



**Politecnico  
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

**Modellazione energetica del patrimonio  
edilizio urbano: approcci bottom-up  
basati su metodi ingegneristici mediante  
l'utilizzo di archetipi.**

**Relatori**

Prof. Ilaria BALLARINI

Prof. Vincenzo CORRADO

Ing. Matteo PIRO

**Candidato**

Alessio CAPUTO

ANNO ACCADEMICO 2025-2026

## Sommario

Questa tesi propone una metodologia di *Urban Building Energy Modeling* (UBEM) finalizzata a supportare la pianificazione energetica urbana e l'analisi di scenari di riqualificazione del patrimonio edilizio esistente, nel quadro degli obiettivi europei delineati dal *Renovation Plan* e dalla Direttiva (UE) 2024/1275 (EPBD IV). L'approccio adottato è di tipo bottom-up e si basa sull'impiego di archetipi edilizi e di parametri derivati da standard tecnici, al fine di rappresentare in modo scalabile la variabilità tipologica del costruito e ridurre i requisiti informativi tipici delle simulazioni ad alto dettaglio.

Il modello energetico urbano è implementato tramite *CitySim Solver*, mediante simulazioni dinamiche a passo orario e successivo *post-processing* degli output per ricavare indicatori annuali e aggregazioni su più edifici. La metodologia comprende: definizione e assegnazione delle proprietà termo-fisiche e dei profili d'uso; impostazione dei servizi energetici (nel presente lavoro si considerano riscaldamento e acqua calda sanitaria, con estensione successiva alla valutazione di eventuali contributi da fonti rinnovabili); calcolo dei fabbisogni energetici (in termini ideali) per riscaldamento, raffrescamento e ACS; costruzione di un set coerente di indicatori per il confronto tra scenari. L'applicazione a un caso studio nell'area metropolitana di Torino consente di discutere criticità tipiche dell'UBEM, tra cui disponibilità e qualità dei dati, assunzioni sugli impianti e sensibilità dei risultati, e di valutare l'effetto di pacchetti di intervento su involucro e sistemi di generazione.

I risultati mostrano come l'approccio UBEM, pur non sovrapponibile alle procedure di calcolo normativo edificio-per-edificio, sia efficace nel fornire stime comparabili e riproducibili per l'analisi di scenario, evidenziando priorità d'intervento e ordini di grandezza dei benefici energetici a scala urbana. La tesi si conclude con una riflessione sui limiti metodologici e sulle prospettive di integrazione con basi dati territoriali e strumenti di supporto alle politiche di decarbonizzazione del costruito.

# Indice

|                                                                                           |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Elenco delle figure</b>                                                                | <b>5</b>  |
| <b>Elenco delle tabelle</b>                                                               | <b>9</b>  |
| <b>1 Introduzione</b>                                                                     | <b>13</b> |
| 1.1 Obiettivi della tesi . . . . .                                                        | 14        |
| 1.2 Nota metodologica sugli indicatori . . . . .                                          | 14        |
| 1.3 Struttura della tesi . . . . .                                                        | 15        |
| <b>2 Piano nazionale ed europeo di ristrutturazione del patrimonio edilizio esistente</b> | <b>17</b> |
| 2.1 Evoluzione normativa e quadro strategico europeo . . . . .                            | 18        |
| 2.2 Direttiva 2024/1275 (EPBD IV): struttura e obiettivi . . . . .                        | 19        |
| 2.2.1 Struttura . . . . .                                                                 | 19        |
| 2.2.2 Definizioni chiave introdotte dalla direttiva . . . . .                             | 20        |
| 2.2.3 Obiettivi principali . . . . .                                                      | 21        |
| <b>3 <i>Urban Building Energy Modeling</i></b>                                            | <b>23</b> |
| 3.1 Approccio <i>Top-Down</i> . . . . .                                                   | 23        |
| 3.2 Approccio <i>Bottom-Up</i> . . . . .                                                  | 25        |
| 3.2.1 <i>Data-driven</i> . . . . .                                                        | 26        |
| 3.2.2 Modelli ingegneristici . . . . .                                                    | 26        |
| 3.2.3 Modelli ibridi . . . . .                                                            | 28        |
| <b>4 Definizione di archetipo edilizio in progetti di ricerca</b>                         | <b>29</b> |
| 4.1 Selezione delle variabili rilevanti contenute negli APE . . . . .                     | 30        |
| 4.2 <i>Data clustering</i> . . . . .                                                      | 31        |
| 4.3 Valutazione della qualità dei dati . . . . .                                          | 32        |
| 4.4 Analisi statistica . . . . .                                                          | 32        |
| 4.5 Definizione degli edifici di riferimento . . . . .                                    | 33        |
| <b>5 Strumento di simulazione energetica a scala urbana: <i>CitySim</i></b>               | <b>35</b> |
| 5.1 Dati in ingresso . . . . .                                                            | 36        |
| 5.2 Simulazione e risultati . . . . .                                                     | 37        |

|          |                                                                                                    |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>6</b> | <b>Metodologia</b>                                                                                 | <b>39</b> |
| 6.1      | Valutazione della qualità dei dati in ingresso . . . . .                                           | 40        |
| 6.2      | Dati climatici . . . . .                                                                           | 42        |
| 6.3      | Dati geometrici . . . . .                                                                          | 42        |
| 6.4      | Dati generali sugli edifici . . . . .                                                              | 43        |
| 6.5      | Dati sulle caratteristiche dell'involucro . . . . .                                                | 43        |
| 6.5.1    | Dati sull'involucro trasparente . . . . .                                                          | 43        |
| 6.5.2    | Dati sull'involucro opaco . . . . .                                                                | 44        |
| 6.6      | Dati sulla modalità di utilizzo degli edifici . . . . .                                            | 44        |
| 6.6.1    | Caratteristiche generali di modalità di utilizzo degli edifici . . . . .                           | 45        |
| 6.6.2    | Censimento degli apporti interni e relativi profili . . . . .                                      | 45        |
| 6.7      | Dati relativi ai servizi energetici degli edifici modellati . . . . .                              | 45        |
| 6.8      | Simulazione e trattamento dei risultati . . . . .                                                  | 46        |
| <b>7</b> | <b>Implementazione</b>                                                                             | <b>49</b> |
| 7.1      | Presentazione del caso studio . . . . .                                                            | 49        |
| 7.2      | Dati climatici . . . . .                                                                           | 51        |
| 7.2.1    | Definizione dei dati climatici e indici di qualità associati . . . . .                             | 53        |
| 7.3      | Geometria del modello . . . . .                                                                    | 54        |
| 7.3.1    | Definizioni dei dati geometrici e indici di qualità associati . . . . .                            | 56        |
| 7.4      | Caratteristiche generali degli edifici . . . . .                                                   | 56        |
| 7.4.1    | Definizione dei dati e indici di qualità associati . . . . .                                       | 61        |
| 7.5      | Caratteristiche dell'involucro . . . . .                                                           | 63        |
| 7.5.1    | Involucro trasparente . . . . .                                                                    | 63        |
| 7.5.2    | Involucro opaco . . . . .                                                                          | 64        |
| 7.5.3    | Definizione dei dati relativi all'involucro edilizio e indici di qualità associati . . . . .       | 70        |
| 7.6      | Apporti interni e profili di utilizzo . . . . .                                                    | 72        |
| 7.6.1    | Occupazione . . . . .                                                                              | 72        |
| 7.6.2    | Apparecchiature e illuminazione . . . . .                                                          | 75        |
| 7.6.3    | Occupazione corretta . . . . .                                                                     | 77        |
| 7.6.4    | Definizione dei dati relativi agli apporti interni e indici di qualità associati . . . . .         | 81        |
| 7.7      | Riscaldamento . . . . .                                                                            | 83        |
| 7.7.1    | Sottosistemi di emissione e regolazione . . . . .                                                  | 84        |
| 7.7.2    | Sottosistema di distribuzione . . . . .                                                            | 86        |
| 7.7.3    | Sottosistema di generazione . . . . .                                                              | 88        |
| 7.7.4    | Definizione dei dati relativi al servizio di riscaldamento e indici di qualità associati . . . . . | 92        |
| 7.8      | Produzione di acqua calda sanitaria . . . . .                                                      | 94        |
| 7.8.1    | Stima dei fabbisogni giornalieri di acqua calda sanitaria . . . . .                                | 94        |
| 7.8.2    | Profili di utilizzo di ACS . . . . .                                                               | 95        |
| 7.8.3    | Modellazione energetica del servizio di ACS . . . . .                                              | 96        |

|           |                                                                                                                         |            |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.8.4     | Definizione dei dati relativi al servizio di produzione di ACS e<br>indici di qualità associati . . . . .               | 101        |
| <b>8</b>  | <b>Risultati</b>                                                                                                        | <b>103</b> |
| 8.1       | Post-processing . . . . .                                                                                               | 104        |
| 8.1.1     | Estrapolazione dei fabbisogni di ACS . . . . .                                                                          | 105        |
| 8.1.2     | Determinazione dei fabbisogni termici utili . . . . .                                                                   | 106        |
| 8.1.3     | Determinazione della prestazione energetica per i diversi servizi<br>energetici . . . . .                               | 106        |
| 8.2       | Validazione dei risultati . . . . .                                                                                     | 110        |
| 8.2.1     | Riscaldamento . . . . .                                                                                                 | 110        |
| 8.2.2     | Raffrescamento . . . . .                                                                                                | 113        |
| 8.2.3     | Acqua calda sanitaria . . . . .                                                                                         | 115        |
| 8.3       | Analisi dei risultati . . . . .                                                                                         | 116        |
| 8.3.1     | Riscaldamento . . . . .                                                                                                 | 118        |
| 8.3.2     | Produzione di ACS . . . . .                                                                                             | 123        |
| 8.3.3     | Fabbisogni di raffrescamento . . . . .                                                                                  | 124        |
| 8.4       | Incertezza associata ai dati . . . . .                                                                                  | 126        |
| <b>9</b>  | <b>Scenari di efficientamento energetico del patrimonio edilizio</b>                                                    | <b>129</b> |
| 9.1       | Interventi sull'involucro edilizio . . . . .                                                                            | 129        |
| 9.1.1     | Involucro trasparente . . . . .                                                                                         | 132        |
| 9.1.2     | Involucro opaco . . . . .                                                                                               | 133        |
| 9.1.3     | Intervento combinato sull'involucro . . . . .                                                                           | 135        |
| 9.2       | Interventi sugli impianti tecnici . . . . .                                                                             | 137        |
| 9.2.1     | Scenario 1: Intervento afferente il solo impianto di riscaldamento .                                                    | 138        |
| 9.2.2     | Scenario 2: Generatore unico per riscaldamento e ACS . . . . .                                                          | 142        |
| 9.2.3     | Scenario 3: Sostituzione dei generatori per il servizio di riscaldamento<br>e per il servizio di ACS autonomo . . . . . | 147        |
| 9.2.4     | Scenario 4: Generatore combinato per riscaldamento e ACS con<br>saturazione della superficie fotovoltaica . . . . .     | 149        |
| 9.2.5     | Confronto dei risultati tra i vari scenari . . . . .                                                                    | 151        |
| 9.3       | Intervento combinato su impianti e involucro . . . . .                                                                  | 155        |
| <b>10</b> | <b>Conclusioni</b>                                                                                                      | <b>159</b> |
| 10.1      | Sintesi del contributo della tesi . . . . .                                                                             | 159        |
| 10.2      | Coerenza fisica e interpretazione dei risultati nello stato di fatto . . . . .                                          | 160        |
| 10.3      | Evidenze chiave dagli scenari: involucro . . . . .                                                                      | 160        |
| 10.4      | Evidenze chiave dagli scenari: impianti e rinnovabili . . . . .                                                         | 161        |
| 10.5      | Intervento combinato: impianti e involucro . . . . .                                                                    | 161        |
| 10.6      | Implicazioni per la pianificazione . . . . .                                                                            | 162        |
| 10.7      | Limiti e prospettive di sviluppo . . . . .                                                                              | 162        |
| 10.8      | Chiusura . . . . .                                                                                                      | 162        |

# Elenco delle figure

|      |                                                                                                                                                                                                 |    |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1  | Situazione attuale dei consumi energetici degli edifici nello scenario europeo [31]. . . . .                                                                                                    | 18 |
| 3.1  | Classificazione dei modelli energetici urbani. [24] . . . . .                                                                                                                                   | 24 |
| 4.1  | Metodologia per la creazione degli archetipi. [26] . . . . .                                                                                                                                    | 30 |
| 4.2  | Clustering dei dati ricavati dagli APE [26] . . . . .                                                                                                                                           | 31 |
| 4.3  | Esempio di rappresentazione grafica per l'approccio quantitativo. [26] . . . . .                                                                                                                | 33 |
| 5.1  | Alcuni esempi di input richiesti da CitySim. [6] . . . . .                                                                                                                                      | 37 |
| 6.1  | Matrice per l'assegnazione delle etichette di qualità dei dati, tratta dal progetto URBEM [28]. . . . .                                                                                         | 40 |
| 7.1  | Immagine satellitare dell'isolato di riferimento (nord in alto). . . . .                                                                                                                        | 50 |
| 7.2  | Boxplot delle distribuzioni mensili della temperatura dell'aria esterna. . . . .                                                                                                                | 52 |
| 7.3  | Boxplot delle distribuzioni mensili dell'irradianza solare diretta su piano orizzontale. . . . .                                                                                                | 52 |
| 7.4  | Boxplot delle distribuzioni mensili dell'irradianza solare diffusa su piano orizzontale. . . . .                                                                                                | 53 |
| 7.5  | Immagine dell'isolato di riferimento dal Geoportale della Città di Torino [29]. . . . .                                                                                                         | 54 |
| 7.6  | Modello geometrico implementato in SketchUp mediante estrusione delle impronte in pianta. . . . .                                                                                               | 55 |
| 7.7  | Geometria del modello visualizzata attraverso l'interfaccia di CitySim dopo l'importazione del file DXF. . . . .                                                                                | 56 |
| 7.8  | Funzione sigmoideale utilizzata da CitySim per regolare i dispositivi di schermatura. [41] . . . . .                                                                                            | 59 |
| 7.9  | Schema del ciclo di isteresi per il controllo dei dispositivi di ombreggiamento in funzione dell'irraggiamento incidente, secondo l'Allegato Nazionale della UNI EN ISO 52016-1. [17] . . . . . | 60 |
| 7.10 | Profilo giornaliero di occupazione per edifici residenziali nei giorni feriali (Prospetto NA.26b, Allegato Nazionale UNI EN 16798-1 [20]). . . . .                                              | 74 |

|      |                                                                                                                                                                                                           |     |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.11 | Profilo giornaliero di occupazione per edifici residenziali nel weekend (Prospetto NA.26b, Allegato Nazionale UNI EN 16798-1 [20]). . . . .                                                               | 74  |
| 7.12 | Profilo giornaliero di occupazione per edificio alberghiero (Prospetto NA.26g, Allegato Nazionale UNI EN 16798-1 [20]). . . . .                                                                           | 75  |
| 7.13 | Profilo giornaliero di utilizzo delle apparecchiature per edifici residenziali (UNI EN 16798-1 [19]). . . . .                                                                                             | 76  |
| 7.14 | Profilo giornaliero di utilizzo dell'illuminazione artificiale per edifici residenziali (UNI EN 16798-1 [19]). . . . .                                                                                    | 77  |
| 7.15 | Confronto tra profilo di occupazione, profilo di utilizzo delle apparecchiature e profilo di occupazione corretto per l'edificio A8 (giorno feriale). . .                                                 | 79  |
| 7.16 | Confronto tra profilo di occupazione, profilo di utilizzo delle apparecchiature e profilo di occupazione corretto per l'edificio A7 (giorno feriale). . .                                                 | 80  |
| 7.17 | Andamento dell'RMSE tra profilo di occupazione di base e profilo corretto in funzione di $\Delta q_{\text{int},(\text{OC-eq})}$ [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] (edifici residenziali). . . . .                 | 80  |
| 7.18 | Confronto tra profilo di occupazione, profilo di utilizzo delle apparecchiature e profilo di occupazione corretto per l'edificio A7 (weekend). . . . .                                                    | 81  |
| 7.19 | Confronto tra profilo di occupazione, profilo di utilizzo delle apparecchiature e profilo di occupazione corretto per l'edificio alberghiero. . . . .                                                     | 81  |
| 7.20 | Esempio (edificio A7, giorno feriale): confronto tra profilo di occupazione corretto, profilo standard di utilizzo dell'ACS [20] e profilo di utilizzo corretto per l'implementazione in CitySim. . . . . | 96  |
| 8.1  | Primo estratto della Tabella 1 dell'Allegato 1 del DM 28 ottobre 2025 [37].                                                                                                                               | 107 |
| 8.2  | Secondo estratto della Tabella 1 dell'Allegato 1 del DM 28 ottobre 2025 [37]. . . . .                                                                                                                     | 108 |
| 8.3  | Andamento mensile dei valori di $EP_{\text{H,nd}}$ e $EP_{\text{H,tot}}$ per l'intero complesso.                                                                                                          | 110 |
| 8.4  | Boxplot mensile delle differenze orarie tra temperatura interna ed esterna, utilizzate per il calcolo dei gradi-giorno invernali. . . . .                                                                 | 111 |
| 8.5  | Relazione tra $EP_{\text{H,nd}}$ mensile del complesso e gradi-giorno mensili cumulati.                                                                                                                   | 111 |
| 8.6  | Andamenti dei fabbisogni di riscaldamento soddisfatti, dell'energia in ingresso al servizio e della corrispondente energia primaria per l'edificio A1 (gas naturale). . . . .                             | 112 |
| 8.7  | Andamenti dei fabbisogni di riscaldamento soddisfatti, dell'energia in ingresso al servizio e della corrispondente energia primaria per l'edificio A9 (teleriscaldamento). . . . .                        | 113 |
| 8.8  | Andamento mensile dei valori di $EP_{\text{C,nd}}$ per l'intero complesso. . . . .                                                                                                                        | 114 |
| 8.9  | Boxplot mensile delle differenze orarie tra temperatura esterna e temperatura interna di riferimento per il raffrescamento. . . . .                                                                       | 114 |
| 8.10 | Relazione tra fabbisogni annuali di ACS e superficie utile limitatamente agli edifici residenziali. . . . .                                                                                               | 116 |
| 8.11 | Scomposizione dei valori di $EP_{\text{tot}}$ tra riscaldamento e ACS per ciascun edificio. . . . .                                                                                                       | 117 |

|      |                                                                                                                                                             |     |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.12 | Valori annuali di $EP_{H,tot}$ per edificio, con scomposizione nelle quote rinnovabile e non rinnovabile. . . . .                                           | 119 |
| 8.13 | Valori annuali di $EP_{H,nd}$ per edificio. . . . .                                                                                                         | 120 |
| 8.14 | Correlazione tra $EP_{H,nd}$ e l'indicatore sintetico che combina i contributi di trasmissione e ventilazione, per i soli edifici residenziali. . . . .     | 122 |
| 8.15 | Valori annuali di $EP_{W,tot}$ per edificio, con suddivisione tra quota rinnovabile e non rinnovabile. . . . .                                              | 124 |
| 8.16 | Valori annuali di $EP_{C,nd}$ per edificio. . . . .                                                                                                         | 125 |
| 8.17 | Distribuzione di frequenza degli indici di qualità utilizzati per i dati di input. . . . .                                                                  | 126 |
| 9.1  | Confronto dei valori di $EP_{H,nd}$ per i tre assetti di intervento sull'involucro: solo trasparente, solo opaco e combinato. . . . .                       | 130 |
| 9.2  | Confronto dei valori di $EP_{H,tot}$ e $EP_{tot}$ per i diversi livelli di intervento nei casi solo trasparente, solo opaco e combinato. . . . .            | 131 |
| 9.3  | Valori di $EP_{H,tot}$ per ciascun edificio nei diversi scenari di intervento sull'involucro trasparente. . . . .                                           | 132 |
| 9.4  | Valori di $EP_{tot}$ per ciascun edificio nei diversi scenari di intervento sull'involucro trasparente. . . . .                                             | 133 |
| 9.5  | Valori di $EP_{H,tot}$ per ciascun edificio nei diversi scenari di intervento sull'involucro opaco. . . . .                                                 | 134 |
| 9.6  | Valori di $EP_{tot}$ per ciascun edificio nei diversi scenari di intervento sull'involucro opaco. . . . .                                                   | 134 |
| 9.7  | Confronto tra i valori medi di $EP_{H,nd}$ e $EP_{C,nd}$ nei diversi scenari di intervento sull'involucro opaco. . . . .                                    | 135 |
| 9.8  | Valori di $EP_{H,tot}$ per ciascun edificio nei diversi scenari di intervento combinato sull'involucro. . . . .                                             | 136 |
| 9.9  | Valori di $EP_{tot}$ per ciascun edificio nei diversi scenari di intervento combinato sull'involucro. . . . .                                               | 136 |
| 9.10 | Relazione statistica tra volume dell'accumulo ACS e potenza termica dispersa, ricavata dall'analisi di schede tecniche di diversi produttori. . . .         | 143 |
| 9.11 | Confronto tra i valori medi di $EP_{H,tot}$ , $EP_{W,tot}$ ed $EP_{tot}$ del complesso nei diversi scenari impiantistici. . . . .                           | 151 |
| 9.12 | Confronto della quota di energia rinnovabile $RER$ del complesso nei diversi scenari impiantistici. . . . .                                                 | 152 |
| 9.13 | Confronto dei valori di $EP_{tot}$ per ciascun edificio nei diversi scenari impiantistici. . . . .                                                          | 153 |
| 9.14 | Confronto della quota di energia rinnovabile $RER$ per ciascun edificio nei diversi scenari impiantistici. . . . .                                          | 154 |
| 9.15 | Confronto dei valori di $EP_{H,tot}$ per ciascun edificio nei diversi scenari impiantistici. . . . .                                                        | 154 |
| 9.16 | Confronto tra i valori di $EP_{tot}$ ante e post intervento per ciascun edificio e per il complesso nello scenario combinato su involucro e impianti. . . . | 157 |

|                                                                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9.17 Confronto della quota di energia rinnovabile ( <i>RER</i> ) ante e post intervento per ciascun edificio e per il complesso nello scenario combinato su involucro e impianti. . . . . | 158 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

# Elenco delle tabelle

|      |                                                                                                                                        |    |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.1  | Indici di qualità, fonte e modalità di acquisizione dei dati climatici utilizzati.                                                     | 53 |
| 7.2  | Indici di qualità, fonte e modalità di acquisizione dei dati geometrici utilizzati. . . . .                                            | 56 |
| 7.3  | Caratteristiche tipologiche degli edifici dell'isolato . . . . .                                                                       | 57 |
| 7.4  | Parametri geometrici e superfici degli edifici dell'isolato . . . . .                                                                  | 58 |
| 7.5  | Parametri di esercizio e controllo adottati per gli edifici dell'isolato . . . .                                                       | 60 |
| 7.6  | Indici di qualità, fonte e modalità di acquisizione dei principali dati di input (per edificio). . . . .                               | 62 |
| 7.7  | Valori di glazing ratio per edificio e orientamento. . . . .                                                                           | 63 |
| 7.8  | Parametri adottati per la componente trasparente: fattore solare $g$ e trasmittanza dei serramenti $U_W$ . . . . .                     | 64 |
| 7.9  | Stratigrafie e trasmittanze adottate per le chiusure opache. . . . .                                                                   | 66 |
| 7.10 | Stratigrafia MCV04: proprietà termo-fisiche degli strati e resistenze termiche. . . . .                                                | 67 |
| 7.11 | Stratigrafia COP04 (copertura piana): proprietà termo-fisiche degli strati e resistenze termiche. . . . .                              | 67 |
| 7.12 | Stratigrafia CIN04 (copertura inclinata): proprietà termo-fisiche degli strati e resistenze termiche. . . . .                          | 68 |
| 7.13 | Stratigrafia SOL04: proprietà termo-fisiche degli strati e resistenze termiche. . . . .                                                | 68 |
| 7.14 | Stratigrafia SOL04 <i>adjusted</i> (solaio su cantina): proprietà termo-fisiche degli strati e resistenze termiche. . . . .            | 69 |
| 7.15 | Indici di qualità, fonte e modalità di acquisizione dei dati relativi all'involucro opaco e trasparente (per edificio). . . . .        | 71 |
| 7.16 | Occupazione, frazione sensibile radiante e apporti interni dovuti all'occupazione (totale, latente e sensibile) per edificio. . . . .  | 73 |
| 7.17 | Superficie media delle unità e apporti interni equivalenti sensibili dovuti ad apparecchiature e illuminazione. . . . .                | 76 |
| 7.18 | Potenza termica interna complessiva sensibile, occupazione corretta e potenza latente corretta per occupante, per edificio. . . . .    | 78 |
| 7.19 | Indici di qualità, fonte e modalità di acquisizione dei dati relativi ad apporti interni e profili di utilizzo (per edificio). . . . . | 82 |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.20 | Parametri assunti per la modellazione del servizio di riscaldamento: potenza termica massima non limitante e rendimenti dei sottosistemi (emissione, regolazione, distribuzione, generazione) con rendimento medio stagionale complessivo $\eta_{th,H}$ . | 84  |
| 7.21 | Parametri assunti per il sottosistema di emissione del servizio di riscaldamento: terminali, carico medio annuo, temperatura di mandata e rendimento $\eta_{th,H,e}$ .                                                                                    | 85  |
| 7.22 | Parametri assunti per il sottosistema di regolazione/controllo del servizio di riscaldamento: tipologia di regolazione e rendimento $\eta_{th,H,c}$ .                                                                                                     | 86  |
| 7.23 | Parametri assunti per il sottosistema di distribuzione del servizio di riscaldamento: livello di isolamento delle tubazioni, numero di piani, temperature di progetto e rendimento $\eta_{th,H,d}$ .                                                      | 87  |
| 7.24 | Generatore e rendimento globale di generazione per la climatizzazione invernale $\eta_{th,H,g}$ .                                                                                                                                                         | 88  |
| 7.25 | Parametri e fattori correttivi per la determinazione del rendimento di generazione della caldaia $\eta_{th,H,g,caldaia}$ .                                                                                                                                | 89  |
| 7.26 | Parametri di esercizio e perdite della sottostazione di teleriscaldamento e rendimento globale di generazione $\eta_{th,H,g}$ .                                                                                                                           | 92  |
| 7.27 | Indici di qualità, fonte e modalità di acquisizione dei dati relativi al servizio di riscaldamento (per edificio).                                                                                                                                        | 93  |
| 7.28 | Parametri UNI/TS 11300-2 e volumi giornalieri di ACS stimati per gli edifici residenziali, a scala di appartamento, edificio e per occupante corretto.                                                                                                    | 95  |
| 7.29 | Parametri UNI/TS 11300-2 e volume giornaliero di ACS stimato per l'hotel (A5), a scala di edificio e per occupante corretto.                                                                                                                              | 95  |
| 7.30 | Tipologia di generatore per ACS e rendimento termico di generazione adottato.                                                                                                                                                                             | 99  |
| 7.31 | Parametri di input dell'accumulo ACS adottati in CitySim.                                                                                                                                                                                                 | 101 |
| 7.32 | Indici di qualità, fonte e modalità di acquisizione dei dati relativi al servizio di acqua calda sanitaria (per edificio).                                                                                                                                | 102 |
| 8.1  | Fattori di conversione in energia primaria adottati.                                                                                                                                                                                                      | 108 |
| 8.2  | Indici di prestazione energetica e quota rinnovabile (RER) per edificio.                                                                                                                                                                                  | 117 |
| 8.3  | Indicatori di prestazione energetica per il servizio di riscaldamento e vettore energetico adottato.                                                                                                                                                      | 118 |
| 8.4  | Volume lordo riscaldato, area disperdente e rapporto di compattezza ( $CR$ ) per edificio.                                                                                                                                                                | 121 |
| 8.5  | Tasso di ricambio d'aria ( $n$ ) e coefficiente globale di trasmissione per unità di superficie disperdente ( $H'_{T,e}$ ) per edificio.                                                                                                                  | 122 |
| 8.6  | Indicatori di prestazione energetica per il servizio di ACS e vettore energetico adottato.                                                                                                                                                                | 123 |
| 8.7  | Fabbisogni ideali areici di raffrescamento ( $EP_{C,nd}$ ) per edificio.                                                                                                                                                                                  | 125 |
| 8.8  | Distribuzione dei valori degli indici di qualità.                                                                                                                                                                                                         | 126 |

|      |                                                                                                                                                                   |     |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9.1  | Valori di trasmittanza termica $U$ ( $W/(m^2K)$ ) adottati per gli interventi sull'involucro nei diversi scenari. . . . .                                         | 130 |
| 9.2  | Parametri ed efficienze adottati per il servizio di riscaldamento nello Scenario 1, per ciascun edificio. . . . .                                                 | 138 |
| 9.3  | Parametri e risultati del dimensionamento degli impianti fotovoltaici per ciascun edificio. . . . .                                                               | 139 |
| 9.4  | Fattori di conversione in energia primaria per i vettori elettrici utilizzati nel post-processing. . . . .                                                        | 140 |
| 9.5  | Indicatori energetici annuali e quota rinnovabile (RER) per edificio. . . .                                                                                       | 141 |
| 9.6  | Parametri di dimensionamento dei preparatori di ACS e coefficienti di dispersione termica degli accumuli per ciascun edificio. . . . .                            | 143 |
| 9.7  | Indicatori energetici annuali e quota rinnovabile (RER) per edificio. . . .                                                                                       | 146 |
| 9.8  | Indicatori energetici annuali per il servizio di riscaldamento, ACS e totale, e quota di energia rinnovabile (RER) per ciascun edificio. . . . .                  | 148 |
| 9.9  | Dimensionamento degli impianti fotovoltaici nello Scenario 4 con saturazione della superficie disponibile in copertura. . . . .                                   | 149 |
| 9.10 | Indicatori energetici annuali per il servizio di riscaldamento, ACS e totale, e quota di energia rinnovabile (RER) per ciascun edificio nello Scenario 4. . . . . | 150 |
| 9.11 | Configurazione dei servizi energetici nei diversi scenari di intervento impiantistico. . . . .                                                                    | 151 |
| 9.12 | Indicatori energetici annuali e quota rinnovabile (RER) per edificio nello scenario combinato di intervento su involucro e impianti. . . . .                      | 156 |



# Capitolo 1

## Introduzione

Il patrimonio edilizio rappresenta uno degli snodi principali della transizione energetica europea, sia per il contributo degli edifici ai consumi finali e alle emissioni climalteranti, sia per l'elevata inerzia del parco immobiliare. La maggior parte degli edifici che saranno in uso nelle prossime decadi esiste già oggi e, in molti casi, presenta prestazioni energetiche insufficienti. In questo contesto, la riqualificazione del costruito assume un ruolo strategico non solo come misura di mitigazione climatica, ma anche come leva per ridurre l'esposizione ai consumi e orientare le politiche urbane verso traiettorie compatibili con gli obiettivi al 2050 perseguiti dall'Unione Europea.

Il quadro di riferimento più recente è rappresentato dalla Direttiva (UE) 2024/1275 (EPBD IV) [27], entrata in vigore l'8 maggio 2024, che aggiorna e rafforza l'impianto regolatorio europeo in materia di prestazione energetica degli edifici, introducendo nuovi obiettivi e strumenti. La direttiva costituisce inoltre una delle basi giuridiche per l'attuazione delle strategie europee di ristrutturazione del patrimonio edilizio, orientate a una progressiva decarbonizzazione del settore.

Parallelamente all'evoluzione normativa, cresce l'esigenza di strumenti quantitativi in grado di supportare decisioni pubbliche e strategie di intervento su scala urbana. Le politiche di riqualificazione richiedono infatti la capacità di stimare in modo coerente e confrontabile: (i) i fabbisogni energetici del costruito, (ii) l'impatto di pacchetti di intervento su involucro e impianti, e (iii) le possibili traiettorie di miglioramento, tenendo conto della forte eterogeneità tipologica del patrimonio edilizio. In tale prospettiva si colloca l'*Urban Building Energy Modeling* (UBEM), ossia l'insieme di metodi e strumenti finalizzati a modellare e simulare la domanda energetica di molti edifici contemporaneamente, perseguendo un compromesso tra dettaglio fisico, disponibilità dei dati e scalabilità computazionale.

Nella pratica UBEM, una delle criticità principali riguarda la disponibilità e la qualità dei dati di input. Per rendere trattabile la simulazione a scala urbana, è frequente ricorrere ad assunzioni semplificative (ad esempio, rappresentare ciascun edificio come una singola zona termica, oppure utilizzare un livello di dettaglio geometrico contenuto) e all'impiego di archetipi edilizi, ossia modelli rappresentativi che condensano caratteristiche termo-fisiche e profili d'uso in gruppi omogenei. Gli archetipi consentono di ridurre la

complessità del patrimonio reale preservandone, per quanto possibile, la rappresentatività statistica e tipologica; tuttavia introducono inevitabilmente una quota di incertezza, che deve essere esplicitata e gestita sia nella fase di modellazione sia nell'interpretazione dei risultati.

All'interno di questo quadro, la presente tesi propone e discute una metodologia operativa per costruire un modello energetico urbano di tipo *bottom-up*, basato su un approccio ingegneristico e sull'uso di archetipi, e ne verifica l'applicabilità attraverso un caso studio reale. La simulazione dinamica viene condotta con *CitySim Solver*, con risoluzione temporale oraria, consentendo di ottenere output per edificio successivamente aggregabili nel post-processing a scale superiori (isolato/quartiere). La metodologia risulta pertanto idonea a supportare analisi di scenario e valutazioni comparative tra misure di efficientamento.

## 1.1 Obiettivi della tesi

Gli obiettivi principali del lavoro possono essere sintetizzati come segue:

- inquadrare il tema della riqualificazione del patrimonio edilizio nel contesto europeo, con particolare riferimento alla Direttiva (UE) 2024/1275 (EPBD IV) [27] e alle politiche di trasformazione del parco immobiliare;
- descrivere i fondamenti dell'UBEM e il ruolo degli archetipi come strumento di semplificazione e scalabilità, evidenziandone criticità e implicazioni;
- implementare una metodologia di modellazione UBEM con lo strumento *CitySim Solver*, definendo criteri e fonti per dati climatici, geometria, parametri di esercizio e assegnazione delle proprietà energetiche;
- applicare la metodologia a un caso studio nell'area metropolitana di Torino, discutendo le criticità reali (dati mancanti, scelte di modellazione, assunzioni) e alcune strategie di mitigazione;
- valutare scenari di efficientamento su involucro e impianti e discuterne gli effetti su indicatori energetici annuali.

## 1.2 Nota metodologica sugli indicatori

Nel seguito del lavoro, gli indicatori energetici sono denominati in modo analogo a quelli impiegati in ambito normativo, poiché ne conservano il significato fisico (energia primaria normalizzata sulla superficie utile e confrontabilità tra vettori energetici). Tuttavia, essi non sono completamente sovrapponibili a quelli ottenuti mediante le procedure UNI/TS 11300, sia per la diversa natura dello strumento di simulazione dinamica, sia per aspetti di perimetro e di modellazione (ad esempio, la gestione degli ausiliari e alcune assunzioni sui profili d'uso). La UNI/TS 11300, inoltre, è concepita principalmente per la valutazione del singolo edificio; nel presente lavoro viene pertanto utilizzata soprattutto come

riferimento per impostare assunzioni e parametri omogenei in presenza di informazioni limitate, coerentemente con lo scopo UBEM dello studio.

## 1.3 Struttura della tesi

Il lavoro è organizzato come segue. Il Capitolo 2 inquadra l'evoluzione normativa e gli obiettivi della EPBD IV. Il Capitolo 3 introduce i principali approcci UBEM e le logiche *top-down/bottom-up*. Il Capitolo 4 discute il concetto di archetipo e la metodologia generale per la loro definizione a partire dai certificati energetici, presentando un esempio tratto dal progetto TIMEPAC [26]. Il Capitolo 5 presenta lo strumento utilizzato per lo studio, ovvero *CitySim*, i dati di input richiesti e gli output disponibili. Il Capitolo 6 descrive la metodologia proposta per la costruzione di un UBEM. I capitoli successivi illustrano il caso studio, l'implementazione del modello, il post-processing degli output e l'analisi degli scenari di efficientamento, discutendo criticità, risultati e implicazioni per la pianificazione energetica urbana.



## Capitolo 2

# Piano nazionale ed europeo di ristrutturazione del patrimonio edilizio esistente

Il patrimonio edilizio europeo rappresenta una delle principali sfide e opportunità nella lotta al cambiamento climatico. Gli edifici sono responsabili di circa il 40% del consumo energetico finale e del 36% delle emissioni di gas a effetto serra associate all'energia nell'Unione Europea. La grande maggioranza di questi edifici, circa il 75%, è ritenuta inefficiente dal punto di vista energetico, e, considerato che il 90% sarà ancora in uso nel 2050, la riqualificazione del patrimonio edilizio esistente è diventata una priorità strategica. [27] È in questo contesto che si inserisce la Direttiva (UE) 2024/1275, rifusione della precedente Direttiva 2010/31/UE, che rappresenta l'ultimo e più ambizioso sviluppo normativo europeo nel campo della prestazione energetica degli edifici. Essa costituisce la base giuridica del cosiddetto Renovation Plan europeo, con l'obiettivo dichiarato di trasformare il parco immobiliare europeo in un parco a zero emissioni entro il 2050. [27]



Figura 2.1. Situazione attuale dei consumi energetici degli edifici nello scenario europeo [31].

## 2.1 Evoluzione normativa e quadro strategico europeo

L'attuale quadro normativo europeo in materia di efficienza energetica degli edifici trova le sue origini nella Direttiva 2002/91/CE (Energy Performance of Buildings Directive – EPBD), che ha introdotto per la prima volta un sistema armonizzato per la valutazione della prestazione energetica del patrimonio edilizio. Tale direttiva è stata successivamente rivista nella Direttiva 2010/31/UE (EPBD II), la quale ha ampliato e rafforzato il precedente impianto normativo, introducendo, tra gli elementi di maggiore rilievo, il concetto di “edificio a energia quasi zero” (Nearly Zero-Energy Building – nZEB), una metodologia comune per il calcolo della prestazione energetica, requisiti minimi per gli edifici di nuova costruzione e per quelli oggetto di ristrutturazioni rilevanti, nonché l'istituzione dell'Attestato di Prestazione Energetica (APE). Un ulteriore avanzamento normativo è stato rappresentato dalla Direttiva (UE) 2018/844 (EPBD III), che ha modificato sia la EPBD che la Direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, nell'ambito del pacchetto legislativo “Energia pulita per tutti gli europei”. Questa revisione ha rafforzato il quadro strategico europeo prevedendo, tra le principali novità, l'obbligo per gli Stati membri di elaborare strategie nazionali a lungo termine per la riqualificazione energetica dell'intero parco edilizio, con l'obiettivo di conseguire un patrimonio edilizio a emissioni zero entro il 2050. La direttiva ha inoltre promosso l'integrazione della

mobilità elettrica, dei sistemi di automazione e controllo degli edifici, dei passaporti di ristrutturazione e dei processi di digitalizzazione del settore, anticipando diversi principi successivamente consolidati con la revisione del 2024. Con l’Accordo di Parigi del 2015 e l’adozione del Green Deal europeo nel 2019, l’Unione Europea ha innalzato il proprio livello di ambizione climatica, ponendosi come obiettivo la neutralità climatica entro il 2050. In tale contesto, l’efficientamento energetico del patrimonio edilizio è divenuto uno dei pilastri centrali delle politiche ambientali, industriali e sociali dell’UE. Nel 2020, la Commissione europea ha presentato la strategia “Renovation Wave”, finalizzata a raddoppiare il tasso annuo di ristrutturazioni energetiche entro il 2030 e a promuovere interventi di “deep renovation” su larga scala. Questo orientamento strategico ha trovato concreta attuazione nella Direttiva (UE) 2024/1275, entrata in vigore nel maggio 2024, che rappresenta l’attuale riferimento normativo per la decarbonizzazione del patrimonio edilizio europeo. [27, 31]

## 2.2 Direttiva 2024/1275 (EPBD IV): struttura e obiettivi

La Direttiva (UE) 2024/1275, entrata in vigore l’8 maggio 2024, rappresenta la fase di maturazione del percorso normativo europeo in materia di prestazione energetica degli edifici. Essa costituisce una rifusione organica e aggiornata della Direttiva 2018/844, integrando le nuove ambizioni climatiche delineate nel Green Deal europeo, nel pacchetto “Fit for 55” — che mira a ridurre del 55% le emissioni di gas serra rispetto ai livelli del 1990 entro il 2030 — nel piano REPowerEU e negli impegni assunti dall’Unione europea nell’ambito dell’Accordo di Parigi.

Questa nuova versione della EPBD si configura come un passaggio fondamentale verso la decarbonizzazione del parco edilizio europeo, poiché introduce obiettivi vincolanti, nuovi strumenti giuridici e un quadro di governance multilivello pensato per guidare l’intera filiera edilizia verso la neutralità climatica al 2050.

### 2.2.1 Struttura

La direttiva si compone di 38 articoli, corredati da allegati tecnici che definiscono criteri metodologici, terminologie specifiche e obblighi puntuali. Tra gli elementi strutturali di maggiore rilievo si annoverano: l’aggiornamento delle definizioni chiave, comprendenti concetti quali l’edificio a zero emissioni, l’edificio predisposto per il solare, la ristrutturazione profonda; l’introduzione di obblighi di prestazione energetica per gli edifici di nuova costruzione e per quelli esistenti; l’adozione di standard minimi di prestazione energetica (Minimum Energy Performance Standards, MEPS) per edifici residenziali e non residenziali; la previsione di strategie nazionali e piani di ristrutturazione del patrimonio edilizio; misure volte alla promozione della mobilità elettrica e dell’integrazione delle fonti di energia rinnovabile negli edifici; l’implementazione di strumenti digitali e indicatori di prontezza tecnologica, quali il Building Renovation Passport e lo Smart Readiness Indicator; nonché disposizioni specifiche in materia di povertà energetica, inclusione sociale e tutela degli occupanti vulnerabili. [27]

## **2.2.2 Definizioni chiave introdotte dalla direttiva**

Di seguito sono riportate alcune delle più importanti definizioni chiave aggiornate nella Direttiva 2024/1275.

### **Ristrutturazione profonda**

La "ristrutturazione profonda" (deep renovation) identifica un insieme di interventi sull'edificio esistente finalizzati a trasformarlo in un edificio a zero emissioni, oppure, in una fase intermedia, in un edificio a energia quasi zero (nZEB). Tali interventi comportano un miglioramento sostanziale della prestazione energetica complessiva e devono rispettare i requisiti minimi stabiliti a livello nazionale o dell'Unione. [27]

### **Edificio a zero emissioni**

L'"edificio a zero emissioni" (zero-emission building, ZEB) costituisce il nuovo paradigma di riferimento per la progettazione e la riqualificazione edilizia. Si tratta di un edificio caratterizzato da una domanda energetica molto bassa, soddisfatta esclusivamente tramite fonti di energia rinnovabile. Esso non genera emissioni operative di gas a effetto serra in loco derivanti dall'uso di combustibili fossili, e rispetta precisi requisiti minimi in termini di prestazione energetica e di emissioni operative. [27]

### **Edificio predisposto per il solare**

L'"edificio predisposto per il solare" (solar-ready building) è progettato e realizzato in modo da agevolare, sotto il profilo tecnico, strutturale ed economico, l'installazione di impianti solari fotovoltaici o solari termici, senza la necessità di interventi edilizi rilevanti o modifiche strutturali sostanziali. [27]

### **Passaporto di ristrutturazione**

Il "passaporto di ristrutturazione" (renovation passport) è uno strumento innovativo introdotto dalla direttiva, definito come un documento, in formato digitale o cartaceo, che fornisce una tabella di marcia personalizzata per l'efficientamento energetico progressivo di un edificio. Tale strumento si basa su una valutazione tecnica e su un audit energetico, con l'obiettivo di guidare l'edificio verso il raggiungimento dello standard a zero emissioni entro il 2050. [27]

### **Indicatore di predisposizione degli edifici all'intelligenza (SRI)**

L'indicatore di predisposizione degli edifici all'intelligenza (in inglese chiamato come smart readiness indicator, abbreviato in SRI) tiene conto delle caratteristiche di maggiore risparmio energetico, di analisi comparativa e flessibilità, nonché delle funzionalità e delle capacità migliorate attraverso dispositivi più interconnessi e intelligenti. [27]

### 2.2.3 Obiettivi principali

La Direttiva (UE) 2024/1275 definisce una serie di obiettivi strategici ambiziosi ma ritenuti attuabili, in linea con la transizione verso un'economia climaticamente neutra. In particolare, essa stabilisce che tutti i nuovi edifici dovranno essere a zero emissioni entro il 2030, con una scadenza anticipata al 2028 per gli edifici di proprietà pubblica. Per quanto riguarda il patrimonio edilizio esistente, è previsto l'obbligo di trasformazione in edifici a zero emissioni entro il 2050, da realizzarsi attraverso politiche di ristrutturazione profonda, graduale o seriale. La direttiva introduce inoltre una progressiva eliminazione dell'utilizzo di combustibili fossili per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici. A tal fine, a partire dal 2025, non sarà più consentita la concessione di incentivi pubblici per l'installazione di caldaie alimentate da combustibili fossili. [27]

Tra le misure operative, si prevedono obblighi di installazione di impianti solari fotovoltaici e/o termici nei nuovi edifici e in quelli sottoposti a ristrutturazioni rilevanti, subordinatamente alla verifica della fattibilità tecnica ed economica degli interventi. Infine, un obiettivo trasversale della direttiva è la riduzione strutturale della povertà energetica, da perseguire mediante misure dedicate e meccanismi di sostegno finanziario accessibili, con particolare attenzione alle famiglie vulnerabili, all'edilizia sociale, alle aree rurali e ai piccoli proprietari. [27]



## Capitolo 3

# *Urban Building Energy Modeling*

Per la definizione e l'attuazione di strategie efficaci di ristrutturazione del patrimonio edilizio esistente, finalizzate al miglioramento dell'efficienza energetica, uno degli strumenti più rilevanti a disposizione della pianificazione urbana è rappresentato dall'Urban Building Energy Modeling (UBEM).

L'UBEM consiste in un insieme di metodologie e strumenti computazionali che consentono di simulare il comportamento energetico di gruppi di edifici inseriti in un contesto urbano, tenendo conto di variabili quali la tipologia edilizia, le modalità d'uso dell'energia, i profili di occupazione, le condizioni climatiche locali e l'interazione con le infrastrutture energetiche esistenti. [24, 33, 40, 22]

Attraverso tali modelli è possibile stimare con maggiore accuratezza i consumi energetici attuali, identificare il potenziale di risparmio ottenibile tramite diversi scenari di intervento, valutare l'efficacia di misure di efficientamento energetico su scala urbana e supportare il processo decisionale in funzione del rapporto costi-benefici. L'UBEM si configura pertanto come uno strumento di supporto strategico per la definizione di politiche locali di decarbonizzazione del settore edilizio, specialmente in contesti caratterizzati da una forte eterogeneità del tessuto urbano. [24, 40]

I modelli di tipo UBEM si articolano principalmente in due categorie metodologiche: gli approcci top-down, che utilizzano dati aggregati per descrivere il comportamento energetico dell'edificio nel suo complesso, e gli approcci bottom-up, basati su dati a livello di singolo edificio e in grado di rappresentare con maggiore granularità la variabilità interna del parco edilizio. La scelta dell'approccio da utilizzare dipende da vari fattori, tra cui la disponibilità dei dati di input, la scala di analisi desiderata e il livello di dettaglio richiesto nella valutazione energetica urbana. Inoltre, i due approcci presentano caratteristiche, vantaggi e limiti distinti, che saranno approfonditi nei paragrafi successivi. [24, 39, 33, 40, 22]

### 3.1 Approccio *Top-Down*

I modelli top-down rappresentano uno strumento utile per l'analisi di sistemi complessi, come il patrimonio edilizio urbano. Questi modelli si basano sull'elaborazione di dati

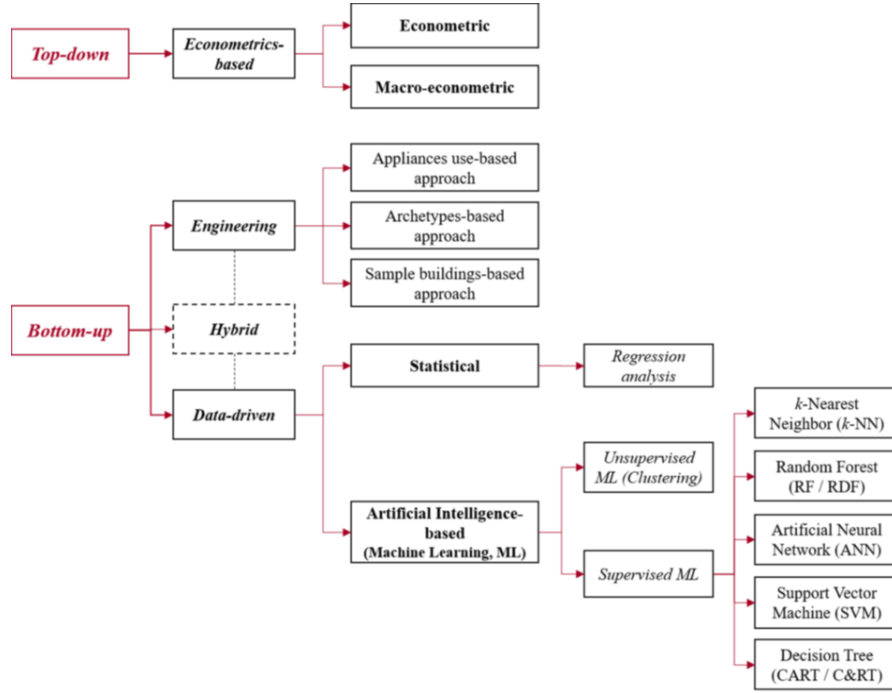


Figura 3.1. Classificazione dei modelli energetici urbani. [24]

aggregati e suddividono l'output complessivo in componenti sintetiche, al fine di individuare le relazioni tra variabili energetiche, economiche, tecnologiche e climatiche. Il loro funzionamento si fonda sull'associazione di modelli di tipo black-box, che stimano i risultati mediante strumenti matematici e statistici, senza necessariamente descrivere i fenomeni attraverso leggi fisiche esplicite. [24]

I modelli top-down si avvalgono di serie storiche di dati aggregati per analizzare i legami tra consumo energetico e variabili macroeconomiche quali il prodotto interno lordo (PIL), il reddito pro capite, il tasso di disoccupazione, l'inflazione e i prezzi dell'energia, oltre a parametri climatici. Poiché operano a un livello aggregato, questi modelli non includono una rappresentazione esplicita delle tecnologie adottate, né consentono di analizzare nel dettaglio i singoli usi finali dell'energia. [33, 24, 39]

Un esempio rappresentativo di approccio top-down è il modello econometrico, utilizzato per studiare l'influenza delle variabili economiche sull'efficacia delle politiche energetiche. Tale modello, spesso basato su regressioni lineari, consente di prevedere statisticamente la domanda energetica del patrimonio edilizio. In letteratura si distinguono modelli econometrici, fondati su microeconomia (basati su reddito pro capite), e modelli macroeconomici, basati su indicatori nazionali aggregati. [24]

Una soluzione efficiente e a basso costo per stimare il fabbisogno energetico urbano su larga scala, pur in presenza di assunzioni semplificative sullo stock edilizio, consiste nell'integrazione dei modelli top-down con dati satellitari e indicatori socioeconomici (PIL,

densità di popolazione, livelli di reddito, stime sulla povertà, prezzi dei combustibili, ecc.). Ciò consente di stimare metriche aggregate relative ai consumi e alle emissioni, anche in contesti privi di dati di dettaglio. Nonostante i limiti legati alla disponibilità, all'accuratezza e alla risoluzione dei dati, numerosi studi dimostrano che i modelli top-down possono produrre stime attendibili dei consumi reali su scala urbana, comparabili con quelle ottenute tramite approcci bottom-up, ma con minori requisiti computazionali. [33]

Tra i principali punti di forza dei modelli top-down si annoverano: la semplicità di implementazione grazie all'impiego di dati storici aggregati, la capacità di individuare correlazioni tra fattori socioeconomici ed energetici, la buona capacità predittiva nel lungo termine l'elevata efficienza in termini di costi e risorse computazionali. [24]

I limiti principali riguardano invece la forte dipendenza da tendenze storiche, la limitata adattabilità a scenari futuri discontinui, l'elevato livello di generalizzazione, l'assenza di dettaglio sugli usi finali e sulle tecnologie impiegate, l'impossibilità di valutare l'efficacia di misure specifiche di efficientamento energetico e la scarsa idoneità per analisi localizzate. [24]

Per loro natura, i modelli top-down sono prevalentemente impiegati per la previsione della domanda energetica aggregata e meno adatti allo studio di interventi di riqualificazione mirati, per i quali si ricorre invece a modelli bottom-up, oggetto di approfondimento nel paragrafo successivo. [39, 40]

## 3.2 Approccio *Bottom-Up*

A differenza dell'approccio top-down, il modello bottom-up si basa su una costruzione dettagliata del modello, fornendo una rappresentazione esplicita dei singoli sottosistemi che compongono il patrimonio edilizio e delle loro interconnessioni. Questo tipo di approccio si fonda sull'analisi dei consumi energetici a livello di singolo edificio, mediante l'utilizzo di dati disaggregati e specifici, raccolti preventivamente dallo sviluppatore attraverso metodi analitici, statistici o empirici. [24, 22, 33, 39, 40]

L'impiego di informazioni dettagliate consente di stimare con precisione i consumi energetici relativi a specifici usi finali o singole unità edilizie. Tali stime possono successivamente essere aggregate per ottenere valutazioni energetiche su scala urbana o territoriale. Grazie al grado elevato di risoluzione, i modelli bottom-up permettono di simulare l'impatto energetico derivante dall'implementazione di specifici interventi di riqualificazione su porzioni circoscritte dello stock edilizio, consentendo quindi valutazioni puntuali in termini di costi, benefici e priorità d'intervento. [24, 40, 39]

Tuttavia, tale approccio richiede un'attenta gestione della complessità e dell'incertezza legate ai parametri in ingresso, frequentemente soggetti a variabilità climatica, comportamentale e tecnologica. La disponibilità e la qualità dei dati costituiscono, pertanto, un elemento critico per l'affidabilità dei risultati ottenibili. [24, 39, 40]

In letteratura, i modelli bottom-up per l'Urban Building Energy Modeling (UBEM) sono comunemente classificati in due categorie principali: modelli data-driven e modelli

physics-based. Le due tipologie saranno analizzate nel dettaglio nei paragrafi successivi. [40, 24, 33, 36, 22]

### **3.2.1 *Data-driven***

I modelli data-driven impiegano metodi statistici e tecniche di Machine Learning per modellare o prevedere la prestazione energetica degli edifici sulla base di dati storici. Tali modelli si fondano sull'analisi empirica dei dati raccolti, senza una descrizione esplicita dei processi fisici sottostanti, e mirano a identificare correlazioni tra le variabili energetiche e le caratteristiche edilizie, d'uso e ambientali. [24, 33]

Gli approcci statistici utilizzati sono prevalentemente basati su tecniche di regressione, quali la regressione lineare o polinomiale. Questi metodi sono ampiamente utilizzati nell'ambito della stima dei consumi energetici per la loro semplicità di implementazione e rapidità di elaborazione. Tuttavia, tali approcci mostrano limiti significativi nella capacità di rappresentare accuratamente la complessità e la variabilità dei comportamenti reali degli edifici e degli occupanti.

Le tecniche di Machine Learning si distinguono principalmente in metodi supervisionati, come le reti neurali artificiali, e metodi non supervisionati, come il clustering. Questi strumenti permettono di analizzare i dati relativi al sistema edificio, rilevando pattern ricorrenti e strutture statistiche latenti, al fine di correlare i consumi energetici con le proprietà geometriche e costruttive dell'edificio, le modalità di utilizzo da parte degli occupanti e le condizioni ambientali esterne. [24]

Il principale vantaggio dei modelli data-driven risiede nella loro elevata accuratezza predittiva, anche in presenza di fenomeni complessi e dinamici. Essi sono in grado di catturare, oltre alle caratteristiche fisiche dell'edificio, anche gli effetti derivanti dal comportamento degli utenti, che spesso rappresentano una componente determinante nei consumi reali. [33, 24]

Tuttavia, questi modelli presentano alcune criticità. In primo luogo, la loro affidabilità dipende in misura significativa dalla qualità, quantità e disponibilità dei dati storici utilizzati come input. Inoltre, trattandosi di modelli legati specificamente al contesto analizzato, essi non sono facilmente generalizzabili ad altri edifici o scenari. Poiché non si basano su principi fisici, ma esclusivamente su correlazioni empiriche, tali modelli tendono a perdere validità ogniqualvolta intervengano modifiche rilevanti alle caratteristiche dell'edificio o alle condizioni di esercizio. [24]

### **3.2.2 Modelli ingegneristici**

I modelli physics-based, noti anche come modelli ingegneristici, sono modelli analitici che si basano sui principi fisici della trasmissione del calore per calcolare e simulare la prestazione energetica degli edifici. Tali modelli tengono conto di variabili come la geometria dell'edificio, le proprietà dei materiali costruttivi, le condizioni climatiche esterne e i sistemi impiantistici HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning), al fine di determinare i flussi termici e i consumi energetici in modo dettagliato e realistico. [33, 24]

Questi modelli possono essere classificati secondo due criteri principali: la metodologia impiegata per il calcolo dei consumi energetici, e la modalità di rappresentazione del patrimonio edilizio.

In riferimento al primo criterio, si distinguono due categorie: i modelli semplificati di tipo resistor-capacitor (RC) e le simulazioni termiche dinamiche dettagliate. I modelli RC si basano su una rappresentazione semplificata del comportamento termico dell'edificio, utilizzando analogie elettriche (resistenze e capacità) per descrivere il trasferimento di calore. Questi modelli impiegano relazioni empiriche o algoritmi semplificati, rappresentando un buon compromesso tra accuratezza del risultato e velocità di calcolo. Al contrario, le simulazioni dinamiche dettagliate, come quelle effettuate con software avanzati quali EnergyPlus, si fondano su equazioni termofisiche complesse, che descrivono in modo preciso i processi di scambio termico, a discapito però di una maggiore intensità computazionale. [40, 33, 22]

Quanto al secondo criterio classificativo, i modelli physics-based possono essere suddivisi in tre approcci principali, sulla base della metodologia adottata per rappresentare il parco edilizio:

- appliances use-based: l'analisi si concentra sull'utilizzo di apparecchiature elettriche e sistemi domestici, stimando il fabbisogno energetico sulla base di parametri come la tipologia, l'efficienza, il livello di utilizzo e i consumi medi associati, a scala regionale o nazionale;
- archetype-based: si utilizza un insieme limitato di archetipi edilizi, ovvero modelli rappresentativi di tipologie ricorrenti, per simulare il comportamento energetico generale del patrimonio edilizio. Questo approccio consente di generalizzare il modello mantenendo un buon equilibrio tra dettaglio e scalabilità;
- sample buildings-based: si fonda sulla modellazione diretta di un campione rappresentativo di edifici reali, per i quali sono disponibili dati completi e affidabili. Questo approccio consente analisi ad alta risoluzione, ma è fortemente dipendente dalla disponibilità di dati di qualità. [24]

Il principale vantaggio dei modelli physics-based risiede nella loro indipendenza dai dati storici e nella maggiore adattabilità a scenari nuovi, poiché si basano su leggi fisiche piuttosto che su relazioni empiriche. Questo li rende particolarmente adatti per valutare l'impatto di interventi di efficientamento energetico non ancora implementati, o per analizzare edifici nuovi o profondamente trasformati. [24, 22, 33, 40]

Tuttavia, tali modelli presentano anche alcune criticità. In primo luogo, essi richiedono una complessità computazionale elevata, soprattutto nel caso delle simulazioni dinamiche dettagliate. Inoltre, la necessità di disporre di input molto dettagliati (relativi alla geometria, ai materiali, agli impianti, ai profili d'uso, ecc.) può limitarne l'applicabilità su larga scala. Infine, le semplificazioni necessarie per rendere gestibili i calcoli possono compromettere in parte l'accuratezza dei risultati. [33, 24]

### 3.2.3 Modelli ibridi

Accanto ai modelli bottom-up di tipo ingegneristico (physics-based) e a quelli data-driven, la letteratura identifica anche approcci ibridi, che combinano componenti fisiche e statistiche con l'obiettivo di mitigare i rispettivi limiti e, soprattutto, colmare la mancanza di un quadro completo dei dati in ingresso. In particolare, alcuni parametri presentano una variabilità intrinsecamente stocastica (ad es. quelli legati all'uso da parte degli occupanti), introducendo incertezza nelle stime; in questi casi, gli input necessari al modello fisico possono essere derivati tramite analisi statistica di dati storici di consumo, integrando informazioni provenienti da database differenti. [24]

In parallelo, si osserva anche l'integrazione tra simulazioni ingegneristiche e tecniche di machine learning, impiegata per sfruttare la capacità dei metodi data-driven di catturare relazioni complesse senza perdere il riferimento ai meccanismi fisici che governano i flussi energetici. In molti casi ciò consente di migliorare l'efficienza computazionale; tuttavia, se il modello data-driven viene usato come sostituto semplificato della simulazione, può introdurre una riduzione del dettaglio rappresentativo e, in funzione della qualità/quantità dei dati, influenzare l'accuratezza dei risultati. [33]

## Capitolo 4

# Definizione di archetipo edilizio in progetti di ricerca

Gli archetipi edilizi sono modelli virtuali rappresentativi che sintetizzano le principali caratteristiche tecnologiche e operative di specifici segmenti del patrimonio edilizio. Essi costituiscono dataset prevalentemente non geometrici che incorporano informazioni relative all'involucro edilizio, ai sistemi tecnici installati, nonché ai profili di utilizzo e ai principali parametri operativi degli edifici. La funzione principale degli archetipi è la riduzione della complessità del patrimonio edilizio reale mediante una classificazione in gruppi omogenei, al fine di consentire simulazioni energetiche rappresentative e scalabili alla scala urbana. [26, 34, 33]

In letteratura, la costruzione degli archetipi edilizi a partire dai dati contenuti nei certificati energetici è generalmente articolata in un processo metodologico strutturato che comprende [26]:

1. la selezione delle variabili rilevanti;
2. la clusterizzazione dei dati mediante tecniche statistiche e di data mining;
3. la valutazione della qualità dei dati;
4. l'analisi statistica dei cluster individuati;
5. la definizione di edifici di riferimento rappresentativi di ciascun cluster.

Tale approccio è ampiamente documentato in progetti di ricerca europei e contributi scientifici, tra cui le linee guida sviluppate nell'ambito del progetto TIMEPAC, che forniscono un quadro metodologico armonizzato per la generazione di archetipi a partire dai database EPC. [26]

In questo lavoro viene riportata esclusivamente, in forma generale, la metodologia proposta in letteratura per la costruzione degli archetipi edilizi, senza entrare nel dettaglio operativo delle singole fasi applicative, in quanto tale livello di approfondimento risulterebbe fuorviante rispetto agli obiettivi del presente studio.

Viene tuttavia descritto il procedimento teorico al fine di fornire una visione complessiva delle modalità con cui gli archetipi vengono generalmente definiti e impiegati nella modellazione energetica urbana, che costituisce l'ambito di riferimento di questo lavoro. Per ulteriori approfondimenti sul processo di costruzione degli archetipi, si rimanda ai contributi citati in bibliografia: [32, 34, 26].

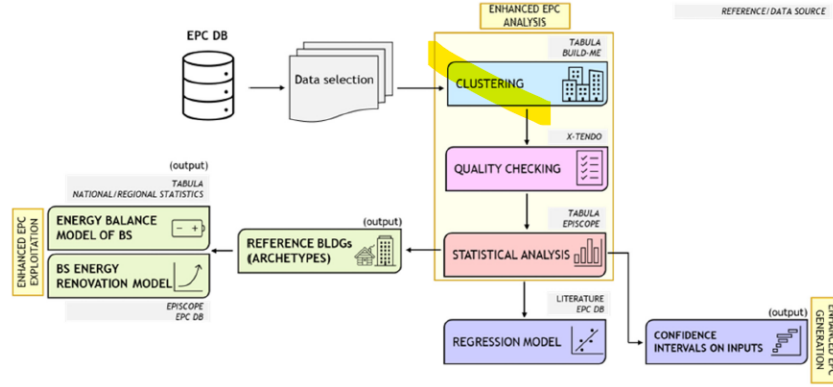


Figura 4.1. Metodologia per la creazione degli archetipi. [26]

## 4.1 Selezione delle variabili rilevanti contenute negli APE

La selezione delle variabili rilevanti rappresenta il primo passaggio del processo di costruzione degli archetipi edilizi descritto in letteratura. L'obiettivo di questa fase è l'identificazione di un insieme coerente di parametri di input e output da utilizzare nelle successive analisi statistiche e nella definizione di modelli rappresentativi. Tali parametri sono estratti dai certificati di prestazione energetica (in Italia: APE), emessi a livello nazionale o regionale, e costituiscono la base per la definizione di una metodologia operativa standardizzata, replicabile e armonizzata a livello territoriale. [26]

Le variabili selezionate includono informazioni relative all'involucro edilizio, agli impianti tecnici installati, ai vettori energetici utilizzati, ai profili di uso e alla prestazione energetica globale. Nel caso in cui un APE non contenga uno o più parametri ritenuti essenziali, si procede, ove possibile, all'imputazione di valori mancanti sulla base di assunzioni tecniche o all'integrazione dei dati mediante fonti alternative, quali database nazionali o regionali complementari. [26]

Questa fase di selezione è finalizzata a garantire l'omogeneità e la comparabilità dei dataset di partenza, condizione necessaria per l'applicazione di metodi di clustering e per l'elaborazione degli archetipi edilizi su base statistica. [26]

## 4.2 Data clustering

Secondo l'approccio proposto nelle linee guida TIMEPAC[26], la fase di clusterizzazione mira a raggruppare gli edifici sulla base di caratteristiche comuni, al fine di individuare insiemi omogenei da cui derivare modelli edilizi rappresentativi.

L'associazione tra edifici reali e archetipi viene effettuata secondo quattro criteri principali: la zona climatica, la categoria d'uso, l'epoca di costruzione e la dimensione dell'edificio. Tali parametri costituiscono la base per la definizione dei cluster, ognuno dei quali rappresenta un insieme omogeneo di edifici accomunati da condizioni climatiche, destinazioni funzionali e caratteristiche costruttive simili. [26]

Il processo di clusterizzazione si articola nelle seguenti fasi operative [26]:

1. Classificazione degli edifici in base alla zona climatica di appartenenza, conformemente alla suddivisione nazionale;
2. Suddivisione, all'interno di ciascuna zona climatica, degli edifici secondo la destinazione d'uso, comprendendo sia il settore residenziale sia quello non residenziale;
3. Raggruppamento ulteriore per epoca di costruzione e dimensione all'interno dei cluster precedentemente definiti per categoria d'uso.

Questo processo consente di ottenere una segmentazione strutturata e coerente dello stock edilizio, funzionale alla successiva identificazione degli edifici di riferimento e alla costruzione degli archetipi energetici.

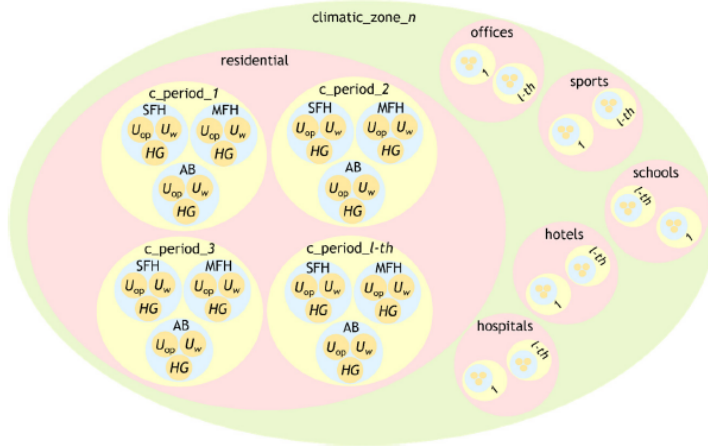


Figura 4.2. Clustering dei dati ricavati dagli APE [26]

### 4.3 Valutazione della qualità dei dati

La valutazione della qualità dei dati ha lo scopo di selezionare, all'interno del dataset, esclusivamente gli Attestati di Prestazione Energetica ritenuti affidabili, al fine di garantire la robustezza dell'analisi e la validità dei modelli archetipici che ne derivano. [26]

Nei principali studi di letteratura, la valutazione della qualità dei dati si basa sull'assegnazione di punteggi alle informazioni contenute negli APE, in funzione della loro conformità a criteri di validità definiti a priori. I punteggi parziali attribuiti alle singole variabili vengono poi sommati per ottenere un indice complessivo di qualità dell'attestato. È definita una soglia prestabilita, oltre la quale l'APE viene considerato inaffidabile ed escluso dalle fasi successive del processo. [26]

In TIMEPAC [26], ad esempio, non tutte le variabili contribuiscono in egual misura al punteggio complessivo: si distinguono infatti caratteristiche critiche, la cui assenza o incongruenza determina automaticamente l'esclusione dell'APE, e caratteristiche non critiche, che possono presentare limitate anomalie a condizione che il punteggio complessivo dell'attestato resti entro la soglia accettabile. I punteggi negativi vengono attribuiti ogniquale volta una variabile violi uno dei seguenti criteri di qualità:

- Congruenza del tipo di dato: si verifica quando il tipo di informazione non corrisponde a quello atteso (ad esempio, un valore numerico codificato come stringa o booleano);
- Possibilità fisica del dato: viene meno quando si rilevano valori incompatibili con i principi fisici (ad esempio, un fabbisogno di riscaldamento negativo);
- Consistenza interna del dato: si ha quando esistono contraddizioni logiche tra variabili (ad esempio, la presenza di un consumo per raffrescamento senza che sia indicata l'esistenza di un impianto di raffrescamento).

Questa procedura consente di filtrare in modo sistematico il dataset, garantendo che la successiva analisi statistica e la costruzione degli archetipi si basino su dati coerenti, attendibili e rappresentativi.

### 4.4 Analisi statistica

L'analisi statistica ha l'obiettivo di identificare i valori più rappresentativi per ciascuna variabile tecnica ed energetica, al fine di costruire edifici archetipici che riflettano le caratteristiche medie del patrimonio edilizio esistente in specifiche zone climatiche. A partire dalle osservazioni ricavate dagli Attestati di Prestazione Energetica, è possibile individuare i parametri più ricorrenti e coerenti per ciascuna categoria edilizia, con riferimento sia al settore residenziale sia a quello non residenziale. Gli archetipi risultanti costituiscono quindi una sintesi delle proprietà tecnologiche medie di uno stock edilizio omogeneo, coerente con il contesto territoriale di riferimento. La metodologia adottata

per l'estrazione di tali caratteristiche può essere di natura quantitativa o qualitativa, a seconda della tipologia e della distribuzione dei dati analizzati. [26]

Un approccio quantitativo consiste, ad esempio, nell'utilizzo di rappresentazioni grafiche come i boxplot, che consentono di analizzare la distribuzione statistica di una variabile e di identificare i valori centrali (mediana) e l'intervallo interquartile, escludendo i valori anomali. Tale metodo è particolarmente utile per determinare, in modo oggettivo, valori medi affidabili da assegnare ai parametri dell'archetipo. [26]

In alternativa, un approccio qualitativo può basarsi sull'analisi delle frequenze assolute o relative, individuando per ciascuna variabile la modalità più frequentemente osservata nel dataset. Questo metodo risulta efficace per variabili categoriche, come la tipologia impiantistica o il tipo di generatore, in cui non è significativa la media numerica ma piuttosto la prevalenza di una determinata opzione.

Entrambi gli approcci sono finalizzati alla costruzione di archetipi coerenti, replicabili e statisticamente rappresentativi delle condizioni reali del parco edilizio nazionale, da utilizzare nelle fasi successive di modellazione energetica.

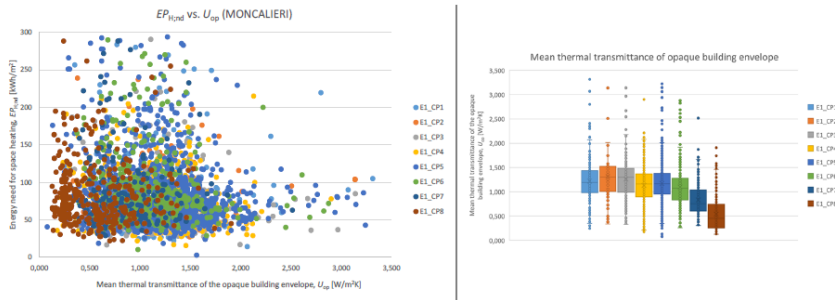


Figura 4.3. Esempio di rappresentazione grafica per l'approccio quantitativo. [26]

## 4.5 Definizione degli edifici di riferimento

Gli edifici di riferimento costituiscono modelli rappresentativi del patrimonio edilizio, costruiti per riflettere le caratteristiche geometriche più comuni, le specifiche tecniche dell'involucro edilizio e le tipologie impiantistiche più diffuse. Il loro scopo principale è quello di rappresentare la situazione media di un determinato segmento di mercato, offrendo un riferimento utile per attività di benchmarking energetico a livello nazionale o regionale. [26]

La costruzione di una libreria di edifici di riferimento riveste un ruolo strategico all'interno dei processi di valutazione e pianificazione energetica, in particolare per la comparazione delle prestazioni tra edifici reali e modelli standardizzati. Per assicurare una copertura adeguata del patrimonio edilizio, è necessario considerare un numero rappresentativo di edifici, reali e/o virtuali, appartenenti sia al settore residenziale sia a quello non residenziale, in grado di descrivere le tipologie edilizie più diffuse all'interno di

ciascuna zona climatica. I parametri energetici fondamentali utilizzati per la definizione degli archetipi di riferimento si suddividono in tre categorie principali [26]:

- dati geometrici, quali il compactness ratio, la superficie utile riscaldata o raffrescata, il volume riscaldato o raffrescato, il window-to-wall ratio;
- proprietà termo-fisiche dell'involucro edilizio opaco e trasparente, come la trasmittanza termica media delle superfici opache e quella delle superfici vetrate;
- tipologie e prestazioni energetiche dei sistemi tecnici, che includono impianti di climatizzazione, ventilazione, produzione di acqua calda sanitaria e, se presenti, fonti energetiche rinnovabili.

La metodologia di identificazione si basa sull'estrazione statistica di valori medi rappresentativi, derivati per ciascuna combinazione di zona climatica, categoria d'uso, epoca di costruzione, dimensione e geometria dell'edificio. L'edificio di riferimento viene definito attraverso l'utilizzo del valore mediano per ciascun parametro caratterizzante; inoltre, sono ritenuti ammissibili anche i valori compresi nell'intervallo interquartile (IQR), ovvero tra i quartili Q1 e Q3, in modo da garantire una rappresentazione robusta ma flessibile della variabilità del patrimonio edilizio reale.

Questa metodologia consente la creazione di archetipi affidabili e coerenti con il contesto territoriale e normativo, ponendo le basi per simulazioni energetiche standardizzate e confrontabili. [26]

## Capitolo 5

# Strumento di simulazione energetica a scala urbana: *CitySim*

Per la costruzione del modello UBEM, è possibile avvalersi di diversi strumenti software. Nell'ambito del presente studio, il tool selezionato è CitySim, in quanto risulta particolarmente adatto per l'analisi energetica su scala urbana e per la valutazione di scenari di pianificazione sostenibile.

CitySim è un software di simulazione sviluppato a partire dal 2009 nei linguaggi Java e C++, progettato per supportare la pianificazione energeticamente sostenibile degli insediamenti urbani. Il tool consente di simulare il comportamento energetico di un numero variabile di edifici, da pochi elementi fino a decine di migliaia, mantenendo un buon compromesso tra dettaglio fisico e scalabilità computazionale. [22]

Il modello termico implementato in CitySim è un modello reduced-order di tipo resistivo-capacitivo (RC), basato sull'analogia con un circuito elettrico equivalente, che consente di rappresentare i flussi di calore mediante parametri aggregati di resistenza e capacità termica. Tale formulazione permette, inoltre, di considerare la presenza di sottospazi o zone interne e di metterli in relazione attraverso la conduttanza termica delle pareti di separazione, descrivendo gli scambi termici tra ambienti adiacenti. Nel contesto urbano, CitySim integra il modello termico con modelli fisici per gli scambi radiativi, consentendo di tenere conto delle interazioni tra edifici (ad esempio ombreggiamento e scambi radiativi) e di rappresentare in modo più articolato le condizioni al contorno che influenzano la dinamica energetica degli edifici simulati. [22, 6]

## 5.1 Dati in ingresso

A differenza dei modelli energetici sviluppati per singoli edifici, che possono includere un elevato livello di dettaglio geometrico e impiantistico, la modellazione energetica urbana (UBEM) richiede semplificazioni (soprattutto geometriche e d'uso) per rendere sostenibile la simulazione di molti edifici, preservando però gli elementi chiave (volumi, superfici disperdenti e orientamenti) necessari a rappresentare correttamente i flussi energetici. Tale semplificazione è necessaria per ridurre il carico computazionale associato alla simulazione simultanea di un ampio numero di edifici, garantendo al contempo una sufficiente rappresentatività del tessuto urbano. [22]

Per questo motivo, molti workflow UBEM sfruttano dati territoriali e modelli 3D della città (ad esempio CityGML) come base geometrica e semantica. Nel caso di CitySim, tali informazioni possono essere utilizzate mediante procedure di import e conversione verso i formati effettivamente supportati dal software per la simulazione. In generale, i tool UBEM fanno ampio ricorso a formati GIS, comunemente impiegati dalle amministrazioni pubbliche per la gestione delle informazioni territoriali; CityGML, in particolare, rappresenta uno standard diffuso per la descrizione tridimensionale dell'ambiente costruito, includendo sia dati geometrici sia attributi semantici degli edifici e del contesto urbano. [22]

Nella pratica UBEM, la geometria degli edifici viene spesso ricostruita a partire da impronte 2D estruse, tramite CAD o modellatori 3D (ad esempio SketchUp), e successivamente importata in CitySim in formati compatibili (file DXF o XML). In molte applicazioni a scala urbana si assume che a ciascun edificio corrisponda una sola zona termica per contenere i tempi di calcolo; tuttavia, qualora siano disponibili dati adeguati e ciò sia coerente con gli obiettivi della simulazione, CitySim consente anche rappresentazioni interne più articolate tramite subspaces. [16, 22]

Una volta definita la geometria, le proprietà termo-fisiche e d'uso possono essere attribuite tramite archetipi (predefiniti o calibrati sul contesto), che includono caratteristiche di involucro, sistemi e profili operativi tipici. I profili di occupazione e utilizzo sono spesso rappresentati mediante schedule temporali di tipo deterministico (profili giornalieri e annuali), adottate nelle applicazioni a scala urbana per contenere complessità e fabbisogno informativo, pur introducendo una quota di incertezza legata alla variabilità reale dei comportamenti. [22, 16, 41]

Nei paragrafi seguenti si approfondiscono, con taglio operativo, i principali dati di input richiesti da CitySim e i criteri adottati per la loro definizione e trattamento nel presente lavoro.

|          |            |                                   |                              |                     |                         |
|----------|------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------------|-------------------------|
| District | Climate    | altitude                          |                              |                     | [m]                     |
|          |            | latitude                          |                              |                     | [° N]                   |
|          |            | longitude                         |                              |                     | [° E]                   |
|          |            | meridian                          |                              |                     | [h]                     |
|          |            | Year hourly values                | temperature                  |                     | [°C]                    |
|          |            |                                   | wind speed                   |                     | [m/s]                   |
|          |            |                                   | wind direction               |                     | [°]                     |
|          |            |                                   | relative humidity            |                     | [%]                     |
|          |            |                                   | nebulosity                   |                     | [okta]                  |
|          |            |                                   | rain fall                    |                     | [mm]                    |
|          |            |                                   | horizontal global irradiance |                     | [W/m <sup>2</sup> ]     |
|          | Buildings  | id                                |                              |                     |                         |
|          |            | infiltration rate                 |                              |                     | [h <sup>-1</sup> ]      |
|          |            | min and max set point temperature |                              |                     | [°C]                    |
|          |            | Thermal zones                     | volume                       |                     | [m <sup>3</sup> ]       |
|          |            |                                   | thermal bridge $\phi$        |                     | [W/K]                   |
|          |            |                                   | Roof surfaces                | geometry            | [m]                     |
|          |            |                                   |                              | U-value             | [W/(m <sup>2</sup> ·K)] |
|          |            |                                   |                              | reflectance         | [-]                     |
|          |            |                                   |                              | windows ratio       | [-]                     |
|          |            |                                   |                              | w. U-value          | [W/(m <sup>2</sup> ·K)] |
|          |            |                                   |                              | w. g-value          | [-]                     |
|          |            |                                   |                              | w. openable ratio   | [-]                     |
|          |            |                                   | Ground surfaces              | geometry            | [m]                     |
|          |            |                                   |                              | U-value             | [W/(m <sup>2</sup> ·K)] |
|          |            |                                   | Wall surfaces                | geometry            | [m]                     |
|          |            |                                   |                              | wall type id        |                         |
|          |            |                                   |                              | reflectance         | [-]                     |
|          |            |                                   |                              | windows ratio       | [-]                     |
|          |            |                                   |                              | w. U-value          | [W/(m <sup>2</sup> ·K)] |
|          |            |                                   |                              | w. g-value          | [-]                     |
|          |            |                                   |                              | w. openable ratio   | [-]                     |
|          |            |                                   | Heat gains                   | total yearly gains  | [Wh]                    |
|          |            |                                   |                              | year hourly profile | [-]                     |
|          | Wall types | id                                |                              |                     |                         |
|          |            | Layers                            | thickness                    |                     | [m]                     |
|          |            |                                   | conductivity                 |                     | [W/(m·K)]               |
|          |            |                                   | heat capacity                |                     | [J/(kg·K)]              |
|          |            |                                   | density                      |                     | [kg/m <sup>3</sup> ]    |

Figura 5.1. Alcuni esempi di input richiesti da CitySim. [6]

## 5.2 Simulazione e risultati

Gli output generati da un modello UBE<sub>M</sub> possono essere ricondotti a quattro categorie principali: indicatori relativi agli edifici, stima delle potenziali risorse locali (es. solare, biomassa), prestazioni dei sistemi energetici urbani e valutazioni generali su scala urbana. [22]

Nel caso di CitySim, gli output coprono sicuramente la componente relativa all'edificio e una parte delle risorse locali potenziali (in particolare per il solare, tramite irraggiamento e produzione da PV e solare termico), oltre a diverse metriche ambientali e di comfort; viceversa, non mira a restituire in modo nativo un set completo di potenziali locali eterogenei (es. biomassa) tipico di alcuni tool orientati anche alla pianificazione energetica multi-vettore. CitySim restituisce output sia visualizzabili nell'interfaccia (con diverse risoluzioni temporali), sia esportabili in forma tabellare (TSV) e, opzionalmente, in formati informativi urbani. Tra i risultati esplorabili rientrano: short-wave e long-wave irradiation, temperatura superficiale, sky view factor, domanda di riscaldamento e raffreddamento, temperatura interna, e produzione fotovoltaica e solare termica. Quando si esportano i risultati in formato TSV, il workflow di riferimento del CitySim-Solver genera una collezione articolata di file, includendo ad esempio file per aree e indicatori, dati climatici, indici di comfort, illuminamento, bilanci radiativi short wave - long wave, temperature superficiali, fattori di vista e riepiloghi annuali. [41, 16]

La simulazione energetica viene eseguita attraverso l'utilizzo del componente CitySim Solver, un tool dedicato all'elaborazione numerica del modello. Questo modulo opera con una risoluzione temporale oraria, permettendo di analizzare in modo dinamico e dettagliato i profili di consumo energetico, nonché di cogliere le variazioni giornaliere e stagionali dei carichi termici e dei flussi energetici. [6]

La risoluzione spaziale del modello è definita a livello di singola zona termica, che come annunciato in precedenza, tipicamente coincide con il singolo edificio. Questa scelta consente di assegnare a ciascuna entità geometrica caratteristiche termo-fisiche specifiche, come le proprietà dell'involucro edilizio, i profili di occupazione e i sistemi tecnici installati. Tale granularità spaziale permette di riflettere la variabilità tipologica del patrimonio edilizio all'interno del contesto urbano simulato. [22]

I risultati generati dal solver possono successivamente essere aggregati nel post-processing per ottenere indicatori sintetici su scala superiore, quali: isolato, quartiere o intera area urbana. Questa possibilità di aggregazione rende CitySim particolarmente adatto a supportare analisi di scenario e strategie di pianificazione energetica urbana, mantenendo un equilibrio tra dettaglio e scalabilità computazionale. [22]

# Capitolo 6

## Metodologia

Il presente capitolo propone una metodologia generale per la costruzione di un modello energetico urbano (UBEM), con l'obiettivo di rendere esplicito un percorso operativo per la selezione, la raccolta e l'organizzazione dei dati di input. In particolare, vengono discusse possibili strategie per l'acquisizione delle informazioni necessarie alla modellazione, suggerendo fonti e modalità di reperimento coerenti con un approccio *bottom-up* applicabile anche in presenza di dati incompleti.

Un aspetto centrale, in ambito UBEM, riguarda infatti la qualità del dato: la scalabilità del modello richiede spesso l'impiego di assunzioni e di parametri derivati da letteratura o da standard tecnici, con livelli di affidabilità eterogenei. Per questo motivo, il capitolo propone anche un sistema di valutazione qualitativa della qualità del dato in ingresso, definito in funzione della fonte e della modalità di acquisizione, finalizzato a stimare l'incertezza intrinseca associata alle principali variabili di input e a supportare l'interpretazione critica dei risultati.

Nei paragrafi seguenti vengono quindi presentate le scelte metodologiche e modellistiche proposte per la selezione dei dati di input necessari alla costruzione di un UBEM. In generale, le informazioni richieste possono essere ricondotte ai seguenti ambiti:

- dati climatici relativi alla località di riferimento;
- dati geometrici e caratteristiche generali dei singoli edifici del comparto analizzato;
- caratteristiche termo-fisiche dell'involucro, sia opaco sia trasparente;
- informazioni sulle modalità di utilizzo degli edifici, necessarie per la definizione degli apporti interni e dei relativi profili temporali;
- parametri, configurazioni e rendimenti dei servizi energetici presenti (ad esempio riscaldamento, ACS, raffrescamento, produzione da fonti rinnovabili), inclusi i sottosistemi rilevanti ai fini del calcolo di tali indicatori.

## 6.1 Valutazione della qualità dei dati in ingresso

Poiché, in ambito UBEM, la disponibilità e l'affidabilità dei dati di input rappresentano uno dei principali fattori limitanti, in questa tesi si propone un criterio *qualitativo* per descrivere la qualità delle informazioni utilizzate in ingresso al modello. L'obiettivo è fornire una metrica trasparente e replicabile per documentare la robustezza delle assunzioni, confrontare set di dati alternativi e supportare l'interpretazione critica dei risultati.

Come riferimento si propone di adottare l'impostazione sviluppata nel progetto URBEM [28], basata su una matrice che associa a ciascun dato un *indice di qualità* in funzione di due dimensioni: *fonte e modalità di acquisizione/determinazione*. La matrice è riportata in Figura 6.1.

| <i>Source type vs. way of determination</i> |                                                                                                                                                               | <b>Way of determination</b> |                      |                        |                           |                 |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------|------------------------|---------------------------|-----------------|
|                                             |                                                                                                                                                               | Inspection                  | Detailed calculation | Simplified calculation | Measurement or monitoring | Other/undefined |
| <b>Source type</b>                          | External reference                                                                                                                                            |                             |                      |                        |                           | Variable        |
|                                             | Survey on-site                                                                                                                                                | Level 2                     |                      |                        | Level 3                   |                 |
|                                             | Legislative or technical standard                                                                                                                             |                             | Level 3              | Level 2                |                           | Level 2         |
|                                             | Technician assumption                                                                                                                                         | Level 1                     |                      |                        |                           | Variable        |
|                                             | Occupant interview                                                                                                                                            | Level 1                     |                      |                        |                           |                 |
|                                             | Numerical tool                                                                                                                                                |                             | Level 3              | Level 1                |                           |                 |
|                                             | Energy bills                                                                                                                                                  | Level 2                     |                      |                        | Level 3                   |                 |
| Level 1                                     | Most inaccurate data quality level                                                                                                                            |                             |                      |                        |                           |                 |
| Level 2                                     | Middle data quality level                                                                                                                                     |                             |                      |                        |                           |                 |
| Level 3                                     | Most accurate data quality level                                                                                                                              |                             |                      |                        |                           |                 |
| Variable                                    | Multiple levels of uncertainties                                                                                                                              |                             |                      |                        |                           |                 |
| Undefinable                                 | Undefinable level of uncertainty. It is recommended to specify an "undefinable" level only if the way of determination is "other/undefined"                   |                             |                      |                        |                           |                 |
|                                             | Inconsistency originated from specific combinations of <i>source type</i> and <i>way of determination</i> for which no level of uncertainty can be associated |                             |                      |                        |                           |                 |

Figura 6.1. Matrice per l'assegnazione delle etichette di qualità dei dati, tratta dal progetto URBEM [28].

Secondo la matrice in Figura 6.1, si distinguono tre livelli di affidabilità, interpretati come segue:

- **Livello 1:** dato debole, associato a elevata incertezza;
- **Livello 2:** dato di qualità intermedia, associato a incertezza media;
- **Livello 3:** dato forte, associato a bassa incertezza.

La qualità del dato dipende congiuntamente dalla *fonte* (asse verticale) e dalla *modalità di acquisizione/determinazione* (asse orizzontale). Le fonti considerate (adattabili al contesto di studio) sono:

1. riferimento esterno (ad es. letteratura scientifica, database nazionali/internazionali, studi precedenti);
2. sopralluogo;
3. norme e provvedimenti tecnici (UNI, EN, ISO, decreti);
4. ipotesi formulate dal modellatore (in assenza di dati);
5. informazioni dagli occupanti (ad es. orari, set-point, modalità d'uso);
6. output di modelli o software (ad es. CitySim o strumenti GIS/analitici);
7. consumi reali (bollette e/o misure).

Le modalità di acquisizione/determinazione considerate sono:

1. osservazione diretta (senza calcolo o misura strumentale);
2. calcolo fisico o normativo dettagliato;
3. calcolo semplificato o regressivo;
4. misura diretta o monitoraggio strumentale;
5. metodo non chiaramente definito.

Per dati ottenuti mediante procedure indirette (derivazioni, catene di calcolo, regressioni o composizione di più contributi), si propone un criterio cautelativo: l'indice di qualità assegnato al dato finale è assunto pari a quello del contributo più incerto utilizzato nella determinazione, così da evitare una sovrastima dell'affidabilità complessiva.

## 6.2 Dati climatici

I dati climatici possono essere reperiti da differenti fonti, quali database istituzionali o tecnici (ad esempio Comitato Termotecnico Italiano, ARPA o altri archivi disponibili in rete) oppure da misurazioni effettuate direttamente nella località di interesse. In genere tali dataset includono informazioni quali: (i) temperatura dell'aria esterna; (ii) componenti diretta e diffusa dell'irraggiamento solare; (iii) umidità dell'aria; (iv) condizioni del vento; (v) precipitazioni e, più in generale, ulteriori variabili descrittive delle condizioni climatiche del sito.

I dataset disponibili possono differire sia per il significato del dato, sia per la copertura e la risoluzione temporale. In relazione al significato, i dati possono essere *misurati* (relativi a uno specifico periodo di osservazione) oppure *standard/tipologici* (ottenuti tramite analisi statistica e rappresentativi del clima locale, come nel caso di alcuni dataset CTI). Per quanto riguarda copertura e risoluzione temporale, sono possibili diverse configurazioni (ad esempio copertura annuale con risoluzione oraria), purché coerenti con gli obiettivi dello studio e con le caratteristiche dello strumento di simulazione adottato.

## 6.3 Dati geometrici

I dati geometrici necessari alla costruzione del modello possono essere ottenuti mediante differenti modalità: (i) misure dirette rilevate durante attività di sopralluogo; (ii) utilizzo di mappe e dati satellitari (ad esempio Google Earth); (iii) consultazione di database regionali o relativi alla località di riferimento (ad esempio geoportali); (iv) impiego di strumenti GIS; (v) utilizzo di modelli in formato CityGML [43]; (vi) oppure tramite una combinazione delle fonti citate.

Il modello geometrico può inoltre essere rappresentato con diversi livelli di dettaglio. Nel contesto della modellazione a scala urbana, un riferimento ampiamente utilizzato è lo standard dell'Open Geospatial Consortium, denominato “*OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard*” [4], che introduce il concetto di *Level of Detail* (LOD), ovvero un indicatore del livello di dettaglio associato alla rappresentazione geometrica. Lo standard distingue cinque livelli di dettaglio:

- LOD0, che consiste essenzialmente in un modello digitale del terreno *2.5D*, sul quale può essere sovrapposta un'immagine aerea o una mappa, e in cui gli edifici possono essere rappresentati tramite poligoni di impronta a terra;
- LOD1, corrispondente a un modello *a blocchi*, costituito da edifici prismatici con coperture piane;
- LOD2, che include coperture differenziate e superfici di confine tematicamente distinte;
- LOD3, indicativo di modelli di tipo architettonico, con strutture di pareti e coperture dettagliate, che possono includere porte e finestre;

- LOD4, che estende il modello LOD3 introducendo anche le strutture interne degli edifici.

Si osserva che, nella modellazione energetica urbana, un maggiore dettaglio geometrico comporta anche un incremento della complessità computazionale. Per questo motivo si ricerca un livello di dettaglio coerente con il compromesso tra onere computazionale e rappresentatività energetica dei risultati; di conseguenza, la scelta ricade spesso su livelli intermedi (ad esempio LOD2).

Infine, per ottenere risultati più attendibili, è opportuno modellare anche gli edifici e/o gli ostacoli presenti nell'intorno del contesto analizzato che possano influenzare il comportamento energetico del dominio di studio (ad esempio per effetti di ombreggiamento o di schermatura dal vento).

## 6.4 Dati generali sugli edifici

Le informazioni generali sugli edifici (ad esempio numero di piani, destinazione d'uso, numero di unità immobiliari ed epoca di costruzione) sono rilevanti ai fini della successiva caratterizzazione, anche in termini energetici, poiché consentono di inquadrare correttamente ciascun edificio e di supportare l'assegnazione di parametri e profili d'uso coerenti con la tipologia edilizia.

Tali dati possono essere reperiti mediante diverse modalità: attività di sopralluogo, interviste a figure competenti, consultazione di banche dati e documentazione disponibile. In particolare, le fonti possono includere database accessibili in rete (ad esempio geoportali), archivi presso le autorità competenti (ad esempio catasto) e documentazione già disponibile (ad esempio visure catastali o attestati di prestazione energetica).

## 6.5 Dati sulle caratteristiche dell'involucro

Le caratteristiche dei componenti di involucro possono essere determinate mediante attività di sopralluogo oppure ricavate con il supporto di standard tecnici e fonti documentali. In generale, una prima distinzione riguarda la natura del componente, separando l'involucro *trasparente* da quello *opaco*.

### 6.5.1 Dati sull'involucro trasparente

I componenti appartenenti all'involucro trasparente sono principalmente finestre e porte. Essi ricevono una definizione geometrica esplicita a partire dal livello di dettaglio LOD3, come discusso nel paragrafo precedente dedicato ai livelli di rappresentazione geometrica in ambito UBEM. Tuttavia, qualora si adottino livelli di dettaglio che non includono la modellazione geometrica esplicita dei componenti trasparenti, e se lo strumento di simulazione lo consente, è possibile tenerne conto specificando la frazione di ciascuna superficie di involucro occupata dalle parti trasparenti, denominata in questo lavoro *glazing ratio*.

Le proprietà energetiche dei componenti trasparenti (ad esempio trasmittanza termica e fattore di trasmissione solare  $g$ ) possono essere reperite attraverso diverse fonti:

1. sopralluogo e/o intervista a figure competenti (ad esempio proprietari, progettisti o amministratori);
2. schede tecniche dei componenti, qualora disponibili o ricostruibili a partire dalla tipologia installata;
3. calcolo secondo standard tecnici, se sono disponibili i dati necessari (ad esempio UNI/TS 11300-1 [9]);
4. utilizzo di database di archetipi edilizi disponibili (ad esempio quelli del progetto URBEM [44]);
5. assunzioni ragionevoli in assenza di informazioni, esplicitando tuttavia un'elevata incertezza associata al dato in ingresso.

### 6.5.2 Dati sull'involucro opaco

I componenti appartenenti all'involucro opaco comprendono pareti verticali, coperture e solai. Per derivare i principali parametri energetici (ad esempio trasmittanza e massa termica) è possibile fare riferimento alle stratigrafie reali, qualora note; in alternativa, tali stratigrafie possono essere determinate mediante strumenti di supporto come abachi e repertori tipologici, ad esempio quelli proposti dalla UNI/TR 11552 [8]. In particolare, attraverso tali strumenti è possibile risalire a stratigrafie rappresentative in funzione di informazioni disponibili, quali epoca di costruzione, trasmittanza attesa o spessori.

Le informazioni necessarie per selezionare la stratigrafia (o per restringere il campo di scelta) possono a loro volta essere ottenute con diverse modalità, ad esempio: sopralluoghi, interviste a figure competenti, elaborati di progetto, database di archetipi edilizi oppure, in assenza di tali fonti, tramite assunzioni ragionevoli, esplicitando l'elevata incertezza associata al dato.

Qualora non si disponga del valore diretto della trasmittanza, questa può essere calcolata a partire dalla stratigrafia assunta impiegando i metodi e i parametri forniti dagli standard tecnici, ad esempio UNI EN ISO 6946 [18] e UNI/TS 11300-1 [9].

## 6.6 Dati sulla modalità di utilizzo degli edifici

I dati che descrivono le modalità di utilizzo degli edifici, quali temperature interne, politiche di controllo dei dispositivi di ombreggiamento, apporti interni dovuti a occupanti e apparecchiature e relativi profili d'uso, possono essere ricavati tramite interviste agli occupanti (approccio spesso poco praticabile in ambito URBEM, data la numerosità degli edifici) oppure mediante assunzioni basate su norme tecniche e standard di riferimento.

### 6.6.1 Caratteristiche generali di modalità di utilizzo degli edifici

Le variabili che descrivono le modalità generali di utilizzo degli edifici, come le temperature interne di set-point e le politiche di impiego dei dispositivi di ombreggiamento, possono essere ottenute da misurazioni, qualora disponibili. Tuttavia, in un contesto UBEM, la disponibilità di campagne di misura diffuse risulta spesso limitata, anche in ragione della numerosità degli edifici considerati. In alternativa, un approccio consolidato consiste nell'assunzione di valori e criteri definiti da standard tecnici. A titolo di esempio: (i) la UNI/TS 11300-1 [9], che fornisce valori di riferimento per le temperature interne nei periodi invernali ed estivi; (ii) la UNI EN ISO 52016-1 [17], per quanto riguarda l'utilizzo dei dispositivi di ombreggiamento in funzione della tipologia di controllo adottata.

### 6.6.2 Censimento degli apporti interni e relativi profili

La caratterizzazione dei carichi interni risulta determinante, poiché tali apporti influenzano direttamente i fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento. In generale, essi possono essere ricondotti a tre principali contributi: (i) occupanti; (ii) apparecchiature; (iii) illuminazione artificiale.

La quantificazione dei carichi può essere effettuata, in linea teorica, a partire dal numero di occupanti per edificio e dalla potenza installata per illuminazione e apparecchiature. Tuttavia, in un contesto UBEM, il reperimento sistematico di tali informazioni a livello di singolo edificio risulta spesso difficilmente praticabile; di conseguenza, si preferisce l'impiego di valori standardizzati ricavati da norme tecniche.

Per quanto riguarda i profili temporali, anche in questo caso un riferimento efficace è rappresentato dagli standard tecnici. Un esempio è la UNI EN 16798-1 [19], che fornisce indicazioni utili per la definizione di carichi e profili d'uso in funzione della destinazione d'uso.

Si osserva tuttavia che tali norme sono sviluppate principalmente per la modellazione del singolo edificio. L'applicazione diretta di profili standard a scala urbana può introdurre semplificazioni che incidono sui risultati UBEM. D'altro canto, in assenza di riferimenti tecnici specificamente concepiti per la modellazione energetica urbana, l'adozione di standard normativi rappresenta una scelta operativa ragionevole e, nel complesso, una delle opzioni più tracciabili e replicabili come prima approssimazione.

## 6.7 Dati relativi ai servizi energetici degli edifici modellati

Per la modellazione dei servizi energetici presenti (o assunti presenti) negli edifici oggetto di studio, la condizione ideale consiste nel disporre di documentazione tecnica che consenta di determinare i principali parametri caratterizzanti i sistemi. A titolo di esempio, possono risultare utili: libretti di impianto/centrale, attestati di prestazione energetica (APE) e/o elaborati progettuali, dai quali è spesso possibile ricavare informazioni su tipologia di generatore, configurazione impiantistica e rendimenti di sottosistema.

Le informazioni non direttamente ricavabili dalla documentazione disponibile possono essere assunte mediante riferimenti tecnici coerenti, quali la serie UNI/TS 11300. In particolare:

- per ACS, riscaldamento, ventilazione e illuminazione, nonché per gli aspetti connessi alla determinazione dei rendimenti di sottosistema, può essere utilizzata la UNI/TS 11300-2 [21];
- per la climatizzazione estiva (raffrescamento) si può fare riferimento alla UNI/TS 11300-3 [3];
- per sistemi alimentati da fonti rinnovabili (ad esempio solare termico e fotovoltaico) e, più in generale, per la trattazione di alcuni generatori non basati su combustibili fossili (ad esempio pompe di calore) o vettori alternativi (ad esempio teleriscaldamento), si può fare riferimento alla UNI/TS 11300-4 [14];
- per i servizi di trasporto di persone (ascensori, scale mobili, ecc.) si può fare riferimento alla UNI/TS 11300-6 [15].

Qualora non sia possibile reperire una specifica informazione, questa può essere assunta tramite ipotesi, purché motivate e coerenti con il contesto di studio, attribuendo al dato un livello di qualità adeguatamente cautelativo secondo la metodologia proposta nei paragrafi precedenti.

In ambito prevalentemente residenziale, alcuni servizi quali illuminazione e trasporto di persone possono essere trascurati, in coerenza con l'impostazione normativa e con l'obiettivo di concentrare l'analisi sui servizi energetici tipicamente prevalenti (climatizzazione, eventuale ventilazione meccanica e produzione di ACS), che costituiscono, nella maggior parte dei casi, la quota principale dei consumi.

Infine, qualora l'obiettivo dell'analisi sia la valutazione comparativa dell'efficienza energetica a scala urbana, è possibile adottare l'ipotesi di generatori non vincolati in potenza (potenza massima non limitante), trascurando eventuali sottodimensionamenti. In tal modo, l'attenzione si concentra sulle efficienze stagionali dei servizi considerati e sui corrispondenti indicatori energetici, rendendo più immediato il confronto tra scenari e configurazioni.

## 6.8 Simulazione e trattamento dei risultati

Una volta definito il modello e raccolti i dati di input necessari alla caratterizzazione energetica dello stato di fatto del contesto analizzato, è possibile eseguire la simulazione mediante uno strumento idoneo alla modellazione energetica a scala urbana. La simulazione consente di ottenere, per ciascun edificio e per l'intero comparto, grandezze quali fabbisogni ideali e consumi energetici associati ai servizi considerati.

I dati derivati da standard tecnici o da altre fonti devono essere preventivamente rielaborati e armonizzati, in modo da risultare coerenti con il formato e con le variabili richieste in ingresso dallo strumento di simulazione adottato.

Idealmente, qualora siano disponibili dati di consumo reale (ad esempio bollette) e il corrispondente dataset climatico riferito al medesimo periodo, risulta opportuno procedere a una calibrazione del modello. Tale procedura consente di ridurre l'incertezza associata ai risultati e di migliorare la rappresentatività del modello rispetto alle condizioni reali dello stato di fatto. Tuttavia, la disponibilità di informazioni complete e coerenti su consumi e clima è spesso limitata, rendendo la calibrazione difficilmente applicabile nella pratica.

Una volta verificata la coerenza fisica dei risultati, gli output possono essere sottoposti a post-processing al fine di ottenere indicatori finali e aggregazioni coerenti con gli obiettivi dello studio (ad esempio a scala mensile/annuale, per edificio, per tipologia d'uso o per comparto).

Nei capitoli successivi viene presentata un'implementazione della metodologia descritta nel presente capitolo, applicata a un caso studio reale introdotto nel capitolo seguente.



## Capitolo 7

# Implementazione

Il presente capitolo propone un esempio di applicazione della metodologia descritta nel capitolo precedente per la costruzione di un modello energetico urbano. L'obiettivo è duplice: da un lato presentare un caso pratico, evidenziando le principali criticità che emergono in ambito UBEM e discutendo possibili strategie operative per affrontarle; dall'altro mostrare la tipologia di risultati ottenibili mediante modellazione energetica urbana e il potenziale dello strumento per l'analisi di scenari di efficientamento.

In coerenza con gli obiettivi del lavoro, la modellazione UBEM adottata è di tipo *bottom-up*, con rappresentazione geometrica a livello di dettaglio LOD2 e impiego di archetipi per la caratterizzazione energetica e per le modalità d'uso degli edifici. Ove disponibili, sono state tuttavia privilegiate informazioni derivate da sopralluoghi e valori ricavati dal quadro normativo e dagli standard tecnici. La simulazione dinamica è stata condotta mediante *CitySim Solver*.

### 7.1 Presentazione del caso studio

Il caso studio riguarda un isolato situato nel contesto urbano della città di Torino, alle coordinate geografiche  $45^{\circ}04'45''\text{N}$  e  $7^{\circ}40'34''\text{E}$ , a quota 239 m s.l.m. [45]. La località ricade in zona climatica E, con 2617 gradi-giorno [1]. La norma UNI 10349-1:2016 riporta per Torino una temperatura media esterna annua pari a  $12,8^{\circ}\text{C}$  [12]. Inoltre, i valori annuali di irraggiamento diffuso e diretto possono essere ricavati come somma dei valori medi mensili del Prospetto 6 della medesima norma, ottenendo rispettivamente  $66,1 \text{ MJ/m}^2$  e  $92,9 \text{ MJ/m}^2$  [12].

L'isolato di riferimento è composto da nove edifici, tutti appartenenti alla categoria d'uso E.1: otto edifici ad uso abitativo continuativo (E.1(1)) e un edificio alberghiero (E.1(3)). In Figura 7.1 è riportata un'immagine satellitare dell'area oggetto di studio.

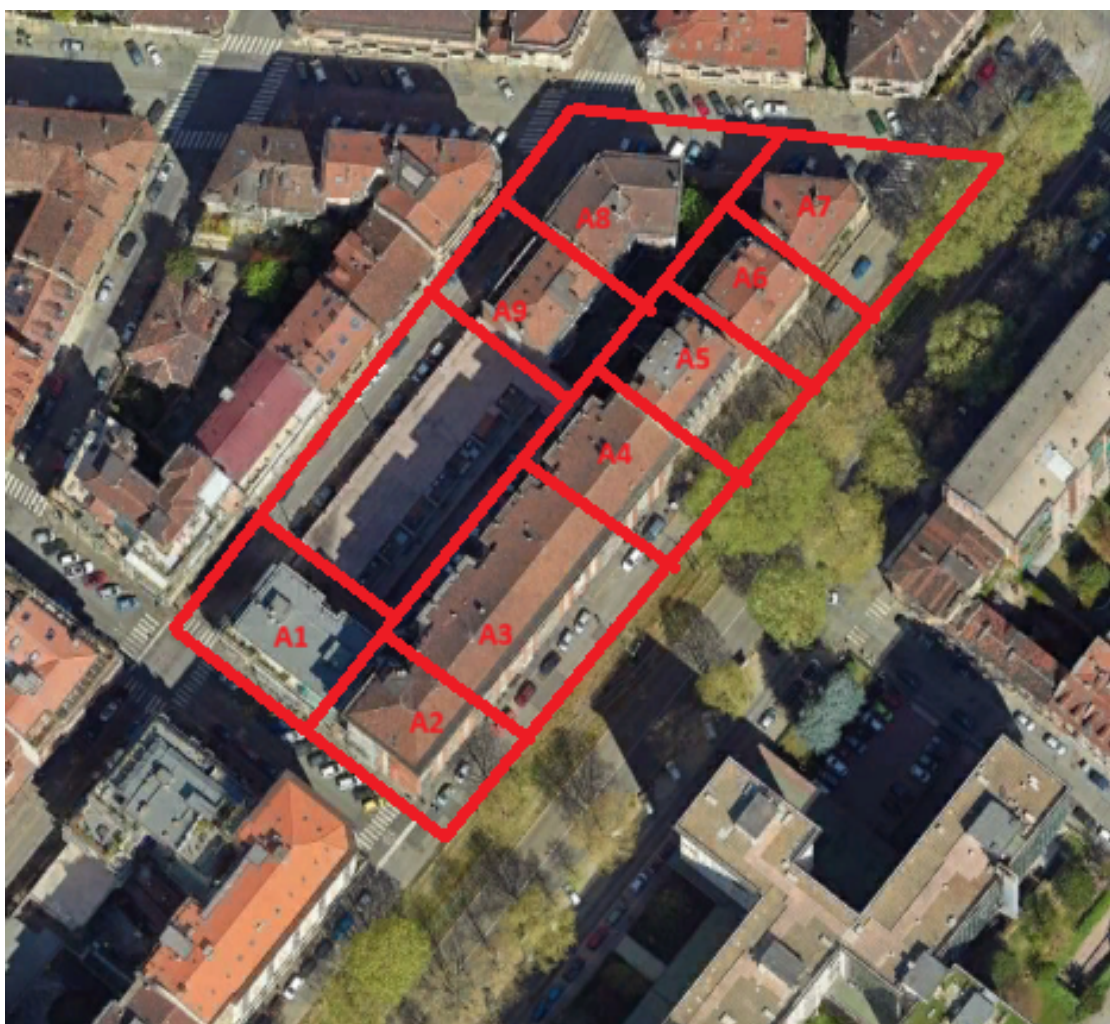


Figura 7.1. Immagine satellitare dell'isolato di riferimento (nord in alto).

Nei paragrafi seguenti vengono esplicitate le scelte adottate per la selezione dei dati di input necessari alla simulazione, evidenziando le principali criticità e le relative assunzioni. In continuità con quanto discusso nel capitolo precedente, le informazioni richieste per la costruzione del modello possono essere ricondotte ai seguenti ambiti:

1. dati climatici annuali relativi alla città di Torino;
2. dati generali inerenti ai singoli edifici;
3. caratteristiche dell'involucro, sia opaco sia trasparente;
4. informazioni sulle modalità di utilizzo degli edifici, necessarie per la definizione degli apporti interni e dei relativi profili;

5. parametri e rendimenti dei servizi di climatizzazione invernale e di produzione di acqua calda sanitaria.

Considerata la limitata disponibilità di informazioni affidabili su ventilazione meccanica, sistemi di accumulo e, in particolare, sugli impianti di climatizzazione estiva, nonché la loro presumibile assenza nella maggior parte delle unità analizzate, tali servizi non sono stati modellati in termini di sistema impiantistico e relativi consumi in energia primaria. L'analisi si concentra pertanto sulla climatizzazione invernale e sulla produzione di ACS, servizi presenti con elevata probabilità nell'intero campione, riducendo l'incertezza introdotta da assunzioni non supportate da evidenza.

Si precisa tuttavia che, pur in assenza della modellazione del servizio di raffrescamento, viene comunque analizzato il fabbisogno ideale di raffrescamento, utilizzato come indicatore del comportamento estivo dell'involucro e della sensibilità agli apporti interni e solari.

Infine, coerentemente con l'impostazione metodologica proposta nel capitolo precedente, a ciascun parametro selezionato viene associato un indice di qualità del dato, definito in funzione della fonte e della modalità di determinazione, al fine di rendere trasparente il livello di affidabilità delle informazioni utilizzate in ingresso al modello.

## 7.2 Dati climatici

Ai fini della modellazione energetica del caso studio, i dati climatici di input sono stati assunti pari all'anno climatico tipo reso disponibile dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI) per la località di Torino [30]. Il dataset, rappresentativo delle condizioni climatiche medie locali, fornisce le principali variabili meteorologiche con risoluzione oraria su un intero anno ed è quindi coerente con le esigenze della simulazione dinamica adottata nel presente lavoro.

In particolare, l'anno climatico tipo include le principali variabili meteorologiche rilevanti per la valutazione dei bilanci energetici degli edifici, quali la temperatura dell'aria esterna, le componenti diretta e diffusa dell'irraggiamento solare, l'umidità dell'aria e le condizioni di vento.

Al fine di garantire la compatibilità con l'ambiente di simulazione CitySim, i dati climatici sono stati opportunamente riorganizzati nel formato `.cli`, selezionando esclusivamente le variabili effettivamente utilizzate dal modello per il calcolo dei flussi termici e dei guadagni solari, ovvero la temperatura dell'aria esterna, l'irraggiamento solare diretto e diffuso, la velocità del vento e l'umidità relativa.

Nelle figure che seguono sono riportati alcuni boxplot utili a illustrare l'andamento delle distribuzioni mensili delle principali variabili climatiche impiegate nei calcoli energetici sviluppati nel presente lavoro.

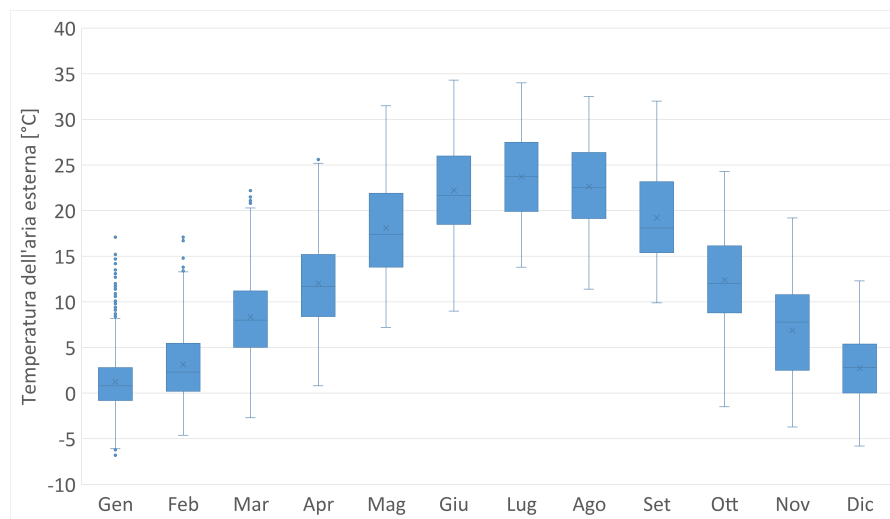


Figura 7.2. Boxplot delle distribuzioni mensili della temperatura dell'aria esterna.

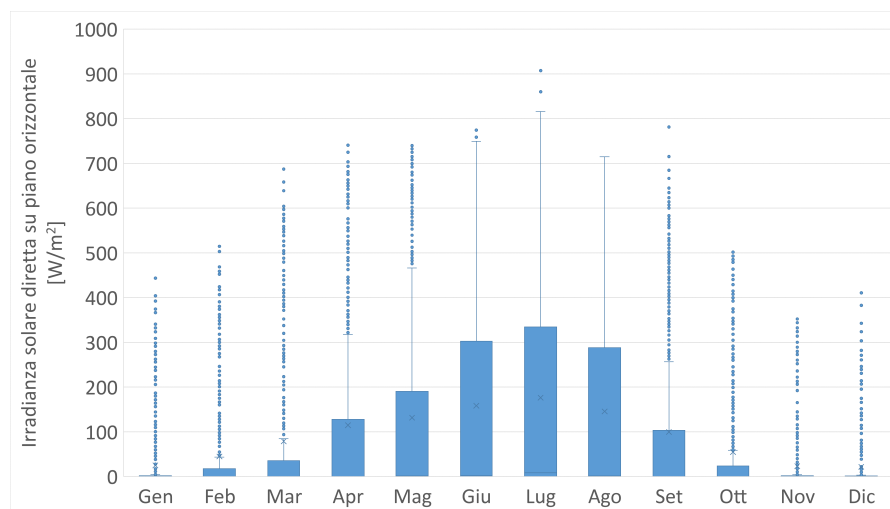


Figura 7.3. Boxplot delle distribuzioni mensili dell'irradianza solare diretta su piano orizzontale.

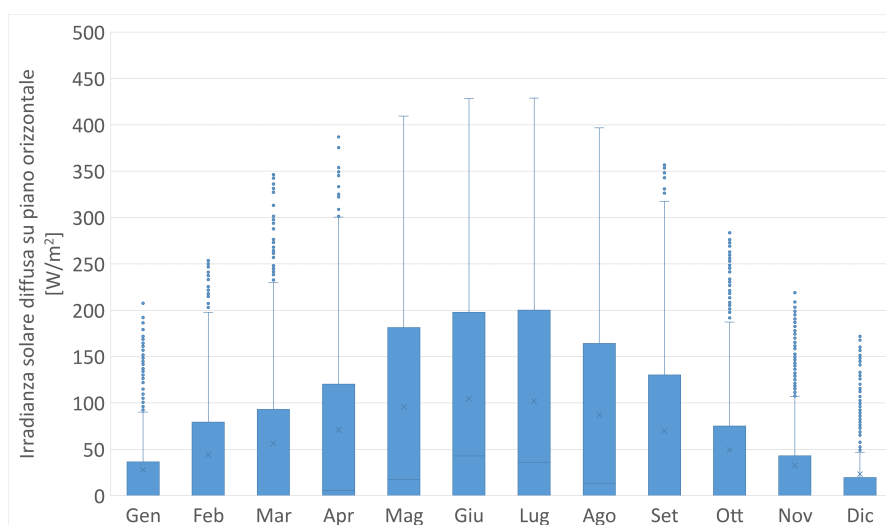


Figura 7.4. Boxplot delle distribuzioni mensili dell'irradianza solare diffusa su piano orizzontale.

Come si evince dalla Figura 7.2, la temperatura dell'aria esterna aumenta progressivamente passando dai mesi invernali a quelli estivi, per poi diminuire nuovamente nei mesi autunnali. Il mese mediamente più caldo risulta luglio, mentre i valori minimi si registrano nei mesi invernali. In particolare, il file climatico considerato presenta temperature minime comprese intorno a  $-7^{\circ}\text{C}$  nel mese di gennaio e massime prossime a  $34^{\circ}\text{C}$  nei mesi estivi.

Un andamento analogo si osserva anche per l'irradianza solare, sia diretta sia diffusa, rappresentate rispettivamente nelle Figure 7.3 e 7.4. In entrambi i casi i valori più elevati si registrano nei mesi estivi, con massimi che raggiungono oltre  $900\text{ W/m}^2$  per la componente diretta e circa  $430\text{ W/m}^2$  per la componente diffusa, entrambi in corrispondenza del mese di luglio.

### 7.2.1 Definizione dei dati climatici e indici di qualità associati

Di seguito sono riportati gli indici di qualità, la fonte e le modalità di acquisizione dei dati climatici utilizzati:

Tabella 7.1. Indici di qualità, fonte e modalità di acquisizione dei dati climatici utilizzati.

| Definizione                            | Indice di qualità | Fonte             | Modalità |
|----------------------------------------|-------------------|-------------------|----------|
| Dati climatici annuali con base oraria | 2                 | database CTI [30] | \        |

### 7.3 Geometria del modello

Come anticipato nei capitoli precedenti, CitySim richiede la geometria come input esterno; pertanto, la modellazione geometrica degli edifici oggetto di studio e di quelli circostanti, che contribuiscono all'ombreggiamento, è stata effettuata mediante SketchUp. In questo lavoro, le misure in pianta sono state ricavate tramite la scalatura di un'immagine satellitare ottenuta da Google Earth, calibrata facendo coincidere un lato dell'isolato con la corrispondente misura rilevata in situ. Le altezze degli edifici sono state invece desunte dai dati disponibili nel Geoportale della Città di Torino [29]. In coerenza con la procedura descritta nella *CitySim Guide: Urban Energy Modelling* [16], il modello è stato costruito in SketchUp adottando un template architettonico con unità di misura in metri; l'immagine di base è stata importata come riferimento grafico e successivamente scalata mediante lo strumento di misura, imponendo una distanza nota e verificando poi la correttezza della scala ottenuta.

Una volta definita correttamente la scala, sono stati tracciati i contorni degli edifici mediante polilinee chiuse e si è proceduto alla loro estrusione in funzione delle altezze reperite dal Geoportale. La modellazione è stata sviluppata con un livello di dettaglio geometrico pari a LOD 2, includendo quindi anche la forma delle coperture. Nell'immagine 7.6 è mostrato il modello geometrico estruso a partire dalla pianta, realizzato in SketchUp per il caso di studio.



Figura 7.5. Immagine dell'isolato di riferimento dal Geoportale della Città di Torino [29].

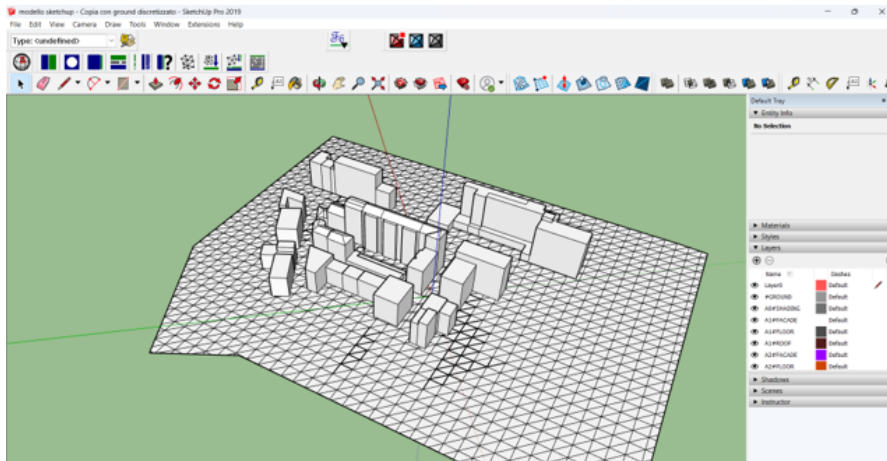


Figura 7.6. Modello geometrico implementato in SketchUp mediante estrusione delle impronte in pianta.

Affinché il modello geometrico sia correttamente leggibile da CitySim, esso deve rispettare specifiche convenzioni di modellazione e di denominazione dei layer, come indicato nella guida *CitySim Guide: Urban Energy Modelling* [16]. In particolare, CitySim riconosce gli elementi geometrici in funzione del nome del layer: le facciate devono essere associate a layer del tipo `NomeEdificio#FACADE`, le coperture a `NomeEdificio#ROOF`, gli elementi di ombreggiamento a `NomeEdificio#SHADING`, eventuali superfici non appartenenti al volume chiuso a `NomeEdificio#SURFACE`, il terreno a `#GROUND` e le superfici inferiori verso il basso a `NomeEdificio#FLOOR`. La guida sottolinea inoltre che non deve essere presente alcun separatore tra il nome dell'edificio e il suffisso del layer e che il volume interno dell'edificio deve risultare geometricamente chiuso e privo di superfici aperte, altrimenti il modello può generare errori in fase di importazione.

Nel caso di SketchUp, la guida raccomanda inoltre l'utilizzo dell'estensione `skp_to_dxf_3DFACE.rbz`, che consente l'esportazione del modello nel formato DXF compatibile con CitySim. Una volta completata la modellazione, il file è stato quindi esportato in formato DXF mediante l'opzione **File > Export to DXF for CitySim**; successivamente, in CitySim, l'importazione è stata effettuata tramite il comando **Import > AutoCAD DXF 2000 with 3DFACES**. La procedura di importazione e le relative criticità sono descritte esplicitamente nella guida, che segnala come gli errori più comuni siano legati alla presenza di volumi aperti o superfici irregolari nel modello tridimensionale. Di seguito, nella Figura 7.7, è riportata la geometria del modello visualizzata nell'interfaccia di CitySim a seguito dell'importazione.

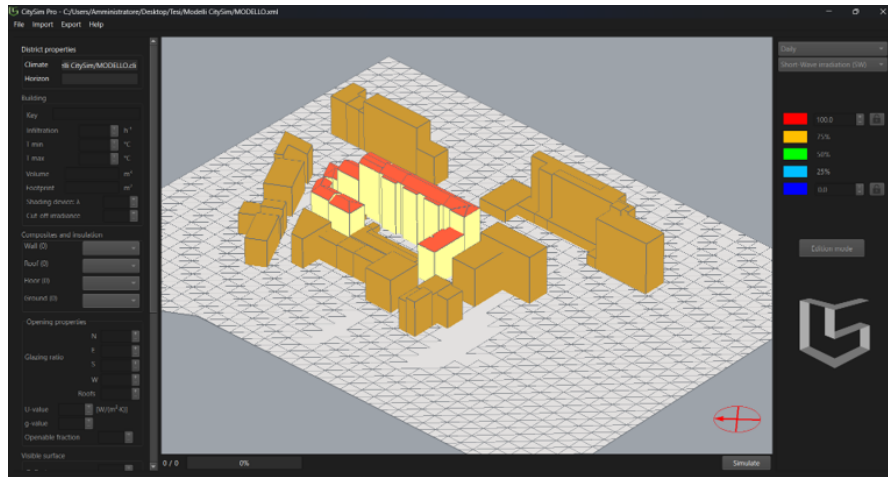


Figura 7.7. Geometria del modello visualizzata attraverso l'interfaccia di CitySim dopo l'importazione del file DXF.

### 7.3.1 Definizioni dei dati geometrici e indici di qualità associati

Di seguito sono riportati gli indici di qualità, la fonte e le modalità di acquisizione dei dati geometrici utilizzati:

Tabella 7.2. Indici di qualità, fonte e modalità di acquisizione dei dati geometrici utilizzati.

| Definizione          | Indice di qualità | Fonte                     | Modalità                              | Note                                                                                           |
|----------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Misure in pianta     | 2                 | Sopralluogo               | Misura diretta / calcolo semplificato | Una dimensione misurata, le altre ricavate tramite scalatura su immagine importata in SketchUp |
| Misura delle altezze | 2                 | Geoportale di Torino [29] | \                                     | \                                                                                              |
| Geometria dei tetti  | 1                 | Google Earth              | \                                     | Forma coerente, misure di elevata incertezza                                                   |

## 7.4 Caratteristiche generali degli edifici

La caratterizzazione preliminare dello stock edilizio oggetto di studio rappresenta un passaggio fondamentale per l'implementazione del modello UBEM, in quanto consente l'assegnazione coerente dei parametri geometrici, termo-fisici e d'uso degli edifici. A tal fine, gli edifici sono stati descritti in termini di dimensione geometrica, tipologia

edilizia ed epoca di costruzione, informazioni determinanti per la successiva modellazione energetica.

Le informazioni relative al periodo di costruzione, al numero di piani e alla destinazione d'uso degli edifici sono state desunte dal Geoportale della Città di Torino [29] e successivamente verificate e integrate mediante attività di sopralluogo, al fine di ridurre le incertezze associate ai dati di input. Il rilievo in sito ha inoltre consentito di determinare il numero di unità immobiliari per ciascun edificio. Per l'edificio a destinazione alberghiera, caratterizzato da una maggiore eterogeneità funzionale, le informazioni relative alla ripartizione degli spazi (camere, reception e ristorante) e al numero di camere da letto sono state ulteriormente integrate mediante interviste al personale della struttura e attraverso l'analisi di dati pubblicamente disponibili forniti dalla stessa.

I parametri geometrici globali, quali il volume e la superficie lorda, sono stati ricavati direttamente dagli output del modello geometrico implementato in Sketchup e successivamente importato in CitySim. Per quanto riguarda la superficie in pianta complessiva, è stato necessario tenere conto del fatto che CitySim restituisce la sola area di proiezione al suolo; pertanto, tale valore è stato opportunamente esteso, moltiplicandolo per il numero di piani, al fine di ottenere una stima coerente della superficie lorda complessiva. La superficie utile riscaldata è stata determinata a partire dall'Attestato di Prestazione Energetica (APE) disponibile per l'edificio A1. Per gli altri edifici dell'isolato, in assenza di dati completi a scala di edificio, si è assunta la medesima incidenza della superficie utile riscaldata rispetto alla superficie lorda totale. Tale assunzione risulta supportata dall'analisi di APE relativi a singole unità immobiliari appartenenti agli altri edifici dell'isolato, reperiti tramite il portale regionale Energia Piemonte [35], dai quali emerge un rapporto medio tra superficie utile e superficie lorda sostanzialmente analogo a quello riscontrato per l'edificio A1. La tabella 7.3 sintetizza le principali caratteristiche tipologiche del costruito, in termini di destinazione d'uso, periodo di costruzione e numero di piani, mentre la tabella 7.4 riporta i parametri geometrici e le superfici assunti come dati di input per la modellazione energetica urbana.

Tabella 7.3. Caratteristiche tipologiche degli edifici dell'isolato

| <b>Edificio</b> | <b>Destinazione d'uso</b> | <b>Anno di costruzione</b> | <b>Piani</b> |
|-----------------|---------------------------|----------------------------|--------------|
| <b>[-]</b>      | <b>[-]</b>                | <b>[-]</b>                 | <b>[-]</b>   |
| A1              | E.1 (1)                   | 1946–1960                  | 7            |
| A2              | E.1 (1)                   | 1961–1970                  | 10           |
| A3              | E.1 (1)                   | 1946–1960                  | 10           |
| A4              | E.1 (1)                   | 1946–1960                  | 10           |
| A5              | E.1 (3)                   | 1961–1970                  | 10           |
| A6              | E.1 (1)                   | 1946–1960                  | 6            |
| A7              | E.1 (1)                   | 1946–1960                  | 4            |
| A8              | E.1 (1)                   | 1961–1970                  | 6            |
| A9              | E.1 (1)                   | 1961–1970                  | 6            |

Tabella 7.4. Parametri geometrici e superfici degli edifici dell'isolato

| Edificio<br>[-] | Volume<br>[m <sup>3</sup> ] | Area in pianta lorda<br>[m <sup>2</sup> ] | Superficie utile riscaldata<br>[m <sup>2</sup> ] | Sup. utile / Sup. lorda<br>[m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ] |
|-----------------|-----------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| A1              | 8755                        | 2471                                      | 1596                                             | 0.65                                                         |
| A2              | 9462                        | 2450                                      | 1593                                             | 0.65                                                         |
| A3              | 20 076                      | 5130                                      | 3335                                             | 0.65                                                         |
| A4              | 9965                        | 2550                                      | 1658                                             | 0.65                                                         |
| A5              | 8537                        | 2180                                      | 1417                                             | 0.65                                                         |
| A6              | 6246                        | 1440                                      | 936                                              | 0.65                                                         |
| A7              | 2985                        | 692                                       | 450                                              | 0.65                                                         |
| A8              | 5535                        | 1380                                      | 897                                              | 0.65                                                         |
| A9              | 5154                        | 1386                                      | 901                                              | 0.65                                                         |

Inoltre, CitySim richiede la definizione di un insieme di parametri generali di esercizio degli edifici, tra cui le temperature interne di riferimento per i periodi di riscaldamento e raffrescamento, il tasso di ricambio d'aria per ventilazione e i parametri di controllo dei dispositivi di ombreggiamento solare. Tali parametri risultano determinanti per la corretta valutazione dei flussi termici e dei guadagni solari a scala di edificio.

Per la definizione delle temperature interne di riferimento e dei ricambi d'aria è stata assunta come riferimento la norma UNI/TS 11300-1 [9], al fine di garantire coerenza normativa e confrontabilità dei risultati. In particolare, la temperatura interna di progetto per la climatizzazione invernale è stata assunta pari al valore prescritto per gli edifici residenziali, come indicato al paragrafo 8.1.1 della norma [9], mentre la temperatura interna di riferimento per il periodo estivo è stata definita sulla base delle indicazioni riportate al paragrafo 8.1.2 [9], assumendo il valore previsto per la medesima destinazione d'uso.

Il tasso di ricambio d'aria per ventilazione è stato determinato a partire dalle portate di ventilazione definite al paragrafo 12.2 della UNI/TS 11300-1 [9]. In particolare, la portata media giornaliera mensile di aria esterna è valutata mediante l'equazione (36) della norma [9], che tiene conto della portata minima di progetto e di un fattore di correzione  $f_{ve,t,k}$  dipendente dal profilo di utilizzo dell'edificio e ricavabile dal prospetto E.2 dell'allegato E della medesima norma [9]. Poiché CitySim richiede come input il tasso di ricambio d'aria  $n$ , le relazioni normative espresse in termini di portata sono state ricondotte a tale grandezza. La UNI/TS 11300-1 definisce la portata media giornaliera mensile come:

$$q_{ve,k,mn} = q_{ve,0,k} f_{ve,t,k}. \quad (7.1)$$

Sostituendo la relazione tra portata volumetrica e tasso di ricambio d'aria (eq. 34 della norma [9]),

$$q_{ve,0,k} = \frac{n_{ve,0,k} V}{3600},$$

si ottiene la forma equivalente in termini di ricambi d'aria:

$$n_{ve,k,mn} = n_{ve,0,k} f_{ve,t,k}, \quad (7.2)$$

utilizzata per l'implementazione del parametro di ventilazione in CitySim.

La definizione dei parametri di controllo dei dispositivi di ombreggiamento solare, in particolare l'irradianza di cut-off e il parametro  $\lambda$ , è stata condotta al fine di massimizzare la coerenza tra il modello di gestione delle schermature implementato in CitySim e il quadro normativo di riferimento. In CitySim il comando delle schermature è descritto mediante una funzione sigmoideale, che rappresenta in forma continua la transizione tra la condizione di schermatura completamente aperta e completamente chiusa in funzione dell'irraggiamento incidente. L'Allegato Nazionale della UNI EN ISO 52016-1 [17], invece, non prevede un controllo modulato tra gli estremi, bensì un ciclo di isteresi: per irraggiamento crescente è definita la soglia massima affinché le schermature restino aperte, mentre per irraggiamento decrescente è definita la soglia minima affinché le schermature rimangano chiuse. Nell'intervallo compreso tra tali soglie non è prevista modulazione continua, come rappresentato in Figura 7.9. Poiché la riproduzione esplicita del ciclo di isteresi normativo non è implementabile tramite i soli parametri disponibili in CitySim (senza modifiche al codice del solver), è stata adottata una procedura di calibrazione dei parametri della funzione sigmoideale finalizzata a riprodurre le condizioni limite previste per i dispositivi di schermatura manuali. In particolare, i parametri sono stati scelti in modo che la curva di controllo risultasse coerente, in prossimità delle soglie operative, con i valori riportati nella Tabella NA.24 dell'Allegato Nazionale [17]. La tipologia di schermatura è stata individuata sulla base delle informazioni raccolte durante l'attività di sopralluogo. Le Figura 7.8 riporta rispettivamente la formulazione del controllo sigmoideale adottato da CitySim per la gestione delle schermature.



Figura 7.8. Funzione sigmoideale utilizzata da CitySim per regolare i dispositivi di schermatura. [41]

L'adozione di tali assunzioni consente di tradurre in modo coerente il quadro normativo di riferimento negli input richiesti dal modello UBEM, garantendo una rappresentazione

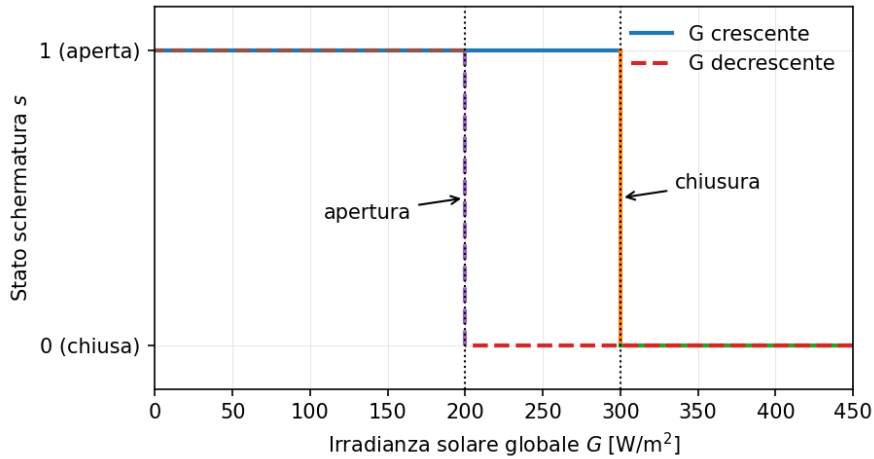


Figura 7.9. Schema del ciclo di isteresi per il controllo dei dispositivi di ombreggiamento in funzione dell'irraggiamento incidente, secondo l'Allegato Nazionale della UNI EN ISO 52016-1. [17]

semplificata ma coerente, sia dal punto di vista fisico sia rispetto alle prescrizioni normative, delle condizioni di esercizio degli edifici a scala urbana. La Tabella 7.5 riassume i parametri di esercizio e di controllo adottati per ciascun edificio dell'isolato. Si osserva che i valori dei ricambi d'aria orari per la ventilazione relativi all'edificio A5 differiscono dagli altri casi, in quanto l'edificio presenta destinazione d'uso alberghiera; per tale tipologia è stato pertanto assunto un valore medio di  $f_{ve,t,k}$  calcolato come media ponderata sui volumi climatizzati dei diversi spazi (ingresso, soggiorno, sala da pranzo e camere da letto), adottando per ciascuno i valori previsti dalla normativa di riferimento.

Tabella 7.5. Parametri di esercizio e controllo adottati per gli edifici dell'isolato

| Edificio<br>[-] | Ricambi ora<br>[h <sup>-1</sup> ] | $T_{\max}$<br>[°C] | $T_{\min}$<br>[°C] | $\lambda$ schermature<br>[-] | Irraggiamento di cut-off<br>[W/m <sup>2</sup> ] |
|-----------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|-------------------------------------------------|
| A1              | 0.30                              | 26                 | 20                 | 0.10                         | 250                                             |
| A2              | 0.30                              | 26                 | 20                 | 0.10                         | 250                                             |
| A3              | 0.30                              | 26                 | 20                 | 0.10                         | 250                                             |
| A4              | 0.30                              | 26                 | 20                 | 0.10                         | 250                                             |
| A5              | 0.17                              | 26                 | 20                 | 0.10                         | 250                                             |
| A6              | 0.30                              | 26                 | 20                 | 0.10                         | 250                                             |
| A7              | 0.30                              | 26                 | 20                 | 0.10                         | 250                                             |
| A8              | 0.30                              | 26                 | 20                 | 0.10                         | 250                                             |
| A9              | 0.30                              | 26                 | 20                 | 0.10                         | 250                                             |

#### **7.4.1 Definizione dei dati e indici di qualità associati**

Di seguito sono riportati gli indici di qualità relativi ad ogni edificio, la fonte e le modalità di acquisizione dei dati utilizzati:

Tabella 7.6. Indici di qualità, fonte e modalità di acquisizione dei principali dati di input (per edificio).

| Simbolo                        | Definizione                                         | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | Fonte                                               | Modalità                |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----------------------------------------------------|-------------------------|
| \                              | Destinazione d'uso                                  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | Geoportale di Torino [29]/<br>APE [35]/ sopralluogo | \                       |
| \                              | Anno di costruzione                                 | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | Geoportale<br>di Torino [29]                        | \                       |
| \                              | Numero di piani                                     | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | Sopralluogo                                         | Osservazione<br>diretta |
| V                              | Volume                                              | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | Derivato                                            | \                       |
| S <sub>g</sub>                 | Area in pianta lorda                                | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | Derivata                                            | \                       |
| S <sub>u</sub>                 | Superficie utile<br>riscaldata                      | 3  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | APE [35]/ derivata                                  | \                       |
| S <sub>u</sub> /S <sub>g</sub> | Rapporto tra S <sub>u</sub> e<br>S <sub>lorda</sub> | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | Derivato                                            | \                       |
| n <sub>ve,k,min</sub>          | Numero di ricambi ora                               | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | UNI/TS<br>11300-1 [9]                               | Calcolo<br>semplificato |
| T <sub>max</sub>               | Temperatura interna<br>massima                      | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | UNI/TS<br>11300-1 [9]                               | \                       |
| T <sub>min</sub>               | Temperatura interna<br>minima                       | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | UNI/TS<br>11300-1 [9]                               | \                       |
| λ                              | λ delle schermature                                 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | Derivato                                            | \                       |
| G <sub>cut-off</sub>           | Irraggiamento di cut-off                            | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | Derivato                                            | \                       |

## 7.5 Caratteristiche dell'involucro

Nella modellazione energetica su scala urbana (UBEM) implementata in CitySim, la descrizione dell'involucro avviene mediante parametri aggregati, in modo da mantenere la simulazione scalabile pur preservando le grandezze maggiormente influenti sui bilanci termici. In particolare, la componente trasparente non viene rappresentata tramite la modellazione puntuale dei singoli serramenti, ma attraverso un *glazing ratio*, definito come la frazione della superficie di facciata occupata dagli elementi vetrati.

Nel presente caso studio, al fine di ridurre l'incertezza associata a parametri geometrici che incidono direttamente su apporti solari e dispersioni, il *glazing ratio* è stato determinato sulla base di rilievi geometrici degli elementi finestrati, con attribuzione distinta per edificio e orientamento. In alternativa, in contesti privi di rilievi di dettaglio, tale parametro può essere assunto da archetipi edilizi (ad esempio URBEM [44]); tuttavia, nel caso in esame l'adozione di valori archetipici è stata ritenuta meno rappresentativa rispetto alla caratterizzazione derivata da misure in sito.

La Tabella 7.7 riporta i valori di *glazing ratio* ottenuti per ciascun edificio e per ciascun orientamento. Completata la definizione dei rapporti di superficie trasparente, la caratterizzazione dell'involucro è stata estesa alle proprietà termo-fisiche dei componenti opachi e trasparenti, coerentemente con i livelli di dettaglio e le assunzioni tipiche dell'approccio UBEM adottato.

Tabella 7.7. Valori di *glazing ratio* per edificio e orientamento.

| Edificio | Glazing ratio N | Glazing ratio E | Glazing ratio S | Glazing ratio W |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| [-]      | [-]             | [-]             | [-]             | [-]             |
| A1       | 0,26            | 0,00            | 0,29            | 0,18            |
| A2       | 0,64            | 0,28            | 0,24            | 0,36            |
| A3       | 0,00            | 0,28            | 0,00            | 0,28            |
| A4       | 0,00            | 0,29            | 0,00            | 0,27            |
| A5       | 0,00            | 0,26            | 0,00            | 0,19            |
| A6       | 0,00            | 0,24            | 0,00            | 0,23            |
| A7       | 0,26            | 0,25            | 0,00            | 0,36            |
| A8       | 0,31            | 0,18            | 0,38            | 0,25            |
| A9       | 0,00            | 0,21            | 0,07            | 0,24            |

### 7.5.1 Involucro trasparente

I parametri richiesti in CitySim per la caratterizzazione della componente trasparente dell'involucro includono: la trasmittanza termica dei serramenti  $U_W$ , il fattore solare totale del vetro  $g$  e il parametro *openable fraction*.

Il fattore  $g$  è stato attribuito in funzione della tipologia di vetro, facendo riferimento ai valori consigliati nel prospetto B.5 dell'Allegato B della UNI/TS 11300-1 [9]. Nel caso studio, i sopralluoghi hanno indicato prevalentemente la presenza di doppi vetri

“standard”; pertanto, in assenza di ulteriori informazioni distintive, è stato adottato un valore rappresentativo coerente con tale configurazione per l’insieme dei componenti trasparenti.

La trasmittanza termica  $U_W$  è stata invece assunta dal database degli archetipi URBEM [44]. Tale scelta è motivata dal fatto che la determinazione analitica secondo norma richiede dati di dettaglio (ad esempio gas nell’intercapedine, emissività e stratigrafie complete) non disponibili nel contesto di rilievo e difficilmente ricostruibili con affidabilità, con conseguente incremento dell’incertezza. In particolare, è stato adottato il valore medio associato alla località di riferimento (Piemonte) e all’epoca di costruzione degli edifici, secondo le classi riportate dal database URBEM [44].

Il parametro openable fraction è stato posto pari a zero, al fine di evitare una duplicazione degli effetti della ventilazione naturale. In CitySim, infatti, tale parametro può incrementare il tasso di ventilazione effettivo; ciò risulterebbe non coerente con l’impostazione assunta in precedenza, in cui il tasso di ricambio è già determinato secondo UNI/TS 11300-1 [9], includendo implicitamente le condizioni d’uso e le pratiche di aerazione.

La Tabella 7.8 sintetizza i valori adottati per i parametri  $U_W$  e  $g$ .

Tabella 7.8. Parametri adottati per la componente trasparente: fattore solare  $g$  e trasmittanza dei serramenti  $U_W$ .

| Edificio | $g$  | $U_W$                  |
|----------|------|------------------------|
| [-]      | [-]  | [W/(m <sup>2</sup> K)] |
| A1       | 0,75 | 3,34                   |
| A2       | 0,75 | 3,38                   |
| A3       | 0,75 | 3,34                   |
| A4       | 0,75 | 3,34                   |
| A5       | 0,75 | 3,38                   |
| A6       | 0,75 | 3,34                   |
| A7       | 0,75 | 3,34                   |
| A8       | 0,75 | 3,38                   |
| A9       | 0,75 | 3,38                   |

### 7.5.2 Involucro opaco

CitySim non prevede l’inserimento diretto delle proprietà termo-fisiche dei singoli componenti opachi sotto forma di parametri unici per elemento; la caratterizzazione dell’involucro opaco avviene invece attraverso la definizione di *composite*, ossia stratigrafie multistrato, da assegnare successivamente alle superfici del modello. Ne consegue che le proprietà di interesse per la simulazione (ad es. trasmittanza, massa/capacità termica areica) devono essere determinate a monte a partire dalla stratigrafia assunta e quindi trascritte nel formato richiesto dal modello. Un inquadramento operativo di tale impostazione è riportato, ad esempio, nella guida *CitySim Guide: Urban energy modelling* [16] e nella documentazione del *CitySim-Solver Wiki* [41].

Nel presente lavoro, la selezione delle stratigrafie e la definizione delle relative grandezze termiche di base (spessori, conducibilità e resistenze termiche di strato) sono state condotte a partire dall'abaco della UNI/TR 11552 [8], che propone configurazioni costruttive rappresentative e ne descrive la diffusione geografica in funzione dell'epoca di costruzione, fornendo inoltre una trasmittanza termica complessiva di riferimento per ciascuna soluzione. Nel caso studio, il vincolo principale adottato per la scelta della stratigrafia è stato lo spessore delle chiusure: per pareti e solai dell'edificio A1 lo spessore è stato ricavato da rilievi in sito e assunto rappresentativo anche per gli altri edifici del comparto, ipotizzando una sostanziale omogeneità costruttiva a scala di isolato. Per le coperture/soffitti, in assenza di riscontri geometrici omogenei e considerando che le soluzioni compatibili risultano prossime ai valori più massivi dell'abaco, è stata adottata la configurazione con spessore maggiore tra quelle ammissibili, al fine di mantenere coerenza con la massività osservata nelle altre chiusure.

Ove l'abaco non riportasse esplicitamente alcune proprietà necessarie all'input del modello (ad es.  $c_p$  e  $\rho$ , e, quando richiesto, valori di  $\lambda$  di progetto), tali parametri sono stati assunti da valori tabellari della UNI EN ISO 10456 [2]. Per strati non completamente caratterizzati nell'abaco (ad es. la soletta), è stato inoltre effettuato un adattamento dei parametri mediante ricerca obiettivo, imponendo la coerenza tra la somma delle resistenze degli strati e la resistenza complessiva di riferimento riportata in UNI/TR 11552 [8]. In particolare, la ricerca obiettivo è stata applicata variando la conducibilità equivalente dello strato di soletta fino a riprodurre la resistenza termica residua coerente con  $R_{\text{tot}}$  dell'abaco.

In alternativa, i database di archetipi edilizi (ad es. URBEM [44]) possono fornire, quando disponibili per la specifica area di studio, valori medi di trasmittanza o stratigrafie di riferimento utili a supportare la selezione delle chiusure. Nel presente caso, tuttavia, per il contesto regionale considerato (Piemonte) tali informazioni non risultano disponibili nel database consultato; di conseguenza, la caratterizzazione dell'involucro opaco è stata condotta facendo riferimento all'abaco della UNI/TR 11552 [8] e ai riscontri geometrici derivanti dai rilievi in sito.

La Tabella 7.9 sintetizza le stratigrafie e le trasmittanze adottate per le chiusure opache; segue la descrizione di dettaglio delle singole stratigrafie.

Tabella 7.9. Stratigrafie e trasmittanze adottate per le chiusure opache.

| Edificio | Pareti esterne | $U_{\text{wall}}$      | Copertura | $U_{\text{roof}}$      | Solaio         | $U_{\text{floor}}$     |
|----------|----------------|------------------------|-----------|------------------------|----------------|------------------------|
| [-]      | [-]            | [W/(m <sup>2</sup> K)] | [-]       | [W/(m <sup>2</sup> K)] | [-]            | [W/(m <sup>2</sup> K)] |
| A1       | MCV 04         | 0,55                   | COP04     | 1,33                   | SOL04 adjusted | 0,86                   |
| A2       | MCV 04         | 0,55                   | CIN04     | 1,67                   | SOL04 adjusted | 0,86                   |
| A3       | MCV 04         | 0,55                   | CIN04     | 1,67                   | SOL04 adjusted | 0,86                   |
| A4       | MCV 04         | 0,55                   | CIN04     | 1,67                   | SOL04 adjusted | 0,86                   |
| A5       | MCV 04         | 0,55                   | CIN04     | 1,67                   | SOL04 adjusted | 0,86                   |
| A6       | MCV 04         | 0,55                   | CIN04     | 1,67                   | SOL04 adjusted | 0,86                   |
| A7       | MCV 04         | 0,55                   | CIN04     | 1,67                   | SOL04 adjusted | 0,86                   |
| A8       | MCV 04         | 0,55                   | CIN04     | 1,67                   | SOL04 adjusted | 0,86                   |
| A9       | MCV 04         | 0,55                   | CIN04     | 1,67                   | SOL04 adjusted | 0,86                   |

### Pareti verticali esterne

In accordo con quanto sintetizzato in Tabella 7.9, per le pareti verticali esterne è stata adottata la stratigrafia MCV 04 [8]. La stratigrafia assunta, calibrata sulla base degli spessori rilevati, è riportata in Tabella 7.10.

La trasmittanza termica della chiusura opaca è stata determinata secondo la UNI EN ISO 6946 [18], mediante metodo semplificato. In particolare:

$$U = \frac{1}{R_{\text{tot}}} \quad (7.3)$$

dove la resistenza termica totale è calcolata come:

$$R_{\text{tot}} = R_{\text{si}} + \sum_{i=1}^n R_i + R_{\text{se}}. \quad (7.4)$$

Nel termine di sommatoria,  $R_i$  rappresenta la resistenza termica dello strato  $i$ -esimo, pari a:

$$R_i = \frac{s_i}{\lambda_i}, \quad (7.5)$$

con  $s_i$  spessore dello strato e  $\lambda_i$  conducibilità termica del materiale [18]. Le resistenze liminari superficiali interna ed esterna,  $R_{\text{si}}$  e  $R_{\text{se}}$ , sono assunte secondo i valori suggeriti dal Prospetto 7 della UNI EN ISO 6946 [18], in funzione della direzione del flusso termico; nel presente caso, con flusso orizzontale attraverso parete verticale..

Tabella 7.10. Stratigrafia MCV04: proprietà termo-fisiche degli strati e resistenze termiche.

| Materiale                     | $\lambda$ [W/(m·K)] | $c_p$ [J/(kg·K)] | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $s$ [m] | $R$ [(m <sup>2</sup> K)/W] |
|-------------------------------|---------------------|------------------|-----------------------------|---------|----------------------------|
| <b>Ext.</b>                   |                     |                  |                             |         | 0,04                       |
| Intonaco esterno              | 0,900               | 1000             | 1800                        | 0,02    | 0,022                      |
| Mattoni pieni                 | 0,720               | 1000             | 1800                        | 0,36    | 0,500                      |
| Intercapedine con polistirolo | 0,045               | 1220             | 15                          | 0,04    | 0,889                      |
| Mattoni forati                | 0,400               | 1000             | 800                         | 0,08    | 0,200                      |
| Intonaco interno              | 0,700               | 1000             | 1400                        | 0,02    | 0,029                      |
| <b>Int.</b>                   |                     |                  |                             |         | 0,13                       |

### Coperture esterne

Come riportato in Tabella 7.9, nel caso studio sono state adottate due configurazioni di copertura, identificate come COP04 e CIN04 sulla base dell'abaco della UNI/TR 11552 [8]. Tale distinzione riflette la diversa tipologia geometrica rilevata: l'edificio A1 presenta una copertura piana, mentre i restanti edifici sono caratterizzati da coperture inclinate. In assenza di informazioni di dettaglio uniformi per l'intero comparto, per entrambe le tipologie è stata assunta, in coerenza con l'approccio descritto in precedenza, una stratigrafia compatibile con l'epoca e il contesto geografico, adottando lo spessore maggiore tra quelli disponibili nell'abaco UNI/TR 11552 [8], al fine di mantenere coerenza con la massività delle strutture osservata in sito.

La trasmittanza termica delle coperture è stata determinata secondo la UNI EN ISO 6946 [18], con procedura analoga a quella applicata alle pareti verticali esterne. Le proprietà termo-fisiche degli strati e le resistenze termiche di ciascun componente sono riportate in Tabella 7.11 (coperture piane) e in Tabella 7.12 (coperture inclinate).

Tabella 7.11. Stratigrafia COP04 (copertura piana): proprietà termo-fisiche degli strati e resistenze termiche.

| Materiale                        | $\lambda$ [W/(m·K)] | $c_p$ [J/(kg·K)] | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $s$ [m] | $R$ [(m <sup>2</sup> K)/W] |
|----------------------------------|---------------------|------------------|-----------------------------|---------|----------------------------|
| <b>Ext.</b>                      |                     |                  |                             |         | 0,040                      |
| Pavimentazione esterna           | 0,700               | 1000             | 1500                        | 0,03    | 0,043                      |
| Membrana bituminosa              | 0,170               | 1000             | 1200                        | 0,01    | 0,059                      |
| Massetto in calcestruzzo         | 1,060               | 1000             | 2000                        | 0,12    | 0,113                      |
| Malta di cemento                 | 1,400               | 1000             | 2000                        | 0,02    | 0,014                      |
| Calcestruzzo armato (2% acciaio) | 2,500               | 1000             | 2400                        | 0,04    | 0,016                      |
| Soletta                          | 0,710               | 1000             | 900                         | 0,24    | 0,338                      |
| Intonaco interno                 | 0,700               | 1000             | 1400                        | 0,02    | 0,029                      |
| <b>Int.</b>                      |                     |                  |                             |         | 0,100                      |

Tabella 7.12. Stratigrafia CIN04 (copertura inclinata): proprietà termo-fisiche degli strati e resistenze termiche.

| Materiale                        | $\lambda$ [W/(m·K)] | $c_p$ [J/(kg·K)] | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $s$ [m] | $R$ [(m <sup>2</sup> K)/W] |
|----------------------------------|---------------------|------------------|-----------------------------|---------|----------------------------|
| <b>Ext.</b>                      |                     |                  |                             |         | 0,040                      |
| Malta di cemento                 | 1,400               | 1000             | 2000                        | 0,02    | 0,014                      |
| Calcestruzzo armato (2% acciaio) | 2,500               | 1000             | 2400                        | 0,04    | 0,016                      |
| Soletta                          | 0,650               | 1000             | 1800                        | 0,24    | 0,369                      |
| Intonaco interno                 | 0,700               | 1000             | 1400                        | 0,02    | 0,029                      |
| <b>Int.</b>                      |                     |                  |                             |         | 0,130                      |

### Solaio su cantina

In accordo con quanto sintetizzato in Tabella 7.9, per i solai è stata adottata la stratigrafia SOL04 [8]. La stratigrafia e le proprietà termo-fisiche assunte per il calcolo delle resistenze di strato sono riportate in Tabella 7.13.

Tabella 7.13. Stratigrafia SOL04: proprietà termo-fisiche degli strati e resistenze termiche.

| Materiale                            | $\lambda$ [W/(m·K)] | $c_p$ [J/(kg·K)] | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $s$ [m] | $R$ [(m <sup>2</sup> K)/W] |
|--------------------------------------|---------------------|------------------|-----------------------------|---------|----------------------------|
| <b>Ext.</b>                          |                     |                  |                             |         | 0,170                      |
| Intonaco esterno                     | 0,900               | 1000             | 1800                        | 0,02    | 0,022                      |
| Soletta                              | 0,710               | 1000             | 900                         | 0,24    | 0,338                      |
| Calcestruzzo armato (2% acciaio)     | 2,500               | 1000             | 2400                        | 0,04    | 0,016                      |
| Malta di cemento                     | 1,400               | 1000             | 2000                        | 0,02    | 0,014                      |
| Massetto in calcestruzzo alleggerito | 0,580               | 1000             | 1400                        | 0,12    | 0,207                      |
| Malta di cemento                     | 1,400               | 1000             | 2000                        | 0,02    | 0,014                      |
| Pavimentazione interna               | 1,470               | 1000             | 1700                        | 0,015   | 0,010                      |
| <b>Int.</b>                          |                     |                  |                             |         | 0,170                      |

Nel caso studio, i solai risultano a contatto con locali accessori (cantine) generalmente non climatizzati. Per rappresentare l'effetto di tale interposizione sullo scambio termico verso l'esterno/terreno, è stato adottato il metodo semplificato della UNI/TS 11300-1 [9], che introduce il coefficiente  $b_{tr,U}$  (Prospetto 7) per modellare il trasferimento termico attraverso ambienti non climatizzati. Il valore di  $b_{tr,U}$  selezionato dal Prospetto 7 [9] è pari a 0,8, corrispondente alla voce *Piano interrato o seminterrato con finestre o serramenti esterni*.

Per tenere conto della riduzione della trasmittanza dovuta alla presenza del locale non climatizzato, è stato introdotto uno strato fittizio aggiuntivo, con lo scopo di riprodurre l'effetto del coefficiente  $b_{tr,U}$  senza modificare gli altri parametri della stratigrafia (ad es. spessori e proprietà dei materiali degli strati reali). Lo strato fittizio è stato pertanto modellato come puramente resistivo, con spessore trascurabile e capacità termica trascurabile (ossia con  $\rho$  e  $c_p$  assunti nulli).

Il coefficiente  $b_{tr,U}$  è definito dalla UNI/TS 11300-1 [9] come:

$$b_{tr,U} = \frac{H_{ue}}{H_{iu} + H_{ue}}, \quad (7.6)$$

dove  $H_{iu}$  e  $H_{ue}$  sono le conduttanze globali [W/K] rispettivamente tra ambiente climatizzato e locale non climatizzato ( $i \rightarrow u$ ) e tra locale non climatizzato ed esterno/terreno ( $u \rightarrow e$ ). In tale formulazione,  $H_{ue}$  include già il contributo di scambio termico del locale non climatizzato verso il terreno secondo le indicazioni normative [9].

Poiché  $H_{iu} = \frac{1}{R'_{iu}}$  e  $H_{ue} = \frac{1}{R'_{ue}}$ , il coefficiente  $b_{tr,U}$  può essere riscritto in funzione delle resistenze globali:

$$b_{tr,U} = \frac{\frac{1}{R'_{ue}}}{\frac{1}{R'_{iu}} + \frac{1}{R'_{ue}}} = \frac{R'_{iu}}{R'_{ue} + R'_{iu}}. \quad (7.7)$$

Da cui si ricava la resistenza globale equivalente tra locale non climatizzato ed esterno/-terreno:

$$R'_{ue} = R'_{iu} \frac{1 - b_{tr,U}}{b_{tr,U}} \quad [K/W]. \quad (7.8)$$

Tale resistenza globale è stata quindi riportata a resistenza areica distribuendola sull'area del solaio  $A$ :

$$R_{ue} = R'_{ue} A = R'_{iu} A \frac{1 - b_{tr,U}}{b_{tr,U}} \quad [m^2 K/W]. \quad (7.9)$$

In altri termini, lo strato fittizio introduce una resistenza termica aggiuntiva equivalente al percorso  $u \rightarrow e$  (locale non climatizzato  $\rightarrow$  esterno/terreno), calibrata in modo da riprodurre l'effetto del coefficiente  $b_{tr,U}$  [9]. La Tabella 7.14 riporta la stratigrafia risultante, indicata come SOL04 *adjusted*.

Tabella 7.14. Stratigrafia SOL04 *adjusted* (solaio su cantina): proprietà termo-fisiche degli strati e resistenze termiche.

| Materiale                            | $\lambda$ [W/(m·K)] | $c_p$ [J/(kg·K)] | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $s$ [m] | $R$ [(m <sup>2</sup> K)/W] |
|--------------------------------------|---------------------|------------------|-----------------------------|---------|----------------------------|
| <b>Ext.</b>                          |                     |                  |                             |         | 0,170                      |
| Strato fittizio cantina              | 0,050               | 0                | 0                           | 0,01    | 0,200                      |
| Intonaco esterno                     | 0,900               | 1000             | 1800                        | 0,02    | 0,022                      |
| Soletta                              | 0,710               | 1000             | 900                         | 0,24    | 0,338                      |
| Calcestruzzo armato (2% acciaio)     | 2,500               | 1000             | 2400                        | 0,04    | 0,016                      |
| Malta di cemento                     | 1,400               | 1000             | 2000                        | 0,02    | 0,014                      |
| Massetto in calcestruzzo alleggerito | 0,580               | 1000             | 1400                        | 0,12    | 0,207                      |
| Malta di cemento                     | 1,400               | 1000             | 2000                        | 0,02    | 0,014                      |
| Pavimentazione interna               | 1,470               | 1000             | 1700                        | 0,015   | 0,010                      |
| <b>Int.</b>                          |                     |                  |                             |         | 0,170                      |

### **7.5.3 Definizione dei dati relativi all’involucro edilizio e indici di qualità associati**

Nella Tabella 7.15 sono riportati gli indici di qualità relativi all’involucro edilizio di ogni edificio, la fonte e le modalità di acquisizione dei dati utilizzati.

Tabella 7.15. Indici di qualità, fonte e modalità di acquisizione dei dati relativi all'involucro opaco e trasparente (per edificio).

| <b>Simbolo</b> | <b>Definizione</b>                        | <b>A1</b> | <b>A2</b> | <b>A3</b> | <b>A4</b> | <b>A5</b> | <b>A6</b> | <b>A7</b> | <b>A8</b> | <b>A9</b> | <b>Fonte</b>                      | <b>Modalità</b>                         |
|----------------|-------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------------|
| \              | Glazing ratio N                           | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | Derivato                          | \                                       |
| \              | Glazing ratio E                           | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | Derivato                          | \                                       |
| \              | Glazing ratio S                           | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | Derivato                          | \                                       |
| \              | Glazing ratio W                           | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | Derivato                          | \                                       |
| <i>g</i>       | Fattore solare totale del vetro           | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | UNI/TS 11300-1 [9]                | \                                       |
| $U_w$          | Trasmittanza termica dei serramenti       | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | Database URBEM [44]               | \                                       |
| \              | Stratigrafia delle pareti esterne         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | UNI/TR 11552 [8]                  | \                                       |
| \              | Spessore delle pareti esterne             | 3         | 3         | 3         | 3         | 3         | 3         | 3         | 3         | 3         | Sopralluogo                       | Misura diretta                          |
| $U_{wall}$     | Trasmittanza termica delle pareti esterne | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | Derivata/<br>UNI EN ISO 6946 [18] | Calcolo<br>semplificato                 |
| \              | Stratigrafia delle coperture              | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | UNI/TR 11552 [8]                  | \                                       |
| \              | Spessore delle coperture                  | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | Ipotesi                           | Osservazione diretta                    |
| $U_{roof}$     | Trasmittanza termica delle coperture      | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | Derivata/<br>UNI EN ISO 6946 [18] | Calcolo<br>semplificato                 |
| \              | Stratigrafia dei solai su cantina         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | 2         | UNI/TR 11552 [8]                  | \                                       |
| \              | Spessore dei solai su cantina             | 3         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | Sopralluogo/<br>Ipotesi           | Misura diretta/<br>Osservazione diretta |
| $U_{floor}$    | Trasmittanza termica dei solai su cantina | 2         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | Derivata/<br>UNI EN ISO 6946 [18] | Calcolo<br>semplificato                 |

## 7.6 Apporti interni e profili di utilizzo

Come annunciato nel capitolo precedente, gli apporti interni di calore negli edifici derivano principalmente dalla presenza degli occupanti, dall'utilizzo di apparecchiature elettriche e dall'illuminazione artificiale. Nell'ambito della modellazione energetica urbana implementata mediante CitySim, la rappresentazione di tali contributi presenta alcune limitazioni: mentre il carico interno associato all'occupazione può essere descritto attraverso profili deterministici, gli apporti dovuti ad apparecchiature e illuminazione sono trattati nativamente mediante modelli di tipo stocastico.

Tale impostazione non è coerente con l'approccio adottato nel presente studio, né con il quadro normativo impiegato per la definizione dei parametri di input e dei profili di utilizzo. In particolare, l'introduzione di contributi interni di natura stocastica comporterebbe una variabilità non controllata, in contrasto con l'esigenza di garantire coerenza, replicabilità e confrontabilità dei risultati su scala urbana.

Al fine di ricondurre la rappresentazione degli apporti interni a un'impostazione deterministica e normativamente consistente, i contributi termici associati ad apparecchiature e illuminazione sono stati inglobati nel carico interno attribuito all'occupazione. Di conseguenza, il numero di occupanti e il relativo profilo temporale sono stati corretti in modo da rappresentare, in forma equivalente, il contributo complessivo degli apporti interni, mantenendo una dinamica temporale coerente con le ipotesi di utilizzo dell'edificio.

La definizione quantitativa e temporale dei carichi interni è stata condotta facendo riferimento alla UNI EN 16798-1 [19], con particolare riguardo all'Allegato Nazionale italiano [20], che fornisce indicazioni armonizzate per la scelta dei parametri relativi alla qualità dell'ambiente interno e ai carichi interni associati all'uso degli edifici. Nel seguito è descritta la metodologia adottata.

### 7.6.1 Occupazione

Gli apporti interni dovuti all'occupazione sono stati determinati sulla base delle indicazioni fornite dall'Allegato Nazionale della UNI EN 16798-1 [20]. In tale Allegato, il contributo termico associato alla presenza degli occupanti è espresso come potenza termica riferita all'unità di superficie ed è valutabile mediante l'equazione (NA.7):

$$q_{\text{int,OC}} = O_C Q_{\text{tot}} \quad [\text{W/m}^2]. \quad (7.10)$$

Nell'espressione precedente,  $O_C$  rappresenta la densità di occupazione [ $\text{p/m}^2$ ], ricavata dal Prospetto NA.19 dell'Allegato Nazionale [20], mentre  $Q_{\text{tot}}$  indica la potenza termica totale rilasciata da una singola persona (quota sensibile + quota latente) [ $\text{W/p}$ ], assunta dal Prospetto NA.20 [20].

Qualora si richieda la sola componente sensibile o la sola componente latente riferita all'unità di superficie, l'equazione (7.10) si applica in forma analoga sostituendo  $Q_{\text{tot}}$  rispettivamente con  $Q_{\text{sen}}$  o con  $Q_{\text{lat}}$ . In particolare, la componente sensibile è assunta pari a

$$Q_{\text{sen}} = Q_{\text{con}} + Q_{\text{rad}}, \quad (7.11)$$

dove  $Q_{\text{con}}$  e  $Q_{\text{rad}}$  sono le quote convettiva e radiante riportate nel Prospetto NA.20 [20], mentre  $Q_{\text{lat}}$  è la potenza latente riportata nella medesima tabella.

Per l'edificio ad uso alberghiero (A5), ai fini della determinazione degli apporti interni, è stato assunto un valore di densità di occupazione equivalente a scala edificio, calcolato come media ponderata sulle superfici dei diversi spazi, analogamente a quanto adottato per la stima dei ricambi d'aria. Tale scelta è coerente con l'approccio UBEM impiegato, che opera a un livello di aggregazione tale da non consentire una rappresentazione esplicita e distinta delle diverse tipologie di ambienti interni.

Per gli edifici residenziali, il numero di occupanti è stato definito facendo riferimento alla nota a) in calce al prospetto NA.20. In sintesi, la norma assume un'occupazione di base pari a due persone per monocali o appartamenti con una sola camera da letto; per ciascuna camera da letto aggiuntiva è prevista l'aggiunta di una persona nel caso di superficie inferiore a 14 m<sup>2</sup>, oppure di due persone per superfici pari o superiori a tale soglia.

Nel caso dell'edificio campione A1, dalle informazioni raccolte durante il sopralluogo è stato individuato un numero medio di tre camere da letto per unità abitativa, tutte con superficie inferiore a 14 m<sup>2</sup>. Ne consegue un'occupazione media pari a quattro persone per appartamento; in assenza di evidenze contrastanti, tale valore è stato esteso anche agli altri edifici residenziali dell'isolato.

I valori assunti per l'occupazione, per la frazione sensibile radiante e per gli apporti interni dovuti alla presenza degli occupanti (totali, sensibili e latenti) sono sintetizzati in Tabella 7.16.

Tabella 7.16. Occupazione, frazione sensibile radiante e apporti interni dovuti all'occupazione (totale, latente e sensibile) per edificio.

| Edificio | Occupazione media<br>[p/unità] | N. unità<br>[-] | Occupazione<br>[p] | Frazione sensibile radiante<br>[-] | $q_{\text{int,OC,tot}}$<br>[W/m <sup>2</sup> ] | $q_{\text{int,OC,lat}}$<br>[W/m <sup>2</sup> ] | $q_{\text{int,OC,sen}}$<br>[W/m <sup>2</sup> ] |
|----------|--------------------------------|-----------------|--------------------|------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| A1       | 4                              | 25              | 100                | 0.49                               | 7.4                                            | 2.4                                            | 5.0                                            |
| A2       | 4                              | 25              | 100                | 0.49                               | 7.4                                            | 2.4                                            | 5.0                                            |
| A3       | 4                              | 49              | 196                | 0.49                               | 6.9                                            | 2.2                                            | 4.7                                            |
| A4       | 4                              | 23              | 92                 | 0.49                               | 6.5                                            | 2.1                                            | 4.4                                            |
| A5       | 24                             | 10              | 240                | 0.49                               | 20.0                                           | 6.4                                            | 13.5                                           |
| A6       | 4                              | 14              | 56                 | 0.49                               | 7.1                                            | 2.3                                            | 4.8                                            |
| A7       | 4                              | 5               | 20                 | 0.49                               | 5.2                                            | 1.7                                            | 3.6                                            |
| A8       | 4                              | 18              | 72                 | 0.49                               | 9.5                                            | 3.1                                            | 6.4                                            |
| A9       | 4                              | 16              | 64                 | 0.49                               | 8.4                                            | 2.7                                            | 5.7                                            |

Nel caso dell'edificio alberghiero A5, il numero di unità riportato in Tabella 7.16 corrisponde al numero di piani.

### Profili di occupazione

I profili temporali di occupazione sono stati assunti dall'Allegato Nazionale della UNI EN 16798-1 [20]. Per gli edifici residenziali sono stati utilizzati i profili del Prospetto NA.26b, distinti tra giorni feriali e fine settimana. Poiché i profili relativi al sabato e alla domenica risultano coincidenti, essi sono stati accorpati in un'unica categoria *weekend*.

Le Figure 7.10 e 7.11 mostrano l'andamento orario della frazione di occupazione assunta rispettivamente per i giorni feriali e per il weekend.

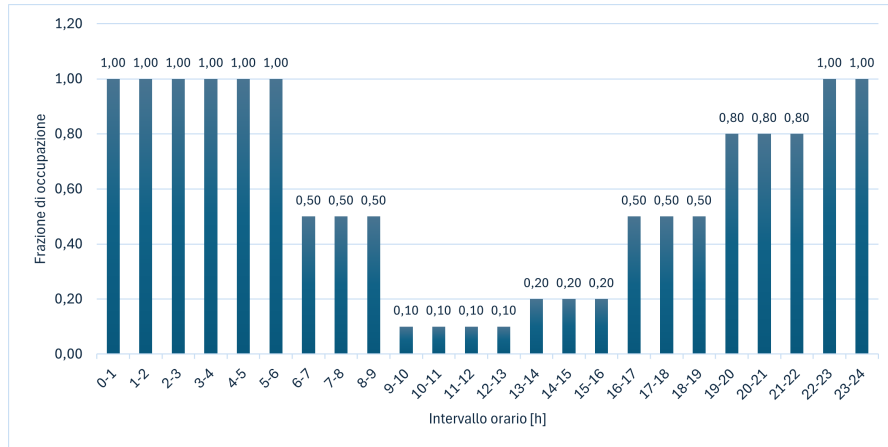


Figura 7.10. Profilo giornaliero di occupazione per edifici residenziali nei giorni feriali (Prospetto NA.26b, Allegato Nazionale UNI EN 16798-1 [20]).

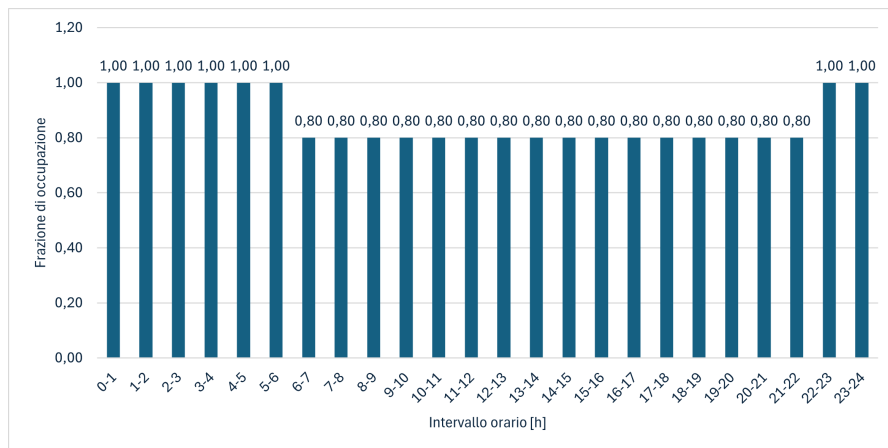


Figura 7.11. Profilo giornaliero di occupazione per edifici residenziali nel weekend (Prospetto NA.26b, Allegato Nazionale UNI EN 16798-1 [20]).

Per l'edificio a destinazione alberghiera è stato adottato il profilo di occupazione riportato nel Prospetto NA.26g [20], relativo alle camere d'albergo. In assenza di profili specifici per le altre aree funzionali della struttura, tale profilo è stato assunto rappresentativo dell'intero edificio, coerentemente con il livello di dettaglio dell'approccio UBEI adottato. Poiché l'andamento del profilo risulta invariato nei diversi giorni della settimana, è stato pertanto impiegato un unico profilo giornaliero (Figura 7.12).

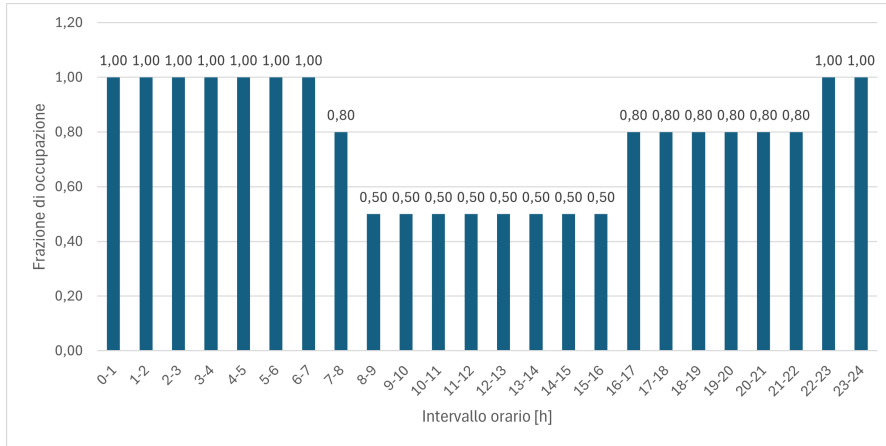


Figura 7.12. Profilo giornaliero di occupazione per edificio alberghiero (Prospetto NA.26g, Allegato Nazionale UNI EN 16798-1 [20]).

### 7.6.2 Apparecchiature e illuminazione

Per gli edifici residenziali, la quantificazione degli apporti interni dovuti ad apparecchiature e illuminazione artificiale è stata effettuata facendo riferimento all’Allegato Nazionale della UNI EN 16798-1 [20]. In tale Allegato, il contributo termico complessivo associato ad apparecchiature e illuminazione è espresso come potenza areica e viene valutato in funzione della superficie utile climatizzata  $A_{cf}$  delle unità abitative.

Il carico interno equivalente sensibile è stato determinato mediante l’equazione (NA.8):

$$q_{\text{int,eq,sen}} = 2.2 + \frac{136}{A_{cf}} \quad [\text{W/m}^2]. \quad (7.12)$$

Per l’edificio alberghiero A5, in assenza di un valore esplicito nell’Allegato Nazionale della UNI EN 16798-1, è stato adottato un valore di riferimento tratto dalla UNI/TS 11300-1 [9]. In particolare, è stato utilizzato il valore indicato per gli alberghi nel Prospetto 17, coerentemente con un livello di rappresentazione aggregata tipico della modellazione UBEM.

I valori ottenuti per ciascun edificio sono riportati in Tabella 7.17.

Tabella 7.17. Superficie media delle unità e apporti interni equivalenti sensibili dovuti ad apparecchiature e illuminazione.

| Edificio | N. unità<br>[-] | $A_{\text{media}}$<br>[m <sup>2</sup> /unità] | $q_{\text{int,eq,sen}}$<br>[W/m <sup>2</sup> ] |
|----------|-----------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|
| A1       | 25              | 63.8                                          | 4.3                                            |
| A2       | 25              | 63.7                                          | 4.3                                            |
| A3       | 49              | 68.1                                          | 4.2                                            |
| A4       | 23              | 72.1                                          | 4.1                                            |
| A5       | 10              | 141.7                                         | 4.0                                            |
| A6       | 14              | 66.9                                          | 4.2                                            |
| A7       | 5               | 90.0                                          | 3.7                                            |
| A8       | 18              | 49.8                                          | 4.9                                            |
| A9       | 16              | 56.3                                          | 4.6                                            |

### Profili di utilizzo

I profili temporali di utilizzo delle apparecchiature e dell'illuminazione non sono esplicitamente riportati nell'Allegato Nazionale della UNI EN 16798-1; pertanto, essi sono stati assunti dalla norma UNI EN 16798-1 [19].

Per gli edifici residenziali, sono stati adottati i profili di utilizzo indicati per la destinazione residenziale, sia per apparecchiature sia per illuminazione. In entrambi i casi, i profili relativi ai giorni feriali e al fine settimana risultano coincidenti. Gli andamenti orari dei fattori di utilizzo assunti sono riportati nelle Figure 7.13 e 7.14.

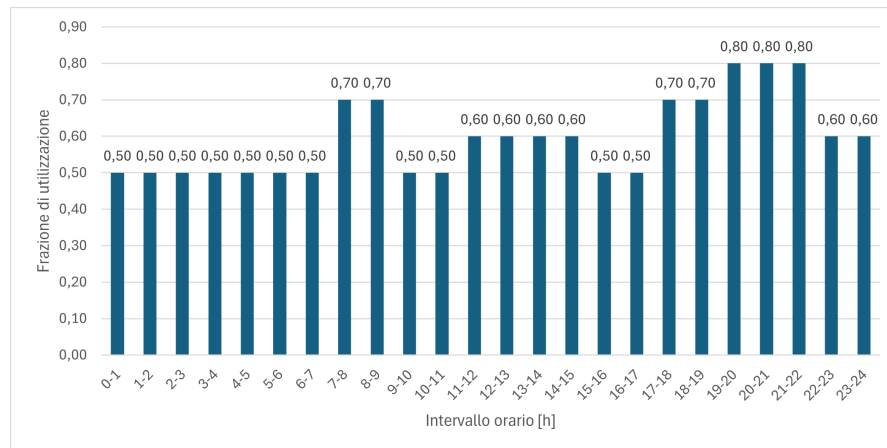


Figura 7.13. Profilo giornaliero di utilizzo delle apparecchiature per edifici residenziali (UNI EN 16798-1 [19]).

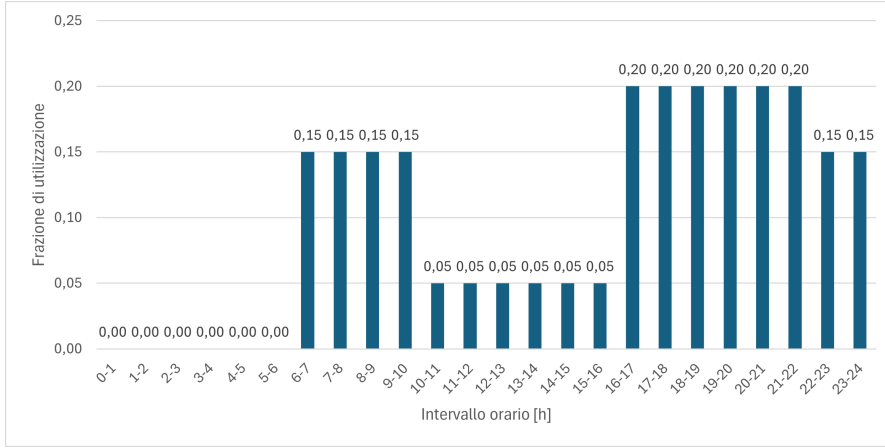


Figura 7.14. Profilo giornaliero di utilizzo dell’illuminazione artificiale per edifici residenziali (UNI EN 16798-1 [19]).

Per l’edificio ad uso alberghiero, in assenza di indicazioni specifiche di profilo nella normativa adottata, sono stati assunti, in prima approssimazione, i medesimi profili temporali utilizzati per il settore residenziale. Tale scelta è motivata dall’esigenza di mantenere un’impostazione deterministica e uniforme a scala di isolato, in assenza di dati più rappresentativi per la singola tipologia d’uso.

### 7.6.3 Occupazione corretta

Come discusso in precedenza, CitySim consente la definizione deterministica dei guadagni interni associati all’occupazione, mentre gli apporti dovuti ad apparecchiature e illuminazione sono modellati nativamente mediante un approccio stocastico. Al fine di mantenere un’impostazione deterministica e coerente con il quadro normativo adottato, tali contributi sono stati ricondotti a un carico equivalente attribuito all’occupazione, introducendo un numero di occupanti *corretto* rappresentativo della potenza interna complessiva.

Il numero di occupanti equivalente agli apporti interni sensibili complessivi è stato determinato come:

$$N_{OC,cor} = \frac{Q_{tot,int,sen}}{Q_{sen,pers}}. \quad (7.13)$$

dove  $Q_{tot,int,sen}$  è la potenza termica sensibile complessiva generata dagli apporti interni (occupanti, apparecchiature e illuminazione), calcolata come:

$$Q_{tot,int,sen} = (q_{int,OC,sen} + q_{int,eq,sen}) A_{utile} N_{unità}, \quad (7.14)$$

mentre  $Q_{sen,pers}$  è la potenza termica sensibile rilasciata da una singola persona [W/p], assunta dalla Tabella NA.20 dell’Allegato Nazionale della UNI EN 16798-1 [20]. Tale valore è il medesimo utilizzato per il calcolo di  $q_{int,OC,sen}$ .

Si osserva che, nel presente lavoro, la procedura di correzione è riferita alla sola componente *sensibile*. Ciò per due motivi: (i) gli apporti interni dovuti ad apparecchiature e illuminazione sono assunti interamente sensibili; (ii) dalle analisi condotte sul codice del solver di CitySim emerge che la determinazione del fabbisogno termico della zona termica è basata esclusivamente sulla componente sensibile. La componente *latente*, pur non concorrendo al fabbisogno termico in assenza di un controllo attivo dell'umidità, assume rilevanza nei bilanci igrometrici e nella valutazione di eventuali fabbisogni di umidificazione/deumidificazione nel caso di sistemi HVAC con controllo dell'umidità interna (caso non considerato nel presente studio). Tuttavia, per coerenza fisica e per preservare l'informazione associata al carico latente degli occupanti negli input di simulazione, è stata definita anche una potenza latente corretta per occupante,  $Q_{\text{occ,lat,corr}}$ , coerente con il valore di  $N_{\text{OC,cor}}$ .

I risultati ottenuti per ciascun edificio sono sintetizzati in Tabella 7.18.

Tabella 7.18. Potenza termica interna complessiva sensibile, occupazione corretta e potenza latente corretta per occupante, per edificio.

| Edificio | $Q_{\text{tot,int,sen}}$<br>[W] | $N_{\text{OC,cor}}$<br>[p] | $Q_{\text{occ,lat,corr}}$<br>[W/p] |
|----------|---------------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| A1       | 14911                           | 186                        | 20                                 |
| A2       | 14904                           | 186                        | 20                                 |
| A3       | 29680                           | 371                        | 20                                 |
| A4       | 14135                           | 177                        | 20                                 |
| A5       | 24868                           | 311                        | 29                                 |
| A6       | 8443                            | 106                        | 20                                 |
| A7       | 3270                            | 41                         | 19                                 |
| A8       | 10181                           | 127                        | 21                                 |
| A9       | 9278                            | 116                        | 21                                 |

Oltre alla correzione del numero complessivo di occupanti, è stato definito un profilo temporale di occupazione equivalente da impiegare in CitySim, integrando il profilo di occupazione con quello di utilizzo delle apparecchiature.

La frazione oraria corretta è stata determinata mediante una media ponderata dei fattori di utilizzo, pesata sulle rispettive potenze sensibili:

$$X_{i,\text{cor}} = \frac{X_i Q_{\text{tot,OC,sen}} + Y_i Q_{\text{tot,eq,sen}}}{Q_{\text{tot,int,sen}}}. \quad (7.15)$$

dove  $X_{i,\text{cor}}$  è la frazione di occupazione corretta all'ora  $i$ ,  $X_i$  è la frazione del profilo di occupazione all'ora  $i$  e  $Y_i$  è la frazione del profilo di utilizzo delle apparecchiature all'ora  $i$ . Inoltre:

$$Q_{\text{tot,OC,sen}} = q_{\text{int,OC,sen}} A_{\text{utile}}, \quad (7.16)$$

$$Q_{\text{tot,eq,sen}} = q_{\text{int,eq,sen}} A_{\text{utile}}. \quad (7.17)$$

Nel presente studio, la definizione di  $Y_i$  è stata ricondotta esclusivamente al profilo di utilizzo delle apparecchiature. Si osserva infatti che, per la destinazione d'uso residenziale, l'Allegato Nazionale della UNI EN 16798-1 [20] fornisce un contributo areico aggregato  $q_{\text{int,eq}}$  (apparecchiature + illuminazione) senza una ripartizione esplicita della potenza tra le due componenti. Pur essendo disponibili nella UNI EN 16798-1 [19] profili temporali distinti per apparecchiature e illuminazione, l'impiego combinato dei due andamenti richiederebbe un'ulteriore ipotesi sulla quota di  $q_{\text{int,eq}}$  attribuibile all'illuminazione. Per minimizzare il numero di assunzioni aggiuntive e mantenere invariato il valore complessivo  $q_{\text{int,eq}}$ , ai fini della correzione è stato adottato un profilo rappresentativo coincidente con quello delle sole apparecchiature.

La procedura descritta comporta la definizione di profili di occupazione corretti specifici per ciascun edificio. Tali profili mantengono una forma analoga, determinata dall'andamento orario dei fattori  $X_i$  e  $Y_i$ , ma assumono livelli differenti in funzione della differenza tra i contributi  $q_{\text{int,OC,sen}}$  e  $q_{\text{int,eq,sen}}$ .

A titolo esemplificativo, nelle Figure 7.15 e 7.16 sono riportati i profili corretti relativi agli edifici A8 e A7, selezionati rispettivamente come caso con maggiore e minore differenza tra gli apporti per occupazione e quelli equivalenti per apparecchiature e illuminazione per unità di superficie (edifici residenziali).

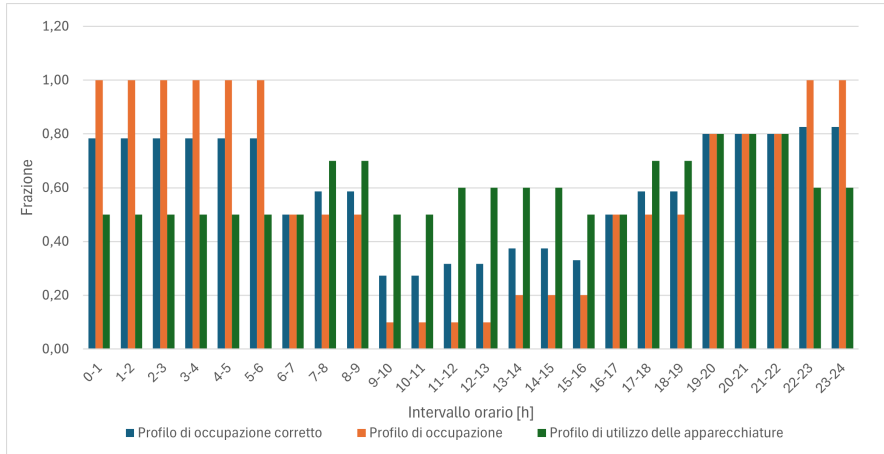


Figura 7.15. Confronto tra profilo di occupazione, profilo di utilizzo delle apparecchiature e profilo di occupazione corretto per l'edificio A8 (giorno feriale).

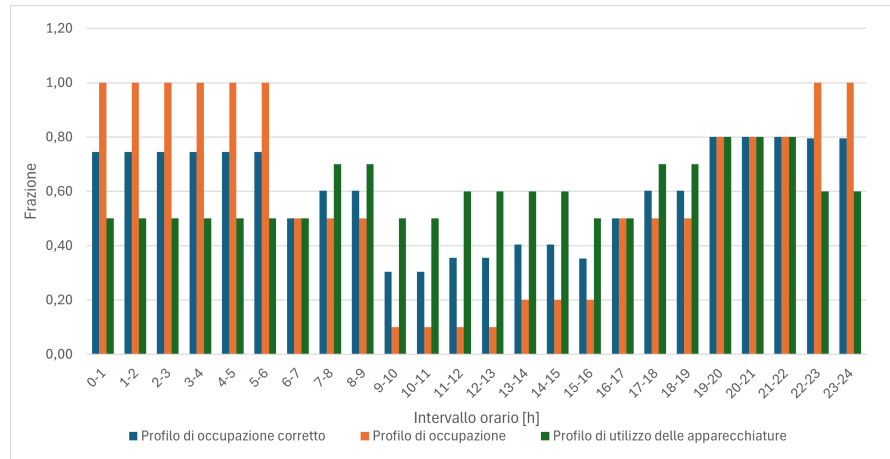


Figura 7.16. Confronto tra profilo di occupazione, profilo di utilizzo delle apparecchiature e profilo di occupazione corretto per l'edificio A7 (giorno feriale).

Per quantificare la dissimilarità tra profilo di occupazione originario e profilo corretto è stata adottata la metrica RMSE. In Figura 7.17 è riportato l'andamento dell'RMSE in funzione di  $\Delta q_{\text{int},(\text{OC-eq})}$  [ $\text{W/m}^2$ ] per gli edifici residenziali, definita come differenza tra i contributi areici  $q_{\text{int},\text{OC}}$  e  $q_{\text{int},\text{eq}}$ .

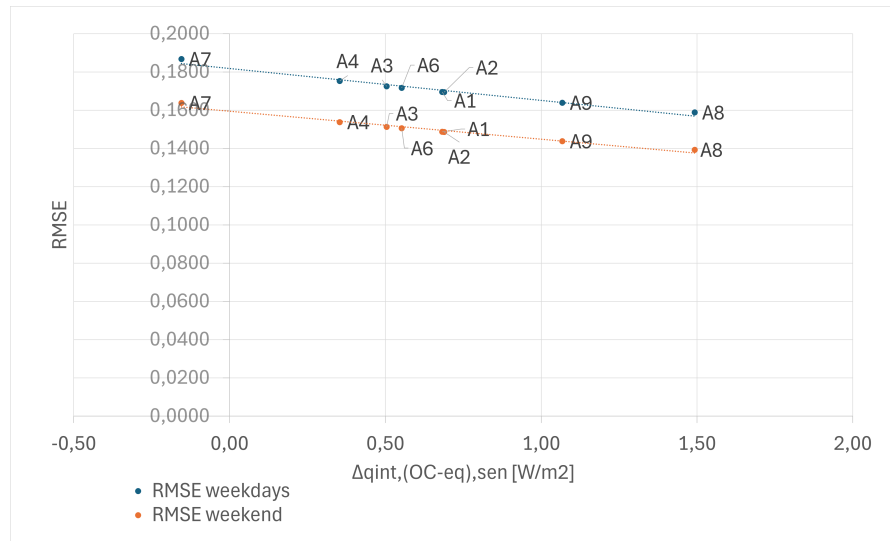


Figura 7.17. Andamento dell'RMSE tra profilo di occupazione di base e profilo corretto in funzione di  $\Delta q_{\text{int},(\text{OC-eq})}$  [ $\text{W/m}^2$ ] (edifici residenziali).

Dalla Figura 7.17 emerge inoltre che, in media, le differenze tra i profili sono più contenute nel weekend. Tale comportamento è coerente con la minore variabilità del profilo di occupazione nel fine settimana, che risulta più prossimo, in forma, al profilo di utilizzo

delle apparecchiature. A titolo esemplificativo, in Figura 7.18 è riportato il confronto tra i profili relativi all'edificio A7 nel weekend.

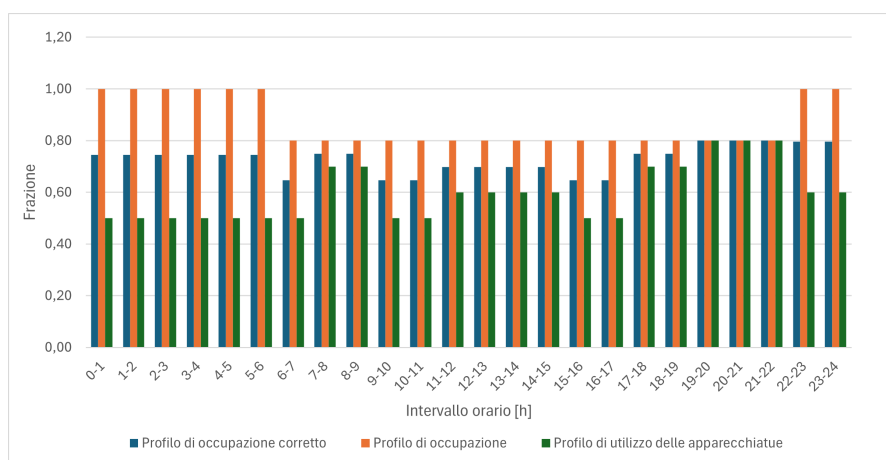


Figura 7.18. Confronto tra profilo di occupazione, profilo di utilizzo delle apparecchiature e profilo di occupazione corretto per l'edificio A7 (weekend).

In Figura 7.19 è infine riportato il profilo corretto ottenuto per l'edificio alberghiero.

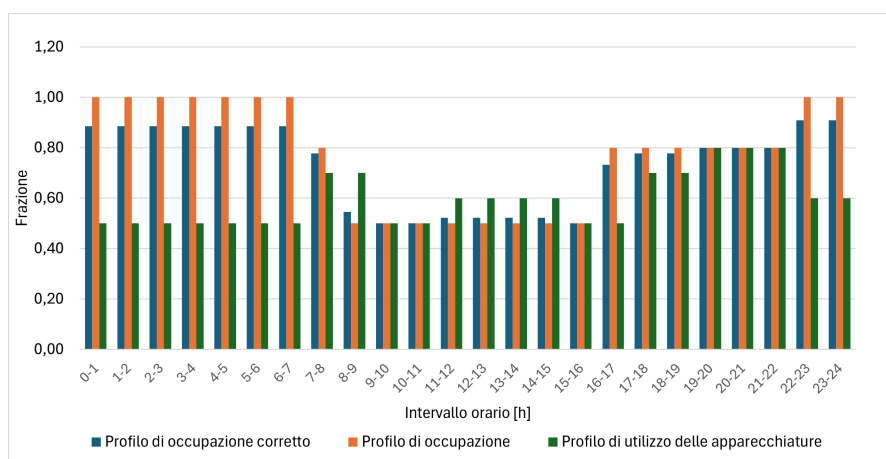


Figura 7.19. Confronto tra profilo di occupazione, profilo di utilizzo delle apparecchiature e profilo di occupazione corretto per l'edificio alberghiero.

#### 7.6.4 Definizione dei dati relativi agli apporti interni e indici di qualità associati

Nella Tabella 7.19 sono riportati gli indici di qualità relativi agli apporti interni di ogni edificio, la fonte e le modalità di acquisizione dei dati utilizzati.

Tabella 7.19. Indici di qualità, fonte e modalità di acquisizione dei dati relativi ad apporti interni e profili di utilizzo (per edificio).

| Simbolo                             | Definizione                                                    | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | Fonte                                                                | Modalità                                  |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| $N_{occ,media,appart.}$             | Occupazione media per unità edilizia                           | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | Allegato nazionale della UNI EN ISO 16798-1 [20]/                    | Calcolo semplificato/Osservazione diretta |
| $N_{unità}$                         | Numero di unità                                                | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | Sopralluogo                                                          | Osservazione diretta                      |
| $N_{occ,tot,edificio}$              | Occupazione totale ad edificio                                 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | Derivata                                                             | \                                         |
| $q_{int,OC,sen,rad}/q_{int,OC,sen}$ | Frazione sensibile radiante                                    | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | Allegato nazionale della UNI EN ISO 16798-1 [20]                     | Calcolo semplificato                      |
| $q_{int,OC,tot}$                    | Apporti interni areici totali relativi all'occupazione         | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | Allegato nazionale della UNI EN ISO 16798-1 [20]                     | Calcolo semplificato                      |
| $q_{int,OC,lat}$                    | Apporti interni areici latenti relativi all'occupazione        | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | Allegato nazionale della UNI EN ISO 16798-1 [20]                     | Calcolo semplificato                      |
| $q_{int,OC,sen}$                    | Apporti interni areici sensibili relativi all'occupazione      | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | Allegato nazionale della UNI EN ISO 16798-1 [20]                     | Calcolo semplificato                      |
| $S_u,media,unità$                   | Superficie utile media ad unità                                | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | Derivata                                                             | \                                         |
| $q_{int,eq,sen}$                    | Apporti interni areici sensibili relativi alle apparecchiature | 2  | 2  | 2  | 2  | 2* | 2  | 2  | 2  | 2  | Allegato nazionale della UNI EN ISO 16798-1[20]/ UNI/TS 11300-1 [9]* | \                                         |
| $Q_{tot,int,sen}$                   | Apporto interno sensibile totale                               | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | Derivato                                                             | \                                         |
| $N_{OC,cor}$                        | Numero di occupanti corretto                                   | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | Derivato                                                             | \                                         |
| $Q_{occ,lat,corr}$                  | Apporto interno latente ad occupante corretto                  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | Derivato                                                             | \                                         |
| \                                   | Profilo di occupazione                                         | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | Allegato nazionale della UNI EN ISO 16798-1[20]                      | \                                         |
| \                                   | Profilo di utilizzo delle apparecchiature                      | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | UNI EN ISO 16798-1 [19]                                              | \                                         |
| \                                   | Profilo di occupazione corretto                                | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | Derivato                                                             | \                                         |

## 7.7 Riscaldamento

Il servizio di riscaldamento è considerato attivo nel periodo compreso tra il 15 ottobre e il 15 aprile, in conformità a quanto previsto per la zona climatica E nel *Decreto del Presidente della Repubblica n. 74 del 16 aprile 2013* [5].

Nel modello implementato, il servizio di riscaldamento è assunto centralizzato per tutti gli edifici del comparto, sulla base delle informazioni desumibili dagli APE disponibili e della configurazione impiantistica tipica degli edifici condominiali del contesto considerato. Il servizio è rappresentato in forma semplificata, coerentemente con le caratteristiche dello strumento CitySim e con l'impostazione tipica della modellazione energetica urbana (UBEM). In particolare, CitySim richiede, per ciascun generatore, l'assegnazione della potenza termica utile massima erogabile e di un rendimento associato al generatore. Per quanto riguarda la potenza termica massima, è stato assunto per ciascun generatore un valore non limitante, modellato mediante l'assegnazione di una potenza termica teoricamente infinita. Tale scelta consente di escludere dal modello eventuali effetti di sottodimensionamento impiantistico, focalizzando l'analisi esclusivamente sull'efficienza energetica del patrimonio edilizio esistente, che costituisce l'obiettivo principale del presente studio.

Diversamente, la definizione del rendimento del servizio di riscaldamento riveste un ruolo centrale nella modellazione. Poiché CitySim non consente una rappresentazione dettagliata dei singoli sottosistemi impiantistici (emissione, regolazione, distribuzione, generazione), il rendimento assegnato al generatore è stato definito come rendimento termico medio stagionale complessivo del servizio. Tale approccio consente di tenere conto, in forma aggregata, delle perdite associate a ciascun sottosistema, risultando coerente sia con le limitazioni del software sia con il livello di dettaglio tipico di un modello UBEM. Il rendimento termico medio stagionale complessivo del servizio di riscaldamento è stato pertanto calcolato come prodotto dei rendimenti dei singoli sottosistemi:

$$\eta_{th,H} = \eta_{th,H,e} \eta_{th,H,c} \eta_{th,H,d} \eta_{th,H,g} \quad (7.18)$$

dove  $\eta_{th,H,e}$ ,  $\eta_{th,H,c}$ ,  $\eta_{th,H,d}$  e  $\eta_{th,H,g}$  rappresentano rispettivamente i rendimenti di emissione, regolazione/controllo, distribuzione e generazione.

In linea teorica, nel calcolo del rendimento complessivo dovrebbe essere incluso anche il contributo del sistema di accumulo. Tuttavia, CitySim consente la modellazione esplicita dell'accumulo termico mediante la definizione delle relative perdite (parametro  $\phi$ ), permettendo una rappresentazione dinamica più accurata. Nel presente studio, sulla base della documentazione tecnica disponibile, non è stata riscontrata la presenza di sistemi di accumulo per l'edificio A1. In particolare, dall'analisi del libretto di centrale termica di A1 emerge l'assenza di un serbatoio di accumulo. Per una parte del comparto (4 edifici su 9), per i quali si presume una gestione impiantistica riconducibile alla medesima proprietà e una configurazione centrale analoga, tale evidenza è stata assunta rappresentativa anche in assenza di documentazione specifica di edificio. Per i restanti edifici, pur non essendo disponibile una verifica diretta della presenza/assenza di accumulo, è stata adottata la medesima ipotesi (assenza di accumulo) al fine di mantenere

un'impostazione uniforme a scala di isolato e contenere il numero di gradi di libertà del modello UBEM; tale scelta introduce una quota di incertezza aggiuntiva, ricondotta alle assunzioni modellistiche in assenza di evidenze documentali.

I valori dei rendimenti termici medi stagionali, sia complessivi sia riferiti ai singoli sottosistemi, assunti per ciascun edificio sono riportati in Tabella 7.20.

Tabella 7.20. Parametri assunti per la modellazione del servizio di riscaldamento: potenza termica massima non limitante e rendimenti dei sottosistemi (emissione, regolazione, distribuzione, generazione) con rendimento medio stagionale complessivo  $\eta_{th,H}$ .

| Edificio | $P_{th,max}$ | $\eta_{th,H,e}$ | $\eta_{th,H,c}$ | $\eta_{th,H,d}$ | $\eta_{th,H,g}$ | $\eta_{th,H}$ |
|----------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| [-]      | [W]          | [-]             | [-]             | [-]             | [-]             | [-]           |
| A1       | $\infty$     | 0,95            | 0,97            | 0,93            | 0,98            | 0,85          |
| A2       | $\infty$     | 0,95            | 0,97            | 0,93            | 0,98            | 0,85          |
| A3       | $\infty$     | 0,95            | 0,97            | 0,93            | 0,98            | 0,85          |
| A4       | $\infty$     | 0,95            | 0,97            | 0,93            | 0,98            | 0,85          |
| A5       | $\infty$     | 0,96            | 0,97            | 0,95            | 1,02            | 0,90          |
| A6       | $\infty$     | 0,95            | 0,97            | 0,93            | 0,98            | 0,85          |
| A7       | $\infty$     | 0,93            | 0,97            | 0,93            | 0,98            | 0,83          |
| A8       | $\infty$     | 0,95            | 0,97            | 0,93            | 0,98            | 0,85          |
| A9       | $\infty$     | 0,95            | 0,97            | 0,93            | 0,98            | 0,85          |

Nei paragrafi successivi è descritta la procedura adottata per la determinazione dei rendimenti dei singoli sottosistemi impiantistici. Si osserva inoltre che, nel presente paragrafo, l'edificio A1 è assunto quale edificio di riferimento per la calibrazione delle ipotesi impiantistiche, in quanto caratterizzato da maggiore disponibilità documentale a scala di edificio e da evidenze raccolte mediante sopralluogo. In assenza di informazioni puntuali per gli altri edifici, e in presenza di elementi di omogeneità riconducibili a configurazioni centrali analoghe (in particolare per gli edifici presumibilmente afferenti alla medesima proprietà), le assunzioni validate su A1 sono state estese, ove ragionevole, al resto del comparto. Qualora una determinata assunzione derivi da fonti specifiche di un edificio diverso da A1, tale circostanza viene esplicitata.

### 7.7.1 Sottosistemi di emissione e regolazione

Per la determinazione dei rendimenti dei sottosistemi di emissione e regolazione è stata impiegata la norma UNI/TS 11300-2 [21], che fornisce valori e criteri di selezione in funzione della tipologia dei terminali di emissione e, per la regolazione, della modalità di controllo adottata.

Coerentemente con quanto anticipato, sulla base della documentazione disponibile e delle evidenze raccolte in sito risulta l'impiego di radiatori quali dispositivi di emissione in ambiente; in assenza di informazioni specifiche a scala di singolo edificio, tale configurazione è stata pertanto assunta rappresentativa dell'intero comparto. Fa eccezione

l'edificio a destinazione alberghiera, per il quale i rilievi in loco e le interviste al personale hanno evidenziato l'adozione di ventilconvettori quali terminali di emissione.

Per quanto concerne il sottosistema di emissione, il rendimento è stato determinato a partire dai valori suggeriti per radiatori installati su pareti esterne nel Prospetto 17 della UNI/TS 11300-2 [21], riferito a locali con altezza fino a 4 m. Il valore tabellato è stato quindi rimodulato in funzione della temperatura di mandata del caso studio, secondo la nota \*) riportata nel medesimo prospetto: il rendimento indicato si riferisce a una temperatura di mandata  $\leq 55^\circ\text{C}$ ; qualora la temperatura di mandata sia pari a  $85^\circ\text{C}$ , il rendimento viene decrementato di 0,02; per temperature intermedie, la correzione è ottenuta mediante interpolazione lineare. Per l'edificio adibito a hotel, è stato invece assunto il valore indicato nello stesso Prospetto 17 per la tipologia di terminali *ventilconvettori*. La scelta della voce relativa ai radiatori su parete esterna è motivata dalle evidenze raccolte durante il sopralluogo, che indicano la collocazione dei terminali prevalentemente su pareti esterne, ove possibile.

La modellazione dei radiatori è stata condotta assumendo una temperatura di mandata pari a  $80^\circ\text{C}$ ; la motivazione di tale scelta è discussa nel paragrafo dedicato al sottosistema di distribuzione.

Ai fini dell'individuazione del rendimento di emissione dal prospetto 17 [21] è inoltre richiesto il carico termico medio annuo, definito come il rapporto tra il fabbisogno annuo di energia termica utile  $Q_{nd}$  (in Wh) e il prodotto tra il tempo di impiego annuale dei dispositivi di emissione (in ore) e il volume lordo riscaldato del locale o della zona termica (in  $\text{m}^3$ ), ottenendo una grandezza in  $\text{W}/\text{m}^3$ . Per maggiori dettagli si rimanda alla nota a) riportata in calce al prospetto 17 [21].

In Tabella 7.21 sono riportati i dispositivi di emissione, il carico medio annuo, la temperatura di mandata e i rendimenti di emissione determinati per ciascun edificio.

Tabella 7.21. Parametri assunti per il sottosistema di emissione del servizio di riscaldamento: terminali, carico medio annuo, temperatura di mandata e rendimento  $\eta_{th,H,e}$ .

| Edificio<br>[-] | Dispositivi di emissione<br>[-] | Carico medio annuo<br>[W/m <sup>3</sup> ] | T <sub>acqua,mand</sub><br>[°C] | $\eta_{th,H,e}$<br>[-] |
|-----------------|---------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| A1              | radiatori                       | 8,22                                      | 80                              | 0,95                   |
| A2              | radiatori                       | 7,08                                      | 80                              | 0,95                   |
| A3              | radiatori                       | 6,08                                      | 80                              | 0,95                   |
| A4              | radiatori                       | 6,19                                      | 80                              | 0,95                   |
| A5              | ventilconvettori                | 3,30                                      | 55                              | 0,96                   |
| A6              | radiatori                       | 7,02                                      | 80                              | 0,95                   |
| A7              | radiatori                       | 11,29                                     | 80                              | 0,93                   |
| A8              | radiatori                       | 9,18                                      | 80                              | 0,95                   |
| A9              | radiatori                       | 7,77                                      | 80                              | 0,95                   |

Per il sottosistema di regolazione/controllo è stato impiegato il prospetto 20 della norma UNI/TS 11300-2 [21]. La selezione del rendimento dipende sia dalla tipologia dei terminali di emissione sia dalla modalità di regolazione adottata. Dalla documentazione disponibile risulta la presenza di regolazione primaria con curva climatica e di valvole termostatiche sui terminali; pertanto è stata assunta una regolazione combinata *per singolo ambiente + climatica*. In assenza di evidenze di sistemi di regolazione evoluti (ad es. controllo PID), il rendimento di regolazione è stato assunto pari a 0,97, in accordo con il prospetto 20 della UNI/TS 11300-2:2019 [21].

In Tabella 7.22 sono riportate le tipologie di terminali e di regolazione considerate, insieme ai rendimenti assunti per ciascun edificio.

Tabella 7.22. Parametri assunti per il sottosistema di regolazione/controllo del servizio di riscaldamento: tipologia di regolazione e rendimento  $\eta_{th,H,c}$ .

| Edificio | Dispositivi di emissione | Tipo di regolazione              | $\eta_{th,H,c}$ |
|----------|--------------------------|----------------------------------|-----------------|
| [-]      | [-]                      | [-]                              | [-]             |
| A1       | radiatori                | Per singolo ambiente + climatica | 0,97            |
| A2       | radiatori                | Per singolo ambiente + climatica | 0,97            |
| A3       | radiatori                | Per singolo ambiente + climatica | 0,97            |
| A4       | radiatori                | Per singolo ambiente + climatica | 0,97            |
| A5       | ventilconvettori         | Per singolo ambiente + climatica | 0,97            |
| A6       | radiatori                | Per singolo ambiente + climatica | 0,97            |
| A7       | radiatori                | Per singolo ambiente + climatica | 0,97            |
| A8       | radiatori                | Per singolo ambiente + climatica | 0,97            |
| A9       | radiatori                | Per singolo ambiente + climatica | 0,97            |

### 7.7.2 Sottosistema di distribuzione

Per la determinazione del rendimento del sottosistema di distribuzione  $\eta_{th,H,d}$  si è fatto riferimento alla norma UNI/TS 11300-2 [21]. In particolare, il prospetto 23 [21] fornisce valori di rendimento di default per impianti di climatizzazione invernale centralizzati in edifici multifamiliari, in funzione della tipologia di distribuzione e del livello di coibentazione delle tubazioni.

Nel presente studio, in assenza di informazioni di dettaglio su spessori e materiali dell'isolamento della rete di distribuzione, ma in presenza dell'indicazione di tubazioni coibentate nel libretto di impianto, è stato assunto il livello di isolamento **B** della UNI/TS 11300-2:2019 [21] (isolamento discreto). Tale scelta è stata adottata come ipotesi intermedia e prudentiale tra i livelli per i quali la coibentazione risulta presente.

Analogamente, in assenza di elementi informativi relativi alla posa dei montanti e alla configurazione edilizia del percorso delle tubazioni, è stato assunto lo schema di distribuzione corrispondente al *caso 4.2* del prospetto 23 [21] (*distribuzione orizzontale nel*

*piano cantinato con montanti non isolati e correnti in traccia interna delle pareti esterne*). Tale configurazione è stata selezionata in coerenza con un approccio conservativo, in quanto rappresentativa di una condizione ricorrente negli impianti centralizzati di edifici residenziali esistenti.

I rendimenti del prospetto 23 fanno riferimento a una distribuzione a temperatura variabile con temperature di progetto di mandata e ritorno pari a  $(80/60)^\circ\text{C}$ . Per temperature di progetto differenti, la UNI/TS 11300-2 [21] prevede l'applicazione della relazione correttiva (equazione 23):

$$\eta_{th,H,d} = 1 - (1 - \eta_d) C \quad (7.19)$$

dove  $\eta_d$  è il rendimento ricavato dal prospetto 23 [21] e  $C$  è un fattore di correzione ricavato dal prospetto 24 della medesima norma [21].

Sulla base del confronto tra la potenza utile e il rendimento indicati nel libretto di centrale dell'edificio A1 e i dati prestazionali riportati nella scheda tecnica del generatore per le diverse condizioni di funzionamento, le temperature di progetto del circuito di distribuzione sono state ricondotte alla coppia  $(80/60)^\circ\text{C}$ . Coerentemente con le ipotesi adottate per il sottosistema di emissione (terminali a radiatori), la medesima coppia di temperature di progetto è stata assunta rappresentativa dell'intero comparto residenziale. Per l'edificio a destinazione alberghiera, caratterizzato dall'impiego di ventilconvettori, sono stati invece adottati i valori suggeriti dal Prospetto 24 della UNI/TS 11300-2 [21], pari a  $(55/45)^\circ\text{C}$ .

A seguito delle ipotesi sopra riportate, in Tabella 7.23 sono sintetizzati, per ciascun edificio, il livello di isolamento delle tubazioni, il numero di piani, le temperature di progetto e il rendimento di distribuzione adottato.

Tabella 7.23. Parametri assunti per il sottosistema di distribuzione del servizio di riscaldamento: livello di isolamento delle tubazioni, numero di piani, temperature di progetto e rendimento  $\eta_{th,H,d}$ .

| Edificio | Livello di isolamento | Numero di piani | $T_{\text{acqua,mand}}^{\text{proj}}$ | $T_{\text{acqua,rit}}^{\text{proj}}$ | $\eta_{th,H,d}$ |
|----------|-----------------------|-----------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|
| [-]      | [-]                   | [-]             | $[^\circ\text{C}]$                    | $[^\circ\text{C}]$                   | [-]             |
| A1       | B                     | 7               | 80                                    | 60                                   | 0,93            |
| A2       | B                     | 10              | 80                                    | 60                                   | 0,93            |
| A3       | B                     | 10              | 80                                    | 60                                   | 0,93            |
| A4       | B                     | 10              | 80                                    | 60                                   | 0,93            |
| A5       | B                     | 10              | 55                                    | 45                                   | 0,95            |
| A6       | B                     | 6               | 80                                    | 60                                   | 0,93            |
| A7       | B                     | 4               | 80                                    | 60                                   | 0,93            |
| A8       | B                     | 6               | 80                                    | 60                                   | 0,93            |
| A9       | B                     | 6               | 80                                    | 60                                   | 0,93            |

### 7.7.3 Sottosistema di generazione

Nel caso studio in esame, il sottosistema di generazione del servizio di climatizzazione invernale è stato modellato considerando due tipologie di generatore: (i) caldaia a condensazione e (ii) teleriscaldamento mediante sottostazione di scambio. La Tabella 7.24 sintetizza, per ciascun edificio, la tipologia di generatore assunta e il corrispondente rendimento globale di generazione  $\eta_{th,H,g}$  adottato.

Tabella 7.24. Generatore e rendimento globale di generazione per la climatizzazione invernale  $\eta_{th,H,g}$ .

| Edificio | Generatore              | $\eta_{th,H,g}$ |
|----------|-------------------------|-----------------|
| [-]      | [-]                     | [-]             |
| A1       | Caldaia a condensazione | 0,98            |
| A2       | Teleriscaldamento       | 0,98            |
| A3       | Teleriscaldamento       | 0,98            |
| A4       | Teleriscaldamento       | 0,98            |
| A5       | Caldaia a condensazione | 1,02            |
| A6       | Teleriscaldamento       | 0,98            |
| A7       | Teleriscaldamento       | 0,98            |
| A8       | Teleriscaldamento       | 0,98            |
| A9       | Teleriscaldamento       | 0,98            |

Si osserva che, per gli edifici residenziali, i valori numerici dei rendimenti risultano coincidenti per le due tipologie di generatore considerate; tale corrispondenza è tuttavia contingente, poiché i rendimenti sono stati determinati mediante procedure differenti in funzione della tipologia impiantistica e del livello di informazione disponibile. Nei paragrafi seguenti sono descritti i criteri di stima adottati e le principali assunzioni introdotte.

#### Caldaia a condensazione

La caldaia a condensazione è stata assunta quale generatore per gli edifici A1 e A5. Per l'edificio A1, la tipologia di generatore è stata desunta dalla documentazione disponibile (APE e libretto di centrale termica). Per l'edificio A5 (destinazione alberghiera), la tipologia è stata invece individuata mediante interviste al personale della struttura; tuttavia, in tale caso sono risultate disponibili esclusivamente informazioni qualitative sulla tipologia, senza dati tecnici di dettaglio (modello e parametri prestazionali). Pertanto, in assenza di ulteriori informazioni e ai fini della definizione degli input del modello UBEM, sono stati assunti per A5 i medesimi parametri adottati per l'edificio A1 (ipotesi semplificativa), come riportato in Tabella 7.25.

Il rendimento di generazione è stato determinato secondo UNI/TS 11300-2 [21]. In particolare, è stato utilizzato il Prospetto 28 [21], relativo a caldaie a condensazione

con regolazione modulante aria/gas installate in centrale termica, che fornisce un valore tabellato in funzione della differenza di temperatura tra fumi e acqua di ritorno in condizioni nominali,  $\Delta T_{\text{fumi-acqua,rit}}$ , a potenza nominale  $P_n$ . Il valore base è stato successivamente corretto mediante i fattori previsti dalla norma.

Per il caso in esame, la scheda tecnica della caldaia indica che, in condizioni nominali e con temperature di progetto di mandata/ritorno pari a  $(80/60)^\circ\text{C}$ , la temperatura dei fumi è pari a  $66^\circ\text{C}$ . Ne consegue:  $\Delta T_{\text{fumi-acqua,rit}} \approx 66 - 60 = 6^\circ\text{C}$ , valore ricadente nell'intervallo  $\Delta T < 12^\circ\text{C}$  del prospetto normativo, a cui corrisponde un rendimento base pari a 104%. In assenza di dati tecnici specifici per la caldaia dell'edificio A5, e coerentemente con l'ipotesi di adozione dei medesimi parametri del generatore di A1, è stato assunto il medesimo intervallo di  $\Delta T_{\text{fumi-acqua,rit}}$  anche per l'hotel.

Il valore base è stato quindi corretto applicando i fattori previsti dalla norma. In particolare,  $F1$  (fattore legato al *rapporto tra la potenza del generatore installato e la potenza di progetto richiesta*) è stato posto pari a  $F1 = 0$ . Il fattore  $F2$ , relativo all'*installazione all'esterno*, non è stato applicato; analogamente  $F5$ , riferito alla presenza di *generatore monostadio*, non è stato applicato. Tali contributi sono stati pertanto assunti nulli (pari a zero) in quanto non pertinenti al caso di studio. Il fattore  $F7$  (correzione associata alla *temperatura di ritorno in caldaia nel mese più freddo*) è stato invece determinato assumendo, per l'edificio A1, una temperatura di ritorno nel mese più freddo pari a  $60^\circ\text{C}$ , da cui  $F7 = -6$ . Per l'edificio A5,  $F7$  è stato ricavato per interpolazione lineare tra i valori tabellati a  $40^\circ\text{C}$  e  $50^\circ\text{C}$ , ottenendo il valore corrispondente a  $45^\circ\text{C}$ , pari a  $F7 = -2$ . Ne consegue un rendimento corretto pari a 98% (ovvero 0,98) per l'edificio A1 e a 102% (ovvero 1,02) per l'edificio A5.

Tabella 7.25. Parametri e fattori correttivi per la determinazione del rendimento di generazione della caldaia  $\eta_{th,H,g,caldaia}$ .

| Edificio | $\Delta T_{\text{fumi-acqua,rit}}$ a $P_n$ | Valore di base | F1  | F2  | F5  | F7  | $\eta_{th,H,g,caldaia}$ |
|----------|--------------------------------------------|----------------|-----|-----|-----|-----|-------------------------|
| [-]      | [ $^\circ\text{C}$ ]                       | [%]            | [-] | [-] | [-] | [-] | [-]                     |
| A1       | 6                                          | 104            | 0   | 0   | 0   | -6  | 0,98                    |
| A5       | 6                                          | 104            | 0   | 0   | 0   | -2  | 1,02                    |

### Teleriscaldamento

Il teleriscaldamento è stato assunto per i restanti edifici dello stock modellato. La presenza della fornitura da rete per la maggior parte delle unità risulta coerente con quanto riportato negli APE reperiti dal portale regionale [35]. Per l'edificio A7, in assenza di informazione univoca, il teleriscaldamento è stato selezionato come opzione più probabile, in coerenza con la prevalenza della soluzione riscontrata negli edifici residenziali dell'isolato.

Per la determinazione del rendimento di generazione, è stata adottata la procedura della UNI/TS 11300-4 [14], che consente di stimare indirettamente  $\eta_{th,H,g}$  mediante bilanci

energetici sulla sottostazione e valutazione delle perdite e del loro recupero. In accordo con le equazioni (106) e (107) della norma [14], valgono:

$$Q_{ss,out} = Q_{ss,in} - Q_{l,ss,env} \quad [\text{kWh}] \quad (7.20)$$

$$Q'_{ss,out} = Q_{ss,out} + Q_{ss,rhl} \quad [\text{kWh}] \quad (7.21)$$

Ne consegue l'espressione del rendimento della sottostazione come:

$$\eta_{th,H,g,ss} = \frac{Q'_{ss,out}}{Q_{ss,in}} = \frac{Q'_{ss,out}}{Q'_{ss,out} - Q_{ss,rhl} + Q_{l,ss,env}} \quad (7.22)$$

dove  $Q_{ss,in}$  è l'energia termica all'ingresso della sottostazione,  $Q'_{ss,out}$  è l'energia termica in uscita comprensiva della quota di perdite recuperata,  $Q_{ss,out}$  è l'energia termica in uscita al netto del recupero,  $Q_{ss,rhl}$  è l'energia termica persa e recuperata e  $Q_{l,ss,env}$  è l'energia termica dispersa verso l'ambiente nel periodo di calcolo.

Il termine  $Q'_{ss,out}$  è stato stimato a partire dal fabbisogno utile dell'edificio e dai rendimenti dei sottosistemi a valle della generazione, secondo:

$$Q'_{ss,out} = \frac{Q_{nd}}{\eta_d \eta_c \eta_e} \quad [\text{kWh}] \quad (7.23)$$

dove  $Q_{nd}$  rappresenta l'energia utile richiesta (fabbisogno netto) e  $\eta_d$ ,  $\eta_c$ ,  $\eta_e$  sono i rendimenti dei sottosistemi di distribuzione, regolazione ed emissione.

Le perdite verso ambiente sono state calcolate secondo il procedimento della UNI/TS 11300-4 [14]. In assenza del coefficiente di perdita specifico di progetto della sottostazione, la norma consente di determinare la percentuale di perdite in esercizio  $P_{l,ss,env}$  mediante l'equazione (110) [14]:

$$P_{l,ss,env} = P'_{l,ss,env} \cdot \frac{(\theta_{ss,w,avg} - \theta_{a,ss})}{(\theta_{ss,w,rif} - \theta_{a,rif})} \quad [\%] \quad (7.24)$$

dove  $P'_{l,ss,env}$  è calcolato con l'equazione (111) [14]:

$$P'_{l,ss,env} = C_2 - C_3 \cdot \log(\Phi_{ss}) \quad [\%] \quad (7.25)$$

con i simboli definiti come segue:

- $C_2$ ,  $C_3$  = coefficienti da prospetto 32 [14];
- $\Phi_{ss}$  = potenza nominale della sottostazione, assunta da APE ove disponibile [kW];
- $\theta_{ss,w,rif}$  = temperatura media di riferimento del fluido termovettore (prospetto 32) [°C] [14];
- $\theta_{a,rif}$  = temperatura di riferimento del locale di installazione (prospetto 32) [°C] [14];

- $\theta_{ss,w,avg}$  = temperatura media del fluido nella sottostazione; in assenza dei dati di progetto (mandata/ritorno del primario), è stata assunta da prospetto 34 [14];
- $\theta_{a,ss}$  = temperatura dell'ambiente ove è installata la sottostazione; in assenza di dati, è stata assunta da prospetto 33 [14] per sottostazione in centrale termica.

La relazione adottata per la stima di  $Q_{l,ss,env}$  risulta coerente con l'impostazione normativa. In particolare, dalla UNI/TS 11300-4 (equazione (112)) [14]:

$$Q_{l,ss,env} = \phi_{l,ss,env} t_{ss} \quad [\text{kWh}] \quad (7.26)$$

dove  $\phi_{l,ss,env}$  rappresenta la potenza termica persa verso ambiente durante l'esercizio e  $t_{ss}$  il tempo di attivazione della sottostazione nel periodo considerato (espresso in ore). In assenza di un profilo temporale di potenza, la potenza persa è stata ricondotta alla percentuale di perdita in esercizio, assumendo:

$$\phi_{l,ss,env} = \frac{P_{l,ss,env}}{100} \phi_{out,ss,esercizio} \quad [\text{kW}] \quad (7.27)$$

dove  $\phi_{out,ss,esercizio}$  è la potenza termica in uscita dalla sottostazione in condizioni di esercizio. Quest'ultima è stata assunta pari alla potenza media sul periodo:

$$\bar{\phi}_{out,ss,esercizio} = \frac{Q'_{ss,out}}{t_{ss}} \quad [\text{kW}] \quad (7.28)$$

Sostituendo le relazioni precedenti si ottiene:

$$Q_{l,ss,env} = \left( \frac{P_{l,ss,env}}{100} \bar{\phi}_{out,ss,esercizio} \right) t_{ss} = Q'_{ss,out} \frac{P_{l,ss,env}}{100} \quad [\text{kWh}] \quad (7.29)$$

L'energia termica persa e recuperata  $Q_{ss,rhl}$  è stata calcolata in funzione del fattore di recupero delle perdite  $K_{ss,env}$  (prospetto 33 [14]). A partire dall'equazione (109) [14]:

$$\Phi_{ss,rhl} = (1 - K_{ss,env}) \Phi_{l,ss,env} \quad [\text{kW}] \quad (7.30)$$

e considerando  $\Phi_{l,ss,env} = Q_{l,ss,env}/t_{ss}$  e  $\Phi_{ss,rhl} = Q_{ss,rhl}/t_{ss}$ , si ottiene:

$$Q_{ss,rhl} = (1 - K_{ss,env}) Q_{l,ss,env} \quad [\text{kWh}] \quad (7.31)$$

Infine, una volta stimati  $Q'_{ss,out}$ ,  $Q_{l,ss,env}$  e  $Q_{ss,rhl}$ , è stato ricavato  $Q_{ss,in}$  e quindi il rendimento  $\eta_{th,H,g,ss}$  secondo le relazioni precedenti. In Tabella 7.26 sono riportati i parametri assunti e i risultati dei calcoli effettuati per ciascuna sottostazione.

Tabella 7.26. Parametri di esercizio e perdite della sottostazione di teleriscaldamento e rendimento globale di generazione  $\eta_{th,H,g}$ .

| <b>Edificio</b><br>[-] | <b>P<sub>nominale</sub></b><br>[W] | <b>Q'<sub>ss,out</sub></b><br>[kWh] | <b>P<sub>l,ss,env</sub></b><br>[%] | <b>Q<sub>l,ss,env</sub></b><br>[kWh] | <b>Q<sub>ss,rhl</sub></b><br>[kWh] | <b>Q<sub>ss,in</sub></b><br>[kWh] | <b><math>\eta_{th,H,g}</math></b><br>[-] |
|------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|
| A2                     | 250000                             | 208905                              | 5,59                               | 11678                                | 8174                               | 212408                            | 0,98                                     |
| A3                     | 450000                             | 383671                              | 5,98                               | 22930                                | 16051                              | 390550                            | 0,98                                     |
| A4                     | 250000                             | 193496                              | 5,59                               | 10816                                | 7571                               | 196741                            | 0,98                                     |
| A6                     | 120000                             | 136144                              | 5,11                               | 6953                                 | 4867                               | 138230                            | 0,98                                     |
| A7                     | N/D                                | 104586                              | 5,58                               | 5841                                 | 4089                               | 106339                            | 0,98                                     |
| A8                     | 250000                             | 157485                              | 5,59                               | 8803                                 | 6162                               | 160126                            | 0,98                                     |
| A9                     | 250000                             | 125415                              | 5,59                               | 7011                                 | 4907                               | 127518                            | 0,98                                     |

#### 7.7.4 Definizione dei dati relativi al servizio di riscaldamento e indici di qualità associati

Nella Tabella 7.27 sono riportati gli indici di qualità relativi al servizio di riscaldamento di ogni edificio, la fonte e le modalità di acquisizione dei dati utilizzati.

Tabella 7.27. Indici di qualità, fonte e modalità di acquisizione dei dati relativi al servizio di riscaldamento (per edificio).

| Simbolo                                                                                  | Definizione                                                                                             | A1 | A2 | A3 | A4 | A5   | A6 | A7  | A8 | A9 | Fonte                                                                                 | Modalità             |
|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|----|----|------|----|-----|----|----|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| $\eta_{th,H,e}$                                                                          | Rendimento del sottosistema di emissione                                                                | 1  | 1  | 1  | 1  | 1    | 1  | 1   | 1  | 1  | UNI/TS 11300-2 [21]/<br>Derivato                                                      | Calcolo semplificato |
| $\eta_{th,H,c}$                                                                          | Rendimento del sottosistema di regolazione                                                              | 3  | 1  | 1  | 1  | 1    | 1  | 1   | 1  | 1  | UNI/TS 11300-2 [21]/<br>Derivato                                                      | Calcolo semplificato |
| $\eta_{th,H,d}$                                                                          | Rendimento del sottosistema di distribuzione                                                            | 1  | 1  | 1  | 1  | 1    | 1  | 1   | 1  | 1  | UNI/TS 11300-2 [21]/<br>Derivato                                                      | Calcolo semplificato |
| $\eta_{th,H,g}$                                                                          | Rendimento del sottosistema di generazione                                                              | 2  | 1  | 1  | 1  | 1    | 1  | 1   | 1  | 1  | UNI/TS 11300-4 [14]/<br>UNI/TS 11300-2 [21]*/<br>Derivato                             | Calcolo semplificato |
| $\eta_{th,H}$                                                                            | Rendimento complessivo del servizio di riscaldamento                                                    | 1  | 1  | 1  | 1  | 1    | 1  | 1   | 1  | 1  | Derivato                                                                              | \                    |
| \                                                                                        | Tipologia dei dispositivi di emissione                                                                  | 3* | 1  | 1  | 1  | 1**  | 1  | 1   | 1  | 1  | Ipotesi/<br>Libretto di centrale termica*/<br>Intervista degli occupanti**            | \                    |
| \                                                                                        | Carico termico medio annuo                                                                              | 1  | 1  | 1  | 1  | 1    | 1  | 1   | 1  | 1  | CitySim/<br>Derivato                                                                  | Calcolo semplificato |
| \                                                                                        | Tipo di distribuzione                                                                                   | 1  | 1  | 1  | 1  | 1    | 1  | 1   | 1  | 1  | Ipotesi                                                                               | \                    |
| \                                                                                        | Tipo di regolazione                                                                                     | 3* | 1  | 1  | 1  | 1    | 1  | 1   | 1  | 1  | Ipotesi/<br>Libretto di centrale termica*                                             | \                    |
| $T_{acqua,ritorno,progetto}$                                                             | Temperatura di ritorno dell'acqua in condizioni di progetto                                             | 3* | 1  | 1  | 1  | 1    | 1  | 1   | 1  | 1  | Ipotesi/<br>Libretto di centrale termica*/<br>Scheda tecnica caldaia*                 | \                    |
| $T_{acqua,mandata,progetto}$                                                             | Temperatura di mandata dell'acqua in condizioni di progetto                                             | 3* | 1  | 1  | 1  | 1    | 1  | 1   | 1  | 1  | Ipotesi/<br>Libretto di centrale termica*/<br>Scheda tecnica caldaia*                 | \                    |
| \                                                                                        | Livello di isolamento                                                                                   | 1  | 1  | 1  | 1  | 1    | 1  | 1   | 1  | 1  | Ipotesi                                                                               | \                    |
| \                                                                                        | Generatore                                                                                              | 3* | 3  | 3  | 3  | 1*** | 3  | 1** | 3  | 3  | APE/<br>Libretto di centrale termica*/<br>Ipotesi**/<br>Intervista degli occupanti*** | \                    |
| $\Delta T_{fumi-acqua, ritorno a acqua di ritorno al generatore in condizioni nominali}$ | Differenza di temperatura tra fumi e acqua di ritorno al generatore in condizioni nominali              | 2  | \  | \  | \  | 1*   | \  | \   | \  | \  | Libretto di centrale termica/<br>Scheda tecnica caldaia/<br>Ipotesi*                  | \                    |
| $P_{nominale}$                                                                           | Potenza nominale del generatore                                                                         | 3* | 3  | 3  | 3  | 1**  | 3  | 1** | 3  | 3  | APE/<br>Libretto di centrale termica*/<br>Ipotesi**                                   | \                    |
| $Q'_{ss,out}$                                                                            | Energia termica comprensiva delle perdite recuperate erogata dalla sottostazione nel periodo di calcolo | \  | 1  | 1  | 1  | \    | 1  | 1   | 1  | 1  | CitySim/<br>Derivato                                                                  | Calcolo semplificato |
| $PL_{ss,env}$                                                                            | Percentuale di perdite in esercizio                                                                     | \  | 2  | 2  | 2  | \    | 2  | 2   | 2  | 2  | UNI/TS 11300-4 [14]/<br>Derivata                                                      | Calcolo semplificato |
| $Q_{l,ss,env}$                                                                           | Energia termica dispersa verso l'ambiente nel periodo di calcolo                                        | \  | 1  | 1  | 1  | \    | 1  | 1   | 1  | 1  | UNI/TS 11300-4 [14]/<br>Derivata                                                      | Calcolo semplificato |
| $Q_{ss,rhl}$                                                                             | Energia termica persa e successivamente recuperata nel periodo di calcolo                               | \  | 1  | 1  | 1  | \    | 1  | 1   | 1  | 1  | UNI/TS 11300-4 [14]/<br>Derivata                                                      | Calcolo semplificato |
| $Q_{ss,in}$                                                                              | Energia termica all'ingresso della sottostazione nel periodo di calcolo                                 | \  | 1  | 1  | 1  | \    | 1  | 1   | 1  | 1  | UNI/TS 11300-4 [14]/<br>Derivata                                                      | Calcolo semplificato |

## 7.8 Produzione di acqua calda sanitaria

Sulla base della documentazione disponibile (APE e libro di centrale), il servizio di produzione di acqua calda sanitaria (ACS) risulta *autonomo* per ciascuna unità immobiliare negli edifici residenziali. Per l'edificio adibito ad hotel (A5), invece, il servizio è stato considerato *centralizzato*, in coerenza con le evidenze raccolte durante le interviste al personale.

Ai fini dell'implementazione del servizio ACS, CitySim richiede: (i) la definizione di un profilo annuale di consumo, ottenuto come composizione di profili giornalieri, (ii) un valore di consumo giornaliero *pro-capite* (definito nel seguito secondo l'impostazione adottata in questo lavoro) e (iii) la presenza di un accumulo termico.

### 7.8.1 Stima dei fabbisogni giornalieri di acqua calda sanitaria

I consumi giornalieri di ACS sono stati stimati secondo la procedura indicata nella UNI/TS 11300-2 [21]. Per gli edifici con destinazione d'uso E.1(1) è previsto l'impiego dell'equazione (28) della norma, riportata di seguito, per la stima del volume medio giornaliero di ACS consumato da ciascun appartamento:

$$V_w = a S_u + b \quad [\text{l/giorno}] \quad (7.32)$$

dove  $a$  è un parametro espresso in  $[\text{l}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$  e  $b$  è un parametro espresso in  $[\text{l}/\text{d}]$ . Entrambi i coefficienti sono stati ricavati dal Prospetto 30 della UNI/TS 11300-2 [21] in funzione della superficie utile della singola unità immobiliare  $S_u$ . Nel presente lavoro  $S_u$  è stata assunta pari alla superficie utile media degli appartamenti afferenti a ciascun edificio. Il volume giornaliero a scala di edificio è stato quindi ottenuto moltiplicando il valore stimato per appartamento per il numero di unità immobiliari presenti.

Per la destinazione d'uso E.1(3) è disponibile invece l'equazione (29) della UNI/TS 11300-2 [21]:

$$V_w = a N_u \quad [\text{l/giorno}] \quad (7.33)$$

dove  $a$  rappresenta il fabbisogno specifico giornaliero, espresso in  $[\text{l}/(N_u \cdot \text{d})]$ , mentre  $N_u$  è un parametro dipendente dalla tipologia d'uso; nel caso in esame  $N_u$  coincide con il numero di letti. I valori di  $a$  e la definizione operativa di  $N_u$  sono stati ricavati dal Prospetto 31 della UNI/TS 11300-2 [21].

Una volta determinato il volume giornaliero di ACS a scala di edificio, al fine di mantenere coerenza con l'impostazione di input richiesta da CitySim, tale valore è stato rapportato al *numero di occupanti corretto* associato a ciascun edificio, ottenendo il corrispondente consumo giornaliero *pro-capite* utilizzato nel modello.

In Tabella 7.28 sono riportati i parametri selezionati e i volumi giornalieri stimati per gli edifici residenziali.

Tabella 7.28. Parametri UNI/TS 11300-2 e volumi giornalieri di ACS stimati per gli edifici residenziali, a scala di appartamento, edificio e per occupante corretto.

| <b>EDIFICIO</b> | $a$                     | $b$    | $V_{w,appart.}$ | $V_{w,edificio}$ | $V_{w,occ.,corr.}$ |
|-----------------|-------------------------|--------|-----------------|------------------|--------------------|
| [–]             | [l/(m <sup>2</sup> ·d)] | [l/d]  | [l/d]           | [l/d]            | [l/(persona·d)]    |
| A1              | 1,067                   | 36,67  | 104,79          | 2619,68          | 14,05              |
| A2              | 1,067                   | 36,67  | 104,64          | 2615,95          | 14,04              |
| A3              | 1,067                   | 36,67  | 109,28          | 5354,74          | 14,43              |
| A4              | 1,067                   | 36,67  | 113,56          | 2611,96          | 14,78              |
| A6              | 1,067                   | 36,67  | 108,01          | 1512,09          | 14,33              |
| A7              | 1,067                   | 36,67  | 132,66          | 663,29           | 16,23              |
| A8              | 2,667                   | -43,33 | 89,58           | 1612,36          | 12,67              |
| A9              | 1,067                   | 36,67  | 96,75           | 1547,98          | 13,35              |

In Tabella 7.29 sono invece riportati i valori adottati per l’hotel (A5).

Tabella 7.29. Parametri UNI/TS 11300-2 e volume giornaliero di ACS stimato per l’hotel (A5), a scala di edificio e per occupante corretto.

| <b>EDIFICIO</b> | $a$                     | $N_u$               | $V_{w,edificio}$ | $V_{w,occ.,corr.}$ |
|-----------------|-------------------------|---------------------|------------------|--------------------|
| [–]             | [l/(m <sup>2</sup> ·d)] | <b>numero letti</b> | [l/d]            | [l/d]              |
| A5              | 80                      | 166                 | 13280            | 42,72              |

Si osserva che i volumi giornalieri stimati per l’hotel risultano sensibilmente superiori rispetto a quelli degli edifici residenziali; tale differenza è coerente con la presenza, tipicamente associata alle strutture alberghiere, di ulteriori servizi (ad esempio spa, ristorazione e lavanderia) che contribuiscono ad incrementare i consumi di ACS.

### 7.8.2 Profili di utilizzo di ACS

Come anticipato, CitySim consente di definire profili annuali di utilizzo dell’ACS. Tali profili sono costituiti da 365 valori, ciascuno dei quali seleziona un profilo giornaliero (24 valori orari) definito dal modellista.

Il solver calcola, per ciascuna ora  $h$ , la quantità di ACS erogata secondo la seguente relazione:

$$V_{ACS,h} = N_{occ} f_{occ}(h) V_{w,occ,giorno} f_{ACS}(h) \quad (7.34)$$

dove  $f_{occ}(h)$  e  $f_{ACS}(h)$  sono rispettivamente la frazione di occupazione e la frazione di impiego dell’ACS che il solver associa all’ora  $h$ ;  $N_{occ}$  è il numero di occupanti impostato in input dal modellista per l’edificio e  $V_{w,occ,giorno}$  è il consumo giornaliero per occupante definito nel paragrafo precedente.

In accordo con le assunzioni adottate nei paragrafi relativi ai profili d'uso, il profilo di utilizzo dell'ACS è stato ricavato dall'Allegato Nazionale della UNI EN 16798-1 [20]: in particolare, per gli edifici residenziali dal Prospetto 26b [20] e per l'hotel dal Prospetto 26g [20]. Tali prospetti coincidono con quelli utilizzati per la definizione dei profili di occupazione; coerentemente, sono stati definiti due profili per gli edifici residenziali (infrasettimanale e weekend) e un profilo unico per l'hotel.

Tuttavia, per garantire coerenza tra il significato del fattore di utilizzo fornito dallo standard e la formulazione implementata nel solver (Equazione 7.34), è stata applicata una correzione del profilo orario di utilizzo dell'ACS mediante il profilo orario di occupazione impiegato nel modello, secondo:

$$f_{ACS}(h) = \frac{f_{ACS,standard}(h)}{f_{occ}(h)} \quad (7.35)$$

Sostituendo l'Equazione 7.35 nell'Equazione 7.34 si ottiene:

$$V_{ACS,h} = N_{occ} V_{w,occ,giorno} f_{ACS,standard}(h) \quad (7.36)$$

coerentemente con l'interpretazione del fattore  $f_{ACS,standard}(h)$  riportato nell'Allegato Nazionale della UNI EN 16798-1 [20].

In Figura 7.20 sono riportati, a titolo esemplificativo per l'edificio A7 e per un giorno feriale, il profilo di occupazione corretto, il profilo di utilizzo dell'ACS secondo la UNI EN 16798-1 [20] e il profilo corretto utilizzato in CitySim.

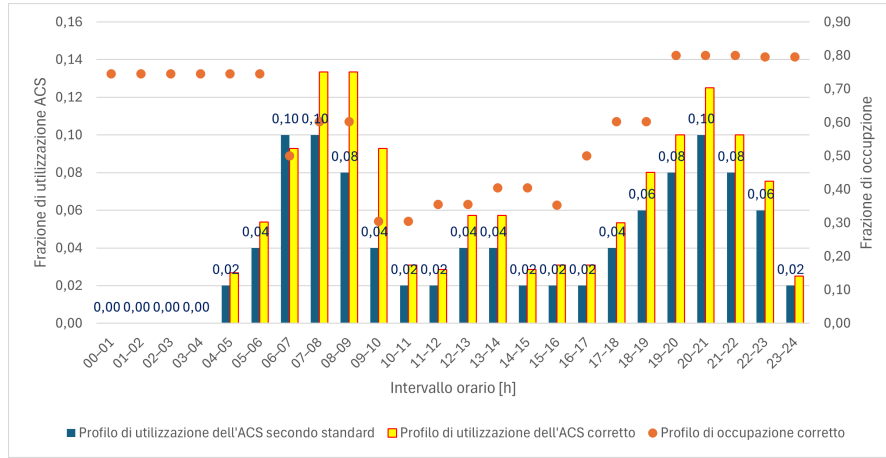


Figura 7.20. Esempio (edificio A7, giorno feriale): confronto tra profilo di occupazione corretto, profilo standard di utilizzo dell'ACS [20] e profilo di utilizzo corretto per l'implementazione in CitySim.

### 7.8.3 Modellazione energetica del servizio di ACS

L'output annuale per i fabbisogni energetici di ACS fornito da CitySim per l'intero stock edilizio modellato in realtà dipende esclusivamente dal numero complessivo di occupanti

fra tutti gli edifici. Questo perchè dallo studio del codice del solver riportato su Github [42] si evince come quel risultato provenga da questa equazione:

$$Q_{dhw} = 1.2 \cdot 1000 \cdot 0.05 \cdot 365 \cdot N_{occ} \cdot (55 - 10) \quad (7.37)$$

dove l'unico parametro modellato è proprio il numero di occupanti totale (proveniente dalla somma di tutti gli edifici).

CitySim però esegue comunque un calcolo dinamico dei fabbisogni energetici orari dell'ACS, difatti sempre dallo studio del codice reperibile online [42], questo è calcolato e poi incluso ora per ora nella variabile denominata "MachinePower(W)" trovabile nel file TH.tsv tra i risultati esportati dal software. Questa variabile infatti mostra la potenza termica media oraria erogata nel complesso da tutte le macchine termiche possedute dall'edificio per i servizi di riscaldamento, ACS e se presente, raffrescamento.

In base a quanto verificato nel codice di *CitySim Solver*, non è possibile modellare un generatore dedicato esclusivamente alla produzione di ACS: il servizio di acqua calda sanitaria condivide infatti lo stesso generatore associato alla climatizzazione invernale. Per questo motivo, le potenze termiche attribuibili ai due servizi sono state separate in fase di post-processing, come descritto nel capitolo seguente.

Tale procedura consente di distinguere i contributi dei due servizi e di applicare rendimenti differenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di ACS.

Analogamente a quanto si è fatto per il servizio di climatizzazione invernale, anche per l'ACS la volontà è quella di determinare un rendimento che rappresenti l'intero servizio. Per farlo è possibile impiegare la norma UNI/TS 11300-2 [21]. Questa infatti divide il medesimo servizio nei seguenti sottosistemi:

- Erogazione;
- Distribuzione;
- Generazione

### Distribuzione ed erogazione

Per ciò che concerne esclusivamente l'erogazione, la norma ipotizza un rendimento unitario perchè le perdite sono conteggiate nel calcolo relativo a quelle per il sottosistema di distribuzione alle utenze.

Il sottosistema di distribuzione invece è suddiviso ulteriormente nelle seguenti parti:

- Distribuzione alle utenze;
- Anello di ricircolo;
- Circuito di collegamento tra generatore e serbatoio di accumulo;
- Accumulo.

Nella maggior parte dei casi (residenziali), essendo un impianto autonomo utilizzante uno "scalda-acqua autonomo istantaneo a gas boiler", quindi con l'assenza di un accumulo, secondo gli APE ricevuti, è presente il solo sistema di distribuzione alle utenze.

Vista l'impossibilità di entrare nel dettaglio richiesto dalla norma per il calcolo delle perdite, si ipotizzano trascurabili rispetto a quelle di generazione. Questa ipotesi è supportabile dal fatto che essendo un impianto autonomo per appartamento, le tubazioni hanno lunghezza ridotta e per lo più posizionate in locali riscaldati, riducendo di gran lunga la possibilità di perdite, soprattutto non recuperate. Questa trattazione rende perciò il rendimento del servizio di ACS uguale in valore a quello del solo sottosistema di generazione.

Nonostante l'assenza di un sistema di accumulo dell'ACS, come annunciato in precedenza, questo deve essere obbligatoriamente modellato su CitySim per far sì che il software tratti l'ACS. Di seguito si spiegherà la modalità proposta in questo esempio per la modellazione coerente alla situazione presente nello stato di fatto.

### **Generazione**

Come anticipato in precedenza, dagli APE ricavati si è evinto l'utilizzo della tipologia di generatore *scalda-acqua autonomo istantaneo a gas boiler*. Per restare in linea con le modalità perseguite fino ad ora per la modellazione di questo caso studio, si propone l'utilizzo del prospetto 35 della norma UNI/TS 11300-2 [21] per la determinazione dell'efficienza del generatore.

In assenza di informazioni, si è adottata una configurazione basata su *generatori a gas di tipo C senza fiamma pilota*, caratterizzati da camera di combustione stagna e prelievo dell'aria comburente dall'esterno, per evitare l'introduzione di ipotesi aggiuntive sul ricambio d'aria dei locali e sulle perdite energetiche associate all'aria comburente. Inoltre tale ipotesi è supportata dal fatto che la maggior parte degli scaldini rilevati in situ sembrano di tecnologia moderna.

Per quanto riguarda l'hotel, dalle interviste effettuate è emerso che il generatore utilizzato per il servizio di riscaldamento provvede anche alla produzione di acqua calda sanitaria. In assenza di informazioni di dettaglio sul layout impiantistico del servizio di ACS, è stata assunta, per tale servizio, la stessa efficienza di generazione adottata per il riscaldamento. Analogamente, anche l'efficienza di distribuzione è stata assunta pari a quella precedentemente determinata per il servizio di riscaldamento.

Nella Tabella 7.30 sono riportati così i rendimenti ed i generatori utilizzati per ogni edificio.

Tabella 7.30. Tipologia di generatore per ACS e rendimento termico di generazione adottato.

| EDIFICIO<br>[–] | Tipo generatore<br>[–]                        | $\eta_{th,gn,W}$<br>[–] |
|-----------------|-----------------------------------------------|-------------------------|
| A1              | Scalda-acqua autonomo istantaneo a gas boiler | 0,80                    |
| A2              | Scalda-acqua autonomo istantaneo a gas boiler | 0,80                    |
| A3              | Scalda-acqua autonomo istantaneo a gas boiler | 0,80                    |
| A4              | Scalda-acqua autonomo istantaneo a gas boiler | 0,80                    |
| A5              | Caldaia a condensazione                       | 0,97                    |
| A6              | Scalda-acqua autonomo istantaneo a gas boiler | 0,80                    |
| A7              | Scalda-acqua autonomo istantaneo a gas boiler | 0,80                    |
| A8              | Scalda-acqua autonomo istantaneo a gas boiler | 0,80                    |
| A9              | Scalda-acqua autonomo istantaneo a gas boiler | 0,80                    |

### Implementazione in CitySim

Come anticipato, CitySim non restituisce in output i consumi di *fuel* (energia in ingresso al generatore) disaggregati per servizio, ossia separatamente per ACS e per riscaldamento. Nel presente lavoro tali consumi sono stati pertanto ricostruiti a valle della simulazione, partendo dalla suddivisione dei fabbisogni termici associati ai due servizi e applicando successivamente i rendimenti dei sottosistemi impiantistici di riferimento.

Detto ciò, risulta necessario determinare i fabbisogni energetici di ACS in modo coerente con la trattazione metodologica adottata fino a questo punto. A tal fine è stato modellato un accumulo termico in CitySim in modo da riprodurre i risultati ottenibili mediante l'impostazione semistazionaria della UNI/TS 11300-2 [21]. La norma calcola infatti i fabbisogni di energia utile per ACS attraverso l'Equazione (27) [21]:

$$Q_w = \rho_w c_w \sum_i \left[ V_{w,i} (\theta_{er,i} - \theta_0) \right] G \quad [\text{kWh}] \quad (7.38)$$

dove:

- $\rho_w$  è la massa volumica dell'acqua, assumibile pari a 1000 kg/m<sup>3</sup>;
- $c_w$  è il calore specifico dell'acqua, pari a 1,162 · 10<sup>-3</sup> kWh/(kg · K);
- $V_{w,i}$  è il volume giornaliero di acqua per l'*i*-esima attività/servizio richiesto, espresso in m<sup>3</sup>/d;
- $\theta_{er,i}$  è la temperatura di erogazione dell'acqua per l'*i*-esima attività/servizio richiesto, espressa in °C;
- $\theta_0$  è la temperatura dell'acqua fredda in ingresso, espressa in °C;
- $G$  è il numero di giorni del periodo di calcolo considerato, espresso in d.

Nel presente lavoro sono stati adottati i valori di riferimento raccomandati dalla norma per valutazioni di tipo A1 e A2 [21]:

- $\theta_{\text{er}}$  pari a  $40^\circ\text{C}$ ;
- $\theta_0$  pari alla media annuale delle temperature medie mensili dell'aria esterna della località considerata, ricavate dal Prospetto 5 della UNI 10349-1 [12].

Diversamente dall'approccio semistazionario della UNI/TS 11300-2, il solver di CitySim calcola i fabbisogni di ACS a partire dal bilancio energetico che agisce sull'accumulo in regime transitorio (con discretizzazione oraria,  $\Delta t = 3600$  s). In particolare, l'implementazione richiede la definizione dei seguenti parametri di input:

- volume dell'accumulo;
- coefficiente di perdita  $\phi$ ;
- densità  $\rho$ ;
- calore specifico  $c_p$ ;
- temperatura minima e massima di regolazione ( $T_{\text{min}}$  e  $T_{\text{max}}$ );
- temperatura dell'acqua di rinnovo in ingresso ( $T_{\text{inlet}}$ ).

Nel bilancio può inoltre comparire un contributo di potenza termica da solare termico. Il solver risolve il bilancio al termine di ciascuna ora, aggiornando la temperatura del serbatoio; qualora la temperatura risultasse inferiore a  $T_{\text{min}}$ , viene calcolata la potenza termica media necessaria nell'ora considerata per riportare la temperatura del serbatoio a  $T_{\text{max}}$ . Per un riscontro diretto dell'algoritmo si rimanda al codice sorgente disponibile su GitHub [42].

La soluzione proposta in questo elaborato è finalizzata a rendere il calcolo dell'ACS in CitySim coerente con l'impostazione semistazionaria della UNI/TS 11300-2. A tal fine: (i) il coefficiente di perdita  $\phi$  è stato posto nullo; (ii) non è stato consentito alcun intervallo di isteresi, imponendo  $T_{\text{min}} = T_{\text{max}}$ . In questo modo si annullano gli effetti associati all'evoluzione transitoria dell'accumulo (pur rimanendo la discretizzazione oraria), riconducendo il calcolo ad un comportamento equivalente a quello stazionario. In Tabella 7.31 sono riportati i valori selezionati in input per modellare gli accumuli in modo conforme a quanto descritto. Sebbene il volume dell'accumulo non influisca sui risultati nel caso in esame (Figura ??), esso è stato comunque impostato a un valore ridotto, al fine di mantenere coerenza con l'ipotesi di assenza di accumulo.

Tabella 7.31. Parametri di input dell'accumulo ACS adottati in CitySim.

| <b>EDIFICIO</b> | $V_{\text{acc}}$  | $\phi$ | $\rho$               | $c_p$      | $T_{\text{max}}$ | $T_{\text{min}}$ | $T_{\text{inlet}}$ |
|-----------------|-------------------|--------|----------------------|------------|------------------|------------------|--------------------|
| [-]             | [m <sup>3</sup> ] | [W/K]  | [kg/m <sup>3</sup> ] | [J/(kg K)] | [°C]             | [°C]             | [°C]               |
| A1              | 0,01              | 0      | 1000                 | 4180       | 40               | 40               | 12,8               |
| A2              | 0,01              | 0      | 1000                 | 4180       | 40               | 40               | 12,8               |
| A3              | 0,01              | 0      | 1000                 | 4180       | 40               | 40               | 12,8               |
| A4              | 0,01              | 0      | 1000                 | 4180       | 40               | 40               | 12,8               |
| A5              | 0,01              | 0      | 1000                 | 4180       | 40               | 40               | 12,8               |
| A6              | 0,01              | 0      | 1000                 | 4180       | 40               | 40               | 12,8               |
| A7              | 0,01              | 0      | 1000                 | 4180       | 40               | 40               | 12,8               |
| A8              | 0,01              | 0      | 1000                 | 4180       | 40               | 40               | 12,8               |
| A9              | 0,01              | 0      | 1000                 | 4180       | 40               | 40               | 12,8               |

Si noti infine che i valori riportati in Tabella 7.31 sono coerenti con quelli assunti nella formulazione normativa: in particolare,  $T_{\text{min}} = T_{\text{max}} = \theta_{\text{er}}$ , mentre  $T_{\text{inlet}} = \theta_0$ .

#### 7.8.4 Definizione dei dati relativi al servizio di produzione di ACS e indici di qualità associati

Nella Tabella 7.32 sono riportati gli indici di qualità relativi al servizio di produzione di ACS per ogni edificio, la fonte e le modalità di acquisizione dei dati utilizzati.

Tabella 7.32. Indici di qualità, fonte e modalità di acquisizione dei dati relativi al servizio di acqua calda sanitaria (per edificio).

| Simbolo                             | Definizione                                                                                                                    | A1 | A2 | A3 | A4 | A5  | A6 | A7 | A8 | A9 | Fonte                                               | Modalità             |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|----|----|-----|----|----|----|----|-----------------------------------------------------|----------------------|
| $a$                                 | Fabbisogno specifico giornaliero                                                                                               | 2  | 2  | 2  | 2  | 2   | 2  | 2  | 2  | 2  | UNI/TS 11300-2 [21]/<br>Derivato                    | Calcolo semplificato |
| $b$                                 | Fabbisogno base giornaliero                                                                                                    | 2  | 2  | 2  | 2  | \   | 2  | 2  | 2  | 2  | UNI/TS 11300-2 [21]/<br>Derivato                    | Calcolo semplificato |
| $V_{w, \text{appartamento}}$        | Fabbisogno giornaliero di ACS per appartamento                                                                                 | 2  | 2  | 2  | 2  | \   | 2  | 2  | 2  | 2  | UNI/TS 11300-2 [21]/<br>Derivato                    | Calcolo semplificato |
| $V_{w, \text{edificio}}$            | Fabbisogno giornaliero di ACS per l'intero edificio                                                                            | 2  | 2  | 2  | 2  | 2   | 2  | 2  | 2  | 2  | UNI/TS 11300-2 [21]/<br>Derivato                    | Calcolo semplificato |
| \                                   | Tipologia del generatore                                                                                                       | 3  | 3  | 3  | 3  | 1** | 3  | 1* | 3  | 3  | APE/ Ipotesi*/<br>Intervista degli occupanti**      | \                    |
| $\eta_{th, gn, W}$                  | Rendimento di generazione                                                                                                      | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1  | 1  | 1  | 1  | UNI/TS 11300-2 [21]/<br>Ipotesi                     | Calcolo semplificato |
| $\eta_{th}$                         | Rendimento dell'intero servizio                                                                                                | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 1  | 1  | 1  | 1  | Derivato                                            | \                    |
| $\rho$                              | Densità dell'acqua in impianto                                                                                                 | 2  | 2  | 2  | 2  | 2   | 2  | 2  | 2  | 2  | UNI/TS 11300-2 [21]                                 | \                    |
| $c_p$                               | Calore specifico dell'acqua in impianto                                                                                        | 2  | 2  | 2  | 2  | 2   | 2  | 2  | 2  | 2  | UNI/TS 11300-2 [21]                                 | \                    |
| $T_{\min} = T_{\max} = \theta_{er}$ | Temperatura di erogazione (coincidente con la massima e minima in input per l'accumulo virtuale modellato su CitySim)          | 2  | 2  | 2  | 2  | 2   | 2  | 2  | 2  | 2  | UNI/TS 11300-2 [21]                                 | Calcolo semplificato |
| $T_{inlet} = \theta_0$              | Temperatura di erogazione (coincidente con la temperatura dell'acqua in ingresso per l'accumulo virtuale modellato su CitySim) | 2  | 2  | 2  | 2  | 2   | 2  | 2  | 2  | 2  | UNI/TS 11300-2 [21]/<br>UNI 10349-1 [12]            | Calcolo semplificato |
| \                                   | Profilo di utilizzo di ACS                                                                                                     | 2  | 2  | 2  | 2  | 2   | 2  | 2  | 2  | 2  | Allegato nazionale della<br>UNI EN ISO 16798-1 [20] | \                    |

## Capitolo 8

# Risultati

A valle della simulazione, CitySim consente l'esportazione di quindici file in formato **tsv**, contenenti i risultati relativi al modello simulato. Nel seguito si presenta sinteticamente ciascun file e il relativo contenuto.

Il primo file, denominato **Area.tsv**, riporta un resoconto delle aree, per ogni edificio e per ciascuna tipologia di superficie. Il secondo file, denominato **ClimaticData.tsv**, contiene il file climatico utilizzato per la simulazione, coincidente con quello fornito in input dal modellista. Il terzo file, denominato **CM.tsv**, riporta le temperature medie radianti e gli indici di comfort. Il quarto file, denominato **DL.tsv**, contiene informazioni relative all'illuminamento negli edifici dovuto ai componenti finestrati. Il quinto file, denominato **ET.tsv**, contiene i risultati dell'evapotraspirazione, ossia la quantità d'acqua da fornire alle aree verdi. Il sesto file, denominato **HC.tsv**, riporta i coefficienti di scambio termico convettivo per tutte le superfici. Il settimo file, denominato **Inertia.tsv**, contiene l'inerzia termica di ciascun edificio. L'ottavo file, denominato **LW.tsv**, riporta il bilancio della radiazione a onda lunga (infrarossa) delle superfici. Il nono file, denominato **SW.tsv**, contiene l'irradianza a onda corta delle superfici. Il decimo file, denominato **SWv.tsv**, riporta l'illuminamento di ciascuna superficie. L'undicesimo file, denominato **TH.tsv**, contiene i risultati con risoluzione oraria relativi al Centro di Energia di Distretto (se presente) e a ciascun edificio. Nel presente lavoro sono stati simulati esclusivamente gli edifici; pertanto, il file **tsv** contiene informazioni riferite unicamente a tali elementi. Il contenuto di questo file è descritto nel seguito del paragrafo. Il dodicesimo file, denominato **TS.tsv**, riporta la temperatura di ciascuna superficie per ogni ora simulata. Il tredicesimo file, denominato **VF.tsv**, contiene il fattore di vista del cielo e il fattore di vista del suolo per ciascuna superficie modellata. Il quattordicesimo file, denominato **YearlyResults.tsv**, riporta i risultati annuali complessivi relativi all'intero modello. Il quindicesimo file, denominato **YearlyResultsPerBuilding.tsv**, contiene i risultati annuali disaggregati per edificio.

Tra tutti i file prodotti, quello di maggiore interesse ai fini del post-processing è **TH.tsv**. Come anticipato, esso riporta, con passo temporale orario, diverse variabili di output relative a ciascun edificio. Le variabili contenute in tale file sono le seguenti:

- temperatura dell'aria interna ("Ta (°C)");

- fabbisogno ideale di riscaldamento necessario per il raggiungimento della temperatura di setpoint ("Heating (Wh)");
- fabbisogno ideale di raffrescamento necessario per il raggiungimento della temperatura di setpoint ("Cooling (Wh)");
- apporti interni, comprensivi di occupanti, apparecchiature e apporti solari ("Qi (Wh)");
- fabbisogno di riscaldamento (positivo) o di raffrescamento (negativo) soddisfatto, da considerare per il calcolo dei carichi ideali ("Qs (Wh)");
- portata di ventilazione naturale dovuta all'apertura delle finestre ("VdotVent (m<sup>3</sup>/h)");
- temperatura del serbatoio di accumulo termico ("HeatStockTemperature (°C)");
- temperatura del serbatoio di acqua calda sanitaria, se presente ("DHWStockTemperature (°C)");
- temperatura del serbatoio di accumulo del freddo ("ColdStockTemperature (°C)");
- potenza termica totale fornita per il riscaldamento degli ambienti e per l'acqua calda sanitaria, ed estratta per il raffrescamento ("MachinePower (W)");
- energia consumata dal sistema di conversione energetica in termini di combustibile ("FuelConsumption (MJ)");
- energia elettrica consumata dal sistema di conversione energetica e dalle apparecchiature ("ElectricConsumption (kWh)");
- energia prodotta dai pannelli fotovoltaici ("SolarPVProduction (kWh)");
- energia fornita all'accumulo termico dai pannelli solari termici ("SolarThermalProduction (J)").

Nel paragrafo successivo è descritto il trattamento effettuato in post-processing per le variabili sopra elencate. Per maggiori informazioni sui file di output si rimanda alla wiki su GitHub di CitySim [41].

## 8.1 Post-processing

Il post-processing dei dati ha l'obiettivo di ottenere una versione elaborata e coerente dei risultati da sottoporre ad analisi. Nel caso in esame, tale processo è finalizzato all'estrazione dei risultati su base oraria per ciascun edificio e alla loro successiva aggregazione ed elaborazione, al fine di ricavare gli indicatori finali considerati nello studio.

Le variabili oggetto di analisi in questo progetto sono: i fabbisogni energetici per i servizi di produzione di acqua calda sanitaria (ACS), riscaldamento e raffrescamento;

i fabbisogni netti areici per il riscaldamento e il raffrescamento ( $EP_{H,nd}$  e  $EP_{C,nd}$ ); la prestazione energetica in termini di energia primaria totale, rinnovabile e non rinnovabile per i servizi presenti, ovvero: riscaldamento ( $EP_{H,tot}$ ,  $EP_{H,ren}$  e  $EP_{H,nren}$ ) e produzione di ACS ( $EP_{W,tot}$ ,  $EP_{W,ren}$  e  $EP_{W,nren}$ ).

Si precisa tuttavia che tali indicatori non risultano pienamente sovrapponibili a quelli definiti in ambito normativo, in quanto la determinazione dei fabbisogni e delle efficienze non coincide esattamente con quanto prescritto dalla serie UNI/TS 11300, sebbene diversi valori di input e parametri di riferimento siano stati ricavati proprio da tali norme. Un primo elemento di non completa coerenza è rappresentato dalla modalità di determinazione dei fabbisogni mediante CitySim, software non riconosciuto dal CTI per la certificazione e la verifica secondo il quadro UNI/TS. Un ulteriore scostamento deriva dal fatto che gli indicatori  $EP$  dovrebbero includere anche i consumi degli ausiliari, aspetto difficilmente trattabile con il livello di dettaglio richiesto in modellazione UBEW rispetto a una modellazione BEM di singolo edificio.

Per tali ragioni, in questo lavoro la serie UNI/TS 11300 è stata impiegata principalmente come supporto metodologico per la definizione di dati standard e assunzioni omogenee tra edifici, in un contesto caratterizzato da una limitata disponibilità di informazioni. Gli indicatori vengono pertanto denominati in modo analogo a quelli normativi in quanto ne conservano il significato fisico, ossia una misura di energia primaria normalizzata sulla superficie utile, utile a consentire confronti oggettivi anche tra sistemi alimentati da vettori energetici differenti (ad esempio teleriscaldamento e gas naturale).

### 8.1.1 Estrapolazione dei fabbisogni di ACS

Come anticipato, i fabbisogni ideali orari di riscaldamento e raffrescamento per ciascun edificio sono riportati nel file `TH.tsv`. Tale file, tuttavia, non fornisce direttamente i fabbisogni energetici orari relativi al servizio di produzione di ACS. Questi ultimi sono comunque considerati dal software e risultano incorporati nella variabile `"MachinePower (W)"`; pertanto, possono essere ricavati sottraendo da tale grandezza la quantità, in valore assoluto, della variabile `"Qs (Wh)"`, che rappresenta il fabbisogno di riscaldamento/raffrescamento soddisfatto nel medesimo intervallo temporale. Si utilizza il valore assoluto poiché il raffrescamento è espresso con segno negativo in `"Qs (Wh)"`, mentre contribuisce positivamente in `"MachinePower (W)"`.

$$Q_{DHW,needs} = \text{MachinePower\_}(W) - |Qs\_ (Wh)| \quad [Wh] \quad (8.1)$$

Sebbene le unità di misura delle due variabili differiscano (la prima è una potenza, la seconda un'energia), l'operazione risulta coerente poiché `"MachinePower (W)"` rappresenta una potenza termica media riferita all'intervallo orario e, moltiplicata per la durata dell'intervallo, fornisce l'energia erogata nello stesso periodo.

Nel presente studio non è previsto il servizio di raffrescamento; di conseguenza, la variabile `"Qs (Wh)"` corrisponde, in ogni ora, esclusivamente alla quota di fabbisogno di

riscaldamento soddisfatta. Inoltre, durante il periodo di riscaldamento, tale grandezza coincide con la richiesta ideale, in virtù della scelta modellistica di considerare un impianto con potenza massima non vincolante.

Operando secondo quanto descritto è possibile esplicitare i fabbisogni orari per ciascun edificio e, successivamente, aggregarli su diversi intervalli di riferimento (ad esempio giornaliero, mensile, annuale) o per differenti condizioni d'uso (ad esempio residenziale, non residenziale, intero comparto).

### 8.1.2 Determinazione dei fabbisogni termici utili

Una volta ricavati dal file `TH.tsv` i fabbisogni ideali orari di riscaldamento per ciascun edificio, è possibile aggregarli su base annuale mediante la somma dei 8760 valori orari prodotti in output.

$$Q_{H,needs,anno,edificio} = \sum Q_{H,needs,ora,edificio} \quad (8.2)$$

Rapportando il valore annuale così ottenuto alla superficie utile dell'edificio, si ricava l'indicatore  $EP_{H,nd}$ :

$$EP_{H,nd,edificio} = \frac{Q_{H,needs,anno,edificio}}{S_{u,edificio}} \quad (8.3)$$

Tale indicatore risulta particolarmente significativo poiché consente un confronto oggettivo, tra edifici di diversa dimensione, delle caratteristiche in termini di prestazioni dell'involucro, ventilazione e apporti interni.

Il ragionamento è del tutto analogo per la determinazione di  $EP_{C,nd}$ , sostituendo ai fabbisogni di riscaldamento quelli di raffrescamento.

### 8.1.3 Determinazione della prestazione energetica per i diversi servizi energetici

Analogamente al paragrafo precedente e per semplicità espositiva, nel seguito viene illustrata esclusivamente la metodologia adottata per la determinazione degli indici di prestazione energetica del servizio di riscaldamento, poiché la medesima procedura è direttamente applicabile anche al servizio di ACS.

Il primo passo consiste nell'esplicitare, per ciascun edificio, l'energia richiesta in ingresso al sistema, su base mensile, per il servizio di climatizzazione invernale, quando attivo. Tale grandezza può essere ricavata dividendo i fabbisogni mensili per il rendimento complessivo del servizio considerato:

$$Q_{H,in,mese} = \frac{Q_{H,needs,mese}}{\eta_{th;H}} \quad (8.4)$$

Una volta determinati i valori mensili di energia in ingresso necessari a soddisfare i fabbisogni di riscaldamento per ciascun edificio (limitatamente ai mesi di attivazione del

servizio), è possibile calcolare le corrispondenti quantità mensili di energia primaria totale, rinnovabile e non rinnovabile mediante l'impiego dei fattori di conversione associati ai diversi vettori energetici:

$$E_{P,H,tot,mese} = \sum_{\text{vettore}} Q_{H,in,mese,vettore} f_{P,tot,vettore} \quad (8.5)$$

$$E_{P,H,ren,mese} = \sum_{\text{vettore}} Q_{H,in,mese,vettore} f_{P,ren,vettore} \quad (8.6)$$

$$E_{P,H,nren,mese} = \sum_{\text{vettore}} Q_{H,in,mese,vettore} f_{P,nren,vettore} \quad (8.7)$$

A tal fine si adottano i fattori di conversione in energia primaria definiti nel quadro dei *Requisiti minimi* introdotti dal DM 26 giugno 2015 [11]. In particolare, per coerenza con l'impostazione normativa più recente, si utilizzano i valori riportati nella Tabella 1 (Figure 8.1 e 8.2) dell'Allegato 1 del DM 28 ottobre 2025 [37], che aggiorna il decreto del 2015 (s.m.i.) e la cui entrata in vigore è prevista a partire dal 3 giugno 2026.

*Tabella 1 - Fattori di conversione in energia primaria dei vettori energetici*

| <b>Vettore energetico</b>                 | <b><math>f_{P,nren}</math></b> | <b><math>f_{P,ren}</math></b> | <b><math>f_{P,tot}</math></b> |
|-------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Gas naturale <sup>(1)</sup>               | 1,05                           | 0                             | 1,05                          |
| GPL                                       | 1,05                           | 0                             | 1,05                          |
| Gasolio e Olio combustibile               | 1,07                           | 0                             | 1,07                          |
| Carbone                                   | 1,10                           | 0                             | 1,10                          |
| Biomasse solide <sup>(2)</sup>            | 0,20                           | 0,80                          | 1,00                          |
| Biomasse liquide e gassose <sup>(2)</sup> | 0,40                           | 0,60                          | 1,00                          |

Figura 8.1. Primo estratto della Tabella 1 dell'Allegato 1 del DM 28 ottobre 2025 [37].

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      |      |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|
| Energia elettrica da rete <sup>(3)</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 1,95 | 0,47 | 2,42 |
| Teleriscaldamento <sup>(4)</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 1,5  | 0    | 1,5  |
| Rifiuti solidi urbani                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,2  | 0,2  | 0,4  |
| Teleraffrescamento <sup>(4)</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 0,5  | 0    | 0,5  |
| Energia termica da collettori solari <sup>(5)</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 0    | 1,00 | 1,00 |
| Energia elettrica prodotta da fotovoltaico, mini-eolico e mini-idraulico <sup>(5)</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0    | 1,00 | 1,00 |
| Energia termica dall'ambiente esterno – free cooling <sup>(5)</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 0    | 1,00 | 1,00 |
| Energia termica dall'ambiente esterno – pompa di calore <sup>(5)</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0    | 1,00 | 1,00 |
| <sup>(1)</sup> I valori saranno aggiornati ogni due anni sulla base dei dati forniti da GSE.<br><sup>(2)</sup> Come definite dall'allegato X del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152.<br><sup>(3)</sup> I valori saranno aggiornati ogni due anni sulla base dei dati forniti da GSE.<br><sup>(4)</sup> Fattore assunto in assenza di valori dichiarati dal fornitore e asseverati da parte terza, conformemente al quanto previsto al paragrafo 3.2.<br><sup>(5)</sup> Valori convenzionali funzionali al sistema di calcolo. |      |      |      |

Figura 8.2. Secondo estratto della Tabella 1 dell'Allegato 1 del DM 28 ottobre 2025 [37].

Nella presente applicazione, dalla tabella ministeriale sono stati utilizzati esclusivamente i fattori di conversione relativi al gas naturale. Per quanto riguarda il teleriscaldamento, sono stati invece adottati i fattori forniti da IREN per la città metropolitana di Torino, riportati nel documento “Validazione dei fattori di conversione in energia primaria del teleriscaldamento”, redatto da RINA SERVICES S.p.A. in data 01/07/2025 [38]. Per maggiore chiarezza, nella Tabella 8.1 sono riportati i valori dei fattori di conversione adottati ai fini del calcolo.

Tabella 8.1. Fattori di conversione in energia primaria adottati.

| Vettore           | $f_{P,nren}$ | $f_{P,ren}$ | $f_{P,tot}$ |
|-------------------|--------------|-------------|-------------|
| Gas naturale      | 1,05         | 0,00        | 1,05        |
| Teleriscaldamento | 0,73         | 0,03        | 0,76        |

Sommando i dodici valori mensili è quindi possibile determinare, per ciascun edificio, l'energia primaria associata al servizio di riscaldamento su base annuale:

$$E_{P,H,tot,anno} = \sum_{mese=1}^{12} E_{P,H,tot,mese} \quad (8.8)$$

$$E_{P,H,nren,anno} = \sum_{mese=1}^{12} E_{P,H,nren,mese} \quad (8.9)$$

$$E_{P,H,ren,anno} = \sum_{mese=1}^{12} E_{P,H,ren,mese} \quad (8.10)$$

Infine, per ciascun edificio e per ciascun intervallo temporale considerato, è possibile calcolare gli indici di prestazione energetica normalizzando l'energia primaria sulla superficie utile. Su base mensile si ottiene:

$$EP_{H,tot,mese} = \frac{E_{P,H,tot,mese}}{S_u} \quad (8.11)$$

$$EP_{H,nren,mese} = \frac{E_{P,H,nren,mese}}{S_u} \quad (8.12)$$

$$EP_{H,ren,mese} = \frac{E_{P,H,ren,mese}}{S_u} \quad (8.13)$$

In modo analogo, su base annuale:

$$EP_{H,tot,anno} = \frac{E_{P,H,tot,anno}}{S_u} \quad (8.14)$$

$$EP_{H,nren,anno} = \frac{E_{P,H,nren,anno}}{S_u} \quad (8.15)$$

$$EP_{H,ren,anno} = \frac{E_{P,H,ren,anno}}{S_u} \quad (8.16)$$

È inoltre possibile determinare l'indice relativo all'intero comparto studiato, ad esempio per la quota totale annua, come rapporto tra la somma delle energie primarie dei singoli edifici e la somma delle rispettive superfici utili:

$$EP_{H,tot,anno,comparto} = \frac{\sum_{edificio} E_{P,H,tot,anno,edificio}}{\sum_{edificio} S_{u,edificio}} \quad (8.17)$$

In modo del tutto analogo possono essere calcolate anche le altre componenti di prestazione (rinnovabile e non rinnovabile) e su differenti intervalli temporali.

Infine, coerentemente con l'intervallo temporale e l'aggregazione spaziale adottati (singolo edificio, sottoinsieme di edifici, intero comparto), è possibile determinare la prestazione complessiva come somma delle prestazioni dei singoli servizi considerati (nel presente lavoro, riscaldamento e ACS):

$$EP_{X,Y,Z} = \sum_{servizio} EP_{servizio,X,Y,Z} \quad (8.18)$$

dove X indica la componente di energia primaria (*tot*, *ren*, *nren*), Y l'intervallo temporale (ad esempio *mese*, *anno*) e Z il livello di aggregazione spaziale (ad esempio singolo edificio, residenziale, intero comparto).

## 8.2 Validazione dei risultati

In una fase avanzata della modellazione è in genere opportuno procedere alla calibrazione del modello sulla base dei consumi reali. Nel caso in esame, tuttavia, l'assenza di dati relativi ai consumi effettivi nel periodo temporale considerato non consente di effettuare tale procedura.

È comunque possibile effettuare una validazione di tipo fisico dei risultati, verificando che gli output rispettino le relazioni attese e risultino coerenti con le leggi che governano i fenomeni oggetto di studio. A tal fine sono stati analizzati gli andamenti delle variabili di output rispetto a grandezze di riferimento, quali la temperatura dell'aria esterna.

### 8.2.1 Riscaldamento

Un primo controllo di coerenza consiste nel confrontare l'andamento mensile dei valori di  $EP_{H,tot}$  e  $EP_{H,nd}$  dell'intero complesso con quello delle differenze orarie tra temperatura interna ed esterna, calcolate conformemente a quanto previsto dalla UNI 10349-3:2016 [13]. Come assunto nel modello, la temperatura interna di riferimento è posta pari a  $T_{in} = 20^\circ\text{C}$ .

In Figura 8.3 è riportato un grafico a linee che illustra l'andamento mensile dei valori di  $EP_{H,nd}$  e  $EP_{H,tot}$  riferiti all'intero complesso.

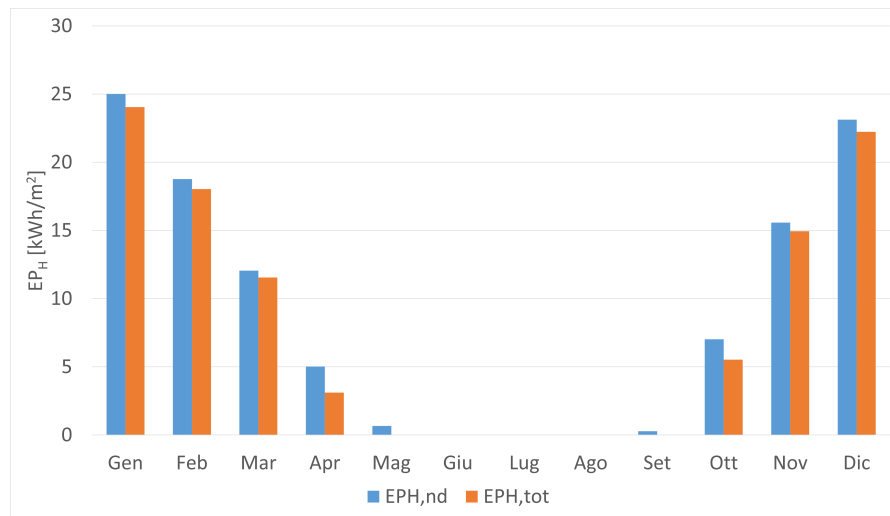


Figura 8.3. Andamento mensile dei valori di  $EP_{H,nd}$  e  $EP_{H,tot}$  per l'intero complesso.

In Figura 8.4 è riportato il boxplot delle distribuzioni mensili delle differenze orarie tra temperatura interna ed esterna, ricavate dal file climatico utilizzato nella simulazione e determinate in modo coerente con la UNI 10349-3:2016 [13].

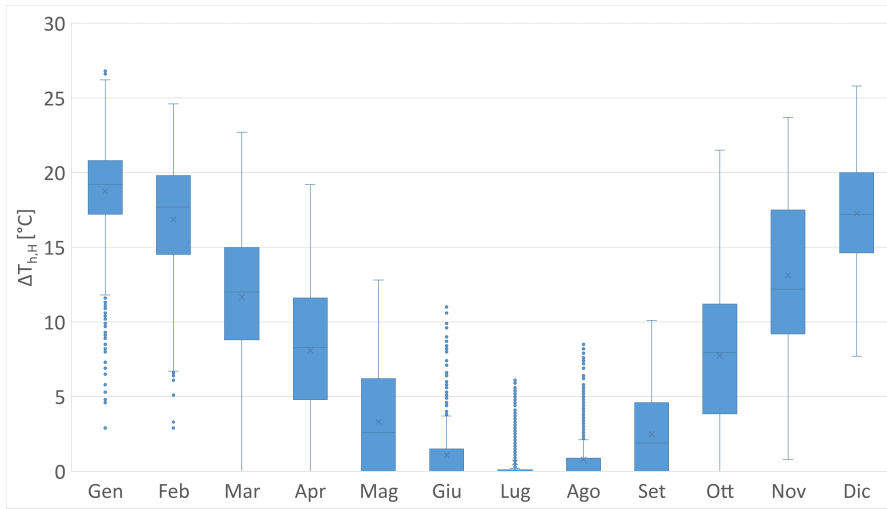


Figura 8.4. Boxplot mensile delle differenze orarie tra temperatura interna ed esterna, utilizzate per il calcolo dei gradi-giorno invernali.

In Figura 8.5 è invece riportato un diagramma a dispersione che mette in relazione il valore mensile di  $EP_{H,nd}$  dell'intero complesso con i gradi-giorno mensili cumulati, calcolati in modo coerente con la UNI 10349-3:2016 [13].

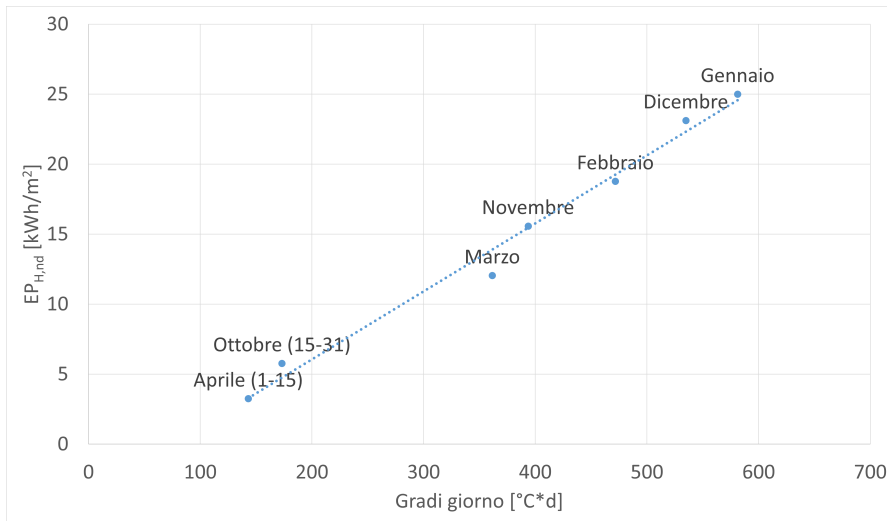


Figura 8.5. Relazione tra  $EP_{H,nd}$  mensile del complesso e gradi-giorno mensili cumulati.

Dalle Figure 8.3 e 8.4 si osserva che l'andamento dei fabbisogni ideali e degli indicatori energetici mensili per il riscaldamento risulta coerente con l'andamento delle differenze di temperatura tra ambiente interno ed esterno. In particolare, i valori di  $EP_{H,nd}$  e  $EP_{H,tot}$  raggiungono i massimi nei mesi invernali, per poi ridursi progressivamente nei

mesi intermedi fino ad annullarsi nel periodo estivo, in accordo con la diminuzione delle differenze termiche orarie.

Tale evidenza è ulteriormente supportata dalla Figura 8.5, dalla quale emerge una relazione pressoché lineare tra i valori mensili di  $EP_{H,nd}$  e i corrispondenti gradi-giorno mensili cumulati.

Si osserva inoltre che, nel file climatico utilizzato, anche nei mesi estivi possono registrarsi differenze orarie tra temperatura interna ed esterna maggiori di zero; coerentemente, anche il fabbisogno ideale di riscaldamento  $EP_{H,nd}$  può assumere valori lievemente diversi da zero. Tuttavia, l'impianto di climatizzazione invernale è impostato come non attivo nel periodo compreso tra il 15 aprile e il 15 ottobre. Di conseguenza, pur in presenza di una richiesta ideale di riscaldamento, l'indicatore  $EP_{H,tot}$  risulta nullo nei mesi in cui il servizio non è effettivamente erogato.

Infine, si osserva che i valori di  $EP_{H,tot}$  risultano nel complesso inferiori a quelle di  $EP_{H,nd}$ . Ciò è riconducibile al fatto che, per la maggior parte degli edifici, il vettore energetico adottato è il teleriscaldamento, il quale, come riportato in Tabella 8.1, è caratterizzato da un fattore di conversione totale  $f_{P,tot}$  pari a 0,76.

Nel seguito si riportano, a titolo esemplificativo, gli andamenti delle grandezze relative ai fabbisogni di riscaldamento soddisfatti, all'energia in ingresso al servizio di riscaldamento e alla corrispondente energia primaria, rispettivamente per l'edificio A1 (Figura 8.6), alimentato a gas naturale, e per l'edificio A9 (Figura 8.7), alimentato da teleriscaldamento.

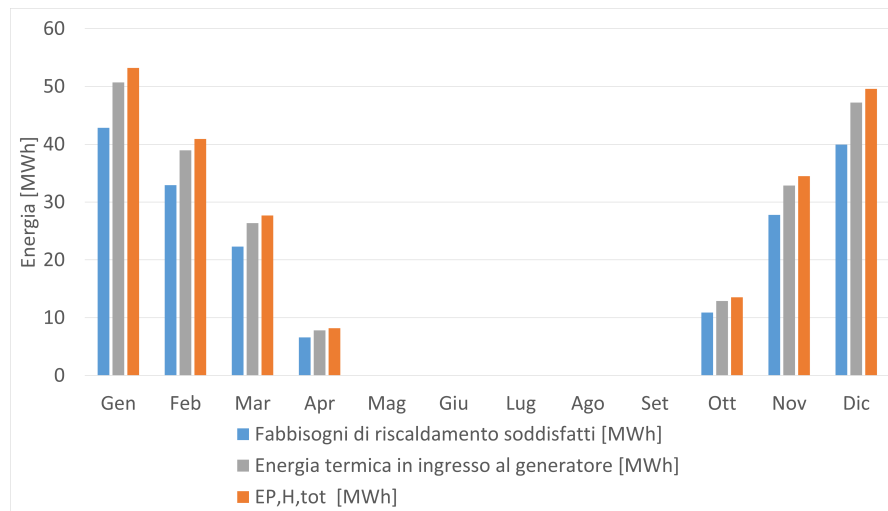


Figura 8.6. Andamenti dei fabbisogni di riscaldamento soddisfatti, dell'energia in ingresso al servizio e della corrispondente energia primaria per l'edificio A1 (gas naturale).

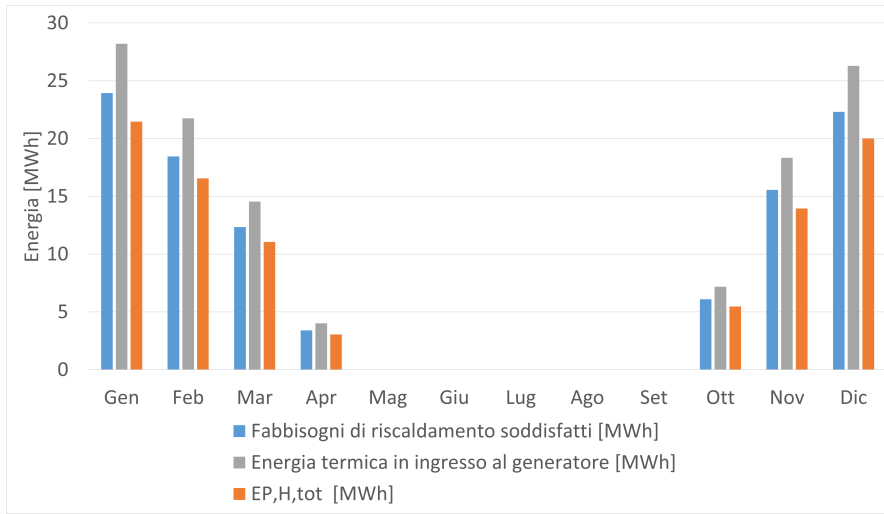


Figura 8.7. Andamenti dei fabbisogni di riscaldamento soddisfatti, dell'energia in ingresso al servizio e della corrispondente energia primaria per l'edificio A9 (teleriscaldamento).

Come atteso, nel caso dell'edificio alimentato a gas naturale le grandezze considerate presentano mensilmente un andamento monotono crescente. Nel caso del teleriscaldamento, invece, il valore mensile di  $E_{P,H,tot}$  può risultare inferiore al corrispondente fabbisogno soddisfatto: tale comportamento è spiegato dal fatto che il fattore di conversione in energia primaria totale del teleriscaldamento risulta inferiore all'unità e inferiore anche al rendimento complessivo associato al servizio di riscaldamento adottato.

### 8.2.2 Raffrescamento

Analogamente a quanto fatto per il servizio di riscaldamento, risulta utile analizzare l'andamento dei fabbisogni di raffrescamento in funzione della differenza tra la temperatura esterna e la temperatura interna di riferimento assunta per il funzionamento estivo degli edifici.

A tal fine sono state calcolate le differenze orarie tra temperatura esterna e temperatura interna in modo coerente con l'impostazione adottata dalla UNI 10349-3:2016 [13] per il calcolo dei gradi-giorno di raffrescamento, assumendo  $T_{in} = 26^\circ\text{C}$ .

In Figura 8.8 è riportato un grafico a linee che illustra l'andamento mensile dei valori di  $EP_{C,nd}$  riferiti all'intero complesso.

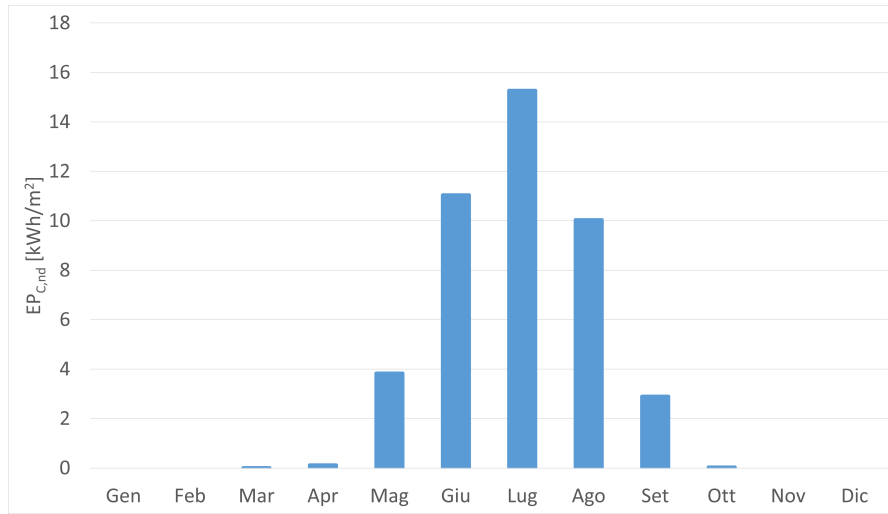


Figura 8.8. Andamento mensile dei valori di  $EP_{C,nd}$  per l'intero complesso.

In Figura 8.9 è invece riportato il boxplot delle distribuzioni mensili delle differenze orarie tra temperatura esterna e temperatura interna di riferimento per il raffrescamento, ricavate dal file climatico utilizzato nella simulazione.

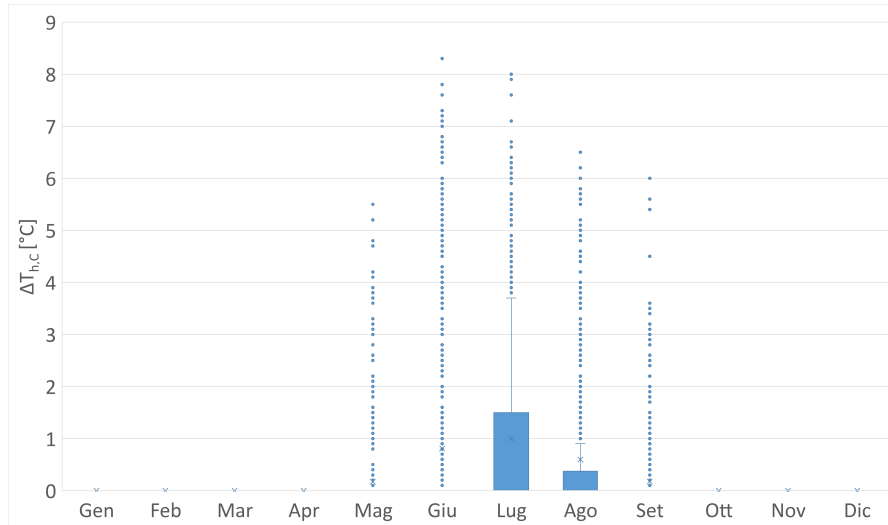


Figura 8.9. Boxplot mensile delle differenze orarie tra temperatura esterna e temperatura interna di riferimento per il raffrescamento.

Dalle Figure 8.8 e 8.9 si osserva che l'andamento dei fabbisogni di raffrescamento risulta coerente con quello delle differenze di temperatura considerate nel calcolo dei gradi-giorno estivi. In particolare, i valori di  $EP_{C,nd}$  risultano concentrati nei mesi estivi,

con un massimo in corrispondenza del mese di luglio, in accordo con l'aumento delle differenze tra temperatura esterna e temperatura interna di riferimento.

Si osserva inoltre che nei mesi intermedi, in particolare tra maggio e settembre, le distribuzioni delle differenze orarie presentano valori positivi anche molto variabili, riflettendo la variabilità delle condizioni climatiche estive. Tale comportamento si traduce coerentemente in valori mensili non nulli del fabbisogno ideale di raffrescamento.

### 8.2.3 Acqua calda sanitaria

Per come è stato definito il fabbisogno di ACS, i valori di  $EP_{W,tot}$  non presentano una variabilità significativa in funzione del mese. I limitati scostamenti osservabili sono attribuibili principalmente alla diversa durata dei mesi, ossia al differente numero di giorni che li compongono. Il valore giornaliero di  $EP_{W,tot}$  risulta infatti pressoché costante, pari a circa  $0,86 \text{ kWh/m}^2$ .

Inoltre, per come è stato determinato il fabbisogno di ACS, esso risulta fortemente correlato alla superficie utile dell'edificio nel caso delle sole destinazioni residenziali. In Figura 8.10 si osserva infatti una relazione marcata tra i fabbisogni annuali di ACS e la superficie utile, analizzata limitatamente agli edifici residenziali. L'edificio a destinazione alberghiera è stato escluso da tale analisi in quanto presenta, a parità di superficie utile, un ordine di grandezza del fabbisogno significativamente differente rispetto a quello degli edifici residenziali; inoltre, nel suo caso il fabbisogno non dipende dalla superficie utile, bensì dal numero di posti letto, in coerenza con il metodo di calcolo previsto dalla UNI/TS 11300-2 [21] e adottato nella presente modellazione.

Il valore di  $R^2$  risulta prossimo all'unità, confermando la forte correlazione tra le due grandezze. Si osserva tuttavia che la relazione non è perfettamente lineare, in accordo con la formulazione utilizzata per la determinazione dei fabbisogni di ACS, anch'essa desunta dalla UNI/TS 11300-2 [21].

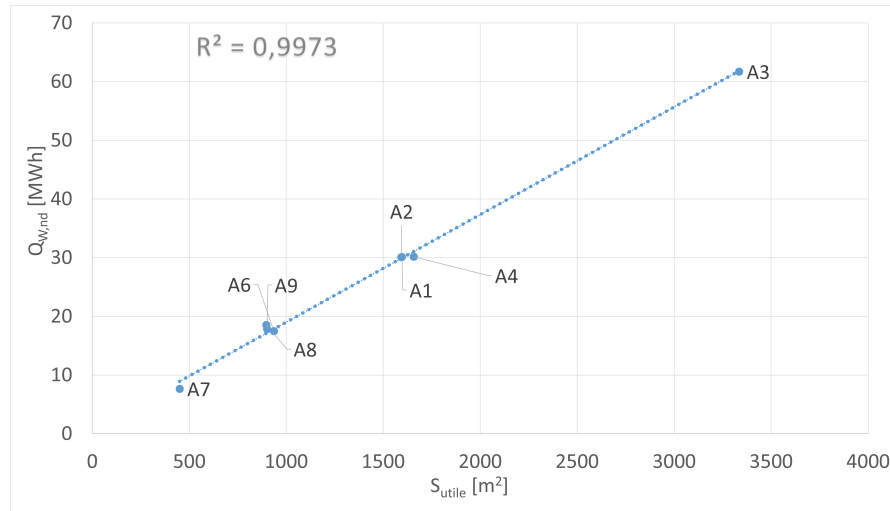


Figura 8.10. Relazione tra fabbisogni annuali di ACS e superficie utile limitata-  
mente agli edifici residenziali.

### 8.3 Analisi dei risultati

Una volta verificata la coerenza fisica dei risultati, è possibile interpretarli, indagandone le cause e individuando eventuali margini di miglioramento.

Come discusso in precedenza, i servizi considerati nel presente lavoro sono il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria. Tuttavia, ai fini di una valutazione più completa del comportamento degli edifici, sono stati analizzati anche i fabbisogni ideali di raffrescamento, intesi come carichi termici da asportare per il mantenimento della temperatura di setpoint estiva, pur in assenza di un effettivo servizio di climatizzazione estiva.

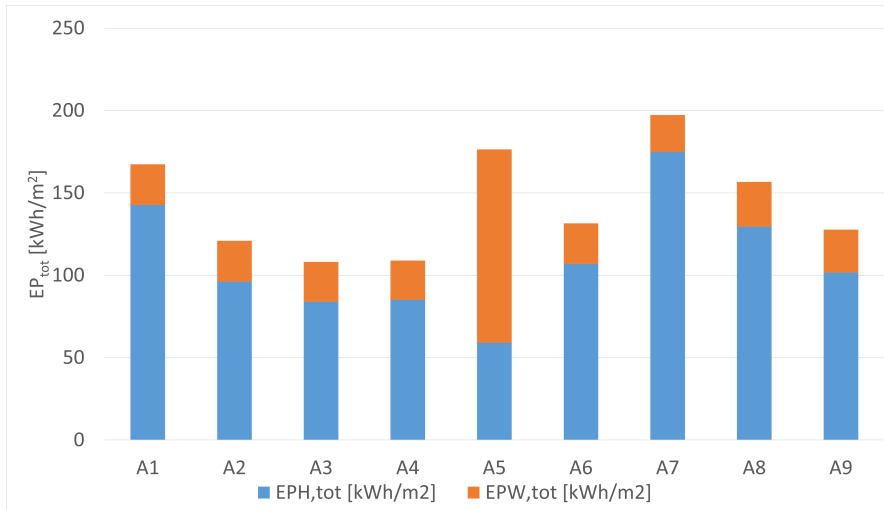
Gli indici di prestazione energetica complessivi relativi ai servizi di riscaldamento e ACS sono riportati in Tabella 8.2 per ciascun edificio e per l'intero complesso. Nella stessa tabella sono inoltre riportate le componenti di energia primaria rinnovabile e non rinnovabile, nonché la quota di energia rinnovabile  $RER$ , calcolate per ogni edificio e per il totale.

Dalla tabella si osserva che il patrimonio esistente analizzato ricorre quasi esclusivamente a energia primaria non rinnovabile. Per gli edifici alimentati da teleriscaldamento è presente una quota rinnovabile, seppur contenuta e complessivamente marginale.

Tabella 8.2. Indici di prestazione energetica e quota rinnovabile (RER) per edificio.

| <b>Edificio</b><br>[-] | $EP_{\text{tot}}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | $EP_{\text{nren}}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | $EP_{\text{ren}}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | <b>RER</b><br>[%] |
|------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------|
| A1                     | 167.4                                      | 167.4                                       | 0.0                                        | 0                 |
| A2                     | 120.9                                      | 117.4                                       | 3.5                                        | 3                 |
| A3                     | 108.1                                      | 105.0                                       | 3.1                                        | 3                 |
| A4                     | 108.9                                      | 105.8                                       | 3.1                                        | 3                 |
| A5                     | 170.3                                      | 170.3                                       | 0.0                                        | 0                 |
| A6                     | 131.5                                      | 127.5                                       | 3.9                                        | 3                 |
| A7                     | 197.3                                      | 190.9                                       | 6.4                                        | 3                 |
| A8                     | 156.6                                      | 151.9                                       | 4.8                                        | 3                 |
| A9                     | 127.6                                      | 123.9                                       | 3.7                                        | 3                 |
| <b>TOTALE</b>          | <b>133.7</b>                               | <b>131.0</b>                                | <b>2.7</b>                                 | <b>2</b>          |

In Figura 8.11 è riportata la scomposizione, per ciascun edificio, del valore di  $EP_{\text{tot}}$  tra i due servizi presenti. Si osserva che, per gli edifici residenziali, la quota prevalente è associata al riscaldamento, mentre per l'edificio ad uso alberghiero risulta dominante il contributo legato alla produzione di ACS. Tale comportamento è coerente con la modalità di definizione dei fabbisogni in input, che per la destinazione alberghiera prevede una richiesta di ACS sensibilmente maggiore, in accordo con le indicazioni della UNI/TS 11300-2 [21].

Figura 8.11. Scomposizione dei valori di  $EP_{\text{tot}}$  tra riscaldamento e ACS per ciascun edificio.

Nel seguito vengono analizzati separatamente i singoli servizi, approfondendo i principali

fattori che influenzano gli indicatori ottenuti e le cause delle differenze riscontrate tra gli edifici.

### 8.3.1 Riscaldamento

In Tabella 8.3 sono riportati i principali risultati annuali analizzati nel presente studio per il servizio di riscaldamento, ossia  $EP_{H,nd}$ ,  $EP_{H,tot}$  e la relativa scomposizione in quota rinnovabile e non rinnovabile, per ciascun edificio e per l'intero complesso. Per completezza, è inoltre indicato il vettore energetico adottato per ogni edificio.

Tabella 8.3. Indicatori di prestazione energetica per il servizio di riscaldamento e vettore energetico adottato.

| Edificio<br>[-] | $EP_{H,nd}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | Vettore energetico<br>[-] | $EP_{H,nren}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | $EP_{H,ren}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | $EP_{H,tot}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] |
|-----------------|--------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| A1              | 120.6                                | Gas naturale              | 142.6                                  | 0.0                                   | 142.6                                 |
| A2              | 111.3                                | Teleriscaldamento         | 92.5                                   | 3.5                                   | 96.1                                  |
| A3              | 96.5                                 | Teleriscaldamento         | 80.7                                   | 3.1                                   | 83.8                                  |
| A4              | 98.2                                 | Teleriscaldamento         | 81.9                                   | 3.1                                   | 85.1                                  |
| A5              | 50.8                                 | Gas naturale              | 59.0                                   | 0.0                                   | 59.0                                  |
| A6              | 124.1                                | Teleriscaldamento         | 103.0                                  | 3.9                                   | 106.9                                 |
| A7              | 201.6                                | Teleriscaldamento         | 168.5                                  | 6.4                                   | 174.9                                 |
| A8              | 150.4                                | Teleriscaldamento         | 124.7                                  | 4.8                                   | 129.5                                 |
| A9              | 117.9                                | Teleriscaldamento         | 97.9                                   | 3.7                                   | 101.6                                 |
| <b>TOTALE</b>   | <b>107.5</b>                         | —                         | <b>96.7</b>                            | <b>2.8</b>                            | <b>99.5</b>                           |

In Figura 8.12 è riportato un grafico a barre che confronta i valori annuali di  $EP_{H,tot}$  per ciascun edificio; nello stesso grafico è inoltre evidenziata la scomposizione tra quota rinnovabile e quota non rinnovabile. Dalla Figura 8.12 si osserva che l'edificio A7 presenta il valore più elevato, mentre l'edificio con la prestazione migliore è A5, caratterizzato da destinazione d'uso alberghiera.

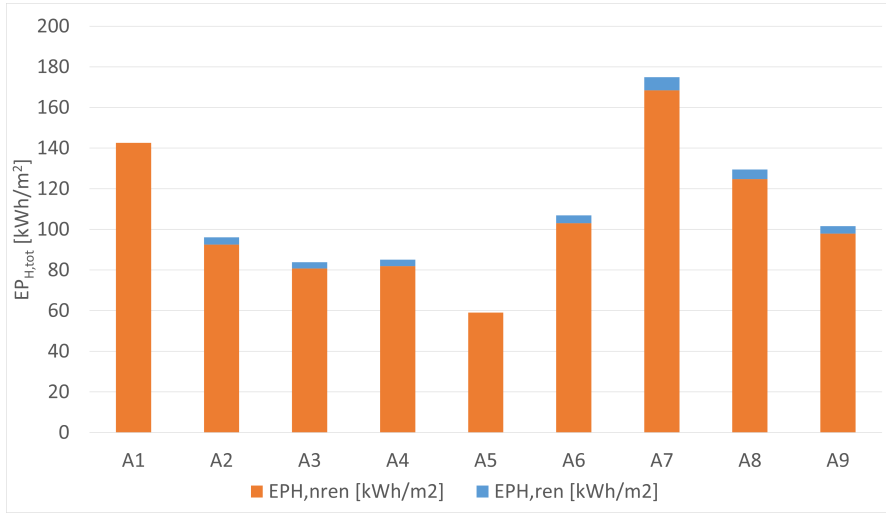


Figura 8.12. Valori annuali di  $EP_{H,tot}$  per edificio, con scomposizione nelle quote rinnovabile e non rinnovabile.

Tuttavia, il confronto basato su  $EP_{H,tot}$  risulta influenzato dal vettore energetico utilizzato, attraverso i relativi fattori di conversione in energia primaria. Qualora l'interesse sia invece confrontare i soli fabbisogni ideali di riscaldamento tra edifici, la grandezza più indicata è  $EP_{H,nd}$ . La Figura 8.13 riporta pertanto i valori annuali di  $EP_{H,nd}$  per ciascun edificio.

Dal grafico si osserva che l'edificio A1, pur risultando secondo in termini di  $EP_{H,tot}$ , non è il secondo edificio per fabbisogno ideale: esso viene infatti superato dagli edifici A8 e A6. Tale differenza è imputabile al diverso vettore energetico adottato. L'edificio A1 utilizza infatti gas naturale, mentre A6 e A8 utilizzano teleriscaldamento, caratterizzato da un fattore di conversione in energia primaria totale più favorevole.

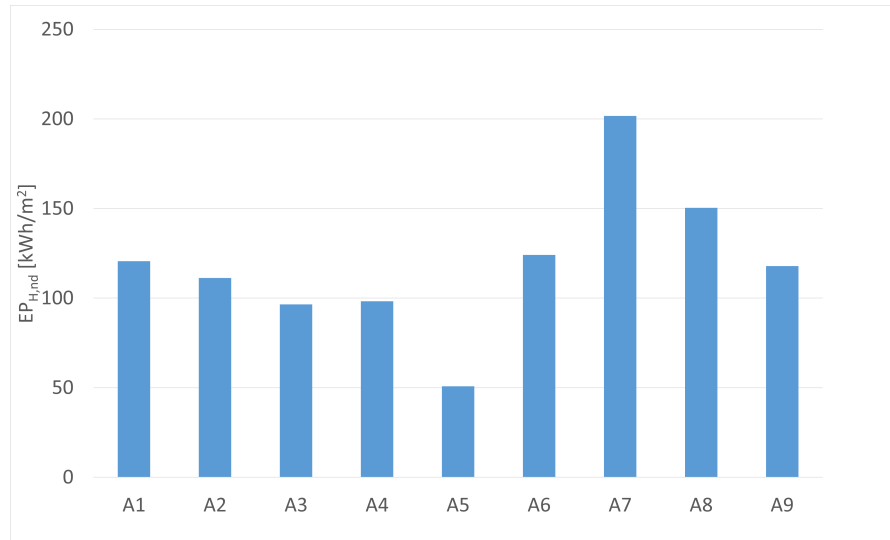


Figura 8.13. Valori annuali di  $EP_{H,nd}$  per edificio.

La distribuzione osservata in Figura 8.13 può essere interpretata anche alla luce di alcuni parametri geometrici e termo-fisici che influenzano il fabbisogno ideale di riscaldamento. Tra questi, un primo indicatore significativo è la compattezza geometrica dell'edificio, espressa mediante il *Compactness Ratio* ( $CR$ ), definito come:

$$CR = \frac{A_{env}}{V_g},$$

dove  $A_{env}$  è l'area complessiva delle superfici disperdenti che delimitano il volume climatizzato (verso esterno, terreno e ambienti non climatizzati), mentre  $V_g$  è il volume lordo riscaldato. In Tabella 8.4 sono riportati i valori di  $V_g$ ,  $A_{env}$  e  $CR$  per ciascun edificio.

Tabella 8.4. Volume lordo riscaldato, area disperdente e rapporto di compattezza ( $CR$ ) per edificio.

| <b>Edificio</b><br>[-] | $V_g$<br>[m <sup>3</sup> ] | $A_{\text{env}}$<br>[m <sup>2</sup> ] | $CR$<br>[1/m] |
|------------------------|----------------------------|---------------------------------------|---------------|
| A1                     | 8755                       | 2061                                  | 0.235         |
| A2                     | 9462                       | 1687                                  | 0.178         |
| A3                     | 20 076                     | 3359                                  | 0.167         |
| A4                     | 9965                       | 1688                                  | 0.169         |
| A5                     | 8537                       | 1622                                  | 0.190         |
| A6                     | 6246                       | 1332                                  | 0.213         |
| A7                     | 2985                       | 873                                   | 0.293         |
| A8                     | 5535                       | 1408                                  | 0.254         |
| A9                     | 5154                       | 1294                                  | 0.251         |

Tuttavia, la compattezza geometrica rappresenta soltanto uno dei fattori che influenzano i fabbisogni ideali areici. Tra gli ulteriori elementi si annoverano il coefficiente medio globale di trasmissione e il tasso di ricambio d'aria.

Il coefficiente medio globale di trasmissione  $H'_T$  è definito come:

$$H'_T = \frac{H_{\text{tr,adj}}}{\sum_k A_k} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right] \quad (8.19)$$

Si osserva che  $H_{\text{tr,adj}}$  include, in linea generale, anche il contributo dei ponti termici lineari e puntuali. Nel presente studio non è stato adottato un livello di dettaglio tale da modellare esplicitamente tali contributi; pertanto, al fine di rappresentare l'influenza della trasmittanza complessiva dell'involucro, è stata calcolata una versione semplificata di  $H'_T$ , qui indicata con  $H'_{T,e}$ , trascurando i ponti termici e assumendo al numeratore il termine  $\sum_k A_k U_k$ :

$$H'_{T,e} = \frac{\sum_k A_k U_k}{\sum_k A_k} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right] \quad (8.20)$$

In Tabella 8.5 sono riportati i valori di  $n$  e di  $H'_{T,e}$  per ciascun edificio. La Figura 8.14 mostra invece la correlazione tra  $EP_{\text{H,nd}}$  e un indicatore sintetico che combina i contributi di trasmissione e ventilazione, espresso come:

$$H'_{T,e} \cdot CR + \left( \frac{n}{3600} \right) \rho c_p$$

misurato in  $\text{W}/(\text{m}^3\text{K})$ , dove  $\rho$  e  $c_p$  rappresentano rispettivamente la densità e il calore specifico dell'aria. Nel diagramma sono riportati i soli edifici residenziali, mentre l'edificio A5 è stato escluso dall'analisi, in quanto caratterizzato da destinazione d'uso alberghiera e quindi da condizioni di utilizzo e apporti interni non direttamente confrontabili con quelli degli altri edifici.

Tabella 8.5. Tasso di ricambio d'aria ( $n$ ) e coefficiente globale di trasmissione per unità di superficie disperdente ( $H'_{T,e}$ ) per edificio.

| Edificio | $n$   | $H'_{T,e}$             |
|----------|-------|------------------------|
| [-]      | [1/h] | [W/(m <sup>2</sup> K)] |
| A1       | 0.30  | 1.32                   |
| A2       | 0.30  | 1.59                   |
| A3       | 0.30  | 1.41                   |
| A4       | 0.30  | 1.41                   |
| A5       | 0.17  | 1.27                   |
| A6       | 0.30  | 1.27                   |
| A7       | 0.30  | 1.49                   |
| A8       | 0.30  | 1.44                   |
| A9       | 0.30  | 1.22                   |

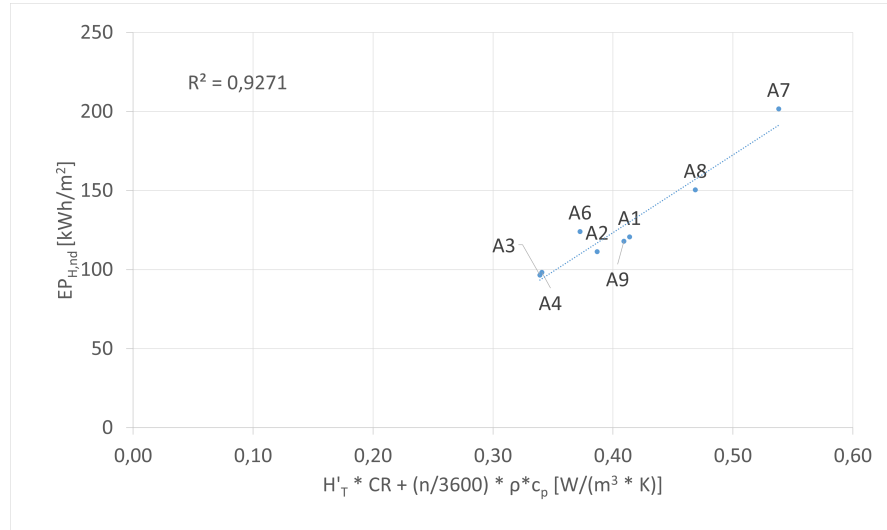


Figura 8.14. Correlazione tra  $EP_{H,nd}$  e l'indicatore sintetico che combina i contributi di trasmissione e ventilazione, per i soli edifici residenziali.

Il valore di  $R^2$  risulta piuttosto elevato (circa 0,93), evidenziando una buona correlazione tra il fabbisogno ideale di riscaldamento e i principali parametri fisici che governano lo scambio termico con l'esterno per gli edifici residenziali considerati. Tuttavia, tale valore rimane inferiore all'unità poiché nel processo fisico intervengono ulteriori variabili, non riconducibili esclusivamente alla geometria, alla ventilazione e alla trasmittanza media dell'involucro. Tra queste si annoverano gli apporti interni, dovuti principalmente a occupanti e apparecchiature, gli apporti solari attraverso le superfici trasparenti e, più in generale, le condizioni microclimatiche locali, inclusa l'azione del vento.

### 8.3.2 Produzione di ACS

Per quanto riguarda la produzione di acqua calda sanitaria, gli edifici presentano consumi correlati alla propria superficie utile, come discusso nei paragrafi precedenti, in coerenza con la modellazione adottata per il servizio.

In Tabella 8.6 sono riportati gli output annuali analizzati in questo studio per il servizio di ACS, ossia  $EP_{W,tot}$  e la relativa scomposizione in quota rinnovabile e non rinnovabile, per ciascun edificio e per l'intero comparto. Analogamente a quanto fatto per il riscaldamento, è inoltre indicato il vettore energetico impiegato per l'erogazione del servizio.

Tabella 8.6. Indicatori di prestazione energetica per il servizio di ACS e vettore energetico adottato.

| Edificio<br>[-] | Vettore energetico<br>[-] | $EP_{W,nren}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | $EP_{W,ren}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | $EP_{W,tot}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] |
|-----------------|---------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| A1              | Gas naturale              | 24.8                                   | 0.0                                   | 24.8                                  |
| A2              | Gas naturale              | 24.8                                   | 0.0                                   | 24.8                                  |
| A3              | Gas naturale              | 24.3                                   | 0.0                                   | 24.3                                  |
| A4              | Gas naturale              | 23.9                                   | 0.0                                   | 23.9                                  |
| A5              | Gas naturale              | 111.3                                  | 0.0                                   | 111.3                                 |
| A6              | Gas naturale              | 24.5                                   | 0.0                                   | 24.5                                  |
| A7              | Gas naturale              | 22.4                                   | 0.0                                   | 22.4                                  |
| A8              | Gas naturale              | 27.1                                   | 0.0                                   | 27.1                                  |
| A9              | Gas naturale              | 26.0                                   | 0.0                                   | 26.0                                  |
| <b>TOTALE</b>   | –                         | <b>34.3</b>                            | <b>0.0</b>                            | <b>34.3</b>                           |

In Figura 8.15 è riportato il confronto dei valori annuali di  $EP_{W,tot}$ . Come evidenziato anche in Tabella 8.6, nel caso in esame  $EP_{W,tot}$  coincide con  $EP_{W,nren}$ , poiché non è presente una quota rinnovabile associata al servizio (tutti gli edifici risultano alimentati a gas naturale).

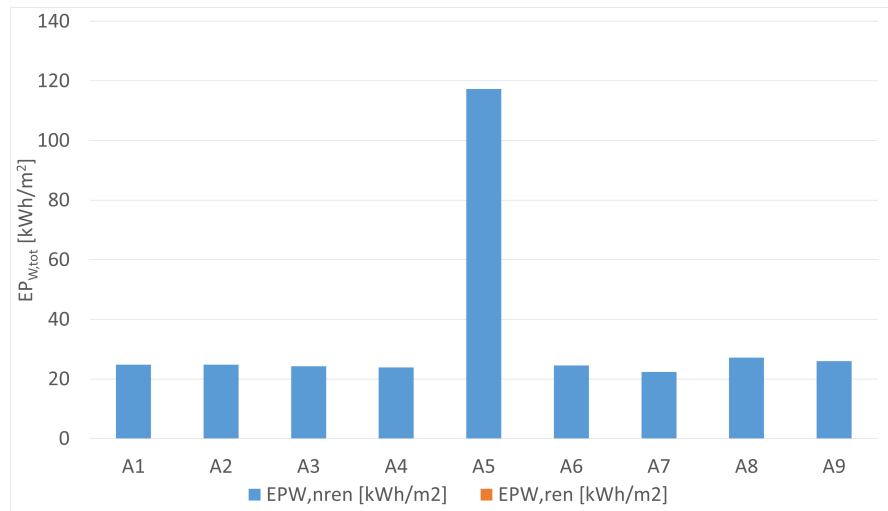


Figura 8.15. Valori annuali di  $EP_{W,tot}$  per edificio, con suddivisione tra quota rinnovabile e non rinnovabile.

Come anticipato, la differenza tra la prestazione energetica dell'edificio alberghiero (A5) e quella degli edifici residenziali è coerente con quanto riportato nella UNI/TS 11300-2 [21], adottata per la determinazione dei fabbisogni di ACS.

### 8.3.3 Fabbisogni di raffrescamento

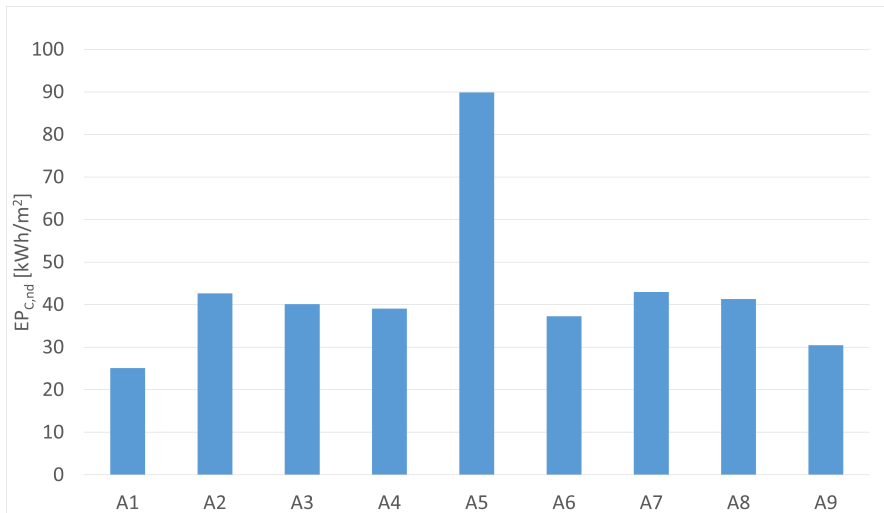
Per completezza si riportano anche i risultati relativi ai fabbisogni ideali areici annuali di raffrescamento ( $EP_{C,nd}$ ) per ciascun edificio del comparto. Pur in assenza di un effettivo servizio di climatizzazione estiva, tale grandezza consente di valutare i carichi ideali di raffrescamento e di interpretare il comportamento degli edifici in condizioni estive.

In Tabella 8.7 sono riportati i valori di  $EP_{C,nd}$ .

Tabella 8.7. Fabbisogni ideali areici di raffrescamento ( $EP_{C,nd}$ ) per edificio.

| <b>Edificio</b><br>[-] | $EP_{C,nd}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] |
|------------------------|--------------------------------------|
| A1                     | 4.6                                  |
| A2                     | 7.2                                  |
| A3                     | 6.7                                  |
| A4                     | 6.5                                  |
| A5                     | 14.9                                 |
| A6                     | 5.6                                  |
| A7                     | 6.5                                  |
| A8                     | 6.7                                  |
| A9                     | 5.3                                  |

Nella Figura 8.16 è riportato un grafico a barre che confronta i valori di  $EP_{C,nd}$  tra i diversi edifici.

Figura 8.16. Valori annuali di  $EP_{C,nd}$  per edificio.

Si osserva che l'edificio con il maggiore fabbisogno ideale areico di raffrescamento è A5, corrispondente alla destinazione d'uso alberghiera. Tale risultato è coerente con quanto già emerso dall'analisi dei fabbisogni ideali di riscaldamento, per i quali lo stesso edificio presentava invece il valore minimo di  $EP_{H,nd}$ .

Una possibile spiegazione di questo comportamento risiede nel fatto che, per A5, gli apporti interni per unità di superficie risultano maggiori rispetto a quelli degli altri edifici del comparto, mentre i tassi di ventilazione assunti sono inferiori. A ciò si può aggiungere una configurazione geometrica e localizzativa che rende l'edificio relativamente meno

dispersivo verso l'esterno. In tali condizioni, gli apporti interni vengono trattiene più facilmente all'interno dell'edificio: questo comportamento contribuisce a ridurre i fabbisogni di riscaldamento nel periodo invernale, ma determina un aumento dei fabbisogni ideali di raffrescamento nella stagione estiva.

## 8.4 Incertezza associata ai dati

In assenza di una calibrazione del modello su consumi reali, non è possibile quantificare in modo rigoroso l'incertezza associata ai risultati. È stata pertanto condotta un'analisi di tipo qualitativo, basata sulla distribuzione degli indici di qualità assegnati ai dati di ingresso, selezionati secondo la metodologia descritta nei capitoli precedenti.

Dall'analisi emerge che l'incertezza associata agli input del modello è elevata, poiché oltre il 90% degli indici risulta pari a 1 o 2, come riportato in Tabella 8.8. Il grafico a barre in Figura 8.17 mostra inoltre che l'indice più frequente è il valore 2, seguito dal valore 1. L'indice associato alla maggiore affidabilità del dato (3) rappresenta invece una quota minoritaria, pari al 7%.

Tabella 8.8. Distribuzione dei valori degli indici di qualità.

| Valore indice | Quantità | Frequenza |
|---------------|----------|-----------|
| [-]           | [-]      | [%]       |
| 1             | 298      | 46        |
| 2             | 307      | 47        |
| 3             | 46       | 7         |

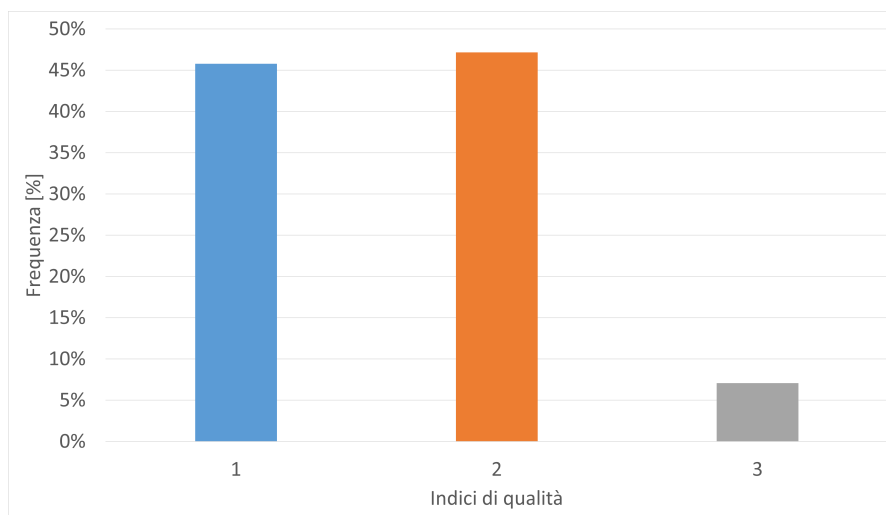


Figura 8.17. Distribuzione di frequenza degli indici di qualità utilizzati per i dati di input.

Alla luce di tali evidenze, i risultati ottenuti non devono essere interpretati come valori puntuali pienamente rappresentativi dei consumi reali, bensì come stime di ordine di grandezza utili a descrivere il comportamento energetico del comparto e a individuare i principali fattori che influenzano le prestazioni.

Nonostante tali limitazioni, il modello risulta comunque idoneo a supportare analisi di scenario su misure di efficientamento energetico, consentendo di valutare l'evoluzione attesa del sistema e gli ordini di grandezza dei potenziali risparmi conseguibili.



## Capitolo 9

# Scenari di efficientamento energetico del patrimonio edilizio

In questo capitolo vengono analizzati alcuni scenari di intervento finalizzati al miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici oggetto dello studio. Le misure considerate sono riconducibili a due macro-categorie: (i) interventi sull'involucro edilizio; (ii) interventi sugli impianti tecnici per l'erogazione dei servizi presenti (riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria). Per ciascuna configurazione vengono riportati i potenziali risparmi conseguibili e, infine, viene valutata anche un'ipotesi di intervento combinato.

L'analisi è condotta esclusivamente in termini energetici; le valutazioni di natura economica non rientrano nel perimetro del presente lavoro.

### 9.1 Interventi sull'involucro edilizio

Al fine di valutare l'influenza dell'involucro edilizio sulla prestazione energetica del complesso e di distinguere il contributo della componente trasparente da quello della componente opaca, è stata condotta un'analisi di sensibilità basata sulla variazione della trasmittanza termica  $U$ . In particolare, sono stati considerati tre differenti tipi di intervento: intervento sul solo involucro trasparente, intervento sul solo involucro opaco e intervento combinato sull'intero involucro.

La Tabella 9.1 riporta i valori di trasmittanza termica  $U$  assunti per ciascun componente e per ciascuno scenario analizzato. In particolare, il Caso 2 corrisponde ai valori di trasmittanza dell'edificio di riferimento descritto nell'Appendice A dell'Allegato 1 del DM 26 giugno 2015, recante «Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici» [11]. I Casi 1 e 3 rappresentano invece, rispettivamente, una configurazione migliorativa e una configurazione peggiorativa rispetto a tale riferimento, ottenute modificando i valori di trasmittanza assunti per i componenti dell'involucro.

Tabella 9.1. Valori di trasmittanza termica  $U$  ( $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) adottati per gli interventi sull'involucro nei diversi scenari.

| Scenario<br>[-]                       | MCV 04<br>[ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ] | COP 04<br>[ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ] | CIN 04<br>[ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ] | SOL 04 adj<br>[ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ] | FIN<br>[ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ] |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| SDF                                   | 0.55                                          | 1.33                                          | 1.67                                          | 0.86                                              | 3.34                                       |
| Caso 1 (+33% edificio di riferimento) | 0.35                                          | 0.29                                          | 0.29                                          | 0.35                                              | 1.86                                       |
| Caso 2 (Edificio di riferimento)      | 0.26                                          | 0.22                                          | 0.22                                          | 0.26                                              | 1.40                                       |
| Caso 3 (-33% edificio di riferimento) | 0.17                                          | 0.15                                          | 0.15                                          | 0.17                                              | 1.00                                       |

Per la componente trasparente, il valore teorico di trasmittanza corrispondente al Caso 3 risulterebbe inferiore a  $1.00 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Al fine di mantenere lo scenario entro valori ritenuti maggiormente realistici dal punto di vista applicativo, è stato tuttavia assunto un valore limite pari a  $1.00 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Pertanto, nel caso dei componenti finestrati, il Caso 3 non corrisponde a una riduzione puramente percentuale rispetto al riferimento, ma a una configurazione corretta mediante l'introduzione di un vincolo di plausibilità tecnica.

Al termine delle simulazioni, sono stati confrontati i valori del fabbisogno ideale areico di riscaldamento ottenuti nei tre tipi di intervento considerati. La Figura 9.1 mostra il confronto tra i valori di  $EP_{H,nd}$  nei tre casi analizzati e consente di evidenziare l'effetto della riqualificazione della sola componente trasparente, della sola componente opaca e dell'intero involucro.

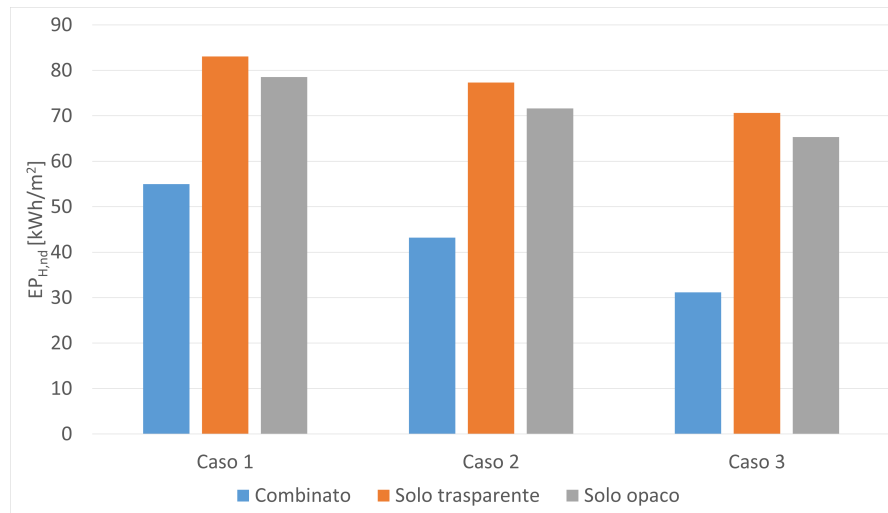


Figura 9.1. Confronto dei valori di  $EP_{H,nd}$  per i tre assetti di intervento sull'involucro: solo trasparente, solo opaco e combinato.

Dalla Figura 9.1 si osserva che l'intervento combinato produce, in tutti i livelli considerati, la riduzione più marcata del fabbisogno ideale di riscaldamento. Gli interventi limitati

alla sola componente trasparente e alla sola componente opaca determinano invece riduzioni più contenute e tra loro relativamente vicine, con un vantaggio generalmente associato alla riqualificazione della parte opaca.

La Figura 9.2 riporta invece il confronto, per i diversi livelli di intervento, tra gli indicatori  $EP_{H,tot}$  ed  $EP_{tot}$ . Tale rappresentazione consente di evidenziare che la riduzione ottenuta su  $EP_{tot}$  risulta coerente con quella osservata per la sola prestazione energetica per il riscaldamento. Ciò dipende dal fatto che gli interventi sull'involucro influenzano il fabbisogno termico per il riscaldamento, ma non modificano il fabbisogno di energia utile per la produzione di acqua calda sanitaria né i relativi consumi associati, che rimangono pertanto invariati.

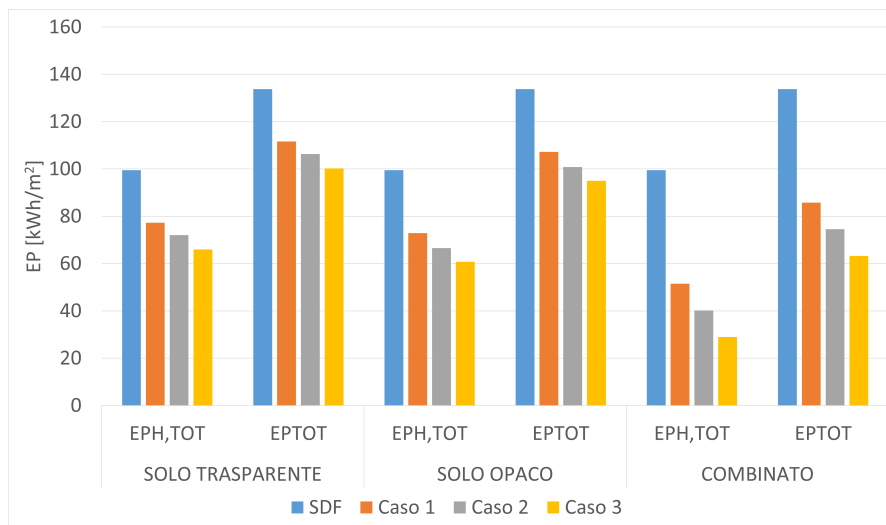


Figura 9.2. Confronto dei valori di  $EP_{H,tot}$  e  $EP_{tot}$  per i diversi livelli di intervento nei casi solo trasparente, solo opaco e combinato.

Occorre tuttavia osservare che i risparmi stimati dipendono in misura significativa dai valori di trasmittanza assunti come riferimento. Poiché le variazioni introdotte sono definite rispetto all'edificio di riferimento, a parità di variazione percentuale un componente caratterizzato da un valore iniziale di  $U$  più elevato presenta una variazione assoluta maggiore e, quindi, un potenziale di miglioramento più ampio. Al contrario, per componenti che già presentano bassi valori di trasmittanza, la variazione assoluta associata allo stesso livello di intervento risulta inevitabilmente più contenuta.

Un'ulteriore considerazione riguarda il confronto con lo stato di fatto. Anche i risparmi conseguibili rispetto alla configurazione iniziale dipendono infatti dal valore di trasmittanza di partenza: quanto più i valori dello stato di fatto risultano elevati rispetto a quelli di riferimento, tanto maggiore è il margine teorico di riduzione dei fabbisogni.

Tale aspetto contribuisce a spiegare perché, nel caso in esame, i risparmi ottenibili intervenendo sulla componente trasparente risultino comparabili con quelli associati alla

componente opaca. I componenti finestrati presentano infatti, nello stato di fatto, valori di trasmittanza significativamente più elevati e quindi un margine di miglioramento più ampio. A ciò si aggiunge che, anche nello stesso edificio di riferimento, i valori di trasmittanza delle chiusure trasparenti risultano sensibilmente superiori rispetto a quelli delle componenti opache. Inoltre, nel contesto studiato, il *glazing ratio* risulta relativamente elevato, e quindi la superficie trasparente assume un'incidenza non trascurabile sul bilancio termico complessivo dell'involucro. Di conseguenza, pur a fronte di superfici generalmente inferiori rispetto a quelle opache, la riqualificazione della parte trasparente può determinare effetti energetici dello stesso ordine di grandezza di quelli osservati per la componente opaca.

### 9.1.1 Involucro trasparente

Nelle Figure 9.3 e 9.4 sono riportati i grafici a barre dei valori degli indicatori energetici ottenuti nei diversi scenari di intervento sull'involucro trasparente. In particolare, la Figura 9.3 riporta i valori di  $EP_{H,tot}$ , mentre la Figura 9.4 mostra i corrispondenti valori dell'indicatore complessivo  $EP_{tot}$ , per ciascun edificio e per i tre livelli di intervento considerati.

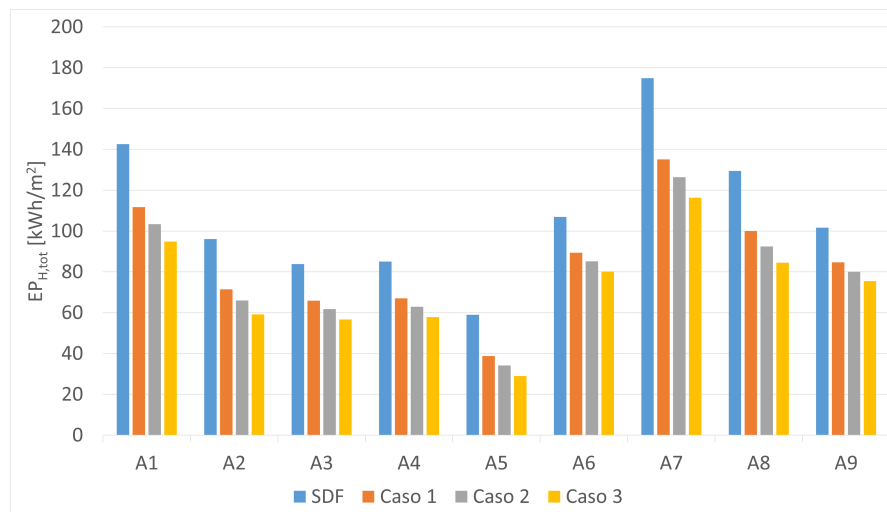


Figura 9.3. Valori di  $EP_{H,tot}$  per ciascun edificio nei diversi scenari di intervento sull'involucro trasparente.

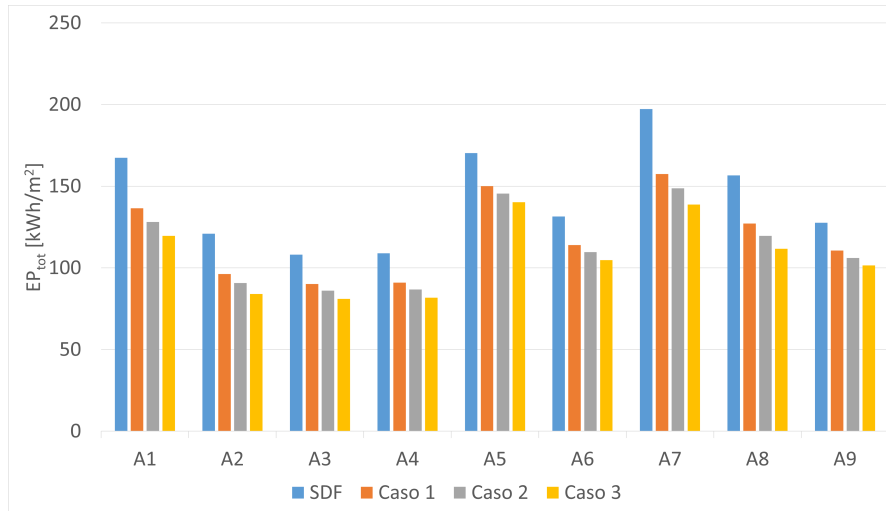


Figura 9.4. Valori di  $EP_{tot}$  per ciascun edificio nei diversi scenari di intervento sull'involucro trasparente.

Dall'analisi delle Figure 9.3 e 9.4 emerge che gli interventi sulla componente trasparente determinano una riduzione significativa dell'indicatore energetico per il servizio di riscaldamento. In termini assoluti, la riduzione più elevata di  $EP_{H,tot}$  si osserva per l'edificio A7, che passa da circa 175 kWh/m<sup>2</sup> nello stato di fatto a circa 116 kWh/m<sup>2</sup> nel Caso 3. Considerando invece le variazioni relative rispetto allo stato di fatto, la riduzione percentuale più marcata si registra per l'edificio A5 (destinazione alberghiera), per il quale l'indicatore  $EP_{H,tot}$  risulta pressoché dimezzato nel Caso 3.

Tuttavia, se si considera l'indicatore complessivo  $EP_{tot}$ , i risparmi percentuali associati allo stesso edificio risultano tra i più contenuti. Tale comportamento è coerente con la struttura dei consumi energetici dell'edificio A5, per il quale una quota rilevante della prestazione energetica totale è attribuibile al servizio di produzione di acqua calda sanitaria. Poiché gli interventi sull'involucro non influenzano tale servizio, il relativo contributo rimane invariato, riducendo l'effetto percentuale della riqualificazione sull'indicatore energetico complessivo.

### 9.1.2 Involucro opaco

Le Figure 9.5 e 9.6 riportano i grafici a barre dei valori degli indicatori energetici ottenuti nei diversi scenari di intervento sull'involucro opaco. In particolare, la Figura 9.5 mostra i valori di  $EP_{H,tot}$ , mentre la Figura 9.6 riporta i corrispondenti valori dell'indicatore complessivo  $EP_{tot}$ , per ciascun edificio e per i tre livelli di intervento considerati.

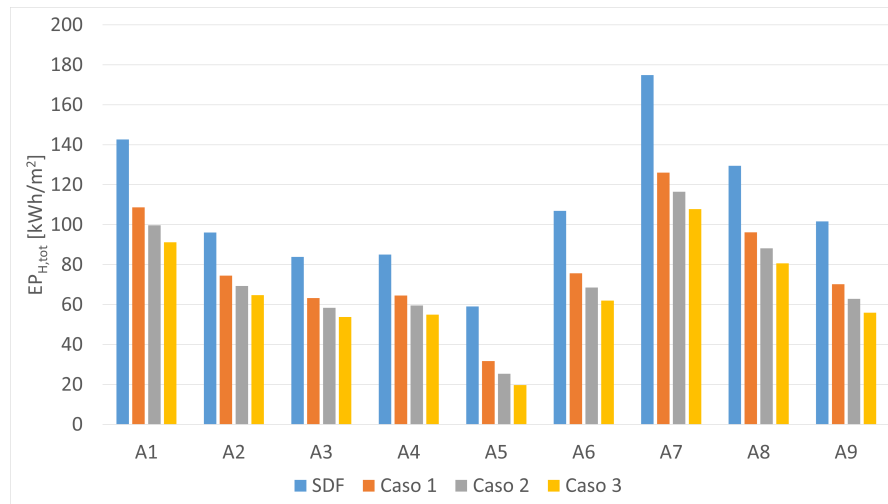


Figura 9.5. Valori di  $EP_{H,tot}$  per ciascun edificio nei diversi scenari di intervento sull'involucro opaco.

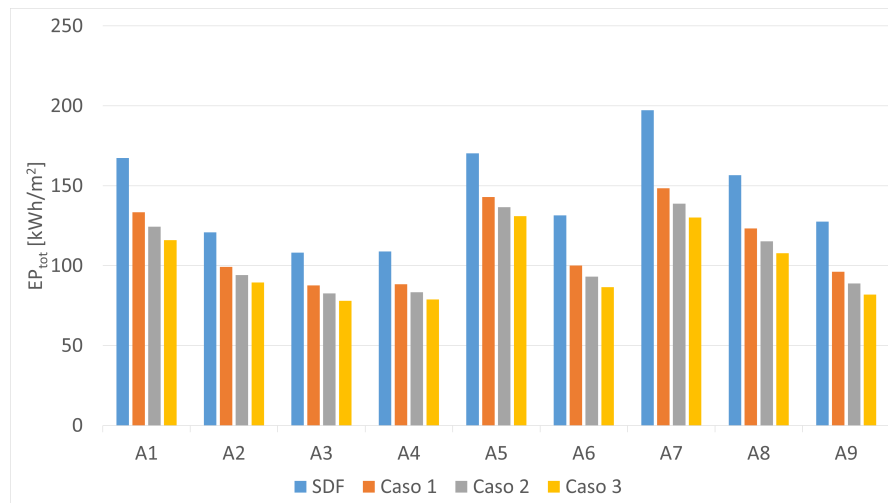


Figura 9.6. Valori di  $EP_{tot}$  per ciascun edificio nei diversi scenari di intervento sull'involucro opaco.

Analogamente a quanto osservato per l'involucro trasparente, l'edificio A5 (destinazione alberghiera) presenta le riduzioni percentuali più elevate dell'indicatore  $EP_{H,tot}$  rispetto allo stato di fatto, con una diminuzione di circa il 67% nel Caso 3. Tuttavia, se si considera l'indicatore complessivo  $EP_{tot}$ , la riduzione percentuale risulta sensibilmente più contenuta. Tale comportamento è coerente con la struttura dei consumi energetici dell'edificio A5 discussa nel paragrafo precedente.

Nel caso di isolamento dell'involucro opaco è inoltre opportuno valutare l'effetto sul comportamento estivo dell'edificio. La riduzione delle dispersioni termiche invernali può infatti comportare un incremento dei fabbisogni ideali di raffrescamento  $EP_{C,nd}$ , poiché un involucro più isolato tende a dissipare con maggiore difficoltà gli apporti termici interni ed esterni durante la stagione calda. Ne consegue che gli interventi sull'involucro devono essere valutati anche in termini di possibile peggioramento delle prestazioni estive, ricercando un compromesso coerente con gli obiettivi di comfort e di riduzione dei consumi energetici complessivi.

A tal fine, la Figura 9.7 mette a confronto i valori medi dei fabbisogni ideali areici di riscaldamento e di raffrescamento ( $EP_{H,nd}$  e  $EP_{C,nd}$ ) nei diversi scenari di intervento sull'involucro opaco.

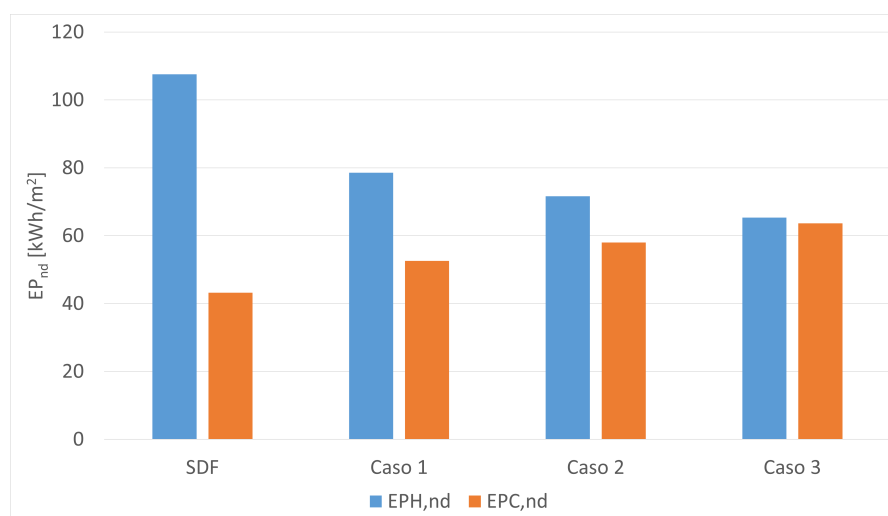


Figura 9.7. Confronto tra i valori medi di  $EP_{H,nd}$  e  $EP_{C,nd}$  nei diversi scenari di intervento sull'involucro opaco.

### 9.1.3 Intervento combinato sull'involucro

Una volta analizzati separatamente gli scenari di intervento sul solo involucro trasparente e sul solo involucro opaco, risulta di interesse valutare anche l'effetto di un intervento combinato sull'intero involucro edilizio. In questo caso, le variazioni di trasmittanza termica  $U$  sono applicate simultaneamente a tutti i componenti dell'involucro (sia opachi sia trasparenti).

A seguito della simulazione e del successivo post-processing dei risultati, i valori degli indicatori energetici ottenuti per ciascun edificio sono riportati nei grafici a barre delle Figure 9.8 e 9.9, rispettivamente in termini di  $EP_{H,tot}$  e di  $EP_{tot}$ .

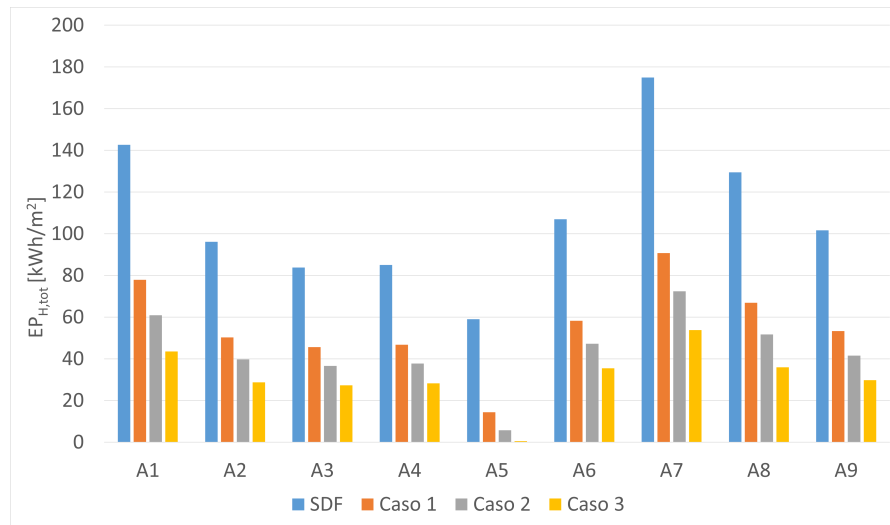


Figura 9.8. Valori di  $EP_{H,tot}$  per ciascun edificio nei diversi scenari di intervento combinato sull'involucro.

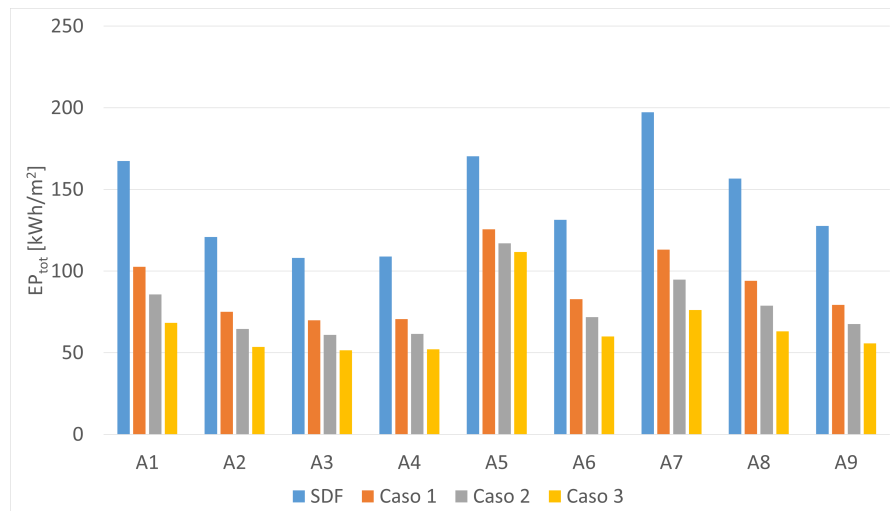


Figura 9.9. Valori di  $EP_{tot}$  per ciascun edificio nei diversi scenari di intervento combinato sull'involucro.

Dall'analisi delle Figure 9.8 e 9.9 emerge che l'intervento combinato sull'involucro determina le riduzioni più significative degli indicatori energetici rispetto agli interventi applicati alle singole componenti. La contemporanea riduzione delle dispersioni attraverso le superfici opache e trasparenti consente infatti di diminuire in modo più marcato il fabbisogno energetico per il riscaldamento.

In termini di  $EP_{H,tot}$ , le riduzioni più rilevanti si osservano per gli edifici caratterizzati da valori iniziali più elevati nello stato di fatto, come ad esempio l'edificio A7. Un

comportamento particolarmente evidente si osserva invece per l'edificio A5 (destinazione alberghiera), nel quale nel Caso 3 il fabbisogno areico per il riscaldamento risulta quasi completamente annullato. Ciò è riconducibile alla combinazione tra livelli elevati di isolamento dell'involucro e significativi apporti interni tipici della destinazione d'uso alberghiera.

Nel complesso, i risultati mostrano come l'intervento combinato sull'involucro rappresenti la strategia più efficace per la riduzione dei fabbisogni energetici per il riscaldamento. Tuttavia, l'impatto sull'indicatore energetico complessivo  $EP_{tot}$  risulta più contenuto nei casi in cui il contributo del servizio di produzione di acqua calda sanitaria è predominante.

Va inoltre considerato che interventi di riqualificazione sull'intero involucro comportano generalmente costi di investimento più elevati rispetto agli interventi sulle singole componenti. Per questo motivo, la valutazione della loro convenienza richiede un'analisi complessiva che tenga conto sia dei benefici energetici sia degli aspetti economici.

Alla luce di tali considerazioni, nei paragrafi successivi l'analisi viene estesa agli interventi sugli impianti energetici, al fine di valutare il potenziale di riduzione dei consumi agendo sui sistemi di generazione e distribuzione dell'energia.

## 9.2 Interventi sugli impianti tecnici

In questa fase sono stati analizzati quattro scenari di intervento sugli impianti energetici. Il primo scenario prevede un'azione limitata al solo servizio di riscaldamento, mediante la sostituzione del generatore esistente con una pompa di calore a compressione aria-acqua e l'adeguamento del sistema di emissione. Al fine di aumentare la quota di energia primaria rinnovabile, è inoltre considerata l'installazione di un impianto fotovoltaico con potenza di picco minima definita dall'Allegato III del D.Lgs. 8 novembre 2021, n. 199 [25].

Il secondo scenario estende l'intervento al sistema di generazione, ipotizzando l'adozione di un unico generatore centralizzato costituito da una pompa di calore a compressione aria-acqua in grado di soddisfare sia il fabbisogno di riscaldamento sia quello di produzione di acqua calda sanitaria (ACS). In questa configurazione il servizio di ACS viene quindi centralizzato; per rendere possibile tale soluzione è stato dimensionato un sistema di accumulo dedicato alla produzione di ACS per ciascun edificio.

Il terzo scenario si discosta dal precedente per quanto riguarda il layout del servizio di ACS. In questo caso si analizza la configurazione in cui il servizio rimane autonomo per ciascuna unità immobiliare, ma i boiler a gas esistenti vengono sostituiti con scaldacqua a pompa di calore. Per rendere applicabile questa configurazione si rinuncia all'impiego dell'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico per l'alimentazione del servizio di ACS.

Il quarto scenario è impiantisticamente analogo al secondo, ma ipotizza una saturazione della superficie disponibile in copertura mediante installazione di moduli fotovoltaici. L'obiettivo è valutare l'impatto dell'aumento della produzione di energia rinnovabile

elettrica sul bilancio energetico complessivo del sistema edificio–impianto, considerando la possibilità di alimentare entrambi i servizi di riscaldamento e ACS.

### 9.2.1 Scenario 1: Intervento afferente il solo impianto di riscaldamento

Lo Scenario 1 prevede la sostituzione dei generatori esistenti con una pompa di calore a compressione aria–acqua. Poiché tale soluzione richiede temperature di mandata inferiori rispetto a quelle tipiche di un impianto tradizionale a radiatori, si ipotizza contestualmente la sostituzione dei terminali di emissione con ventilconvettori.

Ai fini dell’analisi comparativa, il coefficiente di prestazione stagionale della pompa di calore è assunto costante e pari a  $SCOP_{g,H} = 3.0$ , in coerenza con i valori adottati per le efficienze medie dei sistemi di generazione per l’edificio di riferimento nell’Appendice A dell’Allegato 1 del DM 26 giugno 2015, recante «Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici» [11].

I rendimenti dei sottosistemi sono stati ricalcolati coerentemente con le nuove temperature di esercizio (mandata 50 °C e ritorno 40 °C), secondo la medesima metodologia adottata per la valutazione dello stato di fatto.

In Tabella 9.2 sono riportati i parametri e le efficienze medie assunte per ciascun edificio nello Scenario 1.

Tabella 9.2. Parametri ed efficienze adottati per il servizio di riscaldamento nello Scenario 1, per ciascun edificio.

| Edificio<br>[-] | $P_{th,max}$<br>[W] | $\eta_{th,H,e}$<br>[-] | $\eta_{th,H,c}$<br>[-] | $\eta_{th,H,d}$<br>[-] | $SCOP_{g,H}$<br>[-] | $SCOP_{eq,H}$<br>[-] |
|-----------------|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|----------------------|
| A1              | $\infty$            | 0.95                   | 0.97                   | 0.95                   | 3.00                | 2.64                 |
| A2              | $\infty$            | 0.95                   | 0.97                   | 0.95                   | 3.00                | 2.64                 |
| A3              | $\infty$            | 0.95                   | 0.97                   | 0.95                   | 3.00                | 2.64                 |
| A4              | $\infty$            | 0.95                   | 0.97                   | 0.95                   | 3.00                | 2.64                 |
| A5              | $\infty$            | 0.96                   | 0.97                   | 0.95                   | 3.00                | 2.66                 |
| A6              | $\infty$            | 0.95                   | 0.97                   | 0.95                   | 3.00                | 2.64                 |
| A7              | $\infty$            | 0.94                   | 0.97                   | 0.95                   | 3.00                | 2.61                 |
| A8              | $\infty$            | 0.95                   | 0.97                   | 0.95                   | 3.00                | 2.64                 |
| A9              | $\infty$            | 0.95                   | 0.97                   | 0.95                   | 3.00                | 2.64                 |

Si noti che  $SCOP_{eq,H}$  rappresenta un coefficiente di prestazione equivalente che mette in relazione l’energia termica resa all’ambiente con l’energia elettrica assorbita dal generatore, includendo le efficienze dei sottosistemi (emissione, controllo e distribuzione). In altri termini, esso può essere interpretato come uno “SCOP di sistema”, ottenuto correggendo il valore di  $SCOP_{g,H}$  con le efficienze dei sottosistemi.

Al fine di incrementare la quota di energia da fonte rinnovabile, è inoltre ipotizzata l’installazione di un impianto fotovoltaico dimensionato facendo riferimento all’Allegato III

del D.Lgs. 8 novembre 2021, n. 199 [25], che definisce il valore minimo della potenza da fonti rinnovabili da installare sugli edifici.

In particolare, la potenza di picco è stimata come

$$P_{\text{picco}} = k A_p$$

dove  $A_p$  rappresenta l'area della proiezione al suolo dell'edificio e  $k$  è un coefficiente assunto pari a  $k = 0.025 \text{ kW/m}^2$ .

A partire dalla potenza di picco, la superficie fotovoltaica richiesta è ricavata mediante il parametro  $K_{\text{pv}}$  (moduli in silicio multicristallino), selezionato dal Prospetto 11 della UNI/TS 11300-4 [14].

In Tabella 9.3 sono riportati i parametri di dimensionamento e la verifica percentuale rispetto alla superficie disponibile in copertura per ciascun edificio.

Tabella 9.3. Parametri e risultati del dimensionamento degli impianti fotovoltaici per ciascun edificio.

| Edificio<br>[-] | $A_p$<br>[m <sup>2</sup> ] | $k$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] | $P_{\text{picco}}$<br>[kW] | $K_{\text{pv}}$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] | $A_{\text{pv,ideale}}$<br>[m <sup>2</sup> ] | $A_{\text{tetto}}$<br>[m <sup>2</sup> ] | $A_{\text{pv,tetto}}$<br>[%] |
|-----------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|
| A1              | 353                        | 0.025                       | 9                          | 0.13                                    | 68                                          | 353.33                                  | 19                           |
| A2              | 245                        | 0.025                       | 6                          | 0.13                                    | 47                                          | 305.65                                  | 15                           |
| A3              | 513                        | 0.025                       | 13                         | 0.13                                    | 99                                          | 594.30                                  | 17                           |
| A4              | 255                        | 0.025                       | 6                          | 0.13                                    | 49                                          | 295.12                                  | 17                           |
| A5              | 218                        | 0.025                       | 5                          | 0.13                                    | 42                                          | 261.97                                  | 16                           |
| A6              | 240                        | 0.025                       | 6                          | 0.13                                    | 46                                          | 280.92                                  | 16                           |
| A7              | 173                        | 0.025                       | 4                          | 0.13                                    | 33                                          | 193.90                                  | 17                           |
| A8              | 230                        | 0.025                       | 6                          | 0.13                                    | 44                                          | 264.32                                  | 17                           |
| A9              | 231                        | 0.025                       | 6                          | 0.13                                    | 44                                          | 253.74                                  | 18                           |

## Risultati ottenuti

I risultati sono stati valutati distinguendo, per ciascun mese, la quota di energia elettrica richiesta dalla pompa di calore per il servizio di riscaldamento e la quota effettivamente coperta dalla produzione fotovoltaica. In particolare, l'energia fotovoltaica destinata al riscaldamento è stata assunta pari al valore minimo tra l'energia elettrica prodotta dall'impianto FV e l'energia elettrica richiesta in ingresso alla pompa di calore nello stesso mese. Tale assunzione equivale a ipotizzare la disponibilità di un sistema di accumulo elettrico dimensionato in modo da rendere trasferibile su base mensile l'energia prodotta verso il fabbisogno della pompa di calore. Nei mesi in cui la produzione FV risulta insufficiente, condizione frequente nel periodo invernale, la quota residua è stata attribuita alla fornitura di energia elettrica dalla rete.

Per la conversione in energia primaria delle due quote elettriche (FV e rete) sono stati adottati i fattori di conversione riportati nell'Allegato 1 del DM 26 giugno 2015 ("Requisiti minimi"). In Tabella 9.4 sono riportati i fattori utilizzati nel post-processing.

Tabella 9.4. Fattori di conversione in energia primaria per i vettori elettrici utilizzati nel post-processing.

| <b>Vettore</b>            | $f_{P,\text{nren}}$ | $f_{P,\text{ren}}$ | $f_{P,\text{tot}}$ |
|---------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| Fotovoltaico              | 0,00                | 1,00               | 1,00               |
| Energia elettrica da rete | 1,95                | 0,47               | 2,42               |

A valle della simulazione e del post-processing, gli indicatori annuali ottenuti per ciascun edificio (e per il totale del complesso) sono riportati in Tabella 9.7.

Tabella 9.5. Indicatori energetici annuali e quota rinnovabile (RER) per edificio.

| Edificio | $EP_{H,ed}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | $EP_{H,ret}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | $EP_{N,ret}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | $EP_{H,ed}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | RER<br>[%] |
|----------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|------------|
| A1       | 120,6                                | 103,7                                 | 24,8                                  | 128,4                                | 16         |
| A2       | 111,3                                | 96,8                                  | 24,8                                  | 121,6                                | 16         |
| A3       | 96,5                                 | 84,1                                  | 24,3                                  | 108,4                                | 16         |
| A4       | 98,2                                 | 85,4                                  | 23,9                                  | 109,3                                | 16         |
| A5       | 50,8                                 | 44,6                                  | 111,3                                 | 155,8                                | 6          |
| A6       | 124,1                                | 107,4                                 | 24,5                                  | 131,9                                | 17         |
| A7       | 201,6                                | 174,3                                 | 22,4                                  | 196,7                                | 18         |
| A8       | 150,4                                | 130,3                                 | 27,1                                  | 157,4                                | 17         |
| A9       | 117,9                                | 102,0                                 | 26,0                                  | 128,0                                | 16         |
| TOT      | 107,5                                | 93,3                                  | 34,3                                  | 127,6                                | 15         |

### 9.2.2 Scenario 2: Generatore unico per riscaldamento e ACS

In questo scenario si ipotizza di utilizzare la medesima pompa di calore anche per la produzione di acqua calda sanitaria (ACS). Per rendere possibile tale configurazione è necessario centralizzare la generazione di ACS, prevedendo per ciascun edificio un sistema di accumulo dedicato.

Gli accumuli sono stati dimensionati secondo il metodo indicato nell'Appendice G della UNI 9182:2014 [7], che consente di determinare il volume lordo  $V_c$  del preparatore di acqua calda sanitaria ad accumulo mediante la relazione (G.1):

$$V_c = \frac{q_M d_p (T_m - T_f)}{d_p + P_r} \cdot \frac{P_r}{T_c - T_f} \quad (9.1)$$

dove:

- $q_M$  è il consumo orario di acqua calda nel periodo di punta [l/h];
- $T_m$  è la temperatura di utilizzo dell'acqua calda [°C];
- $d_p$  è la durata del periodo di punta [h];
- $P_r$  è la durata del periodo di preriscaldamento dell'accumulo [h];
- $T_c$  è la temperatura dell'acqua accumulata [°C];
- $T_f$  è la temperatura dell'acqua fredda in ingresso [°C].

Il dimensionamento dell'accumulo consente inoltre di stimare le perdite termiche associate al serbatoio. A tal fine è stata condotta un'analisi statistica di diverse schede tecniche di accumuli per ACS, dalle quali è possibile ricavare la potenza termica dispersa dichiarata dai produttori secondo la norma UNI EN 12897:2020 [23]. Tale norma prevede condizioni di prova standard con temperatura dell'acqua pari a 65 °C e temperatura ambiente pari a 20 °C, corrispondenti a una differenza di temperatura di riferimento pari a 45 K.

A partire da tali dati è stato quindi possibile ricavare il coefficiente di dispersione  $\Phi$  (equivalente al prodotto  $UA$ ) espresso in W/K, che rappresenta il parametro richiesto in ingresso dal modello di accumulo implementato in CitySim. La potenza termica dispersa è stata correlata al volume dell'accumulo mediante regressione statistica dei dati raccolti, come mostrato in Figura 9.10.

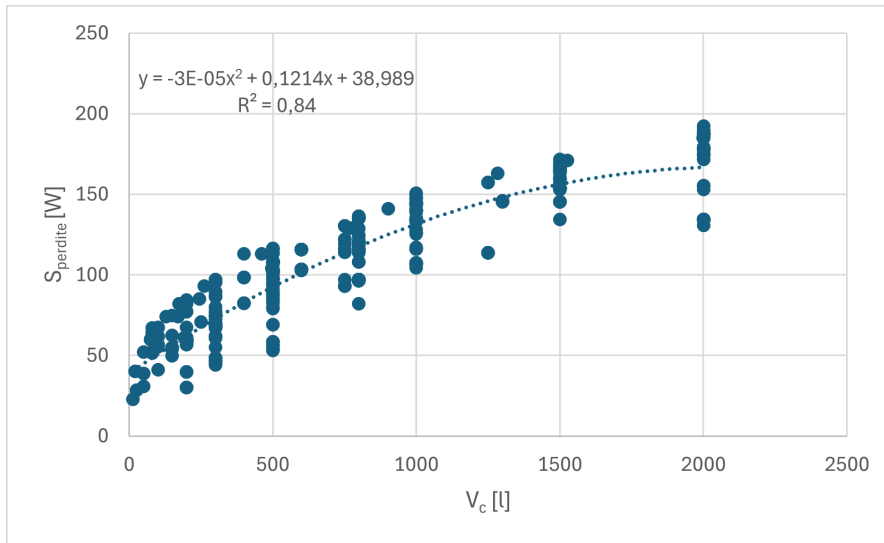


Figura 9.10. Relazione statistica tra volume dell'accumulo ACS e potenza termica dispersa, ricavata dall'analisi di schede tecniche di diversi produttori.

Nella Tabella 9.6 sono riportati i parametri utilizzati e i risultati del dimensionamento dei sistemi di accumulo per ciascun edificio.

Tabella 9.6. Parametri di dimensionamento dei preparatori di ACS e coefficienti di dispersione termica degli accumuli per ciascun edificio.

| <b>Edificio</b><br>[-] | $q_M$<br>[l/h] | $T_m$<br>[°C] | $d_p$<br>[h] | $P_r$<br>[h] | $T_c$<br>[°C] | $T_f$<br>[°C] | $V_c$<br>[l] | $\dot{Q}_{disp}$<br>[W] | $\Phi$<br>[W/K] |
|------------------------|----------------|---------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|-------------------------|-----------------|
| A1                     | 262            | 40            | 2            | 1            | 55            | 12.8          | 113          | 52                      | 1.162           |
| A2                     | 262            | 40            | 2            | 1            | 55            | 12.8          | 112          | 52                      | 1.161           |
| A3                     | 535            | 40            | 2            | 1            | 55            | 12.8          | 230          | 65                      | 1.452           |
| A4                     | 261            | 40            | 2            | 1            | 55            | 12.8          | 112          | 52                      | 1.161           |
| A5                     | 2656           | 40            | 3            | 1            | 55            | 12.8          | 1284         | 145                     | 3.231           |
| A6                     | 151            | 40            | 2            | 1            | 55            | 12.8          | 65           | 46                      | 1.039           |
| A7                     | 66             | 40            | 2            | 1            | 55            | 12.8          | 29           | 42                      | 0.943           |
| A8                     | 161            | 40            | 2            | 1            | 55            | 12.8          | 69           | 47                      | 1.050           |
| A9                     | 155            | 40            | 2            | 1            | 55            | 12.8          | 67           | 46                      | 1.043           |

Il periodo di punta  $d_p$  è stato ricavato dal prospetto F.1 della UNI 9182 [7]. Il periodo di preriscaldamento  $P_r$  è stato assunto pari a 1 h al fine di mantenere coerenza con la discretizzazione temporale adottata dal modello CitySim.

La temperatura di accumulo  $T_c$  è stata assunta pari a 55 °C, valore minimo generalmente raccomandato per limitare il rischio di proliferazione batterica (in particolare *Legionella pneumophila*) negli accumuli di acqua calda sanitaria [10]. Tale scelta risulta inoltre

compatibile con l'utilizzo di pompe di calore, che operano con maggiore efficienza a temperature di mandata moderate.

La temperatura dell'acqua fredda  $T_f$  è stata invece assunta pari alla media annuale delle temperature medie mensili dell'aria esterna della località considerata, ricavate dal Prospetto 5 della UNI 10349-1 [12], analogamente a quanto fatto per lo stato di fatto. Poiché nello Scenario 2 la produzione di ACS è centralizzata, risulta necessario considerare anche le perdite del sottosistema di distribuzione. Per semplicità, il rendimento di distribuzione è stato assunto pari a quello calcolato per il servizio di riscaldamento.

Il coefficiente di prestazione stagionale della pompa di calore per la produzione di ACS è stato assunto pari a  $SCOP_{g,W} = 2.5$ , in accordo con i valori adottati per l'edificio di riferimento nell'Appendice A dell'Allegato 1 del DM 26 giugno 2015 [11]. Tale valore risulta inferiore rispetto a quello adottato per il servizio di riscaldamento ( $SCOP_{g,H} = 3.0$ ) a causa delle maggiori temperature richieste per la produzione di acqua calda sanitaria. Tenendo conto delle perdite dei sottosistemi, il coefficiente di prestazione equivalente del servizio di ACS risulta pari a  $SCOP_{eq,W} = 2.38$  per tutti gli edifici.

### Risultati ottenuti

Ai fini della ripartizione dell'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico tra i diversi servizi energetici, si adotta una procedura di allocazione su base mensile. In particolare, per ciascun mese l'energia elettrica totale prodotta dal sistema FV viene ripartita tra il servizio di riscaldamento e quello di produzione di acqua calda sanitaria (ACS) in proporzione ai rispettivi fabbisogni elettrici mensili.

Indicando con  $x$  un generico servizio energetico (riscaldamento oppure ACS), l'energia fotovoltaica allocata al servizio  $x$  nel mese considerato è determinata mediante la relazione:

$$E_{el,FV,x,mese} = \frac{E_{in,x,el,mese}}{E_{in,tot,el,mese}} E_{el,FV,tot,mese} \quad (9.2)$$

dove:

- $E_{in,x,el,mese}$  è l'energia elettrica richiesta dal servizio  $x$  nel mese considerato;
- $E_{in,tot,el,mese}$  è il fabbisogno elettrico totale mensile, ottenuto come somma dei fabbisogni dei singoli servizi;
- $E_{el,FV,tot,mese}$  è la produzione elettrica mensile dell'impianto fotovoltaico.

Coerentemente con la scala temporale adottata nell'analisi, non vengono modellati esplicitamente gli effetti di contemporaneità oraria tra la produzione fotovoltaica e i profili di carico dei servizi energetici. Di conseguenza, l'autoconsumo dell'energia fotovoltaica è stimato su base mensile.

Una volta determinata la quota di energia FV allocata a ciascun servizio, l'energia elettrica effettivamente coperta da fonte fotovoltaica per il servizio  $x$  nel mese è assunta

pari al minimo tra la quota FV allocata e il fabbisogno elettrico del servizio stesso. L'eventuale quota residua di fabbisogno viene invece considerata come prelevata dalla rete elettrica.

La determinazione dell'energia primaria associata ai consumi elettrici avviene infine applicando i fattori di conversione già introdotti in precedenza, distinti per l'energia elettrica proveniente dalla rete e per quella prodotta dall'impianto fotovoltaico.

A valle della simulazione e del post-processing, gli indicatori annuali ottenuti per ciascun edificio (e per il totale del complesso) sono riportati in Tabella 9.7.

Tabella 9.7. Indicatori energetici annuali e quota rinnovabile (RER) per edificio.

| Edificio | $EP_{H,ed}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | $EP_{H,tot}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | $EP_{W,tot}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | $EP_{ot}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | RER<br>[%] |
|----------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|------------|
| A1       | 120,6                                | 104,0                                 | 15,7                                  | 119,7                              | 21,9       |
| A2       | 111,3                                | 97,1                                  | 16,6                                  | 113,6                              | 21,5       |
| A3       | 96,5                                 | 84,4                                  | 15,8                                  | 100,2                              | 21,9       |
| A4       | 98,2                                 | 85,7                                  | 15,6                                  | 101,3                              | 21,9       |
| A5       | 50,8                                 | 45,5                                  | 106,6                                 | 132,1                              | 21,0       |
| A6       | 124,1                                | 107,8                                 | 15,0                                  | 122,7                              | 22,3       |
| A7       | 201,6                                | 174,6                                 | 13,4                                  | 188,0                              | 21,6       |
| A8       | 150,4                                | 130,6                                 | 16,6                                  | 147,2                              | 22,0       |
| A9       | 117,9                                | 102,3                                 | 15,8                                  | 118,2                              | 22,5       |
| TOT      | 107,5                                | 93,7                                  | 25,8                                  | 119,5                              | 21,8       |

### 9.2.3 Scenario 3: Sostituzione dei generatori per il servizio di riscaldamento e per il servizio di ACS autonomo

Questo scenario analizza la possibilità di eliminare le perdite termiche di distribuzione associate al servizio di ACS. A tal fine si ipotizza di mantenere la produzione di acqua calda sanitaria con configurazione autonoma a livello di singola unità, sostituendo tuttavia i generatori esistenti. In particolare, i boiler a gas vengono sostituiti con scaldacqua a pompa di calore.

Per quanto riguarda il servizio di riscaldamento, invece, la configurazione impiantistica rimane invariata rispetto agli scenari precedenti.

La scelta di questa configurazione comporta tuttavia che il servizio di ACS sia alimentato esclusivamente da energia elettrica prelevata dalla rete. In questa configurazione, infatti, non è possibile sfruttare direttamente l'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico per la produzione di ACS; di conseguenza, l'intera produzione fotovoltaica viene destinata al servizio di riscaldamento.

In coerenza con quanto descritto nel paragrafo precedente, per il generatore a pompa di calore dedicato alla produzione di ACS si assume un coefficiente di prestazione stagionale pari a  $SCOP_{g,W} = 2.5$ . In questo caso si assume che tale valore coincida con il coefficiente di prestazione equivalente dell'intero sistema, ovvero  $SCOP_{eq,W} = 2.5$ , in quanto le perdite associate ai sottosistemi di distribuzione e di accumulo vengono considerate trascurabili.

#### Risultati ottenuti

A valle della simulazione e del post-processing, gli indicatori annuali ottenuti per ciascun edificio (e per il totale del complesso) sono riportati in Tabella 9.8.

Tabella 9.8. Indicatori energetici annuali per il servizio di riscaldamento, ACS e totale, e quota di energia rinnovabile (RER) per ciascun edificio.

| Edificio | $EP_{H,red}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | $EP_{H,tot}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | $EP_{W,tot}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | $EP_{tot}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | RER<br>[%] |
|----------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|------------|
| A1       | 120,6                                 | 103,7                                 | 18,3                                  | 121,9                               | 20,2       |
| A2       | 111,3                                 | 96,8                                  | 18,3                                  | 115,1                               | 20,2       |
| A3       | 96,5                                  | 84,1                                  | 17,9                                  | 102,0                               | 20,3       |
| A4       | 98,2                                  | 85,4                                  | 17,6                                  | 103,0                               | 20,3       |
| A5       | 50,8                                  | 45,5                                  | 106,6                                 | 152,1                               | 21,0       |
| A6       | 124,1                                 | 107,4                                 | 18,1                                  | 125,5                               | 20,4       |
| A7       | 201,6                                 | 174,3                                 | 16,5                                  | 190,8                               | 20,3       |
| A8       | 150,4                                 | 130,3                                 | 20,0                                  | 150,3                               | 20,3       |
| A9       | 117,9                                 | 102,0                                 | 19,2                                  | 121,1                               | 20,4       |
| TOT      | 107,5                                 | 93,4                                  | 28,0                                  | 121,4                               | 20,4       |

### 9.2.4 Scenario 4: Generatore combinato per riscaldamento e ACS con saturazione della superficie fotovoltaica

Dal punto di vista impiantistico, lo Scenario 4 è identico allo Scenario 2, in cui un unico generatore a pompa di calore è utilizzato sia per il servizio di riscaldamento sia per la produzione di acqua calda sanitaria. La differenza principale riguarda invece la configurazione dell'impianto fotovoltaico.

Negli scenari precedenti la potenza fotovoltaica installata è stata dimensionata in modo da rispettare il requisito minimo previsto dalla normativa. Ciò comporta, nella maggior parte dei casi, l'installazione di una superficie relativamente contenuta rispetto alla disponibilità complessiva della copertura.

In questo scenario si analizza quindi una configurazione alternativa in cui la superficie occupata dai moduli fotovoltaici viene portata fino alla saturazione della superficie disponibile in copertura. Tale ipotesi rappresenta una configurazione limite, ma risulta utile per valutare l'influenza che una maggiore disponibilità di energia rinnovabile può avere sulle prestazioni energetiche complessive degli edifici.

In Tabella 9.9 sono riportati i valori delle superfici considerate e le corrispondenti potenze di picco installate per ciascun edificio.

Tabella 9.9. Dimensionamento degli impianti fotovoltaici nello Scenario 4 con saturazione della superficie disponibile in copertura.

| <b>Edificio</b><br>[-] | $A_p$<br>[m <sup>2</sup> ] | $P_{\text{picco}}$<br>[kW] | $K_{\text{pv}}$<br>[kW/m <sup>2</sup> ] | $A_{\text{pv}}$<br>[m <sup>2</sup> ] | $A_{\text{tetto}}$<br>[m <sup>2</sup> ] | $A_{\text{pv}}/A_{\text{tetto}}$<br>[%] | $T_{\text{ref}}$<br>[°C] |
|------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------|
| A1                     | 353                        | 46                         | 0.13                                    | 353                                  | 353                                     | 100                                     | 25                       |
| A2                     | 245                        | 345                        | 1.13                                    | 306                                  | 306                                     | 100                                     | 25                       |
| A3                     | 513                        | 1266                       | 2.13                                    | 594                                  | 594                                     | 100                                     | 25                       |
| A4                     | 255                        | 924                        | 3.13                                    | 295                                  | 295                                     | 100                                     | 25                       |
| A5                     | 218                        | 1082                       | 4.13                                    | 262                                  | 262                                     | 100                                     | 25                       |
| A6                     | 240                        | 1441                       | 5.13                                    | 281                                  | 281                                     | 100                                     | 25                       |
| A7                     | 173                        | 1189                       | 6.13                                    | 194                                  | 194                                     | 100                                     | 25                       |
| A8                     | 230                        | 1885                       | 7.13                                    | 264                                  | 264                                     | 100                                     | 25                       |
| A9                     | 231                        | 2063                       | 8.13                                    | 254                                  | 254                                     | 100                                     | 25                       |

### Risultati ottenuti

A valle della simulazione e del post-processing, gli indicatori annuali ottenuti per ciascun edificio (e per il totale del complesso) sono riportati in Tabella 9.10.

Tabella 9.10. Indicatori energetici annuali per il servizio di riscaldamento, ACS e totale, e quota di energia rinnovabile (RER) per ciascun edificio nello Scenario 4.

| Edificio | $EP_{H,nd}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | $EP_{H,tot}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | $EP_{W,tot}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | $EP_{tot}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | RER<br>[%] |
|----------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|------------|
| A1       | 120,6                                | 97,8                                  | 13,1                                  | 110,9                               | 26,5       |
| A2       | 111,3                                | 90,1                                  | 12,8                                  | 102,9                               | 27,6       |
| A3       | 96,5                                 | 78,2                                  | 12,4                                  | 90,6                                | 28,2       |
| A4       | 98,2                                 | 79,5                                  | 12,3                                  | 91,8                                | 28,1       |
| A5       | 50,8                                 | 43,2                                  | 86,2                                  | 129,4                               | 31,3       |
| A6       | 124,1                                | 98,8                                  | 12,6                                  | 111,3                               | 28,4       |
| A7       | 201,6                                | 162,9                                 | 12,0                                  | 174,9                               | 26,0       |
| A8       | 150,4                                | 121,8                                 | 14,1                                  | 135,9                               | 26,9       |
| A9       | 117,9                                | 95,3                                  | 13,5                                  | 108,8                               | 27,6       |
| TOT      | 107,5                                | 87,2                                  | 20,9                                  | 108,1                               | 28,0       |

### 9.2.5 Confronto dei risultati tra i vari scenari

L'interesse principale di questa fase dello studio è il confronto tra i diversi scenari impiantistici analizzati, al fine di individuare, nel caso di studio considerato, la configurazione più favorevole in termini di prestazione energetica complessiva. Per agevolare l'interpretazione dei risultati, la Tabella 9.11 sintetizza le principali caratteristiche di ciascuno scenario.

Tabella 9.11. Configurazione dei servizi energetici nei diversi scenari di intervento impiantistico.

| Caso | Riscaldamento   | ACS                                                           | FV                                        |
|------|-----------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1    | Pompa di calore | Scalda-acqua autonomo istantaneo a gas (boiler)               | Potenza minima da decreto                 |
| 2    | Pompa di calore | Pompa di calore con impianto centralizzato per ACS e accumulo | Potenza minima da decreto                 |
| 3    | Pompa di calore | Scalda-acqua a pompa di calore autonomo                       | Potenza minima da decreto                 |
| 4    | Pompa di calore | Pompa di calore con impianto centralizzato per ACS e accumulo | Saturazione della superficie di copertura |

Le Figure 9.11 e 9.12 riportano, rispettivamente, gli indicatori energetici medi del complesso per i diversi servizi e la quota di energia rinnovabile  $RER$  nei diversi scenari considerati.

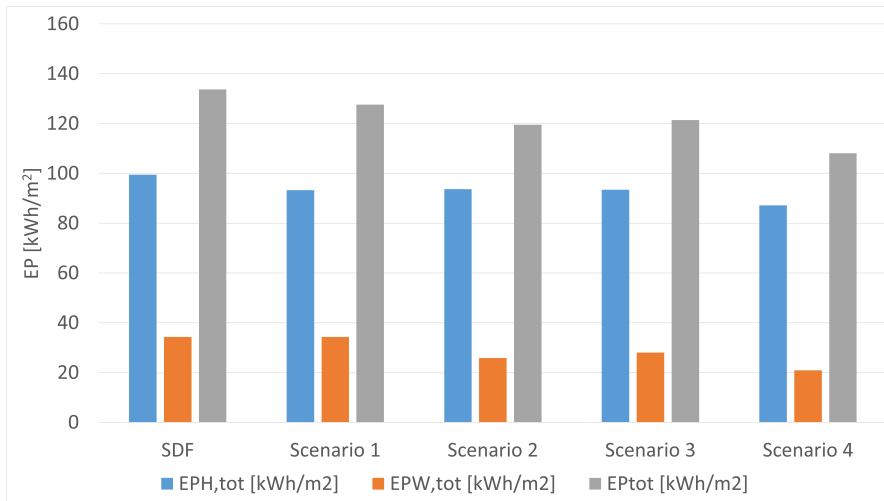


Figura 9.11. Confronto tra i valori medi di  $EP_{H,tot}$ ,  $EP_{W,tot}$  ed  $EP_{tot}$  del complesso nei diversi scenari impiantistici.

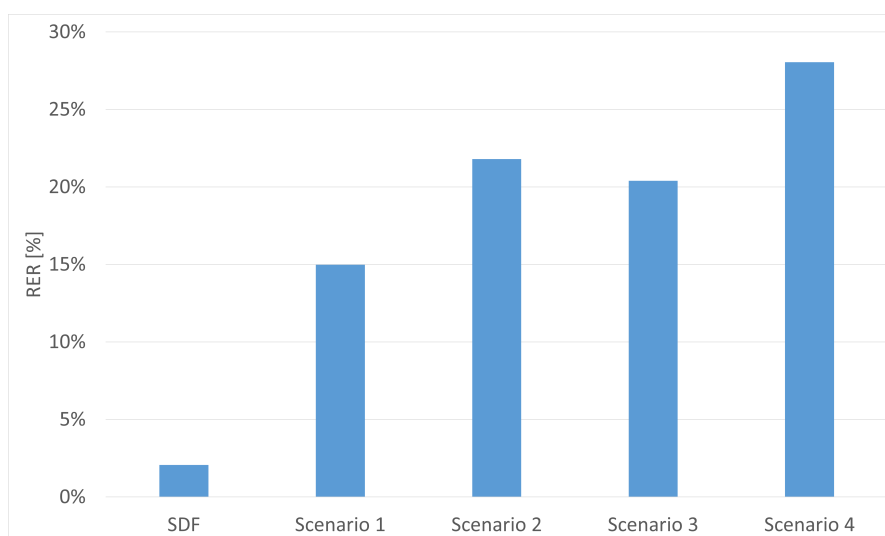


Figura 9.12. Confronto della quota di energia rinnovabile *RER* del complesso nei diversi scenari impiantistici.

Come atteso, lo Scenario 4 risulta il più favorevole dal punto di vista energetico, in quanto presenta i valori minimi degli indicatori di prestazione energetica per il riscaldamento, per il servizio di ACS e, di conseguenza, anche per la prestazione complessiva del complesso. Lo stesso scenario presenta inoltre la quota di energia rinnovabile più elevata, pari al 28%.

Sebbene tale valore possa ancora apparire relativamente contenuto in termini assoluti, va osservato che nello stato di fatto il valore di *RER* risulta prossimo al 2%. Lo Scenario 4 consente pertanto un incremento di circa 26 punti percentuali, evidenziando il contributo significativo della maggiore disponibilità di energia fotovoltaica.

Resta tuttavia necessario sottolineare che la valutazione della configurazione più conveniente non può basarsi esclusivamente sugli indicatori energetici. In particolare, lo Scenario 4 rappresenta anche la soluzione impiantisticamente più spinta e potenzialmente più onerosa; di conseguenza, per individuare la configurazione ottimale sarebbe opportuno affiancare all'analisi energetica anche una valutazione di tipo economico, ad esempio mediante un'analisi costi-benefici.

Un aspetto particolarmente interessante che emerge dai risultati è che, per come il modello è stato impostato, lo Scenario 2 risulta leggermente più favorevole dello Scenario 3. In altri termini, la configurazione con produzione centralizzata di ACS mediante la stessa pompa di calore utilizzata anche per il riscaldamento, associata a un accumulo centralizzato, risulta preferibile rispetto al mantenimento dell'autonomia a livello di unità immobiliare con scalda-acqua a pompa di calore.

Tale risultato non è banale e dipende dalle ipotesi adottate nel presente lavoro. In particolare, nello Scenario 3 le minori perdite di distribuzione dell'ACS non compensano il fatto che il servizio di ACS venga alimentato esclusivamente da energia elettrica prelevata dalla rete, caratterizzata da un fattore di conversione in energia primaria totale

più elevato rispetto a quello associato all'energia fotovoltaica autoconsumata. Al contrario, nello Scenario 2 una parte della produzione fotovoltaica può essere allocata anche al servizio di ACS, con effetti più favorevoli sul bilancio energetico complessivo. Tale vantaggio risulta particolarmente rilevante nel periodo estivo, quando la produzione fotovoltaica è elevata e il fabbisogno per il riscaldamento è nullo, rendendo disponibile una quota maggiore di energia rinnovabile per il servizio di ACS.

Per quanto riguarda invece il servizio di riscaldamento, gli scostamenti rispetto allo stato di fatto risultano in alcuni casi relativamente contenuti. Ciò è riconducibile al fatto che, nel caso di studio analizzato, il teleriscaldamento presenta per Torino un fattore di conversione in energia primaria totale particolarmente favorevole. Di conseguenza, il vantaggio ottenibile passando a una pompa di calore risulta attenuato dal fatto che quest'ultima è alimentata prevalentemente da energia elettrica di rete, soprattutto negli scenari con disponibilità limitata di fotovoltaico. In termini semplificati, il rapporto tra fattore di conversione del vettore energetico e rendimento o coefficiente di prestazione del sistema risulta, nei due casi, dello stesso ordine di grandezza. Per questo motivo, la riduzione di  $EP_{H,tot}$  rispetto allo stato di fatto risulta contenuta e diventa più evidente solo nello Scenario 4, in cui la maggiore disponibilità di energia fotovoltaica riduce ulteriormente il contributo della rete.

Le Figure 9.13 e 9.14 mostrano, rispettivamente, l'andamento di  $EP_{tot}$  e della quota  $RER$  per ciascun edificio e per ciascuno scenario.

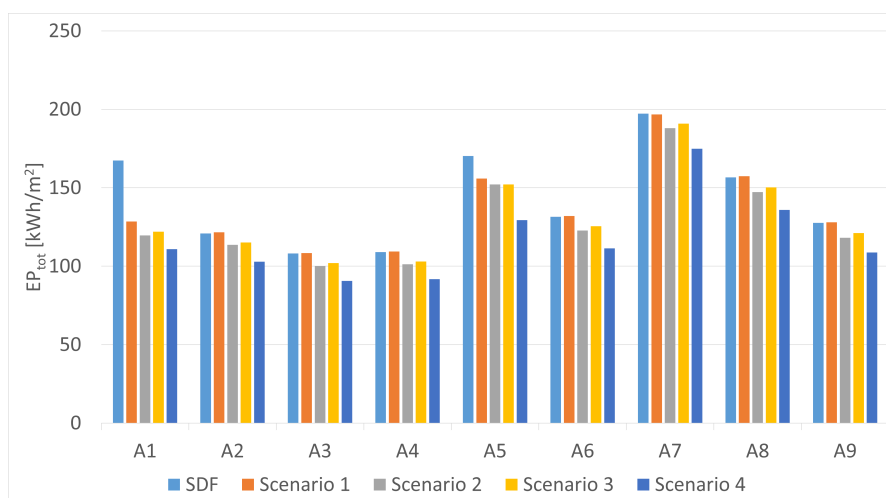


Figura 9.13. Confronto dei valori di  $EP_{tot}$  per ciascun edificio nei diversi scenari impiantistici.

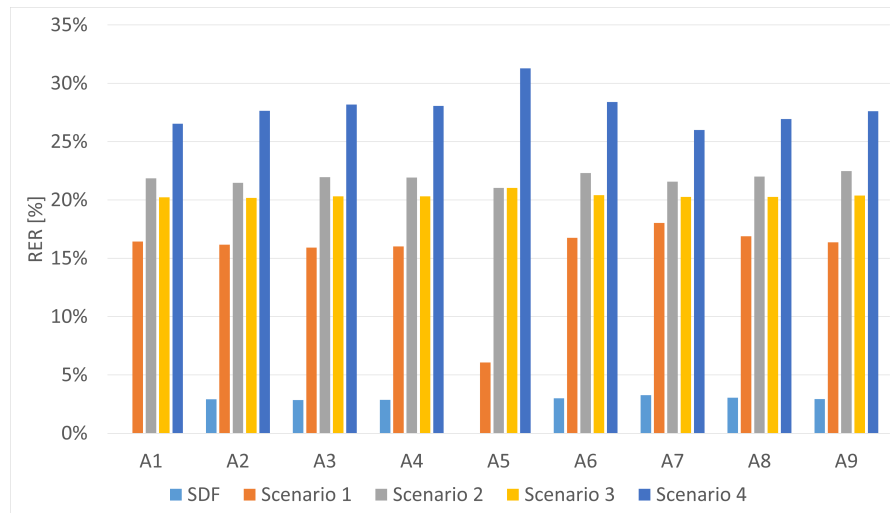


Figura 9.14. Confronto della quota di energia rinnovabile  $RER$  per ciascun edificio nei diversi scenari impiantistici.

L'analisi a scala di singolo edificio conferma che il miglioramento più marcato di  $EP_{tot}$  passando dallo Scenario 1 allo Scenario 2 si osserva per gli edifici A1 e A5, che risultano anche gli unici caratterizzati, nello stato di fatto, da un generatore a gas a condensazione. Per gli altri edifici, il passaggio tra i due scenari produce variazioni più contenute. Tale evidenza è confermata anche dalla Figura 9.15, che riporta l'andamento di  $EP_{H,tot}$  per ciascun edificio e per ciascuno scenario.

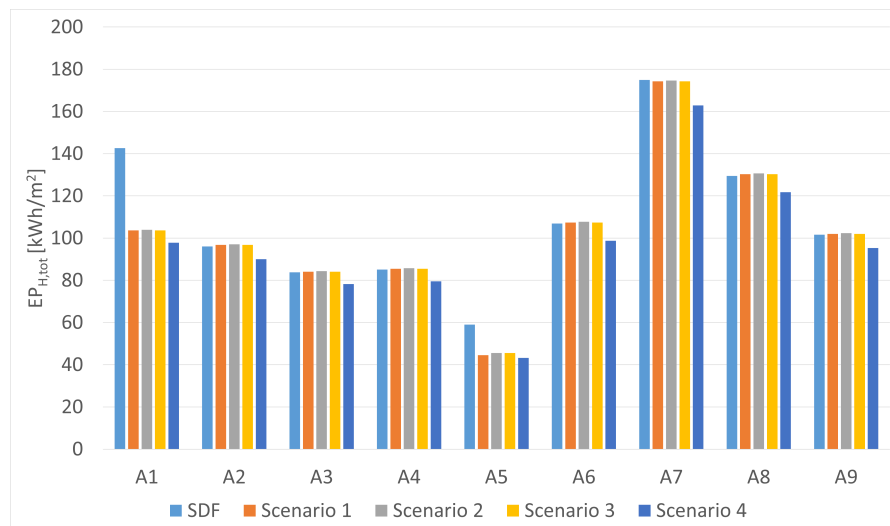


Figura 9.15. Confronto dei valori di  $EP_{H,tot}$  per ciascun edificio nei diversi scenari impiantistici.

Un ulteriore aspetto degno di nota riguarda l'edificio A5, che nello Scenario 4 è l'unico a superare un valore di *RER* pari al 30%. Ciò è coerente con la struttura dei fabbisogni di tale edificio, fortemente caratterizzata dal servizio di ACS, che in questa configurazione beneficia in misura significativa della disponibilità di energia fotovoltaica, soprattutto nel periodo estivo, in assenza di fabbisogni per il riscaldamento.

Nel paragrafo successivo l'analisi viene estesa al caso di intervento combinato su involucro e impianto, con l'obiettivo di valutare se una riduzione più marcata del fabbisogno termico per il riscaldamento possa essere accompagnata da un ulteriore incremento della quota rinnovabile.

### 9.3 Intervento combinato su impianti e involucro

Per completare l'analisi degli scenari di efficientamento, viene infine considerata una configurazione combinata che integra: (i) l'intervento sull'involucro edilizio, assumendo trasmittanze termiche ricondotte ai valori dell'edificio di riferimento per la zona climatica E, corrispondenti al Caso 2 dell'intervento combinato sull'involucro; (ii) l'intervento impiantistico con pompa di calore e integrazione fotovoltaica a servizio del riscaldamento e della produzione di acqua calda sanitaria (ACS), secondo le ipotesi adottate per lo Scenario 2, assumendo quindi una potenza fotovoltaica minima conforme ai requisiti normativi vigenti.

Gli indicatori energetici annuali ottenuti per ciascun edificio, oltre che per il complesso nel suo insieme, sono riportati in Tabella 9.12.

Tabella 9.12. Indicatori energetici annuali e quota rinnovabile (RER) per edificio nello scenario combinato di intervento su involucro e impianti.

| Edificio<br>[-] | $EP_{H,nd}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | $EP_{H,tot}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | $EP_{W,tot}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | $EP_{tot}$<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | RER<br>[%]  |
|-----------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------|
| A1              | 50,0                                 | 43,9                                  | 15,4                                  | 59,3                                | 24,3        |
| A2              | 45,4                                 | 40,2                                  | 16,3                                  | 56,5                                | 23,6        |
| A3              | 41,8                                 | 36,9                                  | 15,5                                  | 52,3                                | 24,3        |
| A4              | 43,1                                 | 38,0                                  | 15,3                                  | 53,3                                | 24,2        |
| A5              | 4,9                                  | 4,4                                   | 106,2                                 | 110,6                               | 21,6        |
| A6              | 53,7                                 | 47,0                                  | 14,6                                  | 61,6                                | 25,2        |
| A7              | 83,0                                 | 72,7                                  | 13,1                                  | 85,8                                | 24,1        |
| A8              | 58,4                                 | 51,4                                  | 16,2                                  | 67,6                                | 25,0        |
| A9              | 72,0                                 | 62,9                                  | 15,6                                  | 78,5                                | 24,0        |
| <b>TOT</b>      | <b>43,0</b>                          | <b>39,6</b>                           | <b>25,5</b>                           | <b>65,1</b>                         | <b>23,8</b> |

Nel complesso, il valore di  $EP_{\text{tot}}$  si riduce fino a  $65.1 \text{ kWh/m}^2$ , rispetto al valore dello stato di fatto pari a  $133.7 \text{ kWh/m}^2$ , corrispondente a una diminuzione complessiva di circa il 51 %. Tale risultato è attribuibile alla combinazione tra: (i) la riduzione dei fabbisogni di riscaldamento conseguente al miglioramento dell'involucro edilizio; (ii) il miglioramento dell'efficienza del sistema di generazione; (iii) il contributo della produzione fotovoltaica. La riduzione dei fabbisogni, in particolare per il servizio di riscaldamento, si riflette anche sulla quota di energia rinnovabile. A scala di complesso, il valore di RER raggiunge infatti il 23.8 %.

Il miglioramento rispetto alla configurazione attuale risulta pertanto significativo: la quota rinnovabile aumenta di circa 21.7 puntipercettuali, passando da 2.1 % nello stato di fatto a 23.8 % nello scenario combinato.

Le Figure 9.16 e 9.17 riportano, rispettivamente, il confronto tra gli indicatori energetici ante e post intervento e l'incremento della quota rinnovabile ottenuto nello scenario combinato rispetto allo stato di fatto.

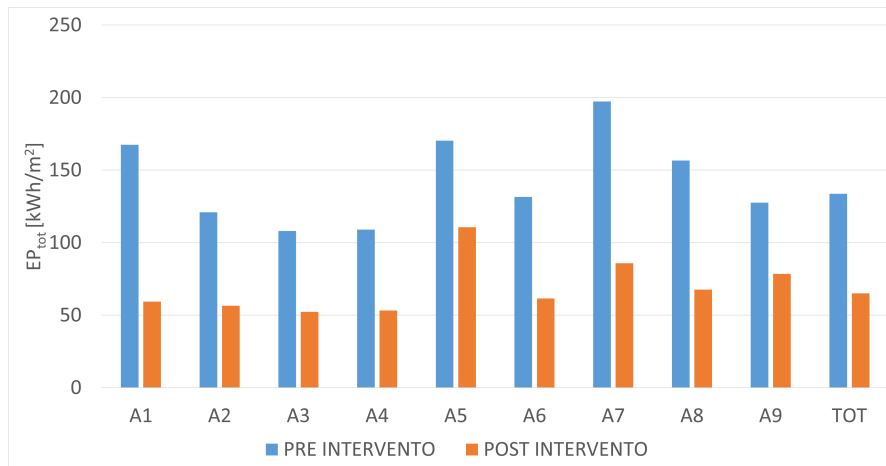


Figura 9.16. Confronto tra i valori di  $EP_{\text{tot}}$  ante e post intervento per ciascun edificio e per il complesso nello scenario combinato su involucro e impianti.

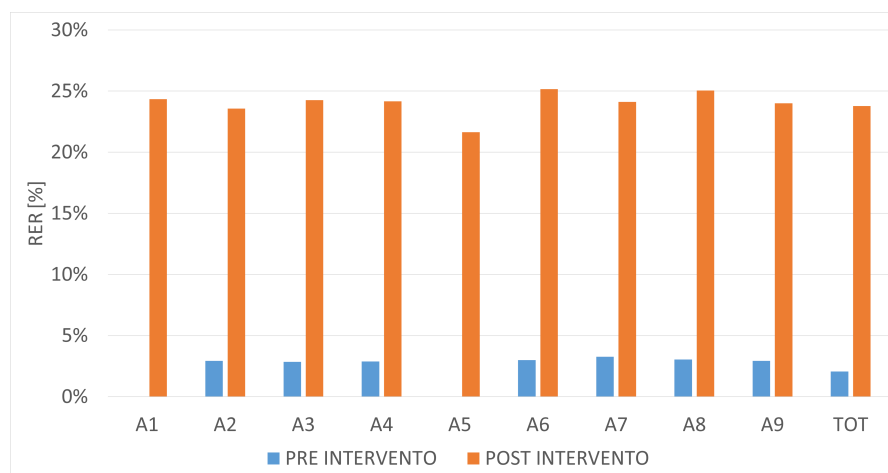


Figura 9.17. Confronto della quota di energia rinnovabile ( $RER$ ) ante e post intervento per ciascun edificio e per il complesso nello scenario combinato su involucro e impianti.

## Capitolo 10

# Conclusioni

La riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente rappresenta una delle leve principali per la decarbonizzazione in Europa. La Direttiva (UE) 2024/1275 (EPBD IV) [27] rafforza tale indirizzo attraverso un quadro più vincolante e orientato alla pianificazione, introducendo obiettivi, strumenti e meccanismi di governance (ad esempio standard minimi di prestazione energetica e strategie nazionali di ristrutturazione) che richiedono capacità di analisi a scala aggregata e valutazioni comparative tra alternative di intervento.

In questo contesto, l'*Urban Building Energy Modeling* (UBEM) si configura come un supporto tecnico utile per analisi di scenario e per la definizione di priorità a scala urbana, a condizione di esplicitare e gestire le semplificazioni introdotte (dati incompleti, archetipi, assunzioni impiantistiche). Il punto critico è che, all'aumentare della scala, cresce la dipendenza dalla qualità dei dati di input: se le informazioni disponibili sono numerose ma affette da elevata incertezza, l'incertezza complessiva del modello tende ad aumentare rapidamente. Ne consegue che l'UBEM è particolarmente efficace per valutazioni *relative* (confronto tra edifici e tra scenari, effetti di pacchetti tecnologici), mentre richiede cautela quando si interpreta il valore *assoluto* degli indicatori, soprattutto in assenza di calibrazione su consumi reali.

### 10.1 Sintesi del contributo della tesi

Il lavoro ha proposto e applicato una metodologia operativa *bottom-up* per costruire un UBEM di un isolato reale nell'area metropolitana di Torino, utilizzando *CitySim Solver* con risoluzione oraria e un *post-processing* mirato alla produzione di indicatori annuali e aggregabili. La catena metodologica (scelte sugli input, utilizzo di archetipi e relativi profili d'uso, implementazione dei servizi, esportazione e trattamento dei file di output) ha consentito di ottenere un set coerente di grandezze confrontabili tra edifici e tra scenari, mantenendo un compromesso ragionevole tra dettaglio fisico e scalabilità, caratteristico dell'approccio UBEM.

## 10.2 Coerenza fisica e interpretazione dei risultati nello stato di fatto

In assenza di consumi reali disponibili, la tesi ha adottato una validazione di tipo fisico, verificando relazioni attese tra output e grandezze climatiche di riferimento. Il confronto tra i valori mensili degli indicatori di riscaldamento e l'andamento delle distribuzioni mensili delle differenze orarie tra temperatura interna ed esterna, ricavate dal file climatico utilizzato nella simulazione e determinate in modo coerente con la UNI 10349-3:2016 [13], ha mostrato un comportamento coerente. Inoltre, la differenza tra fabbisogno ideale e prestazione totale nei mesi senza erogazione del servizio evidenzia correttamente l'effetto delle ipotesi di calendario di funzionamento dell'impianto, mentre la loro differenza nel periodo di accensione degli impianti è coerente con i fattori di conversione selezionati per i vettori energetici impiegati.

Dal punto di vista prestazionale, nello stato di fatto il comparto studiato risulta fortemente dipendente da energia primaria non rinnovabile, con una quota rinnovabile complessivamente marginale (RER totale circa 2%). L'analisi disaggregata ha chiarito come la prestazione complessiva  $EP_{\text{tot}}$  sia influenzata dalla destinazione d'uso e dalla struttura dei servizi: negli edifici residenziali domina il contributo del riscaldamento, mentre nell'edificio alberghiero il peso dell'ACS diventa prevalente, condizionando sia l'interpretazione dei risultati sia l'efficacia relativa delle misure sull'involucro. Questo aspetto suggerisce che politiche e priorità di intervento dovrebbero essere differenziate in funzione della destinazione d'uso, evitando approcci uniformi a tipologie eterogenee.

## 10.3 Evidenze chiave dagli scenari: involucro

Gli scenari di efficientamento sull'involucro mostrano che i risparmi percentuali su  $EP_{H,\text{tot}}$  possono essere elevati, soprattutto quando lo stato di fatto presenta trasmittanze sfavorevoli; tuttavia la riduzione su  $EP_{\text{tot}}$  risulta più contenuta poiché l'ACS rimane invariata negli interventi esclusivamente edilizi. Nel caso studio, i risparmi ottenibili intervenendo sulla componente trasparente possono risultare comparabili a quelli sull'opaco non per un'equivalenza fisica intrinseca, ma perché le trasmittanze iniziali dei serramenti offrono un margine di miglioramento più ampio a parità di variazione percentuale considerata. Un elemento critico emerso (rilevante in ottica EPBD e comfort) è che il miglioramento dell'isolamento dell'opaco può comportare un incremento dei fabbisogni ideali di raffrescamento ( $EP_{C,\text{nd}}$ ). Tale incremento è dovuto al fatto che la riduzione delle dispersioni rende più difficile smaltire gli apporti termici estivi (interni e solari) quando non sono presenti strategie di controllo adeguate. Questo risultato evidenzia la necessità di valutare gli interventi non solo su indicatori invernali, ma anche rispetto al comportamento estivo e al ruolo di ombreggiamento, ventilazione (naturale e meccanica) e gestione dei carichi interni.

## 10.4 Evidenze chiave dagli scenari: impianti e rinnovabili

Gli scenari impiantistici analizzati evidenziano che una riduzione significativa degli indicatori energetici complessivi, accompagnata da un incremento rilevante della quota rinnovabile, richiede un cambio tecnologico del sistema di generazione e un processo di elettrificazione supportato dalla produzione da fonti rinnovabili. Nel caso di studio considerato, lo scenario con sostituzione combinata del generatore per i servizi di riscaldamento e di ACS, associata all'integrazione fotovoltaica, mostra una riduzione di  $EP_{tot}$  da 133,7 kWh/m<sup>2</sup>, nello stato di fatto, a 119,5 kWh/m<sup>2</sup>, accompagnata da un incremento della quota rinnovabile  $RER$  dal 2% al 21,8%. Tali valori raggiungono rispettivamente 108,1 kWh/m<sup>2</sup> e 28% nello scenario con saturazione della superficie di copertura disponibile per il fotovoltaico.

Questo risultato è particolarmente significativo perché mostra come, anche a parità di fabbisogni energetici utili, la trasformazione del sistema di generazione e l'integrazione delle fonti rinnovabili incidano direttamente sulla prestazione energetica complessiva e sul livello di decarbonizzazione a scala di comparto.

L'estensione della pompa di calore anche al servizio di ACS consente inoltre di valorizzare ulteriormente la produzione fotovoltaica quando i due servizi sono gestiti in modo integrato, aumentando la quota di autoconsumo stimata su base mensile e migliorando la prestazione in energia primaria complessiva. Tale effetto risulta particolarmente evidente per le destinazioni d'uso in cui il servizio di ACS assume un peso rilevante sul bilancio energetico totale.

## 10.5 Intervento combinato: impianti e involucro

Lo scenario combinato, che accoppia l'adeguamento dell'involucro ai valori limite normativi con la trasformazione impiantistica e l'integrazione fotovoltaica, rappresenta l'opzione più efficace tra quelle analizzate, poiché agisce simultaneamente sia sui fabbisogni energetici, mediante il miglioramento dell'involucro, sia sulla prestazione del sistema energetico, attraverso la sostituzione dei generatori e l'incremento della quota rinnovabile.

In termini aggregati, il comparto passa da  $EP_{tot} = 133,7$  kWh/m<sup>2</sup> a  $EP_{tot} = 65,1$  kWh/m<sup>2</sup>, con una riduzione complessiva dell'ordine del 51%, mentre la quota rinnovabile totale  $RER$  cresce fino a circa il 23,8%, nella configurazione considerata con potenza fotovoltaica minima prevista dal decreto.

Pur trattandosi di un miglioramento molto marcato, la quota rinnovabile risultante rimane inferiore rispetto a obiettivi normativi più ambiziosi, ad esempio soglie del 60% previste in specifici contesti o regimi. Ciò evidenzia come, nel caso di studio analizzato, la sola combinazione tra miglioramento dell'involucro, elettrificazione dei servizi e integrazione fotovoltaica non sia sempre sufficiente a raggiungere livelli molto elevati di copertura rinnovabile, rendendo potenzialmente necessaria l'introduzione di ulteriori leve, quali altre fonti rinnovabili o strategie più avanzate di gestione dei carichi.

## 10.6 Implicazioni per la pianificazione

Complessivamente, i risultati confermano che l'UBEM adottato, pur non essendo sovrapponibile alle procedure normative edificio-per-edificio, è efficace per produrre stime comparabili e riproducibili utili a:

- identificare edifici prioritari (per intensità di domanda, struttura dei servizi, geometria e compattezza);
- distinguere misure che agiscono sui fabbisogni (involucro) da misure che agiscono sulla prestazione primaria e sulla quota rinnovabile (impianti/FV);
- valutare pacchetti di intervento con una logica di scenario coerente con la pianificazione richiesta dalla EPBD IV.

## 10.7 Limiti e prospettive di sviluppo

Il lavoro presenta limiti strutturali tipici dell'UBEM che vanno letti come spazi di miglioramento:

- assenza di calibrazione sui consumi reali, che impone cautela nell'interpretazione assoluta dei valori e sposta l'attenzione sulla confrontabilità relativa tra edifici e scenari;
- dipendenza da assunzioni archetipali e da semplificazioni geometriche/zonali necessarie alla scalabilità, con conseguente incertezza residua;
- rappresentazione semplificata di alcuni aspetti del comportamento estivo e delle strategie d'uso, che andrebbero integrati per valutazioni più robuste su comfort e rischio di surriscaldamento;
- stima dell'autoconsumo FV a scala mensile in alcuni scenari: scelta coerente con la scala di analisi adottata, ma che non rappresenta esplicitamente la contemporaneità oraria tra produzione e carichi.

Come sviluppi futuri, l'impianto metodologico potrebbe essere rafforzato tramite: integrazione con basi dati territoriali (APE, catasti energetici, dati impiantistici), procedure di calibrazione con misure (anche parziali) e analisi costi-benefici o *cost-optimal* su pacchetti di intervento, così da collegare in modo più diretto le evidenze UBEM alle traiettorie operative richieste dai piani di ristrutturazione e dagli standard minimi previsti in ambito EPBD.

## 10.8 Chiusura

In conclusione, la tesi mostra che una metodologia UBEM basata su *CitySim*, supportata da un post-processing strutturato e da un set coerente di indicatori, può costituire uno

strumento efficace per leggere il patrimonio edilizio urbano in chiave energetica ed esplorare scenari di trasformazione. Nel caso studio, gli interventi sull'involucro migliorano in modo sostanziale la componente invernale riducendo i fabbisogni di riscaldamento, ma possono accentuare criticità estive se non accompagnati da strategie di controllo; inoltre, da soli non incidono in modo proporzionale su  $EP_{\text{tot}}$  quando l'ACS è dominante. Viceversa, gli scenari impiantistici con elettrificazione e integrazione fotovoltaica risultano determinanti per incrementare la quota rinnovabile e ridurre la prestazione primaria a scala di comparto; la combinazione tra involucro e impianti rappresenta infine l'approccio più efficace tra quelli analizzati, coerente con una logica di pianificazione per pacchetti di intervento.



# Ringraziamenti

È quindi arrivato il momento dei ringraziamenti. Siamo davvero arrivati a questo punto: i ringraziamenti della tesi magistrale. Quelli che, se si ha avuto la possibilità, oltre che la determinazione, si scrivono una volta sola nella vita.

Devo ringraziare, prima di tutto, i miei genitori. È proprio grazie a loro se oggi posso scrivere queste righe. Mi hanno permesso di studiare, sì, ma soprattutto mi hanno permesso di imparare tanto anche al di fuori dell'università.

Un ringraziamento speciale va a mamma Paola, perché da lei ho imparato la determinazione, il saper resistere anche quando tutto va male. Ho imparato che, anche se si cade, poi ci si rialza. Ho imparato da lei cosa significa amare un figlio e cosa vuol dire esserci sempre, in un modo o nell'altro, anche quando gli impegni sembrano non permetterlo. Ho imparato l'altruismo, quello vero, quello della chiave di volta: quello di chi si prende addosso le pressioni di tutti pur di tenere tutto in piedi. Perché, onestamente, senza di te, mamma, dove finiremmo tutti?

Devo ringraziare anche papà Fabrizio, l'altra candela, l'altro insegnante. Da lui ho imparato che si deve vivere, non sopravvivere, purché si rispettino quei limiti oltre i quali si finirebbe per sopravvivere proprio a causa di come si è vissuto. Ma l'insegnamento più grande che ho appreso da lui è un altro: la vita può cambiare in qualsiasi momento, e in qualsiasi momento si può essere costretti a cambiare vita. Mi ha insegnato che si può ricominciare da zero, ricostruendosi anche in età avanzata, così come si può perdere tutto da un momento all'altro. È lui che mi ha insegnato la resilienza, la forza di resistere e di rifarsi. Ha vinto una volta, quando ha dovuto ricominciare da zero a quarant'anni; e quando la vita ha deciso di sfidarlo di nuovo, questa volta colpendo la salute, ha scelto di non lasciarsi andare. Ha resistito e, alla fine, ha vinto. Certo, non ne è uscito illeso, ma porta con sé le ferite della battaglia che ha affrontato, e dovrebbe esserne fiero, perché ha vinto anche quando la medicina non sapeva cosa fare.

Voglio ringraziare anche mio fratello Niccolò. Sono fiero di lui e dell'uomo che sta diventando. Forse è lui, tra noi, quello che ha ereditato più di tutti la determinazione di mamma. È determinato in tutto quello che fa. Ha paura delle novità, ma quando decide di mettersi in gioco lo fa con anima e cuore, dando sempre il massimo. Ha tanta voglia di fare e, anche se a volte controvoglia, per gli altri c'è sempre, perché, nonostante un carattere rude, è un ragazzo dal cuore grande e tiene fino all'osso alle persone che ha intorno e alle cose che fa. Io posso solo imparare da lui.

Ringrazio tutti i miei nonni, sia quelli che sono ancora qui sia quelli che purtroppo non

ci sono più, per tutto quello che mi hanno dato. In particolare mia nonna Anna, perché è stata una seconda mamma per me: mi ha cresciuto e ha contribuito in modo rilevante all'uomo che sono oggi. Un ringraziamento speciale va anche a mio nonno Tommaso: anche se ha una personalità particolare, è stato ed è per me un esempio di vita, per il suo modo di vivere attivamente e pienamente. Mi riterrò fortunato già solo se nella mia vita riuscirò a fare anche solo un terzo delle cose che ha fatto lui.

Ringrazio anche i miei zii: zia Alice e zio Alessandro, zia Dina, zio Peppe e zia Ilenia, zia Lucilla e zio Rossano, perché, anche se non sempre sono presente, quando ho avuto bisogno non si sono mai tirati indietro; anzi, si sono sempre offerti di aiutarmi, e so che posso sempre contare su di loro. Questo vale tanto, quindi grazie.

Fra tutti gli zii, voglio citare in modo particolare lo zio Peppe, perché non solo c'è sempre nel momento del bisogno, ma per me è molto di più. È un punto di riferimento, l'ho sempre visto così. Questo ha influenzato profondamente anche la scelta degli studi che ho portato avanti fino a qui. È la mia ispirazione, sia come professionista sia come uomo. Ringrazio inoltre i miei coinquilini, Federico e Riccardo. Ho iniziato questo percorso con voi e, praticamente, l'ho finito con voi. Siamo stati sempre insieme, tutti e tre, dal primo giorno di università. Io vi considero una seconda famiglia: il rapporto che abbiamo costruito, per me, non si distingue da una parentela di sangue. Ci conosciamo come nessun altro ci conosce. In questi anni abbiamo vissuto le reciproche evoluzioni, ci siamo visti cambiare. Si può dire che siamo cambiati tanto da quel primo giorno di università, ma ci siamo sempre stati, in ogni percorso o quasi. Se tornassi indietro, sceglierei ancora voi, perché, anche se ci prendiamo a parole, il legame che abbiamo stretto è forte e non scontato. Per questo, anche se la vita ci allontanerà, vi vorrò sempre bene e rappresenterete sempre tanto per me: come un parente con cui si è perso il contatto, ma che ogni volta che si rincontra fa sembrare che quella distanza non ci sia mai stata.

Un grazie va anche a quelli che c'erano prima, agli altri "fratelli", a quelli che mi hanno visto crescere: Matteo e Nicolas. Ne abbiamo passate tante insieme e voi conoscete ogni mia versione. In particolare ringrazio il mio amico Matteo, che è stato una presenza costante per me, anche nel periodo in cui ci siamo allontanati. Ho con lui un legame profondo: condividiamo tante esperienze importanti. Il suo ingresso nella mia vita mi ha cambiato molto. Prima di lui ero un ragazzo timido e chiuso; è grazie a lui se oggi ho trovato tanti amici, perché è stato lui il primo, quello che ha aperto la mia vita sociale. È stato il primo passo importante di quell'evoluzione che mi ha portato alla versione di me che sono oggi.

Ringrazio inoltre anche gli amici che ho trovato qui a Torino, ognuno di loro: belle persone che mi considero fortunato di aver incontrato. Ringrazio i miei colleghi, persone stupende, ognuna a modo suo singolare. Li ringrazio perché, grazie a loro, questa magistrale è volata: hanno reso divertente ogni lezione e ogni lavoro di gruppo, facendomi essere felice di andare a lezione o di restare insieme fino alle undici di sera a sbatterci la testa sui progetti. Sono tutte esperienze bellissime e non scontate, che mi porterò dietro per sempre. Al pensiero di non seguire più una lezione con voi, quasi mi dispiace aver finito.

Ringrazio la famiglia Fattizzo per avermi accolto come uno di loro fin dall'inizio e per il trattamento che mi riservano. In particolare ringrazio Angelica e Gianluca per la disponibilità che mi hanno sempre dimostrato e per i consigli che mi hanno dato ogni volta che ne ho avuto bisogno. Ma li ringrazio soprattutto per aver messo al mondo e cresciuto Sofia, la mia ragazza: a giudicare dal risultato, hanno fatto un ottimo lavoro. Lei è unica, più che rara.

Infine, devo ringraziare Sofia per innumerevoli cose che non sto qui a elencare. Ho lasciato lei per ultima perché si sa che il meglio arriva sempre alla fine, come il dolce. Io sono fiero di averti accanto; non so come abbia fatto a trovarti, ma per questo mi reputo fortunatissimo. È incredibile il modo in cui ti prendi cura di me anche quando non me lo merito: questa è una prova di vero amore, di un amore non scontato, non banale, di quelli che oggi sembrano sempre più rari. Io con te mi sento a casa, al sicuro. Mi hai sempre supportato, sei sempre stata presente e mi hai visto anche nei miei momenti più bui. Senza di te resterebbe soltanto la versione peggiore di me. Mi spingi a migliorare, e da quando ci sei tu sono migliorato tanto. Ricordo quello che hai scritto nei tuoi ringraziamenti: che mi prendi come punto di riferimento. Ma credo che tu ti sbagli, perché non è vero. Non puoi prendermi come punto di riferimento, perché tu vai molto più forte, tu sei migliore. Fai cose che, dette a voce, sembrano quasi impossibili, eppure tu ci riesci. Sei la più brava della coppia; io devo imparare da te, in tutto. Ti stimo per la donna che sei e per quella che stai diventando. Ti amo.



# Bibliografia

- [1] Repubblica Italiana. *Decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412: Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana. Allegato A – Classificazione climatica del territorio nazionale. 1993.
- [2] *UNI EN ISO 10456:2008 – Materiali e prodotti per l'edilizia – Proprietà igrotermiche dichiarate e di progetto – Tabelle dei valori e procedure per la determinazione dei valori termici dichiarati e di progetto*. UNI, 2008.
- [3] *UNI/TS 11300-3:2010 – Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva*. UNI, 2010.
- [4] *OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard*. OpenGIS® Encoding Standard OGC 12-019. Ver. 2.0.0. Open Geospatial Consortium, apr. 2012. URL: <http://www.opengis.net/spec/citygml/2.0>.
- [5] Repubblica Italiana. *D.P.R. 16 aprile 2013, n. 74 – Regolamento in materia di esercizio e manutenzione degli impianti termici*. G.U. n. 149 del 27 giugno 2013. Attuazione dell'art. 4, comma 1, lett. a) e c), D.Lgs. 192/2005. 2013.
- [6] Diane Perez. «A framework to model and simulate the disaggregated energy flows supplying buildings in urban areas». Thèse no. 6102. Tesi di dott. École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 2014. DOI: [10.5075/epfl-thesis-6102](https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-6102).
- [7] *UNI 9182:2014 – Impianti di alimentazione e distribuzione di acqua fredda e calda – Criteri di progettazione, collaudo e gestione*. UNI, 2014.
- [8] *UNI/TR 11552 – Abaco delle strutture costituenti l'involucro opaco degli edifici – Parametri termofisici*. UNI, 2014.
- [9] *UNI/TS 11300-1:2014 – Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale*. UNI, 2014.
- [10] Caleffi S.p.A. *Il dimensionamento degli impianti idrosanitari: vasi d'espansione e accumuli – Produzione di acqua calda sanitaria*. Fontaneto d'Agogna (NO), Italia: Caleffi S.p.A., 2015. URL: <https://www.caleffi.com>.

- [11] Ministero dello Sviluppo Economico, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare e Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. *Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*. Decreto Ministeriale 26 giugno 2015. Pubblicato nella Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 162 del 15 luglio 2015, Supplemento Ordinario n. 39; in vigore dal 1 ottobre 2015. 2015.
- [12] UNI 10349-1:2016 – 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 una superficie inclinata. UNI, 2016.
- [13] UNI 10349-3:2016 – Riscaldamento e raffrescamento degli edifici – Dati climatici – Parte 3: Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno) e altri indici sintetici. UNI, 2016.
- [14] UNI/TS 11300-4:2016 – Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria. UNI, 2016.
- [15] UNI/TS 11300-6:2016 – Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 6: Determinazione del fabbisogno di energia per ascensori, scale mobili e marciapiedi mobili. UNI, 2016.
- [16] G. Mutani et al. *CitySim Guide: Urban energy modelling*. Politecnico di Torino, EPFL (LESO-PB) e HEIA-FR. 2018.
- [17] UNI EN ISO 52016-1:2018/NA – Prestazione energetica degli edifici – Fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne di progetto e carichi termici – Allegato Nazionale. UNI, 2018.
- [18] UNI EN ISO 6946:2018 – Componenti ed elementi per edilizia – Resistenza termica e trasmittanza termica – Metodo di calcolo. UNI, 2018.
- [19] UNI EN 16798-1:2019 – Prestazione energetica degli edifici – Ventilazione degli edifici – Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici che riguardano la qualità dell'aria interna, l'ambiente termico, l'illuminazione e l'acustica. UNI, 2019.
- [20] UNI EN 16798-1:2019/NA – Prestazione energetica degli edifici – Ventilazione degli edifici – Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici che riguardano la qualità dell'aria interna, l'ambiente termico, l'illuminazione e l'acustica – Allegato Nazionale. UNI, 2019.
- [21] UNI/TS 11300-2:2019 – Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali. UNI, 2019.

- 
- [22] Martina Ferrando et al. «Urban building energy modeling (UBEM) tools: A state-of-the-art review of bottom-up physics-based approaches». In: *Sustainable Cities and Society* 62 (2020). DOI: [10.1016/j.scs.2020.102408](https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102408).
- [23] *UNI EN 12897:2020 – Scaldacqua ad accumulo in pressione (chiusi) riscaldati indirettamente – Requisiti di prestazione e metodi di prova*. UNI, 2020.
- [24] Vincenzo Corrado, Ilaria Ballarini e Matteo Piro. «Building Stock Energy Models and ICT Solutions for Urban Energy Systems». In: *Developing Smart Cities Based on Digital Twins*. Engineering Science Reference, 2021.
- [25] Repubblica Italiana. *Decreto Legislativo 8 novembre 2021, n. 199: Attuazione della direttiva (UE) 2018/2001 del Parlamento europeo e del Consiglio, dell'11 dicembre 2018, sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 285 del 30 novembre 2021, Supplemento Ordinario n. 42. Codice redazionale: 21G00214. 2021.
- [26] Ilaria Ballarini e Matteo Piro. *Guidelines to create archetypes of the building stock from EPC data*. European Union Horizon 2020 Research and Innovation Programme, Grant Agreement No. 101033819. TIMEPAC Consortium, 2024.
- [27] European Commission. *Energy Performance of Buildings Directive IV*. Consultato il 2 agosto 2025. 2024. URL: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=OJ:L\\_202401275](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401275) (visitato il giorno 02/08/2025).
- [28] Ilaria Ballarini. *Urban Reference Buildings for Energy Modelling (URBEM)*. Presentazione del progetto PRIN2020 URBEM. 26 Mar. 2025.
- [29] Città di Torino. *Geoportale della Città di Torino*. Portale cartografico istituzionale. Consultato il 26 gennaio 2026. 2025. URL: <http://geoportale.comune.torino.it/geocatalogocoto/?sezione=mappa> (visitato il giorno 26/01/2026).
- [30] Comitato Termotecnico Italiano. *Dati climatici e anni climatici tipo per la simulazione energetica*. Consultato il 13 ottobre 2025. 2025. URL: <https://try.cti2000.it/page.php?id=1> (visitato il giorno 13/10/2025).
- [31] Vincenzo Corrado. *European regulations framework on energy efficiency in buildings. Course: Energy Audit and Certification of Buildings*. Materiale didattico. Politecnico di Torino, 2025.
- [32] Mohamad Hasan Khajedei, Jacopo Vivian e Angelo Zarrella. «Identification of Italian user archetypes for building energy simulations based on a national survey». In: *Energy and Buildings* 344 (2025), p. 115924. DOI: [10.1016/j.enbuild.2025.115924](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115924).
- [33] Yang Li e Haibo Feng. «Integrating urban building energy modeling (UBEM) and urban building environmental impact assessment (UB-EIA) for sustainable urban development: A comprehensive review». In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 213 (2025). DOI: [10.1016/j.rser.2025.115471](https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115471).

- [34] Yuanli Ma et al. «The advantages and challenges of integrating archetypal building modelling for urban building energy models: A systematic review». In: *Energy and Buildings* 345 (2025), p. 116066. DOI: [10.1016/j.enbuild.2025.116066](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116066).
- [35] Regione Piemonte. *Sistema informativo per la gestione degli Attestati di Prestazione Energetica*. Portale regionale Energia Piemonte. Consultato il 26 gennaio 2026. 2025. URL: <https://energia-energiapt.piemontetu.it/fra-ept/ape> (visitato il giorno 26/01/2026).
- [36] Felix Rehmann et al. «Enhancing Urban Energy Modeling: A Case Study of Data Acquisition, Enrichment, and Evaluation in Berlin». In: *Energy and Buildings* (2025). DOI: [10.1016/j.enbuild.2025.116070](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116070).
- [37] Repubblica Italiana. *Aggiornamento dei requisiti minimi per la prestazione energetica degli edifici*. Decreto Ministeriale. Pubblicato nella Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 283 del 5 dicembre 2025. Allegato 1: Criteri generali e requisiti delle prestazioni energetiche degli edifici. 2025.
- [38] RINA Services S.p.A. *Validazione dei fattori di conversione in energia primaria del teleriscaldamento – IREN Energia S.p.A., Rete di Teleriscaldamento metropolitana di Torino*. Certificato n. PECF-015. Anno di riferimento 2024 (01/01/2024–31/12/2024). fP,nren=0,733; fP,ren=0,028; fP,tot=0,761. Data di rilascio: 01/07/2025. 2025.
- [39] Tarek Sherif et al. «Localizing urban building energy modeling (UBEM) through inclusive microclimate and socioeconomic data». In: *Applied Energy* 383 (2025). DOI: [10.1016/j.apenergy.2025.125342](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125342).
- [40] Andrew Marian Zajch et al. «Temperature–time evaluation as a tool for ‘future-proofing’ urban building energy modelling (UBEM)». In: *Energy and Buildings* 345 (2025). DOI: [10.1016/j.enbuild.2025.116033](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116033).
- [41] kaemco. *CitySim-Solver Wiki*. Consultato il 23 gennaio 2026. URL: <https://github.com/kaemco/CitySim-Solver/wiki> (visitato il giorno 23/01/2026).
- [42] Jérôme Käempfe e contributors. *CitySim-Solver (repository GitHub, commit 18cf6579106b0057c4c9)*. Consultato il 12 febbraio 2026. URL: <https://github.com/kaemco/CitySim-Solver/tree/18cf6579106b0057c4c928248ba0301fd939e677> (visitato il giorno 12/02/2026).
- [43] Open Geospatial Consortium. *CityGML*. Consultato il 20 febbraio 2026. n.d. URL: <https://www.ogc.org/standards/citygml/> (visitato il giorno 20/02/2026).
- [44] URBEM. *Database di edifici*. Sito web del progetto URBEM – Urban Reference Buildings for Energy Modelling (PRIN2020). Consultato il 27 gennaio 2026. Politecnico di Milano. n.d. URL: <https://www.urbem.polimi.it/databasededifici/> (visitato il giorno 27/01/2026).
- [45] Wikipedia. *Torino*. Consultato il 25 gennaio 2026. n.d. URL: <https://it.wikipedia.org/wiki/Torino> (visitato il giorno 25/01/2026).