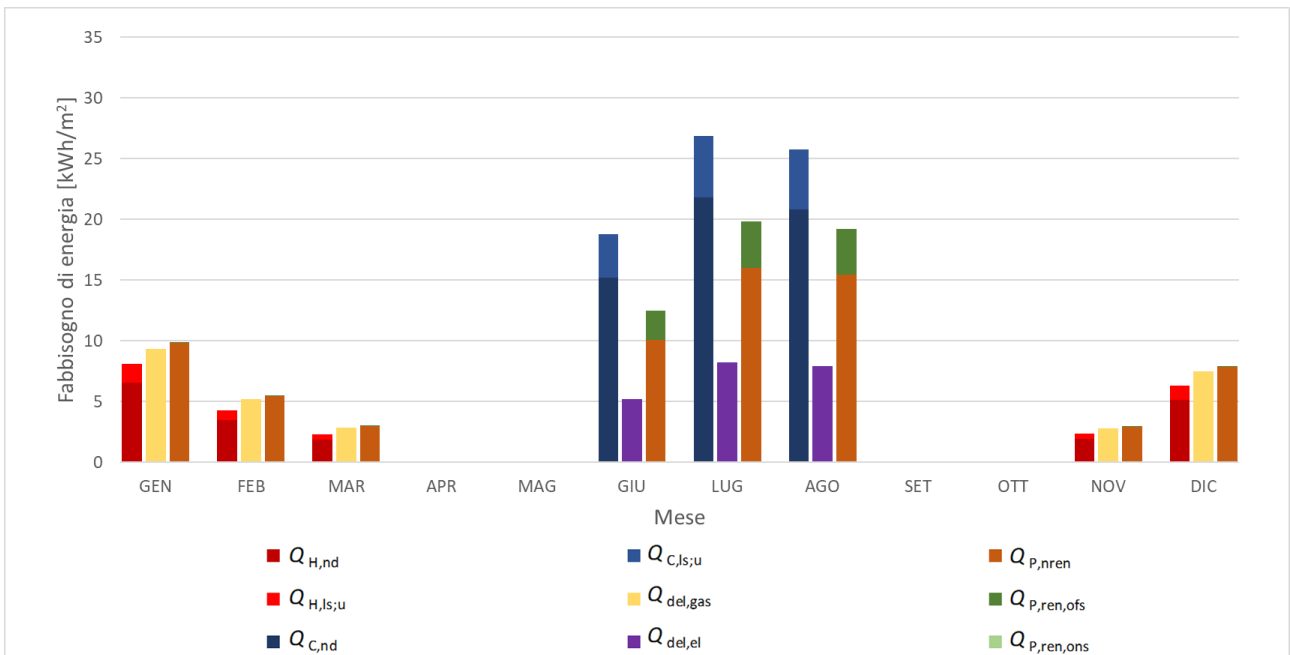


Figura 69. Fabbisogno di energia primaria per riscaldamento e raffrescamento - Roma (regime intermittente) Soluzione 1

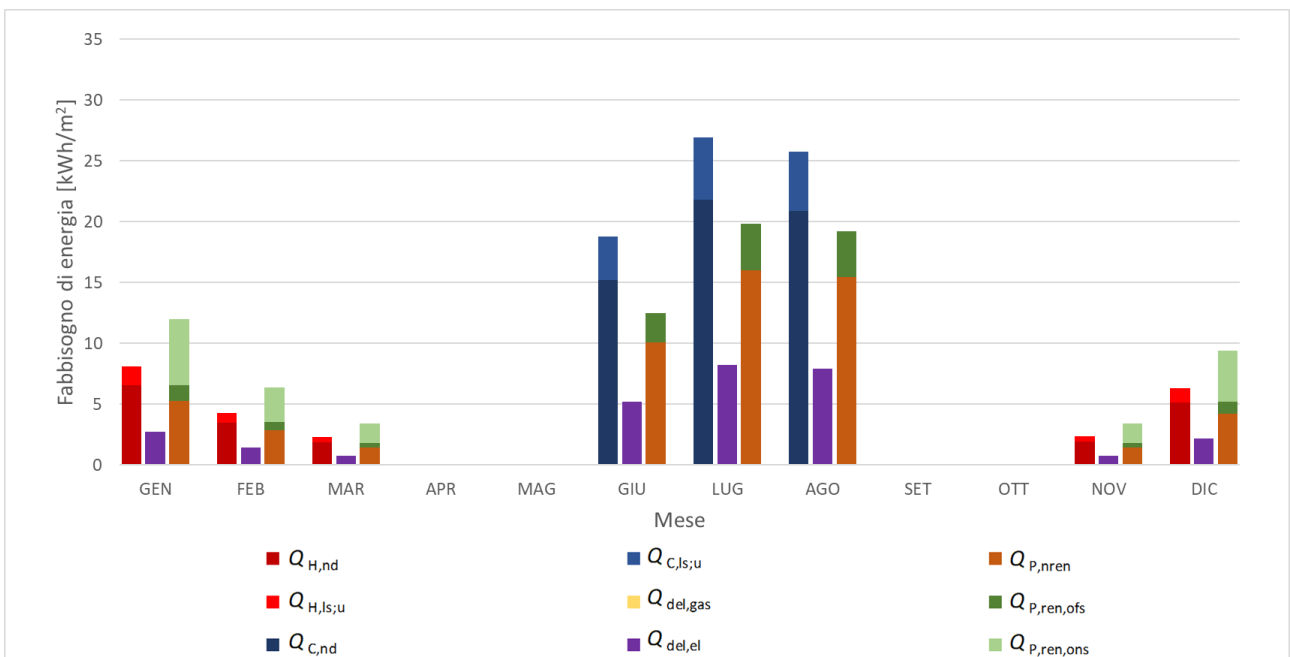


Figura 70. Fabbisogno di energia primaria per riscaldamento e raffrescamento - Roma (regime intermittente) Soluzione 2

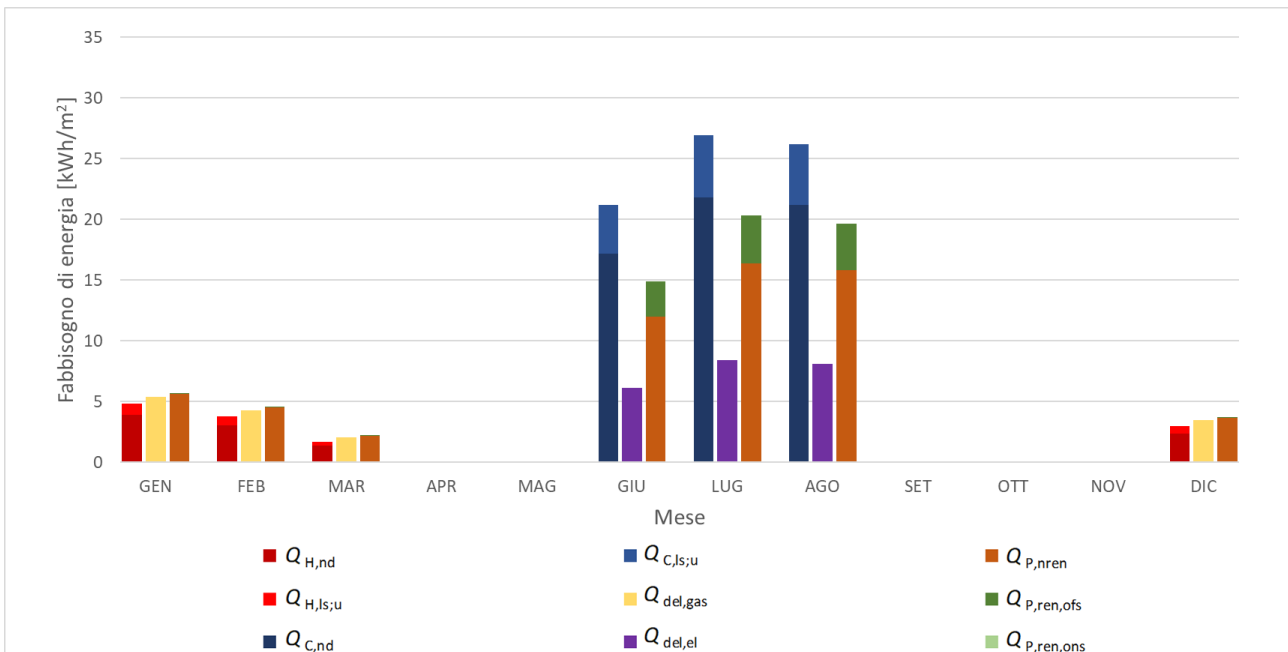


Figura 71. Fabbisogno di energia primaria per riscaldamento e raffrescamento - Palermo (regime continuo) Soluzione 1

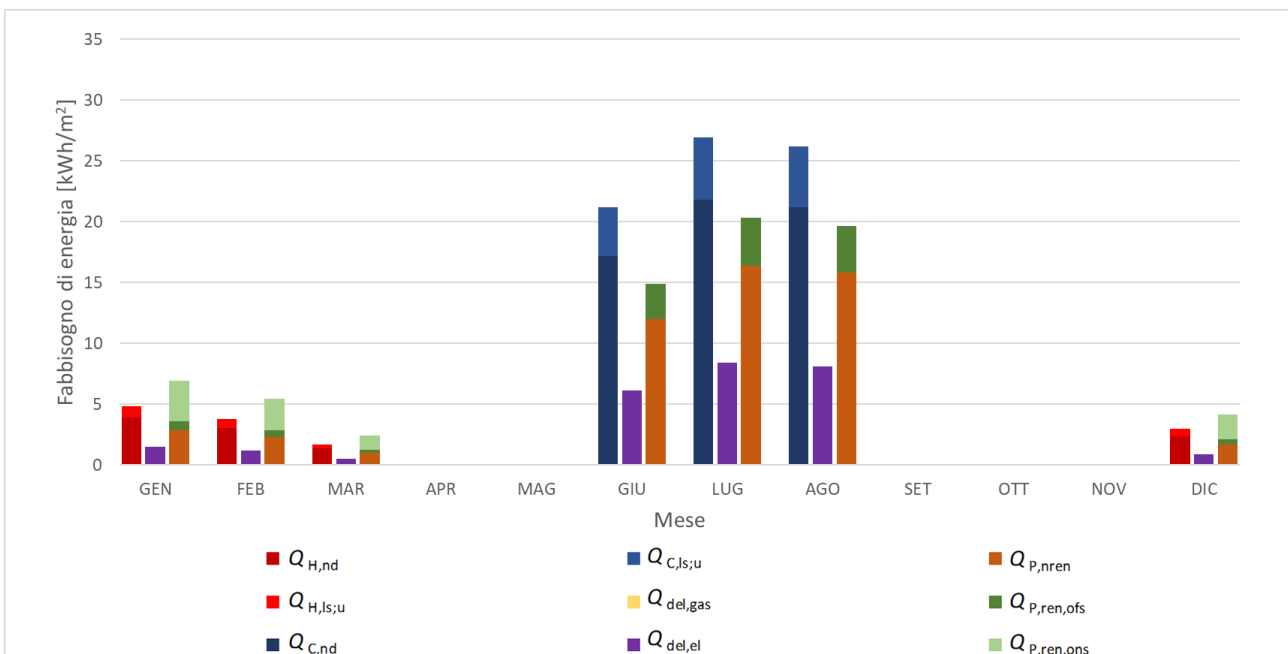


Figura 72. Fabbisogno di energia primaria per riscaldamento e raffrescamento - Palermo (regime continuo) Soluzione 2

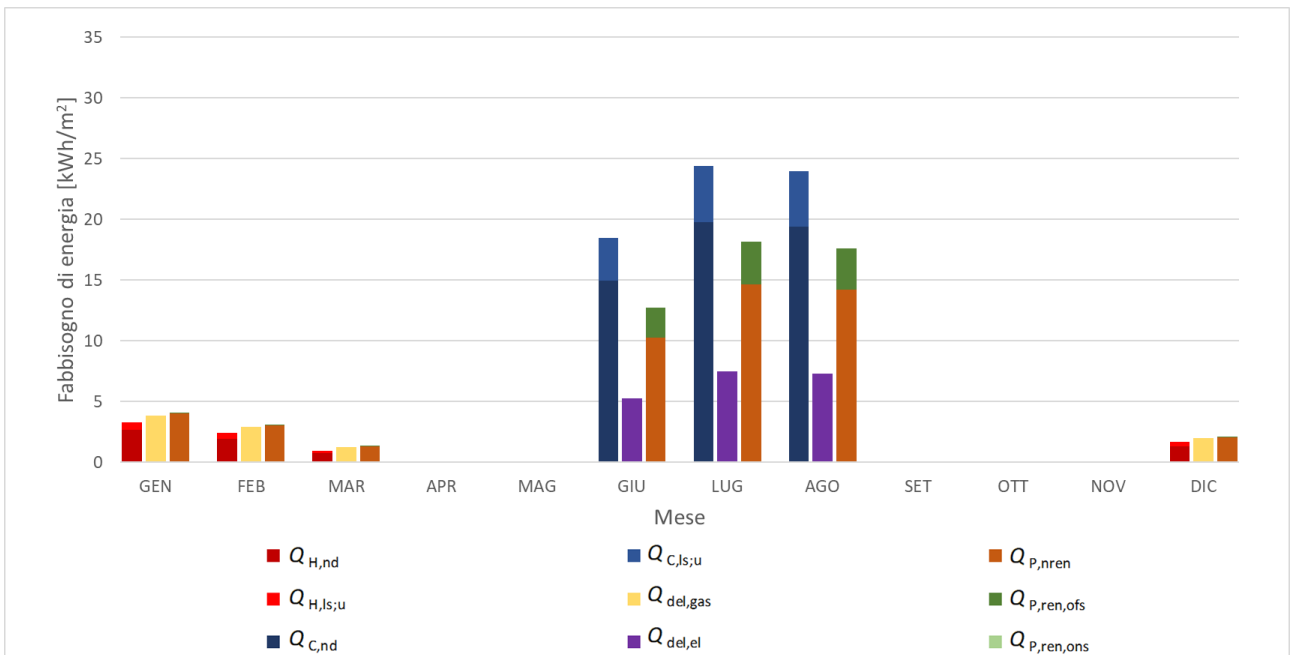


Figura 73. Fabbisogno di energia primaria per riscaldamento e raffrescamento - Palermo (regime intermittente) Soluzione 1

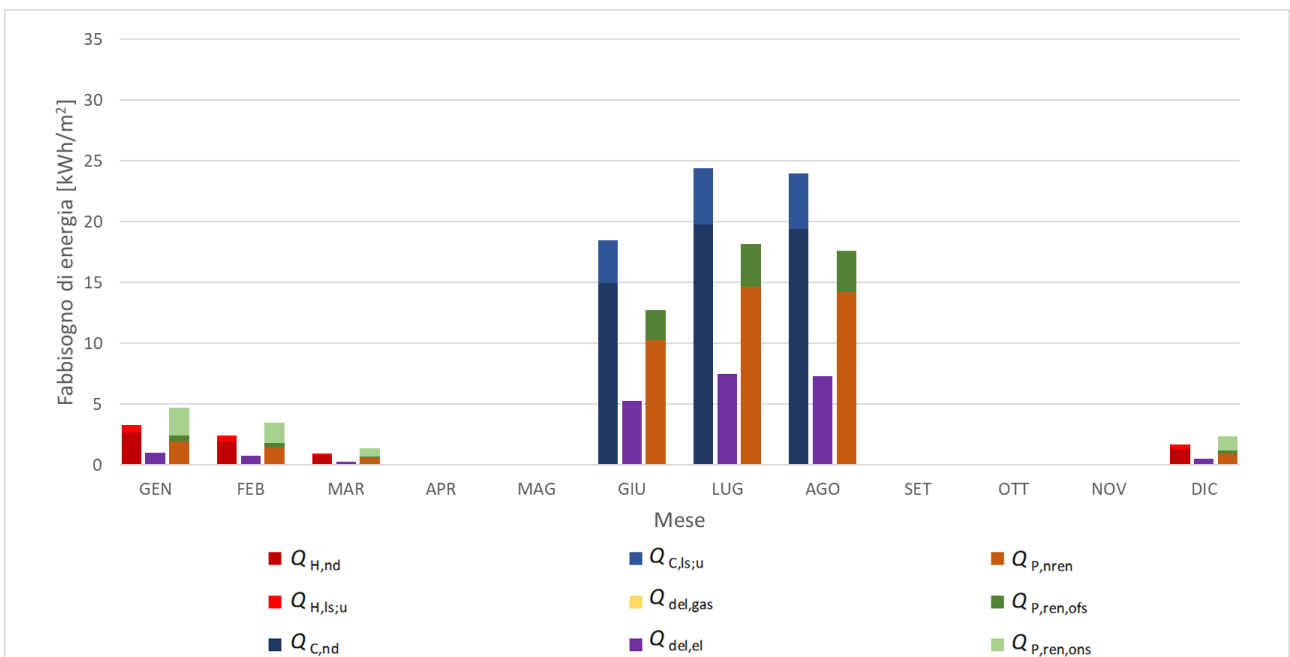


Figura 74. Fabbisogno di energia primaria per riscaldamento e raffrescamento - Palermo (regime intermittente) Soluzione 2

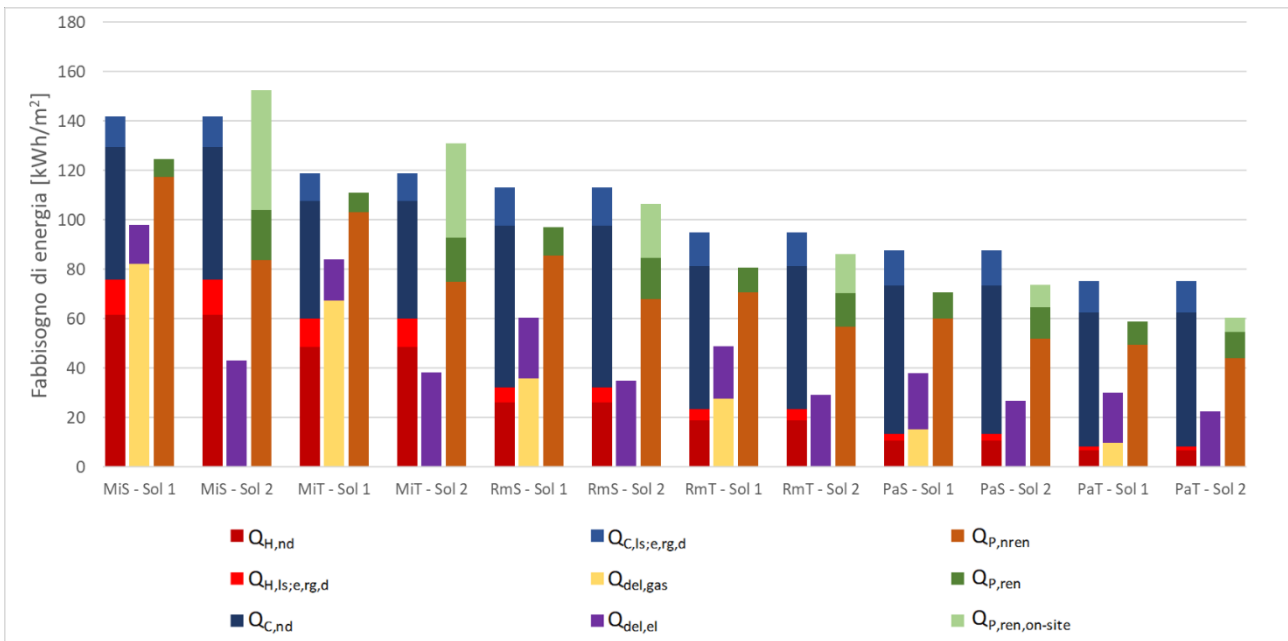


Figura 75. Fabbisogno di energia primaria per riscaldamento e raffrescamento – Risultati annuali

5.3.4 Analisi dei valori medi di efficienza dei generatori

Sono rappresentati da Figura 76 a Figura 79 i risultati mensili ed annuali dei coefficienti di prestazione (*COP*) e dei rapporti di efficienza energetica (*EER*) per i casi considerati. Analizzando tali figure è possibile notare come, coerentemente con quanto atteso, si abbia una riduzione del *COP* ed un aumento dell'*EER* con il decrescere delle temperature esterne.

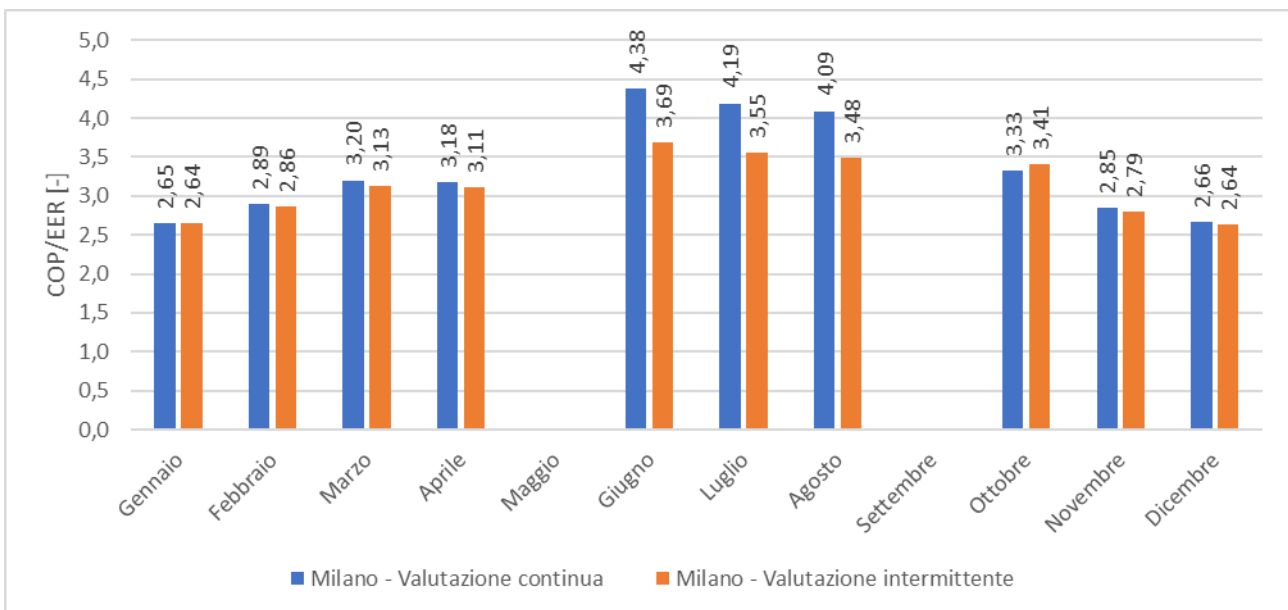


Figura 76. Valori di *COP* ed *EER* – Milano (Soluzione 2)

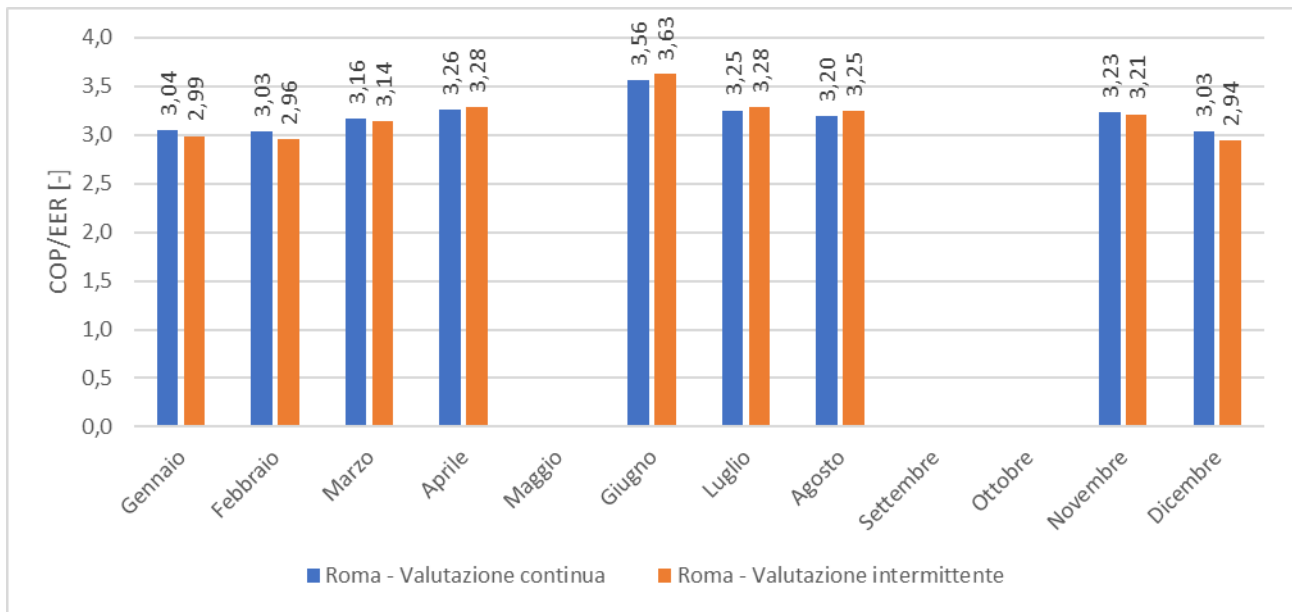


Figura 77. Valori di COP ed EER – Roma (Soluzione 2)

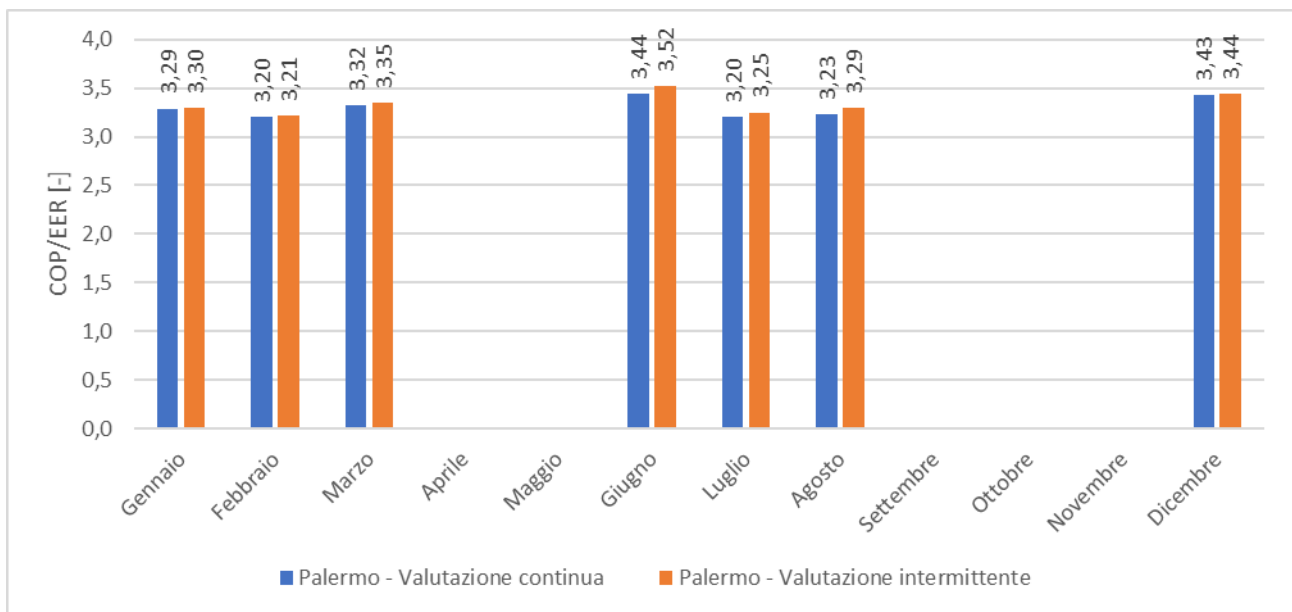


Figura 78. Valori di COP ed EER – Palermo (Soluzione 2)

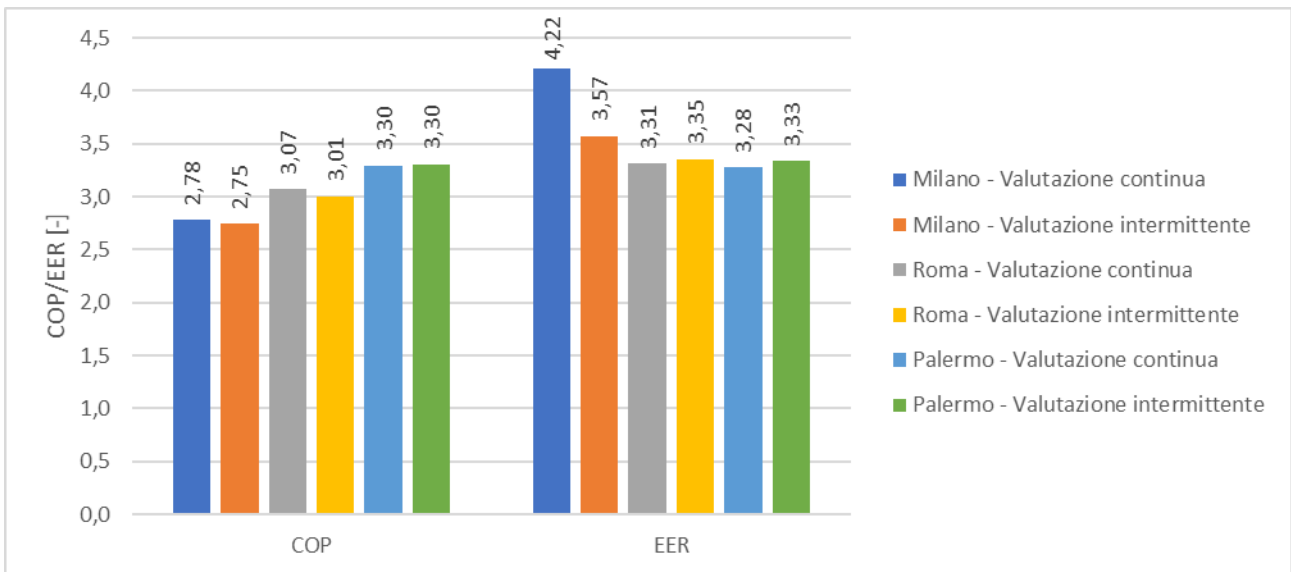


Figura 79. Valori di COP ed EER – Risultati annuali

5.3.5 Analisi dei costi energetici relativi alla climatizzazione

Dall’analisi dei costi annuali per il funzionamento dell’impianto, rappresentati in Figura 80 e calcolati con i costi presentati in Tabella 20, è possibile notare un’inversione rispetto a quanto analizzato in merito ai fabbisogni: la differenza di prezzo tra l’energia elettrica ed il gas rende infatti la soluzione 1, che risulta essere più energivora per quanto concerne l’energia primaria, più conveniente per il caso analizzato a Milano, mentre nelle altre due località i costi risultano essere molto simili. La possibilità di installare dispositivi di produzione di energia elettrica *on-site*, non considerata ai fini di questa trattazione, porterebbe però una riduzione dei costi riferiti a tale vettore energetico rendendo potenzialmente più vantaggiosa la soluzione 2 quantomeno per i climi più caldi.

Tabella 20. Costo dei vettori energetici

Vettore energetico	Costo [€/kWh]
Elettricità	0,241
Gas	0,067

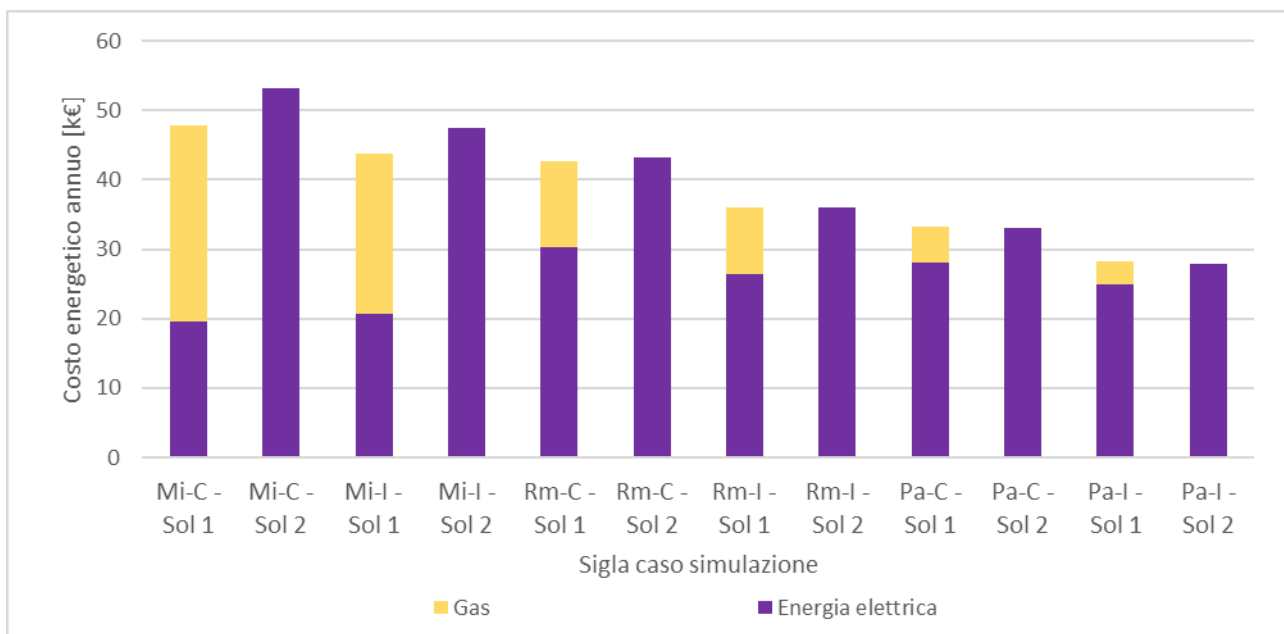


Figura 80. Costo annuale per riscaldamento e raffrescamento

5.3.6 Fabbisogno di energia per l'illuminazione

Sono di seguito presentati i risultati di fabbisogno di energia per l'illuminazione dell'edificio nelle tre località considerate. Nella Figura 81 è possibile apprezzare le variazioni mensili; le differenze tra le località risultano essere minime in quanto principalmente dovute alle differenze tra i rapporti di irradianza solare diretta e globale che non risultano essere, quantomeno nel caso considerato, particolarmente incidenti; le differenze mensili derivano invece dall'utilizzo di differenti coefficienti per il calcolo del fattore di dipendenza dalla luce diurna, essendo dipendenti dal mese considerato, tali parametri portano ad andamenti analoghi nelle tre località. Sono infine presentati nella Figura 82 i risultati del calcolo del LENI.

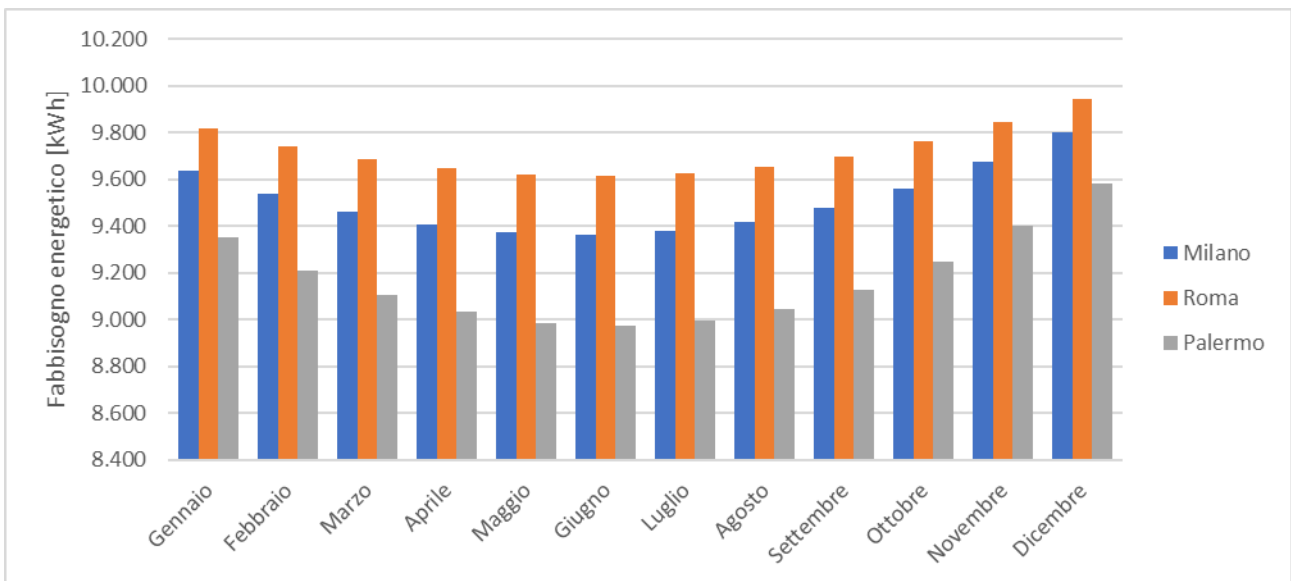


Figura 81. Fabbisogno energetico annuo per l'illuminazione

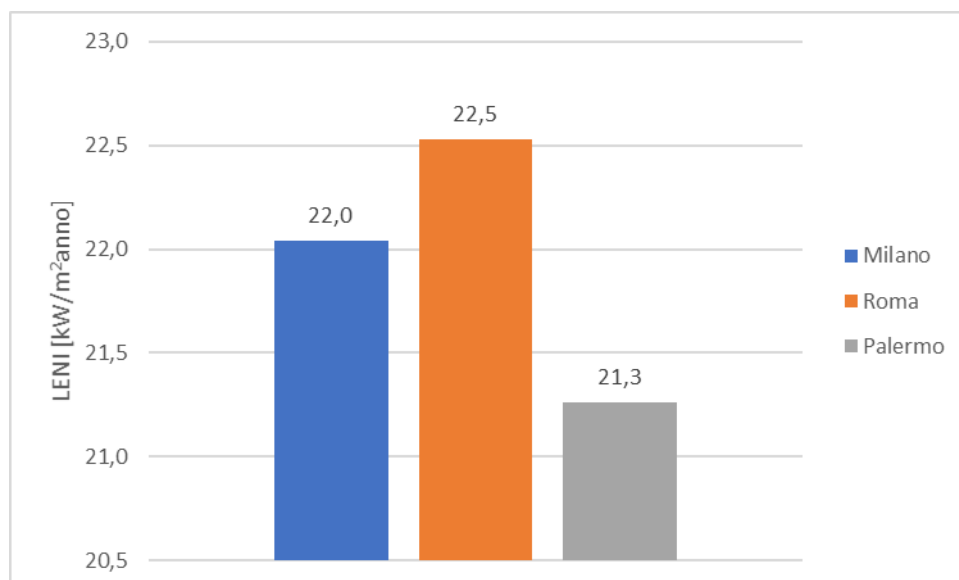


Figura 82. Calcolo del LENI per le località considerate

5.4 La sensitività dei parametri

Alcuni lavori hanno già indagato la sensitività dei parametri e gli effetti che variazioni degli stessi causano sui risultati di output.

Ballarini et al. [13] hanno confrontato i risultati del modello dinamico semplificato della UNI EN ISO 52016-1 e quelli ottenuti con un metodo dinamico dettagliato (*EnergyPlus*) sfruttando uno studio di caso. Sono state analizzate i singoli contributi all'equazione di bilancio termico dell'aria in base alle singole forzanti adottando delle opzioni di consistenza per i singoli fenomeni fisici al fine di rendere i risultati confrontabili. Sono state svolte tre differenti simulazioni:

- Una prima simulazione modellata con un impianto ideale di potenza infinita operante dipendentemente dalle temperature di set-point di riscaldamento e raffreddamento; sono state considerate tutte le forzanti. I valori orari di temperature interne sono stati utilizzati come dati di input per le seguenti simulazioni.
- Una seconda simulazione nella quale sono stati rimossi, rispetto alla prima simulazione, la radiazione solare e gli apporti interni in modo da considerare come unica forzante la temperatura.
- Una terza simulazione nella quale sono stati rimossi, rispetto alla prima simulazione, i soli apporti solari.

Il confronto tra le simulazioni ha quindi permesso di identificare le influenze delle tre forzanti considerate sia sull'intero sistema edificio che sui singoli componenti dell'involucro, inoltre distinguendo i vari fenomeni partecipanti alla definizione della singola forzante è stato possibile studiare quanto le differenti ipotesi applicate sui singoli modelli semplificativi dei fenomeni fisici avessero influenzato i risultati finali.

L'analisi dei risultati, pur ottenendo valori comparabili di fabbisogno di energia utile per la climatizzazione, ha messo in evidenza la costante sottostima di tutte le forzanti da parte del modello dinamico semplificato della UNI EN ISO 52016-1 rispetto al software *EnergyPlus*, come mostrato in Figura 83. Le variazioni di particolare rilevanza risultano essere per tutto il periodo considerato quelle riferite agli effetti della radiazione solare; per il solo periodo estivo, risultano inoltre essere di notevole rilevanza le variazioni associate agli scambi termici per differenza di temperatura. Non sono state infine rilevate variazioni sensibili in merito agli apporti interni

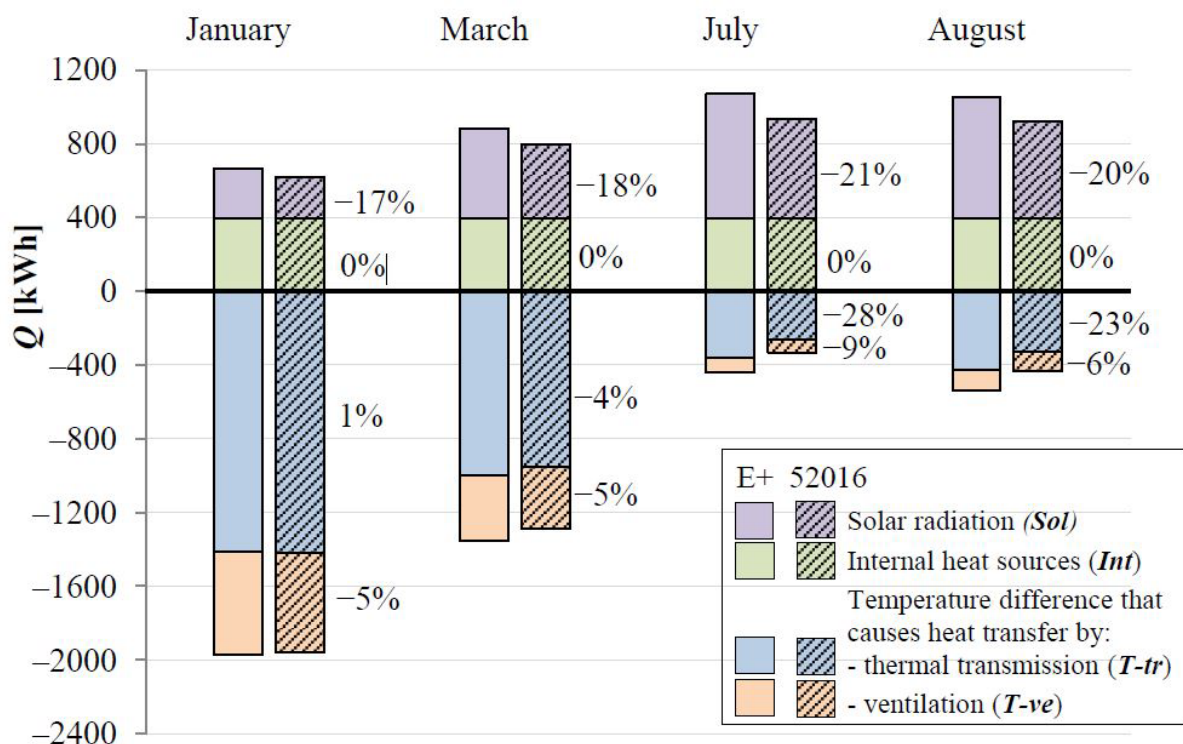


Figura 83. Confronto dei risultati di influenza delle singole forzanti tra il metodo di calcolo della UNI EN ISO 52016-1 e *EnergyPlus* (tratto da Ballarini et al. [13])

Bianco et al. [29] hanno inoltre svolto delle analisi di sensibilità su un caso studio, analizzando l'influenza di variazioni controllate di alcuni dati di input sui risultati di fabbisogno di energia termica utile calcolati con il modello della UNI EN ISO 52016-1. Nel dettaglio sono stati considerati gli effetti di variazioni della densità di occupazione, della distribuzione della massa nelle pareti esterne (considerando i cinque modelli presentati nella UNI EN ISO 52016-1), il fattore di trasmissione solare dei componenti finestrati, nonché le temperature di set point di riscaldamento e raffrescamento. Le simulazioni sono state effettuate con un impianto ideale con potenza infinita nelle gestioni continue ed intermittenti dell'impianto.

I risultati hanno messo in evidenza, per il periodo invernale, la totale predominanza della temperatura di set-point come parametro influenzante i risultati di fabbisogno energetico. Per quanto riguarda invece il periodo estivo i quattro parametri di input considerati presentano una rilevanza molto simile tra di loro, con una leggera predominanza, nuovamente, della temperatura di set-point.

6 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 [30] 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.

6.1 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 conoscerne 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 [31] 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.

6.2 Specifiche modalità di modellazione

6.2.1 Le condizioni al contorno

Al fine di determinare i dati dell'ambiente esterno il Comitato Termotecnico Italiano (CTI) fornisce dei fogli contenenti i principali parametri necessari riferiti ai capoluoghi di provincia per l'intero territorio italiano. Tenendo conto della differenza tra timestep e timestamp, dove il primo è un intervallo di tempo, mentre il secondo corrisponde ad un preciso momento temporale, è possibile distinguere due gruppi di dati proposti. I dati riferiti a temperatura, umidità relativa, pressione di vapore e velocità del vento sono riferiti ad un timestamp, nascono infatti da una misurazione puntuale e i valori riferiti ad una particolare ora corrispondono al valore effettivo di quell'istante temporale.

I dati riferiti all'irradianza sono invece nascono invece dalla media delle misurazioni fatte nel time step che, in questo caso, risulta essere di un'ora. I valori associati ad un'ora non corrispondono quindi al valore associabile al timestamp ma invece alla media effettuata nell'ora precedente a quella indicata. Esemplicando, il valore associato alle ore 10:00, risulta essere il valore medio delle misurazioni tra le 9:00 e le 10:00.

Al fine di avere valori maggiormente coerenti con i valori associabili al timestamp, è preferibile interpolare i valori presentati dal CTI, in modo da ottenere valori riferibili sempre ad un periodo di un'ora, ma centrati sull'ora di interesse. Esemplicando, si useranno valori che se riferiti alle 10:00, saranno riferibili alla media dei valori compresi tra le 9:30 e le 10:30.

6.2.2 Il fabbisogno di energia utile

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, e come prescritto dall'appendice nazionale, 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. [32], oppure caricandone la capacità termica sul nodo d'aria;
- d. Ponti termici. I valori di trasmittanza termica lineare dei ponti termici possono essere desunte da abachi, oppure calcolati secondo modelli dettagliati, come indicato nella norma tecnica UNI EN ISO 10211:2018 [33].

6.2.3 I sistemi impiantistici

Nelle norme di calcolo dei sistemi di generazione precedentemente presentate, sono presenti diverse tipologie di calcolo. Queste differiscono sia in base all'intervallo di tempo considerato che in funzione del dettaglio dei dati riferiti alla particolare macchina impiegata nella simulazione.

Tali procedure vanno scelte con particolare attenzione in quanto un livello di dettaglio eccessivo, in assenza di dati approfonditi renderebbe necessaria l'assunzione di numerosi parametri con una conseguente rilevante perdita di accuratezza, e una non affidabilità dei risultati ottenibili.

Tabella 21. Procedure di calcolo per le norme considerate

Sistema di generazione	Periodo	Norma di calcolo	Procedure ammesse
Pompa di calore	Invernale	Modulo sostitutivo	- Metodo dei bin - Calcolo orario
	Estivo	UNI EN 16798-13:2018 e allegato nazionale	- Metodo 1 (Dati dettagliati della macchina disponibili)
- Metodo 2 (Dati dettagliati della macchina non disponibili)			
Gruppo frigorifero			
Caldaia	Invernale	UNI EN 15316-4-1:2018 e allegato nazionale	- Valori di default - Valori della macchina - Valori misurati

7 Conclusioni

L'attività condotta nella seconda annualità si è focalizzata sull'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 sono stati approfonditi gli aspetti teorici del modello di calcolo, comprendenti le principali equazioni e i parametri di ingresso. Particolare attenzione è stata poi dedicata all'analisi dei sistemi impiantistici, alle centrali di generazione termica e frigorifera ed ai fabbisogni di energia primaria correlati alle soluzioni impiantistiche considerate.

Alla luce dei risultati ottenuti applicando il nuovo metodo orario semplificato ad un edificio per uffici, è emerso un notevole dipendenza del profilo orario della temperatura operativa interna nei periodi di non funzionamento dell'impianto termico dagli apporti interni. Quest'influenza risulta essere amplificata in edifici, come quello oggetto di studio, che presentano un involucro estremamente leggero nonché una notevole presenza di persone ed apparecchi. Questo aspetto merita ulteriori approfondimenti nel prosieguo 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.

8 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. T. Zakula, M. Bagaric, N. Ferdelji, B. Milovanovic, S. Mudrinic, and K. Ritosa. "Comparison of dynamic simulations and the ISO 52016 standard for the assessment of building energy performance.", *Applied Energy*, 25 (2019).
12. 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), 2020.
13. I. Ballarini, A. Costantino, E. Fabrizio, V. Corrado. A Methodology to Investigate the Deviations between Simple and Detailed Dynamic Methods for the Building Energy Performance Assessment. ENERGIES, S.I. "Selected Papers from BS2019 – Building Simulation", vol. 13, issue 23, 6217, p.1-19, ISSN: 1996-1073, novembre 2020, doi:10.3390/en13236217.
14. L. Mazzarella, R. Scoccia, P. Colombo, and M. Motta. "Improvement of EN ISO 52016-1:2017 hourly heat transfer through a wall assessment: the Italian National Annex". *Energy and Buildings* 210, 109758 (2020).

15. 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.
16. Comitato Termotecnico Italiano (CTI), Documento n. 020200109, Bozza di Appendice Nazionale UNI EN ISO 52016-1, dicembre 2018.
17. Ente Italiano di Normazione, UNI EN 15316-4-2. Prestazione energetica degli edifici - Metodo per il calcolo delle richieste di energia e delle efficienze del sistema - Parte 4-2: Sistemi di generazione per il riscaldamento degli ambienti, pompe di calore Moduli M3-8-2, M8-8-2, febbraio 2018.
18. Comitato Termotecnico Italiano (CTI), Documento n. 025100365, Bozza di prUNI/TS 11300-X-X. Prestazione energetica degli edifici – Metodo per il calcolo delle richieste di energia e delle efficienze del sistema – Sistemi di generazione per il riscaldamento degli ambienti, pompe di calore, Moduli italiani M3-8-2, M8-8-2, giugno 2018
19. Ente Italiano di Normazione, UNI EN 16798-13. Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 13: Calcolo dei sistemi di raffreddamento (Modulo M4-8) – Generazione, marzo 2018.
20. Comitato Termotecnico Italiano (CTI), bozza di Appendice Nazionale UNI EN 16798-13, 2018.
21. Ente Italiano di Normazione, UNI EN 15316-4-1. Prestazione energetica degli edifici - Metodo per il calcolo delle richieste di energia del sistema e delle efficienze del sistema - Parte 4-1: Sistemi di riscaldamento e di generazione di acqua calda sanitaria, sistemi di combustione (caldaie, biomasse), Modulo M3-8-1, M8-8-1, febbraio 2018.
22. Comitato Termotecnico Italiano (CTI), bozza di Appendice Nazionale UNI EN 15316-4-1, aprile 2020.
23. Ente Italiano di Normazione, UNI EN 15193-1. Prestazione energetica degli edifici - Requisiti energetici per illuminazione - Parte 1: Specificazioni, Modulo M9, maggio 2017
24. Ente Italiano di Normazione, UNI/PdR 77. Linee guida per il calcolo computerizzato per la determinazione del LENI secondo il metodo di calcolo completo della UNI EN 15193-1:2017, febbraio 2020.
25. Comitato Termotecnico Italiano (CTI), Anno tipo climatico, Milano, 2015.
26. 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.
27. Comitato Termotecnico Italiano (CTI), documento n. 024100181, Bozza di Appendice Nazionale UNI EN 16798-1, dicembre 2019.
28. 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.
29. F. Bianco, I. Ballarini, G. De Luca, M. P. Tootkaboni, V. Corrado. Sensitivity Analysis of the Thermal Energy Need of a Residential Building Assessed by means of the EN ISO 52016 Simplified Dynamic Method. ATI 2020
30. 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).
31. Ente Italiano di Normazione, UNI EN ISO 6946. Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodi di calcolo, marzo 2018.

32. 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.
33. Ente Italiano di Normazione, UNI EN ISO 10211. Ponti termici in edilizia - Flussi termici e temperature superficiali - Calcoli dettagliati, marzo 2018.

9 Riconoscimenti

Si ringrazia l'EPB Center di Rotterdam (NL) per avere messo a disposizione i fogli di calcolo Excel per l'applicazione ufficiale della EN ISO 52016-1, sviluppati nell'ambito dell'attività di normazione internazionale dell'ISO TC 163 e del CEN TC 89.

10 Nomenclatura

Simbolo	Grandezza	Unità di misura
<i>A</i>	area	m ²
<i>F</i>	fattore	-
<i>g</i>	coefficiente di trasmissione solare totale	-
<i>h</i>	conduttanza termica	W·m ⁻² K ⁻¹
<i>I</i>	irradianza solare	W·m ⁻²
<i>M</i>	massa	kg
<i>ṁ</i>	portata in massa	kg·s ⁻¹
<i>Q</i>	energia termica	W·h
<i>q</i>	portata volumetrica	m ³ ·s ⁻¹
<i>R</i>	resistenza termica	m ² K·W ⁻¹
<i>s</i>	spessore	m
<i>U</i>	trasmittanza termica	W·m ⁻² K ⁻¹
<i>V</i>	volume	m ³
<i>Y</i>	trasmittanza termica periodica	W·m ⁻² K ⁻¹
<i>Φ</i>	potenza termica	W
<i>κ</i>	capacità termica areica	J·m ⁻² K ⁻¹
<i>θ</i>	temperatura	°C

Pedici

<i>C</i>	raffrescamento
<i>e</i>	esterno
<i>env</i>	involucro
<i>F</i>	telaio
<i>f</i>	pavimento
<i>gl</i>	vetro
<i>H</i>	riscaldamento
<i>h</i>	orizzontale
<i>i, int</i>	interno
<i>l</i>	lordo
<i>ld</i>	carico termico
<i>n</i>	normale, perpendicolare
<i>nd</i>	utile (fabbisogno termico)
<i>op</i>	operativa (temperatura)
<i>s</i>	superficiale
<i>set</i>	regolazione
<i>sh</i>	schermatura solare
<i>shut</i>	chiusura oscurante
<i>sol</i>	solare
<i>w</i>	finestra

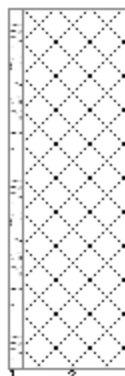
Acronimi

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

Appendice A - Componenti

Descrizione della struttura: *parete, pilastri e setti in cls*

Codice: *M1*

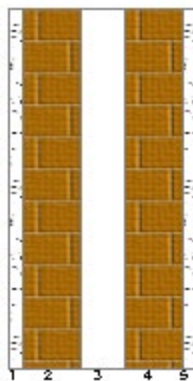


Stratigrafia:

N.	Descrizione strato	s [mm]	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	R [m ² KW ⁻¹]	ρ [kg m ⁻³]	c [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	μ [-]
1	Intonaco di gesso	20	0,400	0,050	1000	1,00	10
2	C.l.s. di sabbia e ghiaia (pareti esterne)	148	2,150	0,069	2400	1,00	96

Descrizione della struttura: *parete in mattoni*

Codice: *M2*

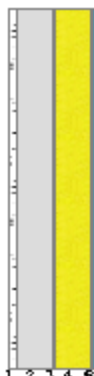


Stratigrafia:

N.	Descrizione strato	s [mm]	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	R [m ² KW ⁻¹]	ρ [kg m ⁻³]	c [kJkg ⁻¹ K ⁻¹]	μ [-]
1	Intonaco di gesso	20	0,570	0,035	1300	1,00	10
2	Mattone forato	80	0,400	0,200	775	0,84	9
3	Intercapedine non ventilata $A_v < 500$ mm ² /m	60	0,333	0,180	-	-	-
4	Mattone forato	80	0,400	0,200	775	0,84	9
5	Intonaco di cemento e sabbia	20	1,000	0,020	1800	1,00	10

Descrizione della struttura: *parete tipo spandrel*

Codice: *M3*

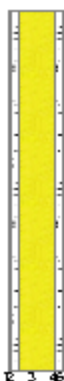


Stratigrafia:

N.	Descrizione strato	s [mm]	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	R [m ² KW ⁻¹]	ρ [kg m ⁻³]	c [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	μ [-]
1	Intonaco di gesso	10	0,570	0,018	1300	1,00	10
2	Cartongesso	50	0,210	0,238	1000	0,90	8
3	Alluminio	2	220,000	0,000	2700	0,88	9999999
4	Fibre minerali da loppe - Feltro	50	0,054	0,926	40	1,03	1
5	Alluminio	2	220,000	0,000	2700	0,88	9999999
6	Vetro per finestre	6	1,000	0,006	2500	1,00	9999999

Descrizione della struttura: *parete partizione interna*

Codice: *M4*

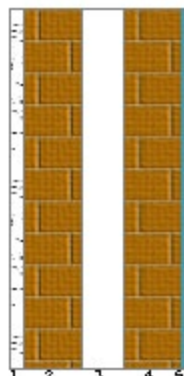


Stratigrafia:

N.	Descrizione strato	s [mm]	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	R [m ² KW ⁻¹]	ρ [kg m ⁻³]	c [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	μ [-]
1	Intonaco di gesso	5	0,570	0,009	1300	1,00	10
2	Cartongesso 9,5 mm (per THERMOGES)	10	0,211	0,047	840	0,84	8
3	Fibra di vetro - Pannello semirigido	50	0,046	1,087	16	1,03	1
4	Cartongesso 9,5 mm (per THERMOGES)	10	0,211	0,047	840	0,84	8
5	Intonaco di gesso	5	0,570	0,009	1300	1,00	10

Descrizione della struttura: *parete in mattoni con rivestimento in vetro*

Codice: *M5*

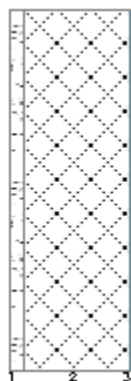


Stratigrafia:

N.	Descrizione strato	s [mm]	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	R [m ² KW ⁻¹]	ρ [kg m ⁻³]	c [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	μ [-]
1	Intonaco di gesso	20	0,570	0,035	1300	1,00	10
2	Mattone forato	80	0,400	0,200	775	0,84	9
3	Intercapedine non ventilata $A_v < 500$ mm ² /m	60	0,333	0,180	-	-	-
4	Mattone forato	80	0,400	0,200	775	0,84	9
5	Vetro per finestre	6	1,000	0,006	2500	1,00	9999999

Descrizione della struttura: *parete, pilastri e setti in cls e paramento esterno in vetro*

Codice: *M6*

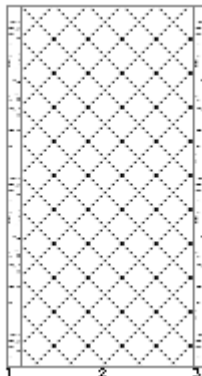


Stratigrafia:

N.	Descrizione strato	s [mm]	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	R [m ² KW ⁻¹]	ρ [kg m ⁻³]	c [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	μ [-]
1	Intonaco di gesso	20	0,400	0,050	1000	1,00	10
2	C.l.s. di sabbia e ghiaia (pareti esterne)	148	2,150	0,069	2400	1,00	96
3	Vetro per finestre	6	1,000	0,006	2500	1,00	9999999

Descrizione della struttura: *Pareti, setti e pilastri in cls interni*

Codice: *M7*



Stratigrafia:

N.	Descrizione strato	s [mm]	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	R [m ² KW ⁻¹]	ρ [kg m ⁻³]	c [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	μ [-]
1	Intonaco di gesso	20	0,400	0,050	1000	1,00	10
2	C.l.s. di sabbia e ghiaia (pareti esterne)	240	2,150	0,112	2400	1,00	96
3	Intonaco di gesso	20	0,400	0,050	1000	1,00	10

Descrizione della struttura: *Porta REI*

Codice: *M8*

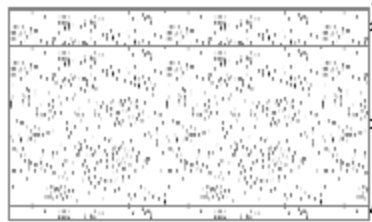


Stratigrafia:

N.	Descrizione strato	s [mm]	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	R [m ² KW ⁻¹]	ρ [kg m ⁻³]	c [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	μ [-]
1	Acciaio	1	52,000	0,000	7800	0,45	9999999
2	Pannello in lana di roccia a doppia densità	58	0,040	1,450	165	1,03	1
3	Acciaio	1	52,000	0,000	7800	0,45	9999999

Descrizione della struttura: *Solaio di interpiano*

Codice: *P1*

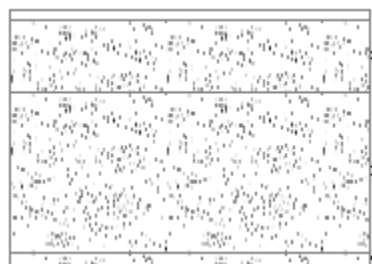


Stratigrafia:

N.	Descrizione strato	s [mm]	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	R [m ² KW ⁻¹]	ρ [kg m ⁻³]	c [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	μ [-]
1	Pavimento in gomma	2	0,170	0,012	1200	1,40	10000
2	Massetto solaio	50	2,200	0,023	2200	1,00	20
3	Laterocemento	220	0,720	0,306	1800	0,84	20
4	Intonaco	20	0,700	0,029	1500	1,00	10

Descrizione della struttura: *Solaio di copertura*

Codice: *S1*

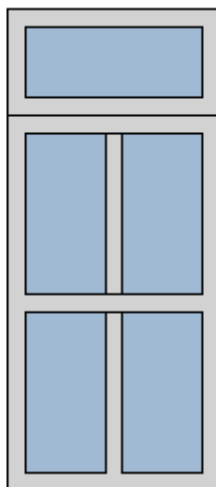


Stratigrafia:

N.	Descrizione strato	s [mm]	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	R [m ² KW ⁻¹]	ρ [kg m ⁻³]	c [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	μ [-]
1	Piastrelle in ceramica (piastrelle)	15	1,300	0,012	2300	0,84	9999999
2	Massetto solaio	100	2,200	0,045	2200	1,00	20
3	Laterocemento	220	0,720	0,306	1800	0,84	20
4	Intonaco di gesso	20	0,400	0,050	1000	1,00	10

Descrizione della finestra: Porta vetrata tipo 1

Codice: W1



Dimensioni del serramento

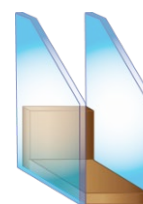
Larghezza **120,0** cm
 Altezza **210,0** cm

Caratteristiche del telaio

Trasmittanza termica del telaio U_f **5,70** W/m²K
 Ponte termico distanziale ψ_d **0,02** W/mK
 Area totale A_w **3,240** m²
 Area vetro A_g **2,020** m²
 Area telaio A_f **1,220** m²
 Fattore telaio F_f **0,38** -

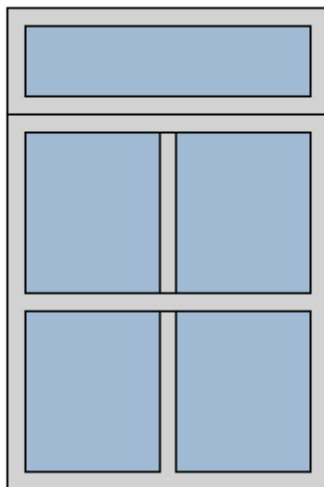
Stratigrafia del pacchetto vetrato

Descrizione strato	s [mm]	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	R [m ² KW ⁻¹]
Primo vetro	4,0	1,00	0,004
Intercapedine	-	-	0,127
Secondo vetro	4,0	1,00	0,004



Descrizione della finestra: Porta vetrata tipo 2

Codice: W2



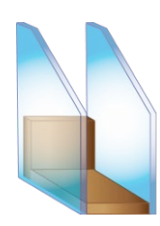
Larghezza **180,0** cm
 Altezza **210,0** cm
 Altezza sopra luce **60,0** cm

Caratteristiche del telaio

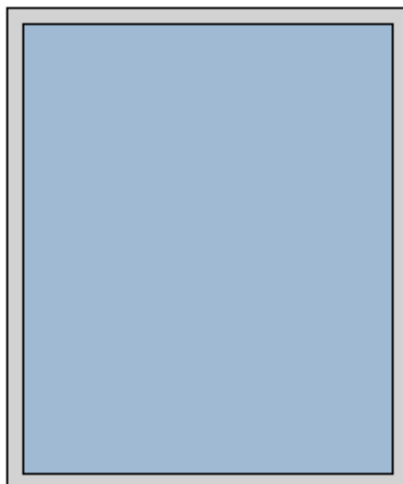
Trasmittanza termica del telaio U_f **5,70** W/m²K
 Ponte termico distanziale ψ_d **0,02** W/mK
 Area totale A_w **4,860** m²
 Area vetro A_g **3,340** m²
 Area telaio A_f **1,520** m²
 Fattore telaio F_f **0,31** -

Stratigrafia del pacchetto vetrato

Descrizione strato	s [mm]	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	R [m ² KW ⁻¹]
Primo vetro	4,0	1,00	0,004
Intercapedine	-	-	0,127
Secondo vetro	4,0	1,00	0,004



Descrizione della finestra: *Finestra tipo 1*



Dimensioni del serramento

Larghezza **100,0** cm
 Altezza **120,0** cm

Caratteristiche del telaio

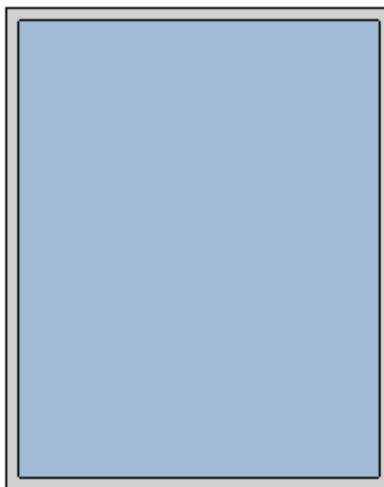
Trasmittanza termica del telaio U_f **2,80** W/m²K
 K distanziale K_d **0,08** W/mK
 Area totale A_w **1,200** m²
 Area vetro A_g **1,030** m²
 Area telaio A_f **0,170** m²
 Fattore telaio F_f **0,14** -

Stratigrafia del pacchetto vetrato

Descrizione strato	s [mm]	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	R [m ² KW ⁻¹]
Primo vetro	6,0	1,00	0,006
Intercapedine	-	-	0,127
Secondo vetro	6,0	1,00	0,006

Descrizione della finestra: Finestra tipo 2

Codice: W4



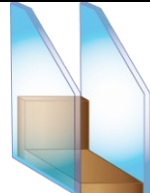
Dimensioni del serramento

Larghezza **120,0** cm
Altezza **150,0** cm

Caratteristiche del telaio

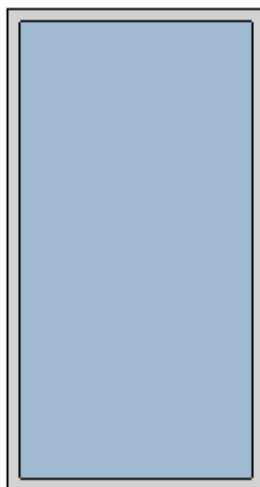
Trasmittanza termica del telaio U_f **2,80** W/m²K
K distanziale K_d **0,08** W/mK
Area totale A_w **1,800** m²
Area vetro A_g **1,590** m²
Area telaio A_f **0,210** m²
Fattore telaio F_f **0,12** -

Stratigrafia del pacchetto vetrato

Descrizione strato	s [mm]	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	R [m ² KW ⁻¹]	
Primo vetro	6,0	1,00	0,006	
Intercapedine	-	-	0,127	
Secondo vetro	6,0	1,00	0,006	

Descrizione della finestra: Finestra tipo 3

Codice: W5



Dimensioni del serramento

Larghezza **80,0** cm
 Altezza **150,0** cm

Caratteristiche del telaio

Trasmittanza termica del telaio U_f **2,80** W/m²K
 Ponte termico distanziale ψ_d **0,08** W/mK
 Area totale A_w **1,200** m²
 Area vetro A_g **1,022** m²
 Area telaio A_f **0,178** m²
 Fattore telaio F_f **0,15** -

Stratigrafia del pacchetto vetrato

Descrizione strato	s [mm]	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	R [m ² KW ⁻¹]	
Primo vetro	6,0	1,00	0,006	
Intercapedine	-	-	0,127	
Secondo vetro	6,0	1,00	0,006	

Appendice B - Dati di input nel calcolo del fabbisogno di energia degli impianti

Sono di seguito presentati i dati necessari per il calcolo del fabbisogno di energia termica erogata degli impianti.

Tabella 22. Legenda colorimetrica dei dati di input

Legenda	
	Dati di input della scheda tecnica della macchina/dell'accumulo
	Variabili di input
	Altri parametri di input
	Parametri da appendice (o valori tabellari)

Tabella 23. Dati di input per il calcolo dei fabbisogni di energia erogata dalla pompa di calore

Nome	Simbolo	Udm	Tipologia dato
Energia termica prevista per l'intervallo di calcolo considerato	$Q_{H,gn,req,ic}$	[kWh]	
Temperatura limite operativo minima sorgente fredda	$\theta_{f,TOL,min}$	[°C]	
Temperatura limite operativo massima sorgente fredda	$\theta_{f,TOL,max}$	[°C]	
Temperatura limite operativo minima pozzo caldo	$\theta_{c,TOL,min}$	[°C]	
Temperatura limite operativo massima pozzo caldo	$\theta_{c,TOL,max}$	[°C]	
Temperatura della sorgente fredda	$\theta_{H,f}$	[°C]	
Temperatura del pozzo caldo	$\theta_{H,c}$	[°C]	
Temperatura di cut-off minima sorgente fredda	$\theta_{f,cut-off,min}$	[°C]	
Temperatura di cut-off massima sorgente fredda	$\theta_{f,cut-off,max}$	[°C]	
Temperatura di cut-off minima pozzo caldo	$\theta_{c,cut-off,min}$	[°C]	
Temperatura di cut-off massima pozzo caldo	$\theta_{c,cut-off,max}$	[°C]	
Temperatura dell'aria esterna	θ_e	[°C]	
Differenza tra la temperatura al pozzo caldo e la temperatura della sorgente fredda	$\Delta\theta_{f-c,min}$	[°C]	
COP a pieno carico	$COP_{H,LR=1}$	[-]	
Potenza termica massima in modulazione	$\Phi_{H,pdc,out,max}$	[kW]	
Grado minimo di modulazione della pompa di calore	$\delta\varphi$	[%]	
Coefficiente di correzione del COP e del GUE a pieno carico in funzione del fattore di carico LR della macchina	Fc	[-]	
Coefficiente correttivo dichiarato dal produttore	Cd		
Coefficiente correttivo dichiarato dal produttore	Cc		
Potenza degli ausiliari elettrici esterni alla pompa di calore non contemplati nel COP o nel GUE della macchina	$W_{H,aux,ext}$	[kW]	
Potenza degli ausiliari elettrici della pompa di calore non contemplati nel COP o nel GUE della macchina	$W_{H,aux,hp}$	[kW]	

Tabella 24. Dati di input per il calcolo dei fabbisogni di energia erogata dal gruppo frigorifero

Nome	Simbolo	Udm	Tipologia dato
Fattore di carico parziale dell'unità di refrigerazione ad uno specifico carico parziale	$f_{C;PL;k}$	[-]	
Fattore di free-cooling	$f_{hr;fc}$	[-]	
Fattore per unità di refrigerazione multipla	$f_{C;mult}$	[-]	
Potenza termica nominale estratta dal sistema di distribuzione dall'unità di refrigerazione	$\Phi_{C;gen;in}$	[kW]	
Energia estratta dal sistema di generazione	$Q_{C;gen;in;req}$	[kWh]	
Intervallo di tempo della generazione frigorifera	$t_{C;gen;op}$	[h]	
Temperatura di riferimento assoluta	$T_{0;abs}$	[K]	
Temperatura richiesta in uscita dal gruppo frigorifero	$\theta_{C;gen;req;out}$	[°C]	
Temperatura richiesta in uscita dal gruppo frigorifero in condizioni nominali	$\theta_{C;gen;req;out;n}$	[°C]	
Temperatura richiesta in ingresso al sistema di smaltimento del calore in condizioni nominali	$\theta_{C;gen;hr;req;in;n}$	[°C]	
Differenza di temperature nell'evaporatore	$\Delta\theta_{evap}$	[K]	
Differenza di temperatura nel condensatore	$\Delta\theta_{cond}$	[K]	
Temperatura dell'acqua di raffreddamento fornita al sistema di smaltimento del calore in condizioni di riferimento	$\theta_{C;wat;hr;in;ref}$	[°C]	
Temperatura dell'acqua di raffreddamento fornita al sistema di smaltimento di calore alla potenza nominale	$\theta_{C;wat;hr;in;n}$	[°C]	
Coefficiente per il calcolo del fattore di carico parziale del sistema di smaltimento del calore	a_0	[-]	
Coefficiente per il calcolo del fattore di carico parziale del sistema di smaltimento del calore	a_1	[°C ⁻¹]	
Coefficiente per il calcolo del fattore di carico parziale del sistema di smaltimento del calore	a_2	[°C ⁻²]	
Temperatura di riferimento dell'acqua di raffreddamento in uscita dal sistema di smaltimento del calore	$\theta_{C;wat;hr;out;ref}$	[°C]	
Limite inferiore della temperatura dell'acqua in ingresso nel sistema di smaltimento del calore	$\theta_{C;wat;hr;in;limit}$	[°C]	
Potenza termica nominale del sistema di smaltimento del calore	$\Phi_{hr;n}$	[kW]	
Energia termica richiesta per il recupero	$Q_{C;gen;out;req}$	[kWh]	
Temperatura media di bulbo umido dell'aria esterna durante il funzionamento nell'intervallo di calcolo	$\theta_{e;wb}$	[°C]	
EER nominale	EER_n	[-]	
Potenza elettrica specifica richiesta dal sistema di smaltimento del calore	$\rho_{hr;el}$	[kW/kW]	
Fattore di carico parziale elettrico del sistema di smaltimento del calore	$f_{hr;PL;el}$	[-]	
Fattore di free-cooling elettrico	$f_{hr;fc;el}$	[-]	
Potenza elettrica richiesta dal sistema di controllo	$P_{ctrl;el;j}$	[kW]	
Potenza elettrica specifica richiesta dal sistema di distribuzione	$\rho_{dis;el}$	[kW/kW]	

Tabella 25. Dati di input per il calcolo dei fabbisogni di termica erogata dalla caldaia

Nome	Simbolo	Udm	Tipologia dato
Potenza nominale del generatore di calore	P_n	[kW]	
Coefficiente per il calcolo del rendimento di generazione	C_1	[-]	
Coefficiente per il calcolo del rendimento di generazione	C_2	[-]	
Coefficiente per il calcolo del rendimento di generazione	C_3	[-]	
Coefficiente per il calcolo del rendimento di generazione	C_4	[-]	
Coefficiente per il calcolo delle perdite con generatore di calore in stand-by	C_5	[-]	
Coefficiente per il calcolo delle perdite con generatore di calore in stand-by	C_6	[-]	
Coefficiente per il calcolo della potenza assorbita dagli ausiliari	C_7	[W]	
Coefficiente per il calcolo della potenza assorbita dagli ausiliari	C_8	[W]	
Fattore di correzione a carico totale	$f_{corr;Pn}$	[-]	
Fattore di correzione a carico parziale	$f_{corr;Pint}$	[-]	
Temperatura media dell'acqua a pieno carico	$\theta_{gen;test;Pn}$	[°C]	
Temperatura media dell'acqua a carico parziale	$\theta_{gen;test;Pint}$	[°C]	
Temperatura media dell'acqua a carico nullo	$\theta_{gen;test;P0}$	[°C]	
Temperatura media dell'acqua nel generatore (o temperature di ritorno nel caso di generatori a condensazione)	$\theta_{Hc;mn}$	[°C]	
Rapporto tra potere calorifico superiore e inferiore	$f_{Hs/Hi}$	[-]	
Temperatura del locale di installazione	θ_{brm}	[°C]	
Fattore di riduzione della temperatura	f_{brm}	[-]	
Frazione delle perdite in stand-by attribuita a perdite al mantello	f_{env}	[-]	
Frazione dell'energia ausiliaria trasmessa al fluido termovettore	$f_{aux;rvd}$	[-]	
Fattore di controllo della temperatura	$f_{ctr;ls}$	[-]	
Energia termica fornita al sistema di distribuzione	$Q_{H;dis;in}$	[kWh]	

Curriculum scientifico dei componenti del gruppo di lavoro

prof. Vincenzo Corrado

Ingegnere civile, professore ordinario di *fisica tecnica ambientale* presso il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino, dove è responsabile di un'unità di ricerca del gruppo di ricerca TEBE (*Technology Energy Building Environment*). 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*).

prof. Ilaria Ballarini

Laureata in Architettura e Dottore di Ricerca in *Innovazione Tecnologica per l'Ambiente costruito* presso il Politecnico di Torino. È professore associato di *fisica tecnica ambientale* presso il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino, gruppo di ricerca TEBE (*Technology Energy Building Environment*). Svolge attività di ricerca nel campo della fisica 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.

ing. Franz Bianco Mauthe Degerfeld

Ingegnere, Laurea Magistrale in Ingegneria dei sistemi edilizi presso il Politecnico di Torino. Attualmente è assegnista di ricerca presso il Politecnico di Torino, Dipartimento di Energia. L'attività di ricerca si sviluppa nell'ambito del programma di ricerca "Ambiente interno e energia degli edifici (acronimo IIEB)", in particolare è focalizzata alle attività di simulazione energetica dinamica degli edifici, validazione di modelli e ottimizzazione energetica ed economica di progetti di nuovi edifici e di riqualificazione.

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 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 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".