# POLITECNICO DI TORINO



Corso di Laurea in Ingegneria Edile Tesi di Laurea Magistrale

Effetti del cambiamento climatico sulla prestazione energetica degli edifici. Studio di un edificio residenziale e di un palazzo uffici mediante simulazione dinamica.

Relatore:

Prof. Vincenzo Corrado

Correlatrice:

Ph.D. Mamak P.Tootkaboni

Candidate:

Michela Morigoni

Luisa Pata

#### Abstract

I cambiamenti climatici in atto stanno trasformando il nostro pianeta.

Un notevole impatto su questo fenomeno è determinato dal settore edilizio: dalla *Direttiva* 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio emerge, infatti, che gli edifici sono responsabili del 40% del consumo globale di energia.

Pertanto, è necessario fronteggiare tale fenomeno, non solo progettando edifici che si adattino al meglio a questi mutamenti, ma anche limitando quanto possibile le emissioni inquinanti, realizzando edifici a energia quasi zero.

Nella presente tesi, tali argomenti sono stati trattati analizzando due diversi casi studio di edifici esistenti: un edificio residenziale ed uno ad uso uffici; per entrambi sono state inoltre considerate tre località differenti: Milano, Roma e Palermo.

Per la simulazione del sistema edificio-impianto in regime dinamico sono stati utilizzati i software EnergyPlus e Design Builder.

A seguito di una scrupolosa applicazione della normativa vigente, i due edifici, sono stati soggetti ad un intervento di ristrutturazione importante e trasformati in edifici a energia quasi zero.

In un secondo tempo, sono stati analizzati gli effetti del cambiamento climatico sulla prestazione energetica dei due diversi fabbricati, per gli anni 2050 e 2080.

Per ultimo, è stata esaminata una delle tecniche di raffrescamento resiliente proposta nel progetto internazionale "IEA EBC Annex 80": la ventilazione notturna.

I risultati hanno confermato l'impatto del cambiamento climatico sui carichi di raffrescamento degli edifici e quantificato l'efficacia della strategia di ventilazione notturna, al variare dei parametri che la influenzano.

#### Abstract

Climate changes currently in progress on our earth are seriously turning the planet.

A great and significant impact on this phenomenon is caused by the building sector: the information published by Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council clearly reveals that buildings are responsible for about 40% of the global energy use.

Therefore, is strictly important for us to front this phenomenon, not only through building designs which suite best to these changes, but also reducing pollutant emissions as much as possible, realizing nearly zero energy buildings.

In this thesis, these topics have been covered by examining two different existing buildings' case studies: a residential building and one for office use. For both of these buildings, three different locations have been taken into account: Milan, Rome and Palermo.

The software EnergyPlus and Design Builder have been used in order to simulate the building-plant system under dynamic conditions.

As a result of a careful implementation of the current legislation, these two buildings were subjected to major renovation and turned into nearly zero energy buildings.

As a second step, climate changes' effects on the energy performance of the two buildings have been considered for the years 2050 and 2080.

Eventually, one of the resilient cooling techniques, which was proposed on the international project "IEA EBC Annex 80", have been analysed: the night ventilation.

These results have shown climate changes impact on cooling loads of buildings, and also quantified the effectiveness of the night ventilation technique, by changing its parameters.

# Sommario

1.	. In	troduzione
2.	. M	etodologia 3
3.	, Q	uadro normativo $\epsilon$
4.	. Da	ati climatici15
5.	. M	odellazione21
	5.1.	Costruzione del modello BIM21
	5.2.	Design Builder22
	5.3.	EnergyPlus25
6.	. De	escrizione generale dell'impianto26
	6.1.	Impianto di riscaldamento e raffrescamento
	6.	1.1. Cenni teorici
	6.	1.2. Modellazione27
	6.2.	Impianto fotovoltaico
	6.3	2.1. Cenni teorici29
	6.3	2.2. Modellazione29
7.	. St	rategia di raffrescamento resiliente31
	7.1.	Cenni teorici31
	7.2.	Modellazione della ventilazione notturna33
8.	. Ес	lificio ad uso residenziale $36$
	8.1.	Descrizione generale
	8.2.	Costruzione del modello
	8.3.	Edificio allo stato di fatto39

	8.3.1.	Descrizione dei componenti edili	39
	8.3.2.	Calcolo di $\mathrm{H'}_{\mathrm{T}}\mathrm{e}\mathrm{A}_{\mathrm{sol,est}}$	42
	8.3.3.	Occupazione	45
	8.3.4.	Apporti interni	46
	8.3.5.	Ventilazione	47
	8.3.6.	Infiltrazioni	48
	8.3.7.	Gestione schermature	49
	8.3.8.	Acqua calda sanitaria	49
	8.3.9.	Fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento	51
8	8.4. Ed	ificio post intervento di ristrutturazione	59
	8.4.1.	Infiltrazioni	61
	8.4.2.	Milano	62
	8.4.3.	Roma	68
	8.4.4.	Palermo	74
	8.4.5.	Confronti tra le tre città	79
8	3.5. Im	pianti	81
	8.5.1.	Impianto di riscaldamento, ACS e raffrescamento	81
	8.5.2.	Impianto fotovoltaico	83
	8.5.3.	Procedura di calcolo	85
	8.5.4.	Milano	87
	8.5.5.	Roma	91
	8.5.6.	Palermo	94
	8.5.7.	Confronti	98

	8.6. Pr	revisioni future	101
	8.6.1.	Milano	101
	8.6.2.	Roma	107
	8.6.3.	Palermo	114
	8.6.4.	Confronti	119
	8.7. Ve	entilazione notturna	121
	8.7.1.	Milano	122
	8.7.2.	Roma	129
	8.7.3.	Palermo	137
	8.7.4.	Confronti	144
9.	. Edifici	io ad uso uffici	147
	9.1. De	escrizione generale	147
	9.2. Co	ostruzione del modello	149
	9.3. Ed	dificio allo stato di fatto	151
	9.3.1 I	Descrizione dei componenti edili	151
	9.3.2 (	Calcolo di H' <sub>T</sub> e A <sub>sol,est</sub>	153
	9.3.3 (	Occupazione	156
	9.3.4 A	Apporti interni	157
	9.3.5 V	Ventilazione	158
	9.3.6 I	Fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento	158
	9.4. Ed	dificio post intervento di ristrutturazione	167
	$9.4.1 \; A$	Apporti interni e illuminazione	170
	9.4.2 N	Milano	173

	9.4.3 Roma	178
	9.4.4 Palermo	183
	9.4.5 Confronti	187
E	9.5. Impianti	189
	9.5.1 Impianto di riscaldamento e raffrescamento	189
	9.5.2 Impianto fotovoltaico	191
	9.5.3 Procedura di calcolo	193
	9.5.4 Milano	195
	9.5.5 Roma	198
	9.5.6 Palermo	201
	9.5.7 Confronti	204
ç	9.6. Previsioni future	206
	9.6.1 Milano	207
	9.6.2 Roma	212
	9.6.3 Palermo	216
	9.6.4 Confronti	220
Ö	0.7. Ventilazione notturna	222
	9.7.1 Milano	223
	9.7.2 Roma	228
	9.7.3 Palermo	236
	9.7.4 Confronti	240
10.	Conclusioni e sviluppi futuri	244
Lic	ta delle tabelle	249

Lista dei grafici	259
Lista delle figure	268
Bibliografia	269
Sitografia	273

## 1. Introduzione

L'attività umana, esercitata negli ultimi due secoli, ha provocato innumerevoli conseguenze sulle condizioni in cui versa il nostro pianeta: prima fra tutte il rapido innalzamento delle temperature a livello mondiale.

Il surriscaldamento globale, non è responsabile esclusivamente dell'innalzamento delle temperature medie, ma sta provocando, allo stesso tempo, abbassamenti delle temperature minime a livello locale, intensificazione delle ondate di calore estive, desertificazione di alcune aree, scioglimento dei ghiacciai, innalzamento e riscaldamento degli oceani e comparsa di fenomeni atmosferici estremi.

Il settore edilizio, come citato all'interno della premessa della direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, è responsabile del 40~% del consumo globale di energia nell'Unione.

Per tale motivo la stessa normativa sottolinea l'importanza di ridurre il consumo di energia negli edifici e di massimizzare l'utilizzo di fonti rinnovabili, misure che avrebbero permesso all'UE di conformarsi al protocollo di Kyoto e di andare incontro agli obbiettivi sanciti dal Consiglio europeo del marzo 2007, mantenendo l'aumento della temperatura globale al di sotto di 2 °C e riducendo entro il 2020 le emissioni globali di gas a effetto serra di almeno il 20 % al di sotto dei livelli del 1990 e del 30 %.

Successivamente, la Direttiva 2018/844/UE del Parlamento europeo e del Consiglio evidenzia l'importanza di stabilire dei piani nazionali, utili a perseguire l'obbiettivo a lungo termine di ridurre, entro il 2050, le emissioni di gas a effetto serra nell'Unione dell'80-95 % rispetto al 1990.

All'interno del contesto appena descritto, nasce la L'EBC Annex 80, un progetto di ricerca internazionale sul "Resilient Cooling for Buildings", che in vista di un aumento della domanda della climatizzazione estiva all'interno degli edifici, causata dall'aumento delle

temperature, si occupa di studiare soluzioni atte a raffrescare gli edifici, basate sul concetto di sostenibilità.

Infatti, lo scopo della presente tesi è quello di analizzare gli effetti del cambiamento climatico sulla prestazione energetica degli edifici e di valutare la prestazione di una delle strategie di raffrescamento resiliente proposte all'interno dell'EBC Annex 80: la ventilazione notturna.

Poiché la presente indagine ha per oggetto due casi studio di edifici esistenti, sono stati studiati tutti i principi relativi alla riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente che, come noto, è responsabile di gran parte delle emissioni di CO<sub>2</sub> in atmosfera. Di conseguenza, il lavoro svolto, ha avuto inizio dalle analisi condotte nei riguardi dei due edifici allo stato di fatto, che sono stati successivamente riqualificati e di cui è stata valutata la prestazione energetica, prendendo in considerazione, non solo gli scenari climatici presenti, ma anche quelli futuri a breve (2050) e lungo termine (2080).

Per eseguire queste analisi sono state effettuate simulazioni di tipo dinamico su entrambi gli edifici e sono state selezionate tre località appartenenti a diverse zone climatiche italiane: Milano, Roma e Palermo.

Nei capitoli successivi sono stati ampiamente descritti gli studi condotti: i primi capitoli contengono delle nozioni generali valide per entrambi i casi studio e per le quali hanno collaborato entrambe le candidate; il capitolo 8 è stato redatto da Michela Morigoni, e riguarda il caso studio di un edificio residenziale; infine, il capitolo 9, elaborato da Luisa Pata, tratta il caso studio dell'edificio adibito a uffici.

## 2. Metodologia

Il presente capitolo descrive le principali fasi dello studio condotto e la metodologia generale adottata, che ha permesso di ottenere i risultati discussi e riportati negli opportuni capitoli, per l'edificio residenziale<sup>1</sup> e la palazzina uffici<sup>2</sup>, rispettivamente per le città di Milano, Roma e Palermo.

I due edifici analizzati sono entrambi esistenti e, per tale ragione, la prima fase dello studio condotto, ha riguardato l'analisi dello stato di fatto di ciascun fabbricato e la raccolta dei dati che li caratterizzano: geometria, materiali, orientamento, aspetti funzionali, occupazione, ventilazione, illuminazione e apporti interni.

Dopo aver reperito tali informazioni, entrambi gli edifici sono stati modellati su Revit e successivamente esportati su Design Builder; infine, le simulazioni di tipo dinamico sono state eseguite tramite EnergyPlus, così come verrà ampiamente descritto nel capitolo 5. In particolare, la creazione del modello BIM, ha permesso di ricavare in maniera speditiva le quantità necessarie per la valutazione del coefficiente medio globale di scambio termico e dell'area solare equivalente specifica; in questa fase, tali parametri sono stati utili per identificare quale fosse la performance dell'involucro opaco e trasparente.

Successivamente, sono stati determinati i fabbisogni di raffrescamento e riscaldamento, mensili ed annuali degli edifici allo stato di fatto, in assenza e presenza di ponti termici. Dopo aver ottenuto questi primi risultati, è stato possibile progettare la riqualificazione dei fabbricati esaminati al fine di renderli edifici a energia quasi zero. Tale trasformazione è avvenuta tramite un intervento di ristrutturazione importante di primo livello, in relazione alle indicazioni contenute all'interno della normativa vigente, riportata al capitolo 3, e facendo riferimento a schede tecniche di materiali presenti in commercio.

I valori limite di trasmittanza termica suggerite dalla normativa, per i componenti opachi e trasparenti costituenti il fabbricato, sono strettamente correlati alle zone climatiche di

3

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Capitolo 8, a cura di Michela Morigoni

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Capitolo 9, a cura di Luisa Pata

appartenenza; pertanto, per ogni caso studio è stato necessario procedere alla modellazione di tre differenti edifici post ristrutturazione, uno per ogni città.

In seguito, tramite i nuovi dati caratterizzanti l'edificio, è stato possibile calcolare nuovamente i valori del coefficiente medio globale di scambio termico e dell'area solare equivalente specifica e, in questo secondo caso, dopo aver verificato che i valori limite previsti dal DM 26/06/2015 fossero rispettati, sono stati effettuati dei confronti con i valori relativi allo stato di fatto, al fine di valutare l'entità dei miglioramenti ottenuti tramite l'intervento di ristrutturazione.

Ulteriori comparazioni sono state effettuate per i valori dei fabbisogni termici ottenuti per entrambi gli edifici, prima e dopo la ristrutturazione, e anche in questo secondo caso, sia mensili che annuali.

Una delle fasi principali che ha caratterizzato la presente ricerca, è stata quella che ha riguardato il dimensionamento e la modellazione degli impianti di riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria e fotovoltaico, esclusivamente per i fabbricati post ristrutturazione. Il dimensionamento degli stessi risulta conforme alla normativa vigente e tiene conto di impianti realmente disponibili in commercio; il tutto verrà discusso dettagliatamente nel capitolo 6 di pertinenza.

La modellazione degli impianti ha permesso di ricavare, oltre ai fabbisogni termici degli edifici stessi, ulteriori risultati, tra cui i consumi, gli indici di prestazione energetica per ogni servizio energetico considerato per l'edificio e il coefficiente RER (Renewable Energy Ratio).

I fabbisogni termici e i consumi elettrici relativi all'edificio nZEB, ottenuti utilizzando i dati climatici forniti dal Comitato Termotecnico Italiano, sono stati in seguito confrontati con i risultati conseguiti, utilizzando gli stessi edifici, ma dati climatici differenti, previsti per gli anni futuri.

È necessario specificare che, i risultati ricavati tramite l'utilizzo dei dati relativi agli anni metereologici tipici 2050 e 2080, sono stati applicati all'edificio ristrutturato secondo le

normative vigenti e provvisto di un impianto di riscaldamento e raffrescamento, dimensionato per soddisfare i fabbisogni termici, calcolati tramite l'utilizzo dei dati climatici presenti (CTI).

L'ultima fase della ricerca ha avuto per oggetto lo studio di una delle tecniche di raffrescamento resiliente proposta dal progetto di ricerca internazionale "IEA EBC Annex 80": la ventilazione notturna.

Entrambi gli edifici sono stati soggetti all'applicazione di tale strategia, sia tramite ventilazione naturale, sia tramite l'ausilio di un impianto meccanico.

In seguito alla modellazione delle strategie di ventilazione notturna, ne è stato valutato l'effetto sui consumi elettrici previsti per il fabbisogno di raffrescamento, per il tempo presente (tramite i dati climatici forniti dal CTI) e per gli anni tipici metereologici 2050 e 2080 e per tutte le città considerate.

## 3. Quadro normativo

La presente tesi si è occupata di rendere nZEB due edifici di differente destinazione d'uso, residenziale e ad uso uffici, tramite un intervento di ristrutturazione importante di primo livello, per studiarne il comportamento negli anni futuri.

L'Allegato 1 del Decreto Ministeriale del 26/05/2015 definisce la ristrutturazione importante di primo livello come un "Intervento che interessa gli elementi e i componenti integrati costituenti l'involucro edilizio delimitanti un volume a temperatura controllata dall'ambiente esterno e da ambienti non climatizzati, con un'incidenza superiore al 50 per cento della superficie disperdente lorda complessiva dell'edificio e comporta il rifacimento dell'impianto termico per il servizio di climatizzazione invernale e/o estiva asservito all'intero edificio".

La necessità di costruire edifici ad alta prestazione energetica era già stata introdotta all'interno della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica degli edifici, imponendo agli Stati Membri di agire affinché:

- a) entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione fossero edifici a energia quasi zero;
- b) a partire dal 31 dicembre 2018 gli edifici di nuova costruzione occupati da enti pubblici e di proprietà di questi ultimi fossero edifici a energia quasi zero.

La presente Direttiva definisce un edificio nZEB come "«edificio a energia quasi zero»: edificio ad altissima prestazione energetica, determinata conformemente all'allegato I. Il fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili, compresa l'energia da fonti rinnovabili prodotta in loco o nelle vicinanze."

L'introduzione a livello europeo della Direttiva~2010/31/UE ha segnato l'avvio di un nuovo iter legislativo intrapreso in Italia a partire dalla pubblicazione del DL~63/13 poi convertito dalla Legge~90/13. La Legge~90/13 è stata a sua volta completata con la

pubblicazione dei decreti attuativi contenuti nel DM 26/6/2015 riguardanti i seguenti 3 argomenti:

- Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici (conosciuto come Decreto Requisiti Minimi);
- 2) Schemi e modalità di riferimento per la compilazione della relazione tecnica di progetto ai ni dell'applicazione delle prescrizioni e dei requisiti minimi di prestazione energetica negli edifici;
- 3) Adeguamento del decreto del Ministero dello sviluppo economico 26 Giugno 2009\_Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici.

Le disposizioni dei decreti attuativi della Legge 90/13 si applicano alle Regioni e alle Province autonome che non hanno ancora adottato provvedimenti di recepimento della Direttiva 2010/31/UE. Le Regioni che hanno già recepito la direttiva europea hanno due anni di tempo per uniformarsi ai provvedimenti nazionali.

A tal proposito, per il caso in esame, si è proceduto con la ristrutturazione degli edifici di partenza, agendo sui componenti edilizi dei fabbricati e modificandone le trasmittanze termiche, rispettando i valori limite dei parametri caratteristici del fabbricato dell'edificio di riferimento, imposti dal  $DM \ 26/06/2015$ .

Di seguito sono riportati i parametri limite a cui è stato fatto riferimento:

Zona climatica	U (W/m <sup>2</sup> K)			
Zona ciimatica	2015	2019/2021		
A e B	0.45	0.43		
С	0.38	0.34		
D	0.34	0.29		
E	0.30	0.26		
F	0.28	0.24		

Tabella 3-1: Trasmittanza termica U delle strutture opache verticali, verso l'esterno, gli ambienti non climatizzati o
contro terra

	Zona climatica	$\mathrm{U}\;(\mathrm{W/m^2K})$			
		2015	2019/2021		
	A e B	0.38	0.35		
	C	0.36	0.33		
	D	0.30	0.26		
	E	0.25	0.22		
	F	0.23	0.20		

Tabella 3-2: Trasmittanza termica U delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura, verso l'esterno e gli ambienti non climatizzati

	$\mathrm{U}\;(\mathrm{W/m^2K})$			
Zona climatica	2015	2019/2021		
A e B	0.46	0.44		
$\mathbf{C}$	0.40	0.38		
D	0.32	0.29		
E	0.30	0.26		
F	0.28	0.24		

 $Tabella \ 3-3: \ Trasmittanza \ termica \ U \ delle \ opache \ orizzontali \ di \ pavimento, \ verso \ l'esterno, \ gli \ ambienti \ non$   $climatizzati \ o \ contro \ terra$ 

Zana alimatica	$\mathrm{U}\;(\mathrm{W/m^2K})$			
Zona climatica	2015	2019/2021		
A e B	3.20	3.00		
$\mathbf{C}$	2.40	2.20		
D	2.00	1.80		
E	1.80	1.40		
F	1.50	1.10		

Tabella 3-4: Trasmittanza termica U delle chiusure tecniche trasparenti e opache e dei cassonetti, comprensivi degli infissi, verso l'esterno e verso ambienti non climatizzati

7	U (W/m²K)		
Zona climatica	2015	2019/2021	
Tutte le zone	0.8	0.8	

 $Tabella \ 3-5: \ Trasmittanza \ termica \ U \ \overline{delle \ strutture \ opache \ verticali \ e \ orizzontali \ di \ separazione \ tra \ edifici \ o \ unità \\ immobiliari \ confinanti$ 

Nel caso di strutture rivolte verso il terreno, i valori delle pertinenti tabelle devono essere confrontati con i valori della trasmittanza termica equivalente calcolati in base alle UNI EN ISO 13370.

I valori di trasmittanza delle precedenti tabelle si considerano comprensive dell'effetto dei ponti termici.

Per i componenti finestrati si assume il fattore di trasmissione globale di energia solare attraverso i componenti finestrati ggl+sh riportato in Tabella 6, in presenza di una schermatura mobile.

Zona	climatica	$g_{ m gl+sh}$			
Zona		2015	2019/2021		
Tutte	e le zone	0.35	0.35		

Tabella 3-6: Valore del fattore di trasmissione solare totale ggl+sh per componenti finestrati con orientamento da Est a Ovest passando per Sud.

Inoltre, l'Allegato 1 del DM 26/06/2015 stabilisce che "sono "edifici a energia quasi zero" tutti gli edifici, siano essi di nuova costruzione o esistenti, per cui sono contemporaneamente rispettati:

- tutti i requisiti previsti dalla lettera b), del comma 2, del paragrafo 3.3,
- gli obblighi di integrazione delle fonti rinnovabili nel rispetto dei principi minimi di cui all'Allegato 3, paragrafo 1, lettera c), del decreto legislativo 3 marzo 2011, n. 28."

Perciò, di seguito sono stati elencati i requisiti da rispettare affinchè un edificio possa essere considerato a energia quasi zero:

 Il valore di H'<sub>T</sub> deve essere inferiore al valore massimo ammissibile riportato nella seguente tabella, in base alla zona climatica di appartenenza e del rapporto di forma S/V.

DADDODTO DI EODMA (C/V)	Zona climatica				
RAPPORTO DI FORMA (S/V)	A e B	С	D	E	F
S/V > 0.7	0.58	0.55	0.53	0.50	0.48
0.7 > S/V > 0.4	0.63	0.60	0.58	0.55	0.53
0.4 > S/V	0.80	0.80	0.80	0.75	0.70

Tabella 3-7: Valore massimo ammissibile del coefficiente globale di scambio termico H'T [W/m²K]

Per tale verifica si calcola il coefficiente medio globale di scambio termico  $H'_T$  come:

$$H'_{T} = \frac{H_{tr,adj}}{\sum_{k} A_{k}} \left[ W/(m^{2}K) \right]$$

Dove:

- $H_{tr,adj}$  è il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione dell'involucro calcolato con la UNI/TS 11300-1 [W/K];
- $A_k$  è la superficie del k-esimo componente (opaco o trasparente) costituente l'involucro  $[m^2]$ .
- 2) Il parametro Asol, est/Asup utile deve risultare inferiore al corrispondente valore limite riportato nella seguente tabella:

Categoria edificio	Tutte le zone climatiche
Categoria E.1 fatta eccezione per collegi, conventi, case di pena, caserme nonché per la categoria E.1(3)	$\leq 0.030$
Tutti gli altri edifici	$\leq 0.040$

Tabella 3-8: Valore massimo ammissibile del rapporto tra area solare equivalente estiva dei componenti finestrati e l'area della superficie utile Asol, est/Asup utile [-]

L'area equivalente estiva Asol, est dell'edificio è calcolata come sommatoria delle aree equivalenti estive di ogni componente vetrato k:

$$A_{sol,est} = \sum_{k} F_{sh,ob} \cdot g_{gl+sh} \cdot (1 - F_F) \cdot A_{w,p} \cdot F_{sol,est}[m^2]$$

#### Dove:

- F<sub>sh,ob</sub> è il fattore di riduzione per ombreggiatura relativo ad elementi esterni per l'area di captazione solare effettiva della superficie vetrata k—esima, riferito al mese di luglio;
- $g_{gl+sh}$  è la trasmittanza di energia solare totale della finestra calcolata nel mese di luglio, quando la schermatura solare è utilizzata;
- F<sub>F</sub> è la frazione di area relativa al telaio, rapporto tra l'area proiettata del telaio e l'area proiettata totale del componente finestrato;
- A<sub>w,p</sub> è l'area proiettata totale del componente vetrato (area del vano finestra);
- F<sub>sol,est</sub> è il fattore di correzione per l'irraggiamento incidente, ricavato come rapporto
  tra l'irradianza media nel mese di luglio, nella località e sull'esposizione considerata,
  e l'irradianza media annuale di Roma, sul piano orizzontale.
- 3) Le efficienze degli impianti devono risultare superiori ai valori delle corrispondenti efficienze indicate per l'edificio di riferimento.

Le efficienze medie limite del complesso dei sottosistemi di utilizzazione (emissione/erogazione, regolazione, distribuzione e dell'eventuale accumulo) sono definite nella seguente tabella.

Efficienza dei sottosistemi di utilizzazione $\eta u$	Н	С	W
Distribuzione idronica	0.81	0.81	0.70
Distribuzione aeraulica	0.83	0.83	-
Distribuzione mista	0.82	0.82	-

Tabella 3-9:Efficienze medie ηu dei sottosistemi di utilizzazione dell'edificio di riferimento per i servizi di H, C, W

Le efficienze medie dei sottosistemi di generazione sono definite nella seguente tabella.

	Produ	zione di e	energia	Produzione di energia	
Sottosistemi di generazione:		termica		elettrica in	
	Н	$\mathbf{C}$	W	situ	
Pompa di calore a compressione di vapore con	3.00	(*)	2.50	_	
motore elettrico		()			

<sup>(\*)</sup> Per pompe di calore che prevedono la funzione di raffrescamento di considera lo stesso valore delle macchine frigorifere della stessa tipologia

Le efficienze indicate nelle tabelle soprastanti sono comprensive dell'effetto dei consumi di energia elettrica ausiliaria.

4) Gli indici EPH,nd, EPC,nd e EPgl,tot devono inferiori ai valori dei corrispondenti indici limite calcolati per l'edificio di riferimento.

Per il caso in esame, non è stato utilizzato un edificio di riferimento con il quale realizzare dei confronti, ma sin da subito si è intervenuti affinchè gli edifici casi studio, a seguito dell'intervento di ristrutturazione rilevante, possedessero i parametri relativi al fabbricato e all'impianto migliorativi rispetto a quelli imposti dal  $DM \ 26/06/2015$ , così che l'edificio finale già rispettasse i requisiti imposti.

Nonostante non sia stata effettuata alcuna verifica dei predetti indici di prestazione, questi sono stati comunque calcolati.

Ai fini della determinazione di tali indici, si effettua il calcolo sia dell'energia primaria totale che dell'energia primaria non rinnovabile, ottenute applicando i pertinenti fattori di conversione in energia primaria totale  $f_{P,tot}$  e in energia primaria non rinnovabile  $f_{P,nren}$ . Il fattore di conversione in energia primaria totale  $f_{P,tot}$  è pari a:

$$f_{P,tot} = f_{P,nren} + f_{p,ren}$$

Tabella 3-10: Efficienze medie  $\eta gn$  dei sottosistemi di generazione dell'edificio di riferimento per la produzione di energia termica per i servizi di H, C, W e per la produzione di energia elettrica in situ.

Dove:

- $f_{P,nren}$  corrisponde al fattore di conversione in energia primaria non rinnovabile;
- f<sub>P,ren</sub> corrisponde al fattore di conversione in energia primaria rinnovabile.

Ai fini del soddisfacimento di quanto specificato, i fattori di conversione in energia primaria sono pari a quelli riportati in tabella, in funzione del vettore energetico utilizzato.

Vettore energetico	<sup>f</sup> P,nren	<sup>f</sup> P,ren	P,tot			
Energia elettrica da rete (3)	1.95	0.47	2.42			
Energia elettrica prodotta da fotovoltaico, mini-eolico e mini-idraulico <sup>(5)</sup>	0	1.00	1.00			
Energia termica dall'ambiente esterno – pompa di calore $^{(5)}$	0	1.00	1.00			
(3) I valori saranno aggiornati ogni due anni sulla base dei dati forniti da GSE.						

<sup>(5)</sup> Valori convenzionali funzionali al sistema di calcolo.

Tabella 3-11: Fattori di conversione in energia primaria dei vettori energetici

- 5) Per entrambi gli edifici è stata eseguita almeno una delle seguenti verifiche, relativamente a tutte le pareti verticali opache con l'eccezione di quelle comprese nel quadrante nord-ovest/nord/nord-est:
  - i. che il valore della massa superficiale Ms sia superiore a 230 kg/m<sup>2</sup>;
  - ii. che il valore del modulo della trasmittanza termica periodica  $Y_{IE}$  sia inferiore a  $0.10 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;

Inoltre, è stato verificato che, relativamente a tutte le pareti opache orizzontali e inclinate, il valore del modulo della trasmittanza termica periodica  $Y_{\rm IE}$ , fosse inferiore a  $0.18~{\rm W/m^2K}$ ;

6) Infine, sono stati osservati gli obblighi di integrazione delle fonti rinnovabili secondo i principi minimi e le decorrenze di cui all'Allegato 3, del decreto legislativo 3 marzo 2011, n. 28.

Il Decreto Legislativo 3 marzo 2011, n. 28. prevede che, nel caso di edifici nuovi o edifici sottoposti a ristrutturazioni rilevanti, gli impianti di produzione di energia termica devono essere progettati e realizzati in modo da garantire il contemporaneo rispetto della copertura, tramite il ricorso ad energia prodotta da impianti alimentati da fonti

rinnovabili, del 50% dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria e delle seguenti percentuali della somma dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria, il riscaldamento e il raffrescamento:

- a) il 20 per cento quando la richiesta del pertinente titolo edilizio è presentata dal 31 maggio 2012 al 31 dicembre 2013;
- b) il 35 per cento quando la richiesta del pertinente titolo edilizio è presentata dal 1° gennaio 2014 al 31 dicembre 2016;
- c) il 50 per cento quando la richiesta del pertinente titolo edilizio è rilasciato dal 1° gennaio 2017.

Nel caso di edifici nuovi o edifici sottoposti a ristrutturazioni rilevanti, la potenza elettrica degli impianti alimentati da fonti rinnovabili che devono essere obbligatoriamente installati sopra o all'interno dell'edificio o nelle relative pertinenze, misurata in kW, è calcolata secondo la seguente formula:

$$\mathbf{P} = -\frac{1}{K} \cdot \mathbf{S}$$

Dove:

- a. S è la superficie in pianta dell'edificio al livello del terreno, misurata in m<sup>2</sup>,
- b. K è un coefficiente [m<sup>2</sup>/kW] che assume i seguenti valori:
  - i. K = 80, quando la richiesta del pertinente titolo edilizio è presentata dal 31 maggio 2012 al 31 dicembre 2013;
  - ii. K = 65, quando la richiesta del pertinente titolo edilizio è presentata dal 1° gennaio 2014 al 31 dicembre 2016;
  - iii. K = 50, quando la richiesta del pertinente titolo edilizio è presentata dal 1° gennaio 2017.

In caso di utilizzo di pannelli solari termici o fotovoltaici disposti sui tetti degli edifici, i predetti componenti devono essere aderenti o integrati nei tetti medesimi, con la stessa inclinazione e lo stesso orientamento della falda.

#### 4. Dati climatici

Al fine di valutare la prestazione energetica degli edifici NZEB in scenari futuri di cambiamento climatico, sono state selezionate tre località appartenenti a diverse zone climatiche italiane: Milano, Roma e Palermo e tre differenti periodi temporali: il presente, il 2050 e il 2080.

Ad ogni periodo temporale considerato corrisponde un file climatico, che in realtà è composto da dati orari riferiti ad anni tipo climatici, che tengono conto di un periodo pluriennale e che contengono record orari delle variabili meteorologiche.

I dati climatici relativi al periodo attuale sono stati ricavati dal sito ufficiale del Comitato Termotecnico Italiano.

Il CTI, in collaborazione con ENEA UTEE nell'ambito della Ricerca di Sistema promossa dal MSE, ha infatti reso disponibile il download degli archivi XLS contenenti i dati orari degli anni tipo climatici di tutte le Province italiane, realizzati utilizzando il modello di calcolo della norma UNI EN ISO 15927-4:2005 "Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data - Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling".

Gli archivi, consultabili e scaricabili gratuitamente, consistono in 12 mesi caratteristici selezionati da un database di dati meteorologici, realmente misurati, di un periodo di almeno 10 anni e contengono record orari delle variabili meteorologiche: temperatura, irradianza solare globale su piano orizzontale, umidità relativa e velocità del vento.

Invece, i dati climatici relativi agli anni futuri sono stati ricavati tramite l'applicazione del metodo dinamico, utilizzando modelli climatici regionali.

In questo studio, il modello climatico regionale utilizzato è GERICS-REMO-2015, per il quale i dati sono stati scaricati dal punto di ingresso EURO-CORDEX attraverso la Earth System Grid Federation (ESGF) per il dominio dell'Europa su una griglia di 0,11° (equivalente a una griglia di 12,5 km).

Il formato disponibile per questi dati è NetCDF4, un formato di file per l'archiviazione di dati scientifici multidimensionali.

L'estrazione dei dati per i casi-studio (città di Milano, Roma e Palermo) è stata eseguita tramite il software Cordex Data Extractor, che permette di trovare il punto dati più vicino alla latitudine e longitudine desiderate.

Lo scenario RCP 8,5 è stato adattato per estrarre questi dati per il periodo 2041-2060 (2050) e 2081-2100 (2080).

MPI-M-MPI-ESM-LR è il modello trainante di questo studio, in quanto, secondo il rapporto IPCC, è ben supportato sulla valutazione dei modelli climatici.

È stata utilizzata la metodologia della norma EN ISO 15927-4 (2005), con l'obiettivo di creare un anno meteorologico tipico futuro dai dati estratti di 20 anni.

In effetti, questa norma internazionale riguarda la selezione di dati meteorologici appropriati per la valutazione del consumo medio di energia a lungo termine per il riscaldamento e il raffreddamento.

L'anno meteorologico tipico (TMY) è costituito da 12 mesi rappresentativi (Best Months) provenienti da record pluriennali. I Best Months vengono selezionati attraverso il confronto della Funzione di Distribuzione Cumulativa dell'anno singolo e di riferimento, attraverso le statistiche FinkelsteinSchafer (FS).

Tale metodo è stato utilizzato in questo studio, poiché i criteri per la selezione del "Best Month" non sono limitati semplicemente alla temperatura dell'aria a bulbo secco, ma tengono conto anche dell'irraggiamento solare globale, dell'umidità relativa e della velocità del vento.

L'analisi dei dati climatici relativi agli anni futuri 2050 e 2080 per le tre città in esame, ha permesso di elaborare alcune considerazioni sull'entità del cambiamento climatico a cui sarà soggetto nei prossimi anni il nostro pianeta.

Dai grafici di seguito riportati, relativi agli andamenti delle temperature medie mensili per ogni città e ogni anno tipico metereologico preso in considerazione, emerge un reale aumento delle temperature con il passare degli anni e, di conseguenza, il verificarsi di inverni ed estati più caldi.

Mentre questo comportamento è riscontrabile per ogni mese dell'anno 2080, l'anno 2050 presenta alcune singolarità: in prevalenza a Milano e a Roma, in alcuni mesi, le temperature medie mensili dell'anno 2050 diminuiscono rispetto a quelle dell'anno attuale di riferimento, piuttosto che aumentare.

	CTI	20	50	20	080
	[°C]	[°C]	[%]	$[^{\circ}C]$	[%]
Gennaio	4.0	4.7	19%	7.4	85%
Febbraio	7.1	6.8	-4%	7.6	7%
Marzo	10.6	10.3	-3%	12.0	13%
Aprile	13.4	13.2	-2%	17.2	28%
Maggio	19.4	18.6	-4%	20.8	8%
Giugno	22.8	23.6	3%	25.9	14%
Luglio	24.5	27.0	10%	27.7	13%
Agosto	24.3	24.1	-1%	27.2	12%
Settembre	19.8	20.6	4%	23.8	20%
Ottobre	14.1	16.9	19%	19.7	40%
Novembre	7.5	10.1	34%	12.0	59%
Dicembre	3.5	5.7	63%	7.4	109%

Tabella 4-1: Valori medi di temperatura per la città di Milano, per gli anni metereologici tipici CTI 2050 e 2080

	CTI	2050		2080	
	[°C]	[°C]	[%]	$[^{\circ}C]$	[%]
Gennaio	8.0	8.4	5%	10.6	33%
Febbraio	9.0	9.5	6%	11.8	32%
Marzo	11.4	11.6	2%	14.0	22%
Aprile	15.8	14.5	-8%	16.9	6%
Maggio	19.2	18.7	-2%	20.0	5%
Giugno	22.5	23.4	4%	26.1	16%
Luglio	26.3	28.1	7%	30.7	17%

```
      Agosto
      26.5
      25.5
      -4%
      32.7
      24%

      Settembre
      21.6
      23.5
      9%
      27.1
      26%

      Ottobre
      17.7
      19.9
      12%
      22.7
      28%

      Novembre
      12.6
      12.9
      3%
      15.0
      19%

      Dicembre
      8.6
      10.0
      16%
      11.7
      36%
```

Tabella 4-2: Valori medi di temperatura per la città di Roma, per gli anni metereologici tipici CTI 2050 e 2080

	CTI	20	2050		80
	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	[%]	$[^{\circ}C]$	[%]
Gennaio	11.7	13.2	12%	15.9	35%
Febbraio	11.3	14.1	24%	16.1	42%
Marzo	13.4	15.1	13%	16.3	22%
Aprile	16.6	17.5	6%	19.5	18%
Maggio	20.1	19.8	-2%	22.4	12%
Giugno	23.9	24.2	2%	27.9	17%
Luglio	26.9	26.7	-1%	30.2	12%
Agosto	27.0	27.5	2%	30.3	12%
Settembre	23.9	24.7	4%	28.2	18%
Ottobre	20.6	21.8	6%	23.0	12%
Novembre	16.6	17.3	4%	19.3	16%
Dicembre	12.9	14.8	15%	17.0	32%

Tabella 4-3: Valori medi di temperatura per la città di Palermo, per gli anni metereologici tipici CTI 2050 e 2080

Infine, dai grafici sotto riportati, relativi alla variazione dei valori medi di irradianza globale su piano orizzontale durante gli anni tipici metereologici e per ogni città, emerge una diminuzione di tali valori, rispetto a quelli relativi all'anno attuale di riferimento (CTI).

Tale decrescita non risulta però progressiva negli anni: in alcuni mesi del 2080 infatti, il valore di irradianza risulta maggiore rispetto a quella relativa al 2050.

	CTI	205	2050		80
	$[\mathrm{W/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	[%]	$[\mathrm{W/m^2}]$	[%]
Gennaio	57.6	47.6	-17%	43.2	-25%
Febbraio	86.3	74.9	-13%	79.4	-8%
Marzo	137.3	125.9	-8%	133.1	-3%
Aprile	186.0	161.6	-13%	156.0	-16%
Maggio	221.0	215.9	-2%	222.6	1%
Giugno	264.9	240.8	-9%	256.9	-3%
Luglio	269.6	259.9	-4%	253.8	-6%
Agosto	220.4	202.8	-8%	215.6	-2%
Settembre	173.8	139.7	-20%	148.9	-14%
Ottobre	92.0	88.9	-3%	83.7	-9%
Novembre	48.7	53.4	10%	52.0	7%
Dicembre	42.0	32.2	-23%	33.5	-20%

Tabella 4-4: Valori medi di irradianza globale su piano orizzontale per la città di Milano, per gli anni metereologici tipici CTI 2050 e 2080

	CTI	205	2050		0
	$[\mathrm{W/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	[%]	$[\mathrm{W/m^2}]$	[%]
Gennaio	73.3	64.8	-12%	57.8	-21%
Febbraio	104.5	86.4	-17%	97.0	-7%
Marzo	154.8	128.3	-17%	155.7	1%
Aprile	215.9	175.2	-19%	191.5	-11%
Maggio	249.0	222.6	-11%	233.9	-6%
Giugno	295.6	264.4	-11%	243.3	-18%
Luglio	319.8	271.9	-15%	264.1	-17%
Agosto	264.7	231.3	-13%	232.4	-12%
Settembre	196.0	159.1	-19%	165.2	-16%
Ottobre	135.3	103.5	-24%	112.0	-17%
Novembre	81.6	66.4	-19%	63.3	-22%
Dicembre	69.4	45.1	-35%	47.0	-32%

Tabella 4-5: Valori medi di irradianza globale su piano orizzontale per la città di Roma, per gli anni metereologici tipici CTI 2050 e 2080

	CTI	205	2050		0
	$[\mathrm{W/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	[%]	$[\mathrm{W/m^2}]$	[%]
Gennaio	85.5	72.0	-16%	81.6	-5%
Febbraio	107.4	97.1	-10%	110.3	3%
Marzo	168.8	159.5	-6%	152.0	-10%
Aprile	207.3	200.6	-3%	196.7	-5%
Maggio	258.3	228.8	-11%	238.8	-8%
Giugno	278.7	247.3	-11%	231.0	-17%
Luglio	283.8	246.0	-13%	269.3	-5%
Agosto	246.4	234.4	-5%	241.6	-2%
Settembre	187.1	179.2	-4%	183.5	-2%
Ottobre	147.1	121.8	-17%	126.1	-14%
Novembre	104.4	79.7	-24%	84.7	-19%
Dicembre	76.4	55.4	-28%	64.4	-16%

Tabella 4-6: Valori medi di irradianza globale su piano orizzontale per la città di Palermo, per gli anni metereologici tipici CTI 2050 e 2080

## 5. Modellazione

Una delle fasi essenziali per l'analisi delle prestazioni energetiche dei due edifici analizzati è stata la costruzione dei modelli, mediante il quale sono state effettuate le simulazioni energetiche dinamiche.

I calcoli sono stati effettuati tramite l'utilizzo del software *EnergyPlus*, il quale permette di svolgere simulazioni energetiche dinamiche, ma non consente agli utenti di avere una restituzione grafica dei dati caratterizzanti gli edifici.

Il problema è stato risolto utilizzando un secondo software, *Design Builder*, che costituisce una delle interfacce grafiche compatibili *con EnergyPlus*.

Design Builder permette di creare un modello geometrico molto semplice, assemblando in modo opportuno più blocchi, stabilendo il posizionamento delle aperture e disegnando le partizioni che delimitano le diverse zone.

La metodologia appena descritta consente di ottenere un modello molto semplice e adatto a valutare le prestazioni energetiche degli edifici, tuttavia è stato ritenuto opportuno costruire un modello BIM (Building Information Modeling), esportato successivamente su Design Builder.

#### 5.1. Costruzione del modello BIM

La creazione di un modello BIM è ormai essenziale all'interno dell'intero processo di progettazione, tuttavia nel caso in esame, il modello costruito su *Revit*, è stato utile soprattutto per l'ottenimento di informazioni geometriche e dimensionali che su Design Builder erano ottenibili in modo più laborioso.

Pertanto, il modello costruito su *Revit*, non è stato utilizzato esclusivamente per effettuare l'esportazione su *Design Builder*, ma anche per ricavare una serie di quantità necessarie per effettuare i calcoli che verranno riportati negli opportuni paragrafi.

Prendendo in considerazione gli scopi appena descritti, si è scelto di adottare un livello di dettaglio LOD B (Level Of Detail), che ha consentito di modellare ogni elemento con la

propria forma e dimensione, ma senza associargli alcun tipo di informazione riguardante i materiali e le stratigrafie, che al contrario, sono state inserite su *Design Builder*.

Nonostante nel modello BIM non siano state inserite le informazioni relative ai materiali che costituiscono i componenti edili, agli stessi è stata associata una codifica che tenesse conto della stratigrafia, e in aggiunta, contenesse l'informazione sulla funzione dell'elemento a cui è stata associata (separazione tra esterno e locale riscaldato, tra esterno e locale non riscaldato, e tra locale riscaldato e non riscaldato)

I dati dimensionali dei singoli componenti, unitamente alla codifica descritta precedentemente, hanno assunto fondamentale importanza nella lettura degli abachi, viste di progetto sotto forma di tabelle contenenti tutti gli elementi del modello, che hanno consentito di ricavare le quantità desiderate (in particolare le aree dei componenti) e associate alle diverse tipologie di elementi tecnici.

La fase finale della costruzione del modello su *Revi*t è stata l'assegnazione dei locali ai singoli ambienti, operazione necessaria per l'esportazione del modello su *Design Builder*. Infatti, l'esportazione è avvenuta tramite un file gbXML, che consente in funzione dei volumi dei locali creati precedentemente, di ottenere su *Design Builder* elementi architettonici di separazione tra una zona e l'altra.

Un modello ottenuto come appena descritto non è dotato di tutte le informazioni necessarie per una simulazione energetica (localizzazione, dati climatici, proprietà termiche dei componenti, aspetti funzionali dei locali, occupazione, ventilazione, apporti interni, schermature solari, illuminazione, impianti), di conseguenza queste sono state inserite direttamente su *Design Builder*, ed è stato così ottenuto un modello BEM (Building Energy Model) partendo da un modello BIM.

## 5.2. Design Builder

La creazione del modello geometrico all'interno di *Design Builder* è stata effettuata tramite l'esportazione da *Revit* di un file gbXML, che ha consentito di ottenere soltanto elementi

geometrici come muri, solai, finestre e porte, e rilevare informazioni come l'orientamento dell'edificio, pertanto, la fase di modellazione all'interno di *Design Builder*, ha permesso di affiancare ai dati geometrici, tutte le informazioni utili all'ottenimento dei risultati finali.

Il modello ottenuto tramite la metodologia appena descritta risulta costituito da più zone (aree circoscritte da muri o partizioni), raggruppate in blocchi (ogni blocco rappresenta un piano); l'insieme di tutti i blocchi costituisce l'intero edificio.

Questa classificazione ha assunto una fondamentale importanza durante l'inserimento delle informazioni nel modello, in quanto, in funzione della tipologia di dato, è stato possibile scegliere se associarlo all'intero edificio, al blocco o alla singola zona.

Una delle informazioni inserite a livello generale, e quindi valida per l'intero edificio, è la località, e di conseguenza le coordinate di latitudine, longitudine e altitudine del luogo considerato per la simulazione.

Per quanto riguarda gli altri dati, il software permette di inserirli raggruppandoli principalmente in 6 categorie:

- 1. Attività;
- 2. Costruzione;
- 3. Aperture;
- 4. Illuminazione;
- 5. HVAC;
- 6. Generazione.

All'interno della categoria "Attività" è stato possibile definire dei template in funzione della destinazione d'uso delle singole zone, all'interno dei quali le informazioni più importanti hanno riguardato:

- 1. il numero di occupanti;
- 2. l'attività metabolica;
- 3. il vestiario;

- 4. il setpoint di temperatura desiderato all'interno;
- 5. la ventilazione;
- 6. l'illuminazione desiderata;
- 7. gli apporti interni dovuti ad apparecchiature.

La scheda "Costruzioni" è stata compilata sia a livello di blocco, che di singole zone, a seconda dell'elemento costruttivo considerato, in quanto in questa sezione è stato possibile assegnare a muri, solai e porte, una stratigrafia precedentemente definita.

Ogni stratigrafia è stata definita assemblando materiali creati in precedenza, caratterizzati da valori di conducibilità termica, calore specifico e densità.

Inoltre, ad ogni elemento costruttivo, è stata assegnata una precisa unità tecnologica, in funzione della quale il software ha adoperato gli adeguati valori di resistenza termica superficiale esterna e interna per il calcolo della trasmittanza termica.

Infine, nella scheda "Costruzioni" è stato possibile associare ai ponti termici esistenti lungo l'intersezione tra muro e solaio, muro e telaio o allo spigolo di pareti, i valori di trasmittanza termica lineare.

All'interno della categoria "Aperture" è stato possibile definire varie tipologie di infisso, associando ad ogni elemento vetrato i valori di trasmittanza termica del vetro e del telaio, dimensioni del telaio, fattore solare e trasmissione luminosa.

La scheda "HVAC" è stata utilizzata per selezionare le zone all'interno delle quali mantenere attivo l'impianto di riscaldamento e raffrescamento.

Le altre informazioni riguardanti gli impianti sono state inserite su *EnergyPlus* o eseguendo una modellazione dettagliata descritta successivamente nel *capitolo 6*: *EnergyPlus* è stato adottato per ricavare i fabbisogni, la modellazione dettagliata per ottenere i consumi dell'impianto ipotizzato.

La stessa scheda "HVAC" è stata utilizzata anche per inserire le informazioni relative alla ventilazione naturale.

Infine, la scheda "Generazione" è stata adoperata per definire vari tipi di generatori elettrici: nel caso in esame è stata utilizzata per la modellazione di pannelli fotovoltaici. Inoltre, durante la fase iniziale di modellazione, è stato necessario definire gli ambienti a contatto con il terreno, informazione che non è stato possibile rilevare da Revit: tale operazione è stata effettuata modellando il terreno a contatto con l'edificio tramite elementi chiamati "Blocco componenti".

Il presente paragrafo si è occupato di descrivere in maniera generica alcune delle fasi di modellazione eseguite, le quali, successivamente, verranno descritte in modo più dettagliato negli opportuni paragrafi previsti per l'edificio residenziale e la palazzina uffici.

## 5.3. EnergyPlus

Dopo la creazione del modello BEM, la totalità dei risultati è stata ottenuta tramite EnergyPlus, un programma open source sviluppato da Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti (DOE), che permette di effettuare le simulazioni energetiche dinamiche.

Il file esportato da *Design Builder* è un file in formato ".idf" e contiene tutti i dati di input che il software elabora per ottenere gli output.

Il software utilizza una semplice interfaccia grafica, *EP-Launch*, dove sono elencati tutti i dati di input suddivisi in apposite sezioni e inseriti precedentemente su *Design Builder*, che possono essere modificati o aggiunti anche direttamente su *EnergyPlus*.

Infine, all'interno della sezione "Output: Table: Summary Reports" è stato possibile scegliere da una lista predefinita gli output da stampare, mentre all'interno della sezione "Output: Variable", sono state inserite le didascalie contenute all'interno del documento "Input Output Reference", che rappresentano tutte le tipologie di output ottenibili da una simulazione dinamica energetica: nel primo caso è stato ottenuto un file HTML, nel secondo un file CSV, grazie al quale è stato possibile analizzare i risultati.

## 6. Descrizione generale dell'impianto

Una delle parti fondamentali della ricerca condotta ha avuto per oggetto lo studio approfondito del sistema impiantisco degli edifici caso studio.

Dapprima è stato scelto un opportuno impianto di riscaldamento e di raffrescamento, in modo da soddisfare i requisiti imposti dal DM 26/06/2015 e successivamente si è proceduto con la modellazione degli stessi tramite il software Design Builder.

Analogamente è stato fatto per il sistema fotovoltaico.

## 6.1. Impianto di riscaldamento e raffrescamento

#### 6.1.1. Cenni teorici

Per la produzione di energia di riscaldamento e raffrescamento, si è scelto il generatore termico a pompa di calore aria-acqua, in quanto, integrato all'installazione di moduli fotovoltaici, consente un maggior impiego del vettore elettrico nella climatizzazione dell'edificio, nel rispetto delle quote di energia rinnovabile obbligatorie per le nuove costruzioni.

I sistemi di riscaldamento e raffrescamento con pompa di calore sono un'alternativa ecologica al riscaldamento tradizionale, perché utilizzano fonti energetiche rinnovabili e gratuite: in particolare, la pompa di calore aria-acqua sottrae energia dalla sorgente aria esterna, per trasferirla internamente alla struttura da climatizzare, alla temperatura stabilita.

L'impiego e il rendimento di questo tipo di impianto, basato sull'utilizzo di fonti rinnovabili, risulta però, strettamente legato alle caratteristiche climatiche del sito in esame, oltre che alla richiesta energetica dell'edificio.

L'efficienza di una pompa di calore è misurata infatti dal coefficiente di prestazione "COP" (Coefficient of Performance) dato dal rapporto tra l'energia resa e l'energia elettrica consumata: al variare delle condizioni esterne varierà il valore di tale coefficiente e di conseguenza il consumo elettrico.

Il funzionamento di una pompa di calore è dato dalla presenza di un circuito chiuso al cui interno è presente un fluido refrigerante soggetto a cambiamenti di stato ciclici, che precisamente passa dalla fase liquida a quella vaporizzata e viceversa.

Il compressore di una pompa di calore crea la differenza di pressione che permette al ciclo termodinamico di funzionare: esso aspira il fluido refrigerante attraverso l'evaporatore, dove il fluido stesso evapora a bassa pressione assorbendo calore, lo comprime e lo spinge all'interno del condensatore dove il fluido condensa ad alta pressione rilasciando il calore assorbito. Dopo il condensatore, il fluido attraversa la valvola di laminazione che lo porta in condizione liquido/vapore, riducendo la pressione del fluido, e successivamente rientra nell'evaporatore ricominciando il ciclo.

La pompa di calore rappresenta una soluzione vantaggiosa in quanto lavora con una maggiore efficienza a bassa temperatura: per questo nel caso in esame verrà abbinata a dei ventilconvettori ad acqua che lavorano a 45°C nel periodo invernale e a 7°C in quello estivo.

#### 6.1.2. Modellazione

Per modellare l'impianto si è scelto di utilizzare la modalità *HVAC dettagliata* presente su Design Builder, la quale permette di realizzare uno schema idraulico composto da singoli elementi disponibili sul software, collegati tra loro al fine di riprodurre al meglio il comportamento reale dell'impianto.

L'impianto da riprodurre è stato quello di una pompa di calore che si occupasse sia del riscaldamento, sia del raffrescamento: per fare ciò si è scelto di utilizzare una pompa di calore elettrica aria-acqua a ciclo invertibile, che alimentasse dei ventilconvettori ad acqua. Per modellare questo tipo di impianto è stato necessario attuare una schematizzazione del caso reale; poiché il software dispone di un generatore a pompa di calore aria-acqua che può essere utilizzato solo per il funzionamento di riscaldamento, al fine di riprodurre il comportamento di una pompa di calore a ciclo invertibile si è scelto di unire due diversi

template: una pompa di calore aria-acqua con serbatoio integrato per riscaldamento e produzione di ACS ed un chiller per il raffrescamento, assunzione valida poiché quest'ultimo generatore sfrutta lo stesso principio di funzionamento di una pompa di calore.

La scelta da scheda tecnica del modello di pompa di calore dalla quale estrapolare i dati da inserire sul software è dipesa dal valore di carico massimo invernale ed estivo espresso in Watt richiesto dall'edificio in assenza di impianti, dalle temperature di mandata da soddisfare e dai valori limite delle efficienze relative all'impianto dei sottosistemi di generazione e di utilizzo, imposte dal DM 26/06/2015.

In merito a queste ultime limitazioni, è bene specificare che, per quanto riguarda il valore di COP pari a 3 lato generazione per l'impianto di riscaldamento e pari a 2.5 lato generazione per l'impianto di raffrescamento, ci si è avvicinati il più possibile a quest'ultimi valori, non sempre rispettandoli, ma scegliendo di utilizzare piuttosto valori relativi a pompe di calore effettivamente presenti in commercio, che garantissero la potenza in Watt pari al carico massimo nelle condizioni nominali del macchinario.

Inoltre, per quanto riguarda la limitazione sul valore minimo di efficienza dei sottosistemi di utilizzo dell'impianto pari a 0.81, sia di riscaldamento, sia di raffrescamento, si è tenuto conto di quest'ultima inglobandola nel valore di efficienza dei sottosistemi di generazione, riducendo in modo opportuno la COP della pompa di calore e l'EER del chiller.

Per modellare in maniera dettagliata l'impianto, è stato necessario inserire nel software, oltre alle informazioni relative a capacità nominale e relativa efficienza, i valori delle temperature dei componenti principali di una pompa di calore: evaporatore, condensatore e compressore.

Infine, la durata del periodo di riscaldamento è stata imposta secondo il D.P.R. 26/08/1993, n. 412, in base alla zona climatica in questione, mentre il periodo di raffrescamento è stato considerato complementare a quello di riscaldamento.

Città	Zona climatica	Periodo di accensione		
Milano	E	15 ottobre - 15 aprile		
Roma	D	1° novembre - 15 aprile		
Palermo	В	1° dicembre - 31 marzo		

Tabella 6-1: Periodo di accensione degli impianti di riscaldamento (D.P.R. 26/08/1993)

# 6.2. Impianto fotovoltaico

#### 6.2.1. Cenni teorici

Ad oggi, come previsto dal *D.Lgs. 3 marzo 2011, n. 28*, gli impianti di produzione di energia termica degli edifici realizzati o ristrutturati in base a titoli abilitativi presentati dal 1° gennaio 2018 devono essere progettati e realizzati in modo da garantire il contemporaneo rispetto della copertura, tramite il ricorso ad energia prodotta da impianti alimentati da fonti rinnovabili, del 50% dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria e del 50% della somma dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria, il riscaldamento e il raffrescamento.

Inoltre, nel caso di edifici sottoposti a ristrutturazioni rilevanti, la potenza elettrica degli impianti alimentati da fonti rinnovabili che devono essere obbligatoriamente installati sopra, all'interno dell'edificio o nelle relative pertinenze, misurata in kW, deve essere calcolata secondo la formula indicata nel D.Lqs.~3~marzo~2011,~n.~28.

# 6.2.2. Modellazione

Dapprima, i pannelli sono stati dimensionati e successivamente creati e posizionati opportunamente come elemento "Collettore Solare-Fotovoltaico" su Design Builder.

Successivamente sono state associate all'elemento le prestazioni e le proprietà del pannello, ricavate da scheda tecnica.

Le impostazioni per la generazione di elettricità sono state invece definite a livello di edificio nella scheda "Generazione" sotto l'intestazione "Generazione Elettricità On Site".

Per fare questo, è stato creato un centro di carico elettrico ed è stato associato al rispettivo modulo fotovoltaico: i centri di carico elettrici sono componenti utilizzati per includere generatori di elettricità on site in una simulazione; tramite questi elementi è possibile definire la quantità di elettricità generata.

Tutti i generatori collegati ad uno specifico centro di carico devono essere dello stesso tipo: nel caso in esame si sono scelti generatori a corrente continua, per i quali è stato necessario inserire un inverter che convertisse la corrente continua in corrente alternata.

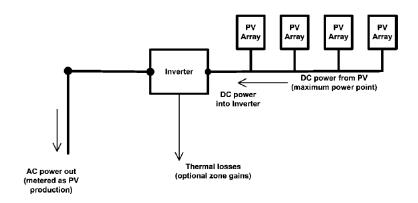


Figura 6-1: Schema di conversione di corrente continua in corrente alternata

Infatti, i centri di carico a corrente continua con inverter producono corrente continua in base alla disponibilità di luce solare, poi attraverso l'inverter quest'ultima viene convertita in corrente alternata: l'uscita AC dell'inverter è ciò che viene registrato come produzione di elettricità.

# 7. Strategia di raffrescamento resiliente

# 7.1. Cenni teorici

Il mondo sta affrontando un rapido aumento della climatizzazione degli edifici. Ciò è determinato da molteplici fattori, come l'urbanizzazione e la densificazione, i cambiamenti climatici e le elevate aspettative di comfort insieme alla crescita economica nelle regioni climatiche calde e densamente popolate del mondo. La tendenza al raffrescamento sembra inevitabile, quindi è obbligatorio guidare questo sviluppo verso soluzioni sostenibili.

In questo contesto si inserisce L'EBC Annex 80: un progetto di ricerca internazionale sul "Resilient Cooling for Buildings". Tale progetto è stato lanciato nel giugno 2019 e coprirà una fase di lavoro di tre anni fino a giugno 2022, si concluderà con una fase di rendicontazione di un anno (fino a giugno 2023).

L'obiettivo principale dell'Annex 80 è sostenere una rapida transizione verso un ambiente in cui i sistemi di raffrescamento resilienti siano le soluzioni per i problemi di raffrescamento e surriscaldamento negli edifici.

Il raffrescamento resiliente viene utilizzato per indicare soluzioni di raffrescamento a bassa energia e basse emissioni di carbonio, che aumentino la capacità della nostra comunità a resistere e anche prevenire gli impatti termici e di altro tipo dei cambiamenti nei climi globali e locali. A tal fine, comprende la valutazione e la ricerca e sviluppo delle tecnologie di raffrescamento sia attive che passive.

Tra le strategie di raffrescamento resiliente, nella presente tesi, ci si occuperà di valutare il risparmio in termini di consumo elettrico, in seguito all'applicazione della ventilazione notturna.

La ventilazione notturna funziona utilizzando la ventilazione, naturale o meccanica, per raffreddare le superfici del tessuto dell'edificio durante la notte: il calore assorbito dall'edificio durante il giorno viene rilasciato all'interno degli ambienti di notte, la ventilazione notturna sfrutta poi l'aria fresca esterna per raffreddare la massa termica esposta dell'edificio, la quale così funzionerà da dissipatore di calore nel giorno successivo.

La ventilazione notturna può avvenire naturalmente, cioè attraverso le aperture dell'edificio, oppure meccanicamente, attraverso l'istallazione di un apposito impianto di ventilazione.

La ventilazione notturna naturale può aumentare notevolmente il risparmio energetico, tuttavia l'efficienza di questa tecnica è influenzata dall'interdipendenza dei parametri ambientali: il flusso d'aria è variabile e casuale e dipende dalle differenze di pressione dovute al vento e di temperatura tra l'ambiente interno ed esterno, perciò non è facile da controllare come la ventilazione notturna meccanica. Infine, risulta una tecnica strettamente legata al posizionamento e alla quantità di componenti finestrati.

Per entrambi gli edifici in esame, è stata scelta un'opportuna percentuale di apertura dei componenti vetrati e uno slot orario di attivazione di tale strategia, in funzione della destinazione d'uso dell'edificio.

All'interno del periodo di attivazione sono stati poi inseriti dei controlli sulla temperatura esterna, permettendo l'ingresso di aria esterna solo quando quest'ultima risulta ad una temperatura minore rispetto a quella interna.

Per quanto riguarda la ventilazione con mezzi meccanici, questa avviene tramite l'uso di ventilatori che immettono un flusso costante di aria esterna in ambiente, senza provvedere al raffreddamento di questa.

Per entrambi gli edifici in esame, è stato scelto di garantire 5 ricambi d'aria tramite ventilazione notturna meccanica nelle ore di attivazione, impostando dei controlli sulla temperatura esterna massima (in base al valore di temperatura di setpoint interna) e permettendo l'ingresso di aria esterna solo quando quest'ultima risulta ad una temperatura minore di 1°C rispetto a quella interna.

Il periodo di attivazione è stato scelto per ogni città sulla base dell'andamento delle temperature esterne nelle ore notturne del mese in cui la richiesta di raffrescamento risulta massima e dell'anno in cui le temperature sono maggiori: è stato selezionato lo slot orario che presentava al suo interno temperature favorevoli allo sfruttamento di questo tipo di

strategia e che più volte si presentava all'interno del mese stesso, al fine di ottenerne il massimo dei benefici, riducendo al più i consumi elettrici di ventilazione.

Dunque, i parametri che entrano in gioco durante la fase di progettazione della ventilazione notturna, in funzione della tipologia (naturale o meccanica), sono molteplici:

- 1. condizioni climatiche:
  - temperature;
  - velocità del vento;
  - differenza di pressione tra interno e esterno;
- 2. parametri legati alla strategia adottata:
  - tasso di ricambio d'aria;
  - orario di attivazione;
  - presenza di controlli termostatici;
- 3. parametri legati alla tipologia di edificio:
  - massa termica;
  - apporti interni;
  - orientamento;
  - percentuale di aperture;
  - presenza di schermature solari.

Al fine di indagare il potenziale di raffrescamento delle tecniche di ventilazione notturna, sono state effettuate analisi per entrambi gli edifici casi studio, confrontando il comportamento di tali edifici nelle tre differenti località (Milano, Roma e Palermo) e per i tre anni tipici metereologici presi in esame (CTI, 2050 e 2080).

# 7.2. Modellazione della ventilazione notturna

La strategia di ventilazione notturna è stata applicata agli edifici in esame tramite l'utilizzo di Design Builder.

Per quanto riguarda la ventilazione naturale notturna, quest'ultima è stata modellata secondo l'approccio di "Ventilazione calcolata" disponibile sul software.

Tale impostazione permette di considerare la ventilazione naturale sulla base della percentuale di apertura dei componenti vetrati definita dall'utente, calcolando i tassi di ventilazione naturale che possono essere raggiunti con una particolare configurazione.

Per la ventilazione naturale calcolata, la modalità di controllo definisce il modo in cui i componenti vetrati esterni vengono aperti e chiusi in base alla temperatura dell'aria esterna, tramite un programma di funzionamento in cui viene definito il periodo di attivazione della strategia: tutti i componenti vetrati della zona vengono aperti della percentuale imposta, durante il solo periodo di attivazione e solo se la temperatura esterna è minore rispetto a quella esterna.

Per modellare la ventilazione notturna meccanica si è scelto, invece, di utilizzare la modalità "Ventilazione programmata", in cui la portata d'aria è definita per ciascuna zona in termini di un valore massimo di ricambi d'aria e viene garantita e controllata da un programma di funzionamento definito dall'utente.

In Design Builder, in realtà, questo tipo di impostazione è associata alla modellazione di una ventilazione di tipo naturale, ma si adegua correttamente al caso in esame, in quanto ha permesso di impostare i controlli termici sull'aria in ingresso che altrimenti non sarebbe stato possibile imporre con la modellazione della ventilazione meccanica prevista dal software.

Infatti, tramite la modalità programmata, è stato possibile definire per ogni zona dell'edificio un programma di funzionamento che prevedesse i ricambi d'aria minimi diurni e notturni relativi al mantenimento della qualità dell'aria e, durante il solo periodo di raffrescamento, i 5 ricambi d'aria desiderati nelle ore notturne stabilite.

Per il periodo in cui è stata prevista l'attivazione di ventilazione meccanica notturna è stata imposta una restrizione sul funzionamento di questa, quando la temperatura esterna supera una temperatura di setpoint stabilita, e permettendo l'ingresso di aria esterna solo

quando quest'ultima risulta ad una temperatura minore di almeno 1°C rispetto a quella interna.

# 8. Edificio ad uso residenziale

# 8.1. Descrizione generale

L'analisi è stata svolta assumendo come caso di studio la "Casa Vivaldi", descritta nella UNI EN 12831:2006.

La "Casa Vivaldi" è un edificio residenziale semi-indipendente composto da un piano fuori terra e un seminterrato. Il piano terreno è rialzato di 0,5 m dal livello del suolo e ospita un soggiorno, una cucina, un bagno, un WC, tre camere da letto, un atrio, un atrio di ingresso e il vano scala che lo collega al piano sottostante.

Il soggiorno ha un pavimento su intercapedine, mentre il resto del piano terreno si trova sopra il seminterrato. Nel seminterrato vi sono una cantina e un garage non riscaldati e un locale hobby riscaldato.

La parete ovest del soggiorno è a contatto con la casa adiacente.

Di seguito vengono riportate le piante dell'edificio, dove è possibile visualizzare anche l'orientamento della costruzione, e una tabella contenente i principali dati geometrici relativi al volume riscaldato, calcolati utilizzando le misure esterne.

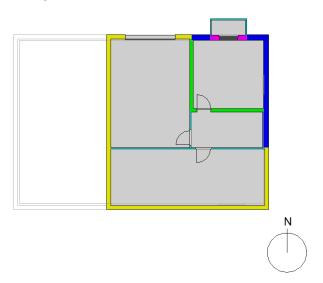


Figura 8-1: Pianta del piano seminterrato

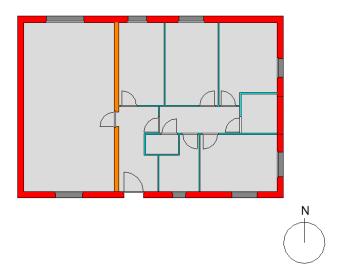
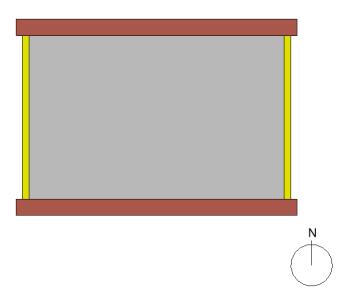


Figura 8-2: Pianta del piano terra



 $Figura \ 8\text{-}3\text{:}\ Pianta\ del\ piano\ sottotetto$ 

Caratteristica	Simbolo	Unità di misura	Valore
Volume lordo climatizzato	$V_1$	$\mathrm{m}^3$	359
Superficie utile climatizzata	$A_{\mathrm{f}}$	$\mathrm{m}^2$	102
Superficie dell'involucro disperdente	$A_{\mathrm{env}}$	$\mathrm{m}^2$	377
Superficie dell'involucro edilizio trasparente	$A_{ m w}$	$\mathrm{m}^2$	12
Rapporto di forma	S/V	$\mathrm{m}^{\text{-}1}$	1.05

Tabella 8-1: Dati geometrici relativi al volume riscaldato

Poiché lo studio effettuato non si è basato sulla posizione reale dell'edificio, non è stato preso in considerazione un contesto urbano ben preciso, di conseguenza, non è stato valutato alcun contributo di ombreggiamento dovuto ad edifici attorno.

Successivamente verranno descritti nel dettaglio i parametri relativi all'involucro e all'utenza, che caratterizzano il caso studio dell'edificio residenziale.

# 8.2. Costruzione del modello

La metodologia generale utilizzata per la modellazione è stata quella ampliamente descritta nel Capitolo 5.

Come precedentemente accennato, dapprima è stato realizzato un modello geometrico realizzato su Revit, successivamente è stato esportato su Design Builder tramite un file gbXML, il quale ha permesso di visualizzare gli elementi geometrici come muri, solai, finestre e porte e rilevare informazioni come l'orientamento dell'edificio.

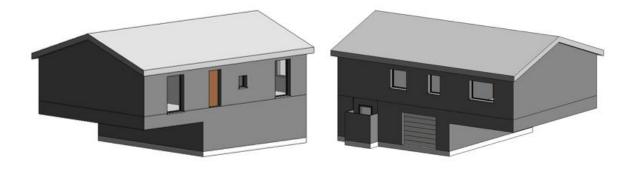


Figura 8-4: Modello di Revit

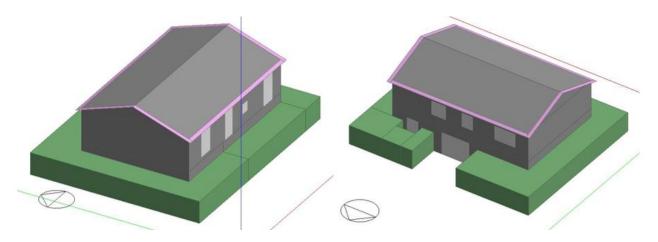


Figura 8-5: Modello di Design Builder

È utile specificare che, per il solo caso studio residenziale, poichè la parete ovest del soggiorno è a contatto con la casa adiacente, al fine di simulare questa condizione, senza modellare l'edificio adiacente, nella scheda "Costruzione" è stato possibile rendere adiabatica tale parete, selezionando la voce "Adiabatica" sotto l'impostante "Adiacenza".

# 8.3. Edificio allo stato di fatto

I paragrafi che seguono descrivono in modo dettagliato alcuni dei parametri relativi ad involucro ed utenza, che caratterizzano l'edificio prima dell'intervento di riqualificazione. Tramite i dati di input, che verranno riportati successivamente, è stato possibile ricavare i fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento che, insieme ai valori della trasmittanza termica globale e dell'area solare equivalente riportati di seguito, costituiscono alcuni dei parametri utilizzati per confrontare il comportamento dell'edificio prima e dopo l'intervento di ristrutturazione importante di primo livello.

# 8.3.1. Descrizione dei componenti edili

Per quanto riguarda l'involucro opaco, si è fatto riferimento alla descrizione della stratigrafia riportata nella documentazione tecnica disponibile sul caso studio.

Le pareti perimetrali esterne, a contatto con i locali riscaldati, di spessore complessivo pari a 29 cm, sono costituite da muratura in laterizio e isolate internamente; le pareti perimetrali esterne a contatto con i locali non riscaldati sono, invece, prive di isolamento. Le pareti a contatto con il terreno sono rivestite esternamente con uno strato di bitume. La prevalenza di partizioni verticali è composta da due lastre di gesso con un'intercapedine d'aria.

In tabella sono riportate le caratteristiche termofisiche dei componenti opachi verticali: spessore, trasmittanza termica, massa termica superficiale e trasmittanza termica periodica.

Ad ogni tipologia di elemento è stato associato un codice e un colore corrispondente a quello delle piante riportate al paragrafo 8.1.

Codice	Colore	Descrizione	$\mathbf{s}$	U	m	$Y_{ie}$
			[cm]	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{kg/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
$CV_1\_SDF$		Parete esterna isolata	29.0	0.433	255	0.204
$CV_3\_SDF$		Parete esterna non isolata	23.2	2.107	292	1.318
$CV\_32\_SDF$		Parete esterna locale hobby (verso terra)	27.2	0.733	293	0.309
CV_33_SDF		Parete esterna locale hobby (verso l'intercapedine)	25.0	0.725	255	0.240
P_11_SDF		Partizioni interne	6.0	1.868	18	0.732
P_13_NR_SDF		Partizioni interne verso non riscaldato	14.0	0.742	125	0.513
P_1_SDF		Partizione interna soggiorno	22.0	1.763	268	0.907

Tabella 8-2: Caratteristiche dei componenti opachi verticali

Per quanto riguarda i componenti opachi orizzontali, i solai del piano terra e del piano interrato sono entrambi costituiti da un doppio strati di calcestruzzo, al cui interno si trova del polisterene. Il soffitto del piano terra è realizzato mediante una lastra in lana di roccia, intonacata all'intradosso. Il solaio di copertura, infine, è costituito da una soletta a due falde, in laterocemento, sulla quale è posato un manto di impermeabilizzazione in bitume. Le porte sono realizzate in legno.

Le stesse caratteristiche termofisiche, precedentemente introdotte, sono contenute nella successiva tabella per i componenti orizzontali.

Codice	Descrizione	s	U	m	Yie
		[cm]	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{kg/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
F_16_SDF	Soffitto del piano terreno	9.0	0.469	16	0.578
F_17_SDF	Pavimento del piano terreno (verso non riscaldati)	27.0	0.480	398	0.272
F_17_SDF_LH	Pavimento del piano terreno (verso locale hobby)	27.0	0.500	398	0.272
F_35_SDF	Pavimento del piano interrato (locali non riscaldati)	24.2	0.525	400	0.223
$F_35\_SDF\_LH$	Pavimento del piano interrato (locale hobby)	24.2	0.525	400	0.223
R_36_SDF	Copertura inclinata	26.2	0.670	478	0.501

Tabella 8-3: Caratteristiche dei componenti opachi orizzontali

L'abbinamento dei colori ad ogni stratigrafia si è rilevata particolarmente utile durante la fase di associazione delle stratigrafie ad ogni elemento del modello, in quanto Design Builder fornisce una restituzione grafica come quella mostrata nell'immagine sottostante, utile a verificare che l'operazione sia stata eseguita in modo corretto.

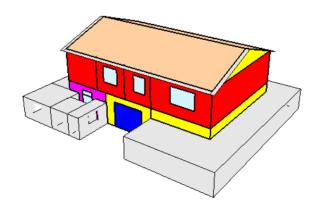


Figura 8-6: Restituzione grafica del modello di Design Builder

Infine, le tabelle sottostanti contengono tutti i dati necessari a caratterizzare l'involucro trasparente: area e trasmittanza termica del vetro e del telaio, perimetro del vetro, trasmittanza termica lineare, fattore solare, trasmissione luminosa e trasmittanza termica dell'intero serramento.

I serramenti, sia finestre, sia porte vetrate, sono realizzati con un doppio vetro con intercapedine di 12 mm d'aria e telaio in legno.

Sono, inoltre, presenti schermature solari quali veneziane di colore chiaro sul lato esterno di tutti i serramenti dei piani fuori terra, gestite tramite un setpoint impostato sul valore di incidenza solare pari a  $300~{\rm W/m^2}$ .

Codice	$A_{\mathrm{g}}$	$A_{\mathrm{f}}$	$A_{\mathrm{w}}$	$ m U_g$	$\mathrm{U_{f}}$	1	ψ	$\mathrm{U}_{\mathrm{w}}$
	$[m^2]$	$[m^2]$	$[m^2]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	[m]	[W/mK]	$[\mathrm{W/m^2K}]$
W01	1.07	0.31	1.38	1.800	2.100	4.70	0.08	2.140
W02	0.77	0.27	1.04	1.800	2.100	4.10	0.08	2.194
W03	1.68	0.39	2.07	1.800	2.100	5.90	0.08	2.085
W04	0.27	0.17	0.44	1.800	2.100	2.66	0.08	2.396
W05	2.13	0.45	2.58	1.800	2.100	6.70	0.08	2.060
W06	1.53	0.41	1.94	1.800	2.100	6.10	0.08	2.115
W07	2.33	0.46	2.80	1.800	2.100	6.90	0.08	2.047

Tabella 8-4: Caratteristiche dei componenti trasparenti

Codice	$g_{\rm gl,n}$	$g_{\rm gl+sh}$	$\tau_{\rm v}$
	[-]	[-]	[-]
W01	0.74	0.26	0.73
W02	0.74	0.26	0.73
W03	0.74	0.26	0.73
W04	0.74	0.26	0.73
W05	0.74	0.26	0.73
W06	0.74	0.26	0.73
W07	0.74	0.26	0.73

Tabella 8-5: Parametri solari dei componenti trasparenti

# 8.3.2. Calcolo di H' $_{\rm T}$ e $A_{\rm sol,est}$

#### Calcolo di H'<sub>T</sub>

Le trasmittanze termiche dei componenti elencati precedentemente, unitamente ai dati geometrici, sono state utilizzate per ricavare il coefficiente medio globale di scambio termico H'<sub>T</sub>.

Per il calcolo di  $H_U$  sono stati considerati i quattro ambienti non climatizzati: il garage, la cantina, il sottotetto e il vano scala.

Per il calcolo di H<sub>G</sub> sono stati considerati due diversi casi:

- Pavimento su vespaio aerato per il solaio del soggiorno;
- Pavimento controterra per il locale hobby, che si trova nel piano seminterrato.

Il valore di H'<sub>T</sub> è stato calcolato in due situazioni differenti: assenza e presenza di ponti termici; di conseguenza, è stato necessario definire le tipologie di ponti termici da valutare prendendo in considerazione i nodi tra le varie stratigrafie.

Per quanto riguarda il calcolo dei ponti termici, in questa fase, questi sono stati ricavati dalla documentazione fornita per il caso studio residenziale; però, poiché tali valori si riferivano a misure interne, sono stati successivamente trasformati nel loro equivalente in misure esterne, utilizzando la seguente formula:

$$A_i \cdot U + \psi_i \cdot l_i = A_e \cdot U + \psi_e \cdot l_e$$

Per il calcolo del valore di trasmittanza termica lineare relativa al ponte termico GF7 è stata applicata l'equazione presente nell'articolo scientifico "A building thermal bridges sensitivity analysis", che ha permesso di calcolare il valore relativo a tale nodo in modo più accurato.

Tipo	Codice	Ponte termico	ψi	ψe
			$[\mathrm{W/mK}]$	$[\mathrm{W/mK}]$
	42A	Angolo parete esterna isolata locale hobby	0.01	-0.36
	47A	Parete esterna isolata-Parete interna (verso garage)	0.01	-0.09
	48A	Parete esterna isolata-Parete interna (versoscala)	0.01	-0.09
	62A	Perimetro serramenti	0.12	-
	23B	Parete esterna-Soffitto piano terra	0.33	0.28
	GF7*	Parete esterna isolata -Pavimento locale hobby	-	-0.49
	01A	Angolo parete esterna isolata piano terra	0.01	-0.24
	04A-B	Parete esterna isolata piano terra - Partizioni verticali	0.13	0.10
1	05A-B	Parete esterna isolata piano terra - Partizioni verticali (vano scala)	0.13	0.10
	63 A	Perimetro portefinestre	0.13	-
	61 A	Perimetro porte	0.12	-
	03A	Angolo parete cucina	0.20	0.11
	03A	Angolo parete atrio	0.20	0.11
	02A	Angolo parete soggiorno (verso casa adiacente)	0.01	-0.21
	23B	Parete esterna isolata piano terra - Soffitto locale hobby	0.33	0.20
	12A- 13A	Parete esterna isolata piano terra - Soffitto piano terra	0.33	0.29
	22B	Parete esterna isolata piano terra - Pavimento piano terra	0.33	0.21
	29C	Partizioni isolate - Pavimento/Soffitto (verso scala e verso garage)	0.10	-0.04
	42A	Angolo partizione interna isolata (verso garage)	0.01	-0.20
	65A	Porta interna locale hobby (verso scale)	0.12	-
0	29A	Partizione scala-Pavimento camera 2 (verso scala)	0.04	-0.09
2	30A	Partizione scala-Pavimento atrio e camera 3	0.04	-0.09
	30A	Partizione scala - Soffitto piano terra (verso scala)	0.04	-0.14
	65A	Porta interna atrio (verso scale)	0.12	-
	22A	Parete esterna isolata - Pavimento piano terra (verso vespaio)	0.33	0.19

	23A	Partizione soggiorno - Pavimento piano terra (verso vespaio)	0.33	0.19
	12B	Parete esterna isolata piano terra - Soffitto piano terra (verso sottotetto)	0.33	0.19
	64A	Perimetro porta garage	0.12	-
3	12A	Parete esterna scale - Soffitto piano terra - Copertura (verso scale)	0.33	0.29

Tabella 8-6: Valori di trasmittanza termica lineare dei ponti termici

Nella precedente tabella, i ponti termici sono stati raccolti in base alla loro tipologia:

- 1: ponti termici presenti tra volume climatizzato ed esterno;
- 2: ponti termici presenti tra volume climatizzato e volume non climatizzato;
- 3: ponti termici presenti tra volume non climatizzato ed esterno.

Nelle seguenti tabelle vengono riportati i risultati parziali più significativi e i valori di H'<sub>T</sub> per le tre località e per le differenti tipologie di modello analizzate.

Città	${ m H_d}$	$\mathrm{H_{u}}$	${ m H_g}$	${ m H_{tr}}$	S/V	$\mathrm{H'}_{\mathrm{T}}$	$\mathrm{H'_{T,lim}}$
	[W/K]	[W/K]	[W/K]	[W/K]	$[m^{-1}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
Milano	110	74	27	211	1.05	0.56	0.50
Roma	110	74	27	211	1.05	0.56	0.53
Palermo	110	74	27	211	1.05	0.56	0.58

Tabella 8-7: Calcolo del coefficiente medio globale di scambio termico in assenza di ponti termici

Città	$\mathrm{H_{d}}$	$\mathrm{H}_{\mathrm{u}}$	${ m H_g}$	${ m H_{tr}}$	S/V	H' <sub>T</sub>	$\mathrm{H'_{T,lim}}$
	[W/K]	[W/K]	[W/K]	[W/K]	$[m^{-1}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
Milano	132	84	27	242	1.05	0.64	0.50
Roma	132	84	27	242	1.05	0.64	0.53
Palermo	132	84	27	242	1.05	0.64	0.58

Tabella 8-8: Calcolo del coefficiente medio globale di scambio termico in presenza di ponti termici

# Calcolo di A<sub>sol,est</sub>

L'area solare equivalente estiva è stata calcolata considerando la superficie di involucro trasparente per ogni orientamento, il fattore di riduzione per ombreggiatura, la trasmittanza di energia solare totale della finestra, l'irradianza solare media nel mese di luglio per l'esposizione considerata e quella media annuale sul piano orizzontale a Roma.

Nel caso in esame, non è stato considerato alcun contributo di ombreggiamento dovuto ad altri edifici, ma è stato calcolato il fattore di riduzione per ombreggiatura sui serramenti, dovuto alla gronda perimetrale alla copertura.

Nelle tabelle successive vengono riportati alcuni dati utilizzati per il calcolo precedentemente descritto e il valore di  $A_{\text{sol,est}}$  ottenuto per le città di Milano, Roma e Palermo.

Esposizione	$Aw_{,p}$	Ag	Isol,media Luglio	Isol,h,media annua, Roma	Asol <sub>,est</sub> /Asup <sub>,utile</sub>	Area solare specifica limite
	$[\mathrm{m}^2]$	$[m^2]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	[-]	[-]
Nord	5.52	4.36	109.03	180.36		
Sud	5.82	4.89	123.84	180.36	0.016	0.03
Est	3.87	3.14	175.46	180.36		

Tabella 8-9: Calcolo dell'area solare equivalente estiva per la città di Milano

Esposizione	$A_{\mathrm{w,p}}$	$A_{ m g}$	I <sub>sol,media</sub> Luglio	$I_{sol,h,media\ annua,\ Roma}$	$A_{\rm sol,est}/A_{\rm sup,utile}$	Area solare specifica limite
	$[m^2]$	$[m^2]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	[-]	[-]
Nord	5.52	4.36	124.88	180.36		
Sud	5.82	4.89	132.87	180.36	0.018	0.03
Est	3.87	3.14	209.95	180.36		

Tabella 8-10: Calcolo dell'area solare equivalente estiva per la città di Roma

Esposizione	$A_{w,p}$	$A_{ m g}$	$I_{\rm sol,media\ Luglio}$	$I_{sol,h,media\ annua,\ Roma}$	$A_{sol,est}/A_{sup,utile}$	Area solare specifica limite
	$[m^2]$	$[m^2]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	[-]	[-]
Nord	5.52	4.36	118.75	180.36		
Sud	5.82	4.89	112.62	180.36	0.016	0.03
Est	3.87	3.14	185.07	180.36		

Tabella 8-11: Calcolo dell'area solare equivalente estiva per la città di Palermo

# 8.3.3. Occupazione

Secondo la *UNI EN 16798-1*, per un appartamento con una sola camera da letto si considera la presenza di 2 persone, poi per ogni camera da letto aggiuntiva, la cui superficie è inferiore a 14 m², 1 persona in più: perciò nel caso in esame si considera un totale di 4 occupanti.

Ai fini dei calcoli successivi, si suppone che le persone siano disposte tra cucina, soggiorno e locale hobby durante le ore diurne (7:00-23:00) e nelle tre camere da letto durante le ore notturne (23:00-7:00).

Il numero di persone presenti all'interno dei vari ambienti seguirà i profili di occupazione riportati successivamente per i giorni feriali, il sabato, la domenica e le festività.

	Fattore di occupazione																							
													[-	-]										
Ora del giorno	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Giorni feriali	1	1	1	1	1	1	0.5	0.5	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.5	0.5	0.5	0.8	0.8	0.8	1	1
Sabato	1	1	1	1	1	1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1	1
Domenica/ Festività	1	1	1	1	1	1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1	1

Tabella 8-12: Profilo di occupazione



Grafico 8-1: Andamento giornaliero del fattore di occupazione

# 8.3.4. Apporti interni

Gli apporti interni dovuti agli occupanti, alle apparecchiature e all'illuminazione, per tutti gli ambienti climatizzati, sono elencati nella seguente tabella.

	Apporti per persona	Apporti per apparecchiature e illuminazione
	[W/pers.]	$[\mathrm{W/m^2}]$
Ambienti climatizzati	118	3.54

Tabella 8-13: Apporti interni

I valori riportati in tabella si verificano quando il profilo di occupazione riportato al paragrafo 8.3.3 assume dei valori pari a 1, in tutte le altre ore gli apporti interni variano in funzione della percentuale di occupazione.

#### 8.3.5. Ventilazione

Per il caso studio in esame, si considera l'assenza di un impianto di ventilazione meccanica e la sola presenza di ventilazione naturale.

La ventilazione naturale degli ambienti climatizzati corrisponde alla portata minima pro capite per garantire la qualità dell'aria: quest'ultima avverrà, quindi, in funzione degli occupanti e del profilo di occupazione precedentemente riportato (paragrafo 8.3.3).



Tabella 8-14: Portata minima di ventilazione naturale per persona

Su Design Builder, nella scheda "Attività" è stata inserita l'informazione relativa alla portata minima di ventilazione naturale, al fine di garantire la qualità dell'aria, inserendo il valore in [l/pers.] sotto la voce "Min Fresh Air". Tale valore viene poi associato ai diversi locali secondo una scheda di programmazione, relativa appunto alla ventilazione naturale, inserita nella scheda "HVAC".

Poiché la ventilazione naturale avviene in funzione del numero di persone presenti negli ambienti e seguendo il profilo di occupazione (paragrafo 7.3.3), al fine di ricreare una situazione al più reale, quest'ultime vengono disposte dalle 7.00 alle 23.00 nel seguente modo:

- 2 persone nel soggiorno;

- 1 persona nel locale hobby,
- 1 persona in cucina.

Nelle ore restanti, 23.00-7.00, le persone saranno così disposte:

- 1 persona nella camera da letto 1;
- 2 persone nella camera da letto 2;
- 1 persona nella camera da letto 3.

Le schede di programmazione sono quindi state associate alle diverse zone, in base alla loro effettiva occupazione.

# 8.3.6. Infiltrazioni

Il tasso di infiltrazione viene definito per ogni zona tramite i valori di:

- tasso di ventilazione a 50 Pa "n<sub>50</sub>"
- coefficiente di schermatura "e";
- fattore di correzione altezza "ε".

Zona	$n_{50}$	e	3
	[h-1]	[-]	[-]
Locale hobby	6	0.02	1
Soggiorno	6	0.03	1
Cucina	6	0.02	1
Camera da letto 1	6	0.02	1
Camera da letto 2	6	0.02	1
Camera da letto 3	6	0.03	1
Bagno	6	0.02	1
Atrio d'ingresso	6	0.02	1
Atrio	6	0.00	1
WC	6	0.00	1

Tabella 8-15: Parametri di infiltrazione

Nella scheda "Costruzione" sotto la voce "Permeabilità all'aria" è stata inserita per ogni zona l'informazione relativa al tasso di ventilazione a 50 Pa " $n_{50}$ ", il coefficiente di schermatura "e" e il fattore di correzione altezza " $\epsilon$ ".

Infine, l'infiltrazione si considera attiva 24 ore al giorno per tutto l'anno, tramite una scheda di programmazione.

#### 8.3.7. Gestione schermature

Le schermature solari presenti, veneziane di colore chiaro sul lato esterno di tutti i serramenti del piano fuori terra, sono gestite tramite un setpoint impostato sul valore di incidenza solare pari a  $300 \text{ W/m}^2$  attivo  $24 \text{ ore al giorno per tutto l'anno, che ne determina la chiusura una volta superato.$ 

Quest'ultime vengono modellate automaticamente a livello di blocco, selezionando la tipologia desiderata nella scheda "Aperture", sotto la voce "Schermature". Il software permette di associare le proprietà solari e visive delle stesse, la loro posizione rispetto all'elemento vetrato ed è inoltre possibile impostare un tipo di controllo, nel caso in esame in funzione del "Solar Setpoint", a cui è a sua volta associato un programma di funzionamento.

# 8.3.8. Acqua calda sanitaria

Per gli edifici residenziali il volume di acqua richiesto  $V_w$ , espresso in [l/giorno], è calcolato secondo la UNI/TS 11300-2:2014 come:

$$V_{yy} = a \cdot S_{yy} + b$$

Dove:

- a è un parametro in l/(m<sup>2</sup>giorno) ricavabile dal prospetto 30;
- b è un parametro in l/giorno ricavabile dal prospetto 30;
- $S_u$ è la superficie utile dell'abitazione espressa in  $m^2$ .

$S_{\mathrm{u}}$	a	b	$ m V_w$
$[\mathrm{m}^2]$	$[l/(m^2giorno)]$	[l/giorno]	[l/giorno]
101.62	1.067	36.67	145

Tabella 8-16: Calcolo del volume di acqua calda sanitaria (UNI/TS 11300-2:2014)

Per le rispettive città in esame si considerano le seguenti temperature:

Città	$\vartheta_{ m er}$	$\vartheta_0$
	[°C]	$[^{\circ}C]$
Milano	40	14.3
Roma	40	16.6
Palermo	40	18.8

Tabella 8-17: Temperature di riferimento

#### Dove:

- $\vartheta_{er}$  è la temperatura di erogazione, imposta da UNI/TS 11300-2:2014;
- $\vartheta_0$  è pari alla media annuale delle temperature medie mensili dell'aria esterna della località considerata, ricavate dalla *UNI 10349-1:2016*.

Il funzionamento di tale produzione segue il profilo di carico ricavato da *FprEN 12831-3:2016*, dove il 25% del volume totale di acqua calda sanitaria viene erogata nello slot orario mattutino 7:00-8:00 e durante l'ora di pranzo 12:00-13:00, mentre il restante 50% tra le 20:00 e le 21:00.

	Frazione del volume di acqua calda sanitaria																							
[-]																								
Ora del giorno	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Tutto l'anno	0	0	0	0	0	0	0.25	0	0	0	0	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0

Tabella 8-18: Profilo di funzionamento dell'acqua calda sanitaria

Su Design Builder, nella scheda "Attività", all'interno del template creato per il modello residenziale, si inserisce l'informazione relativa produzione dell'acqua calda sanitaria: per fare questo è necessario definire il consumo giornaliero specifico, pari a 1.43 l/(m²giorno), i valori delle temperature riportate e il profilo di carico da seguire, ricavato da FprEN 12831-3:2016.

# 8.3.9. Fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento

I fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento sono stati calcolati facendo riferimento al componente "ZoneHVAC:IdealLoadsAirSystem" di Energy Plus, il quale permette di studiare le prestazioni dell'edificio senza modellare l'impianto.

Questo oggetto viene infatti descritto come un'unità ideale che per ottenere le temperature di setpoint desiderate all'interno degli ambienti utilizza l'aria per aggiungere o rimuovere calore con il 100% di efficienza.

Di seguito, vengono riportati i valori di setpoint di riscaldamento e raffrescamento da mantenere all'interno degli ambienti climatizzati.

Zona	Temperatura di setpoint riscaldamento	Temperatura di setpoint raffrescamento
	$^{\circ}\mathrm{C}$	$^{\circ}\mathrm{C}$
Ambienti climatizzati	26	20

Tabella 8-19: Temperature di setpoint di riscaldamento e di raffrescamento

Inoltre, col fine di modellare un "impianto ideale", per ricavare i fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento, è stato necessario specificare su Energy Plus che il sistema in esame non avesse nessun limite di capacità e di portata, modificando i file *.idf* esportati da Design Builder.

La metodologia di calcolo utilizzata per la determinazione dei fabbisogni di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale si è basata sulle condizioni standard (Asset Rating), che prevede l'utilizzo di dati di input convenzionali e un regime di funzionamento dell'impianto continuo.

Di conseguenza, i sottoparagrafi che seguono, mostrano i risultati ottenuti considerando l'impianto di riscaldamento e di raffrescamento attivo tutto l'anno 24 ore al giorno, per le tre città analizzate.

In aggiunta, per ogni città, sono stati riportati i risultati relativi ai modelli con e senza ponti termici e una tabella contenente l'incidenza che quest'ultimi sui risultati.

Al contrario, gli studi condotti sull'edificio a seguito della ristrutturazione e riportati nei capitoli successivi, sono stati compiuti esclusivamente sul modello con ponti termici, in quanto:

- 1. Si è ritenuto che il modello con i ponti termici fosse più realistico;
- 2. in previsione di un isolamento dell'edificio l'incidenza dei ponti termici rispetto allo stato di fatto assumerà un'influenza maggiore sui risultati.

Inoltre, i risultati che seguono sono stati ottenuti effettuando le simulazioni con Energy Plus, utilizzando 4 timestep per ora e i dati climatici forniti dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI), per Milano, Roma e Palermo.

# 8.3.9.1. Milano

Nel seguente paragrafo sono riportate le tabelle e i grafici contenenti il carico termico sensibile di riscaldamento e raffrescamento dal quale sono stati ricavati i fabbisogni mensili riferiti a tutto l'edificio e quelli specifici per la città di Milano.

I risultati appena descritti sono stati riportati sia per il modello in assenza di ponti termici, sia per quello in cui questi sono stati considerati.

	Fabbise riscalda	0	Fabbisogno riscalda	-	Fabbise raffresc	0	Fabbisogno raffresc	•
Mese	Senza ponti termici	Con ponti termici						
	[kWh]	[kWh]	$[{ m kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	[kWh]	[kWh]	$[{ m kWh/m^2}]$	$[{ m kWh/m^2}]$
Gennaio	1413	1540	13.90	15.16	0	0	0.00	0.00
Febbraio	854	945	8.41	9.30	0	0	0.00	0.00
Marzo	478	554	4.70	5.45	0	0	0.00	0.00
Aprile	190	229	1.87	2.26	-2	-2	-0.02	-0.02
Maggio	5	9	0.05	0.09	-109	-104	-1.07	-1.02
Giugno	0	0	0.00	0.00	-340	-327	-3.34	-3.22
Luglio	0	0	0.00	0.00	-493	-483	-4.85	-4.75
Agosto	0	0	0.00	0.00	-399	-395	-3.92	-3.89
Settembre	0	1	0.00	0.01	-38	-33	-0.37	-0.32
Ottobre	352	390	3.47	3.84	0	0	0.00	0.00
Novembre	1058	1152	10.41	11.34	0	0	0.00	0.00
Dicembre	1550	1679	15.25	16.52	0	0	0.00	0.00

Tabella 8-20: Fabbisogno termico mensile in assenza e presenza di ponti termici

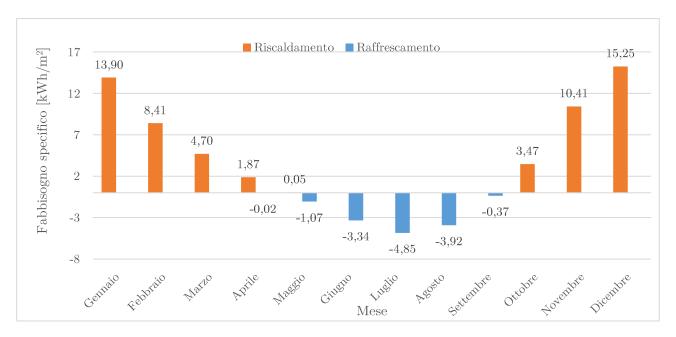


Grafico 8-2: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e raffrescamento in assenza di ponti termici

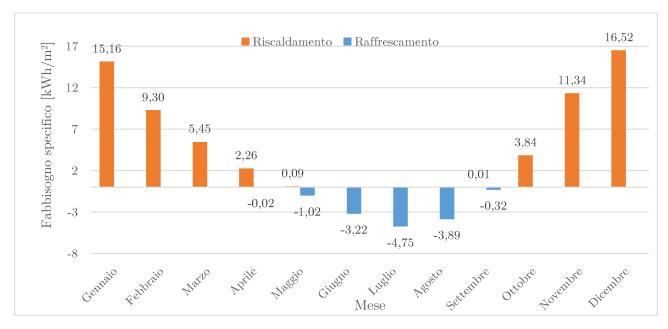


Grafico 8-3: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e raffrescamento in presenza di ponti termici

Come atteso, dai grafici e dalle tabelle sovrastanti risulta evidente come il fabbisogno di riscaldamento aumenti a causa delle maggiori dispersioni dovute alla presenza di ponti termici.

Nella tabella seguente sono stati riportati i fabbisogni annuali di riscaldamento e raffrescamento dell'edificio per le due versioni e l'incidenza dei ponti termici sui risultati.

	Senza ponti termici	Con ponti termici	Incidenza
	[kWh]	[kWh]	[%]
Fabbisogno di riscaldamento	5901	6500	10%
Fabbisogno di raffrescamento	-1380	-1344	-3%

Tabella 8-21: Incidenza dei ponti termici sul fabbisogno termico annuale

# 8.3.9.2. Roma

Nel seguente paragrafo sono riportate le tabelle e i grafici contenenti il carico termico sensibile di riscaldamento e raffrescamento dal quale sono stati ricavati i fabbisogni mensili riferiti a tutto l'edificio e quelli specifici per la città di Roma.

I risultati appena descritti sono stati riportati sia per il modello in assenza di ponti termici, sia per quello in cui questi sono stati considerati.

	Fabbisc riscalda	J	Fabbisogno riscalda	•	Fabbisc raffresca	0	Fabbisogno raffresca	•
Mese	Senza ponti termici	Con ponti termici	Senza ponti termici	Con ponti termici	Senza ponti termici	Con ponti termici	Senza ponti termici	Con ponti termici
	[kWh]	[kWh]	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	[kWh]	[kWh]	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Gennaio	929	1028	9.14	10.11	0	0	0.00	0.00
Febbraio	665	748	6.55	7.36	0	0	0.00	0.00
Marzo	377	444	3.71	4.37	0	0	0.00	0.00
Aprile	12	22	0.12	0.21	-2	-1	-0.02	-0.01
Maggio	1	2	0.01	0.02	-96	-89	-0.94	-0.88
Giugno	0	0	0.00	0.00	-356	-340	-3.50	-3.34
Luglio	0	0	0.00	0.00	-739	-735	-7.27	-7.23
Agosto	0	0	0.00	0.00	-638	-636	-6.28	-6.26
Settembre	0	0	0.00	0.00	-137	-126	-1.35	-1.24
Ottobre	11	17	0.11	0.17	-3	-3	-0.03	-0.03
Novembre	435	496	4.28	4.88	0	0	0.00	0.00
Dicembre	837	932	8.23	9.17	0	0	0.00	0.00

 $Tabella\ 8-22:\ Fabbisogno\ termico\ mensile\ in\ assenza\ e\ presenza\ di\ ponti\ termici$ 

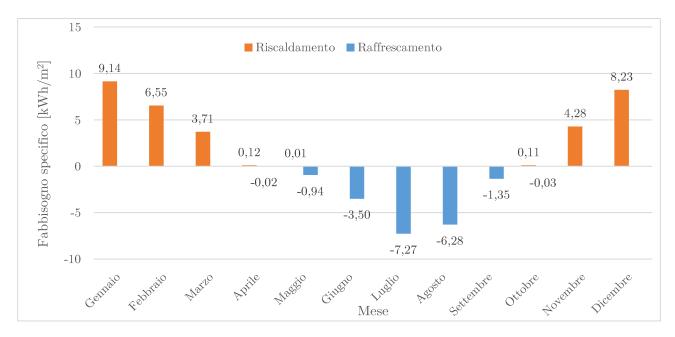


Grafico 8-4: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e raffrescamento in assenza di ponti termici

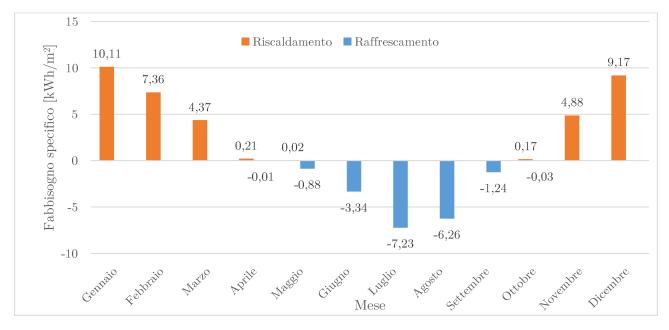


Grafico 8-5: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e raffrescamento in assenza di ponti termici

Come atteso, dai grafici e dalle tabelle sovrastanti risulta evidente come il fabbisogno di riscaldamento aumenti a causa delle maggiori dispersioni dovute alla presenza di ponti termici.

Nella tabella seguente sono stati riportati i fabbisogni annuali di riscaldamento e raffrescamento dell'edificio per le due versioni e l'incidenza dei ponti termici sui risultati.

	Senza ponti termici	Con ponti termici	Incidenza
	[kWh]	[kWh]	[%]
Fabbisogno di riscaldamento	3266	3688	13%
Fabbisogno di raffrescamento	-1971	-1930	-2%

Tabella 8-23: Incidenza dei ponti termici sul fabbisogno termico annuale

# 8.3.9.3. Palermo

Nel seguente paragrafo sono riportate le tabelle e i grafici contenenti il carico termico sensibile di riscaldamento e raffrescamento dal quale sono stati ricavati i fabbisogni mensili riferiti a tutto l'edificio e quelli specifici per la città di Palermo.

I risultati appena descritti sono stati riportati sia per il modello in assenza di ponti termici, sia per quello in cui questi sono stati considerati.

	Fabbisogno di riscaldamento		Fabbisogno specifico di riscaldamento		Fabbisogno di raffrescamento		Fabbisogno specifico di raffrescamento	
Mese	Senza ponti termici	Con ponti termici	Senza ponti termici	Con ponti termici	Senza ponti termici	Con ponti termici	Senza ponti termici	Con ponti termici
	[kWh]	[kWh]	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[{ m kWh/m^2}]$	[kWh]	[kWh]	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Gennaio	533	601	5.25	5.92	0	0	0.00	0.00
Febbraio	403	467	3.96	4.60	0	0	0.00	0.00
Marzo	198	243	1.94	2.39	-1	0	-0.01	0.00
Aprile	16	25	0.15	0.25	-8	-6	-0.08	-0.06
Maggio	0	0	0.00	0.00	-120	-104	-1.18	-1.02
Giugno	0	0	0.00	0.00	-397	-384	-3.91	-3.78
Luglio	0	0	0.00	0.00	-668	-665	-6.57	-6.54
Agosto	0	0	0.00	0.00	-572	-571	-5.62	-5.62
Settembre	0	0	0.00	0.00	-202	-195	-1.99	-1.92
Ottobre	0	0	0.00	0.00	-38	-34	-0.38	-0.33
Novembre	77	102	0.76	1.00	-2	-2	-0.02	-0.02
Dicembre	412	471	4.05	4.64	0	0	0.00	0.00

 $Tabella\ 8-24:\ Fabbisogno\ termico\ mensile\ in\ assenza\ e\ presenza\ di\ ponti\ termici$ 

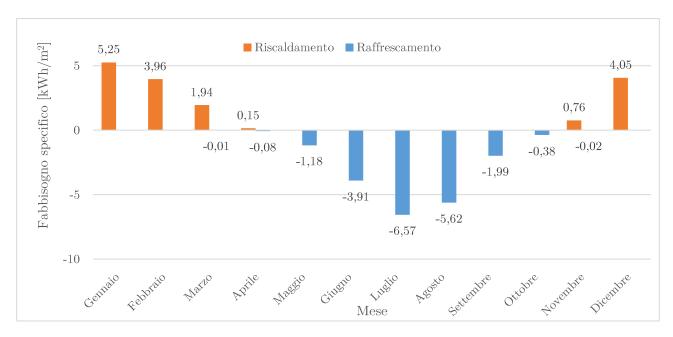


Grafico 8-6: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e raffrescamento in assenza di ponti termici

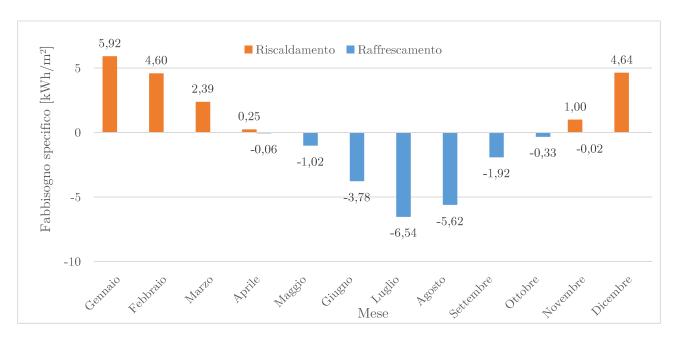


Grafico 8-7: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e raffrescamento in presenza di ponti termici

Nella tabella seguente sono stati riportati i fabbisogni annuali di riscaldamento e raffrescamento dell'edificio per le due versioni e l'incidenza dei ponti termici sui risultati.

	Senza ponti termici	Con ponti termici	Incidenza
	[kWh]	[kWh]	[%]
Fabbisogno di riscaldamento	1638	1910	17%
Fabbisogno di raffrescamento	-2007	-1960	-2%

Tabella 8-25: Incidenza dei ponti termici sul fabbisogno termico annuale

# 8.3.9.4. Confronti

Nel presente sottoparagrafo sono stati riportati i risultati dei fabbisogni annuali di riscaldamento e raffrescamento per le tre città e per le due differenti versioni di modello. La tabella e il grafico seguenti, riferite al modello senza ponti termici, mettono in evidenza, come atteso, che il fabbisogno di riscaldamento decresce da Milano a Palermo, mentre quello di raffrescamento, presenta un andamento opposto.

	Fabbisogi	no annuale	Fabbisogno specifico annuale		
Città	Riscaldamento	Raffrescamento	Riscaldamento	Raffrescamento	
	[kWh]	[kWh]	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	
Milano	5901	-1380	58	-14	
Roma	3266	-1971	32	-19	
Palermo	1638	-2007	16	-20	

Tabella 8-26: Fabbisogno termico annuale di riscaldamento e raffrescamento in assenza di ponti termici

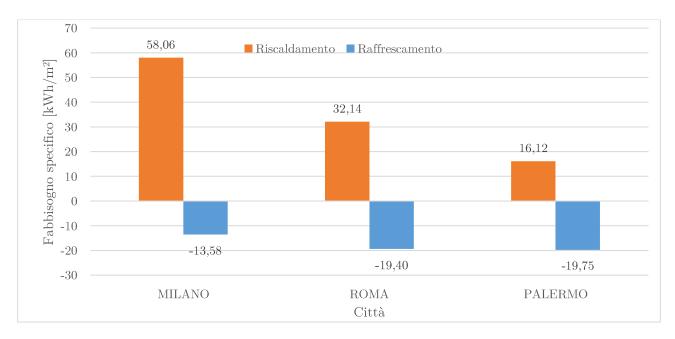


Tabella 8-27: Fabbisogno termico specifico annuale di riscaldamento e raffrescamento in assenza di ponti termici

Il grafico e la tabella sottostante si riferiscono, invece, al modello con i ponti termici e, come per il caso precedente, si può notare come il fabbisogno di riscaldamento diminuisca da Milano a Palermo, mentre il raffrescamento aumenti.

	Fabbisogr	no annuale	Fabbisogno specifico annuale		
Città	Riscaldamento	Raffrescamento	Riscaldamento	Raffrescamento	
	[kWh]	[kWh]	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	
Milano	6500	-1344	63.96	-13.22	
Roma	3688	-1930	36.30	-18.99	
Palermo	1910	-1960	18.79	-19.29	

Tabella 8-28: Fabbisogno termico specifico annuale di riscaldamento e di raffrescamento in presenza di ponti termici

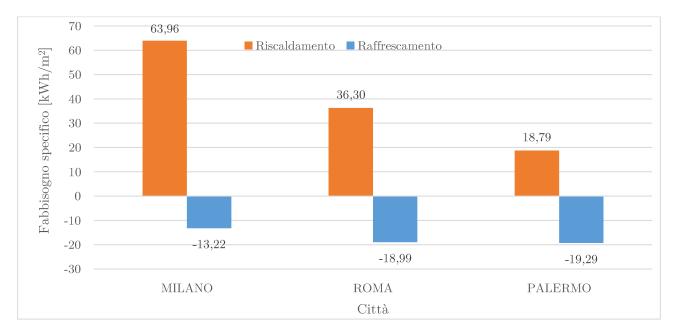


Grafico 8-8: Fabbisogno termico specifico annuale di riscaldamento e di raffrescamento in presenza di ponti termici

# 8.4. Edificio post intervento di ristrutturazione

Gli interventi edilizi applicati al caso studi residenziale sono stati selezionati in modo da ottenere un edificio nZEB: è stata effettuata una ristrutturazione importante di primo livello, così come definita all'interno del *DM* 26/06/2015 (Decreto dei requisiti minimi). L'intervento di ristrutturazione ha riguardato principalmente le partizioni e le chiusure, opache e trasparenti, verticali e orizzontali, che sono state migliorate in funzione dei valori di trasmittanza termica riferiti al 2019/2021, presenti all'interno della normativa per l'edificio di riferimento.

Tali valori sono correlati alla zona climatica in cui l'edificio risulta collocato e di conseguenza è stato necessario creare un modello per ognuna delle tre città analizzate.

Per tale motivo, all'interno del presente paragrafo, è stato inserito un sottoparagrafo per ognuna delle tre città, dove sono stati riportati i valori di riferimento di trasmittanza termica forniti dalla normativa e quelli effettivamente utilizzati per la creazione del modello.

Nonostante le stratigrafie degli elementi architettonici siano molto differenti tra una città e l'altra, i criteri adottati per la ristrutturazione sono stati sempre gli stessi:

- 1. Ottenimento di un valore di trasmittanza inferiore a quello previsto per l'edificio di riferimento;
- 2. posizionamento degli strati di isolamento volto a eliminare alcune tipologie di ponti termici;
- 3. inserimento dell'isolamento all'esterno, in modo da aumentare la capacità termica dell'edificio.

In aggiunta, il DM 26/06/2015, fornisce valori limite di trasmittanza termica periodica, fattore solare ed efficienze degli impianti che, non essendo funzione della zona climatica o del rapporto di forma, sono riportati nel capitolo 4 per tutte le città e per entrambi i casi studio.

In ogni caso, ogni scelta progettuale adottata in questa fase, ha fatto riferimento a schede tecniche di materiali e impianti, di conseguenza, i dati utilizzati per le simulazioni, non sono gli stessi proposti dalla normativa, ma quest'ultimi sono stati considerati come valori limite, in modo da ottenere in ogni situazione effetti migliorativi rispetto all'edificio di riferimento.

I dati tecnici riferiti alle chiusure trasparenti sono stati ricavati assemblando diversi componenti degli infissi attraverso il sito "Glass Configurator", che ha permesso di comporre le chiusure, scegliendo tra varie tipologie di vetri, intercapedini e trattamenti, in funzione delle quali è stato possibile ottenere la scheda tecnica.

Il calcolo del coefficiente di trasmissione termica globale e dell'area solare estiva è stato eseguito anche per l'edificio dopo l'intervento di ristrutturazione ma, a differenza del caso

precedente, è stato necessario verificare che i valori rispettassero quelli limite imposti dal  $DM\ 26/06/2015$ .

Nei paragrafi successivi sono stati riportati i calcoli dei parametri appena descritti per ognuna delle tre città e inoltre, essendo i tre modelli caratterizzati da diversi spessori dell'isolante, è stato necessario valutare i ponti termici per tutti e tre i casi, come messo in evidenza successivamente.

La valutazione dei ponti termici si è differenziata dal modello iniziale, non solo perché sono state cambiate le stratigrafie, ma anche perché in questa fase i valori di trasmittanza termica lineare sono stati ricavati utilizzando l'Atlante nazionale dei ponti termici, e, nei casi in cui le caratteristiche dei ponti termici presenti all'interno dello stesso si discostavano troppo dal caso in esame, sono state applicate le equazioni presenti nell'articolo scientifico "A building thermal bridges sensitivity analysis", che ha permesso di calcolare i valori in modo più accurato.

I dati di input sono rimasti invariati rispetto al caso precedentemente analizzato, ad eccezione del tasso di infiltrazione, la cui modifica verrà successivamente discussa.

A differenza del caso precedente, per l'edificio nZEB, sono state effettuate delle considerazioni aggiuntive su impianti di riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione, riportate dettagliatamente nei paragrafi successivi.

# 8.4.1. Infiltrazioni

Dopo l'intervento di ristrutturazione, si considera un tasso di infiltrazione a 50 Pa pari a 1.5, ipotizzando una classe energetica A, secondo quanto imposto dalla certificazione CasaClima.

Una buona impermeabilità all'aria riduce infatti le dispersioni di calore e quindi i costi energetici, migliora il comfort abitativo, previene la formazione di condensa negli elementi costruttivi, diminuisce l'effetto dei ponti termici e migliora, qualora presente, l'efficienza dell'impianto di ventilazione.

Il tasso di infiltrazione viene definito per ogni zona tramite i valori di:

- tasso di ventilazione a 50 Pa "n<sub>50</sub>"
- coefficiente di schermatura "e";
- fattore di correzione altezza "e".

Zona	$n_{50}$	e	ε
	[h-1]	[-]	[-]
Locale hobby	1.5	0.02	1
Soggiorno	1.5	0.03	1
Cucina	1.5	0.02	1
Camera da letto 1	1.5	0.02	1
Camera da letto 2	1.5	0.02	1
Camera da letto 3	1.5	0.03	1
Bagno	1.5	0.02	1
Atrio d'ingresso	1.5	0.02	1
Atrio	1.5	0.00	1
WC	1.5	0.00	1

Tabella 8-29: Parametri di infiltrazione

L'infiltrazione si considera attiva 24 ore al giorno per tutto l'anno, tramite una scheda di programmazione.

# 8.4.2. Milano

# 8.4.2.1. Descrizione dei componenti edili

Le seguenti tabelle mostrano i valori di trasmittanza termica dell'edificio di riferimento per la zona climatica E, e i componenti edili in seguito alle modifiche apportate durante l'intervento di ristrutturazione.

	U edificio di riferimento
	$[\mathrm{W/m^2K}]$
Strutture opache verticali, verso l'esterno, gli ambienti non climatizzati e contro terra	0.26
Strutture opache orizzontali o inclinate di copertura verso l'esterno	0.22
Strutture opache orizzontali di pavimento verso gli ambienti non climatizzati e contro terra	0.26

Tabella 8-30: Valori di trasmittanza termica dell'edificio di riferimento per la zona climatica E

Gli interventi apportati agli elementi opachi verticali hanno riguardato le pareti a contatto con l'esterno e, come anticipato, è stato scelto di intervenire su di esse sostituendo il tipo di isolante utilizzato e spostando quest'ultimo verso l'esterno.

Inoltre, si è scelto di sostituire le partizioni interne del piano terra a contatto con il vano scala non riscaldato (P\_11\_SDF) con le nuove partizioni P\_13\_NR, in cui si è intervenuti sostituendo il tipo di isolante e di intonaco, al fine di raggiungere i limiti richiesti per le pareti verticali a contatto con ambienti non riscaldati.

Codice	Descrizione	$\mathbf{s}$	U	m	Yie
		[cm]	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{kg/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
$CV_1$	Parete esterna isolata	31.0	0.233	258	0.061
CV_3_SDF	Parete esterna non isolata	23.2	2.107	292	1.318
$CV\_32$	Parete esterna locale hobby (verso terra)	33.2	0.234	296	0.06
P_11_SDF	Partizioni interne	6.0	1.868	18	0.732
P_13_NR	Partizioni interne verso non riscaldato	18.0	0.241	134	0.075
P_1_SDF	Partizione interna soggiorno	22.0	1.763	268	0.907

Tabella 8-31: Caratteristiche dei componenti opachi verticali

Per quanto riguarda i componenti orizzontali, è stato sostituito e aumentato lo strato di isolamento del pavimento del piano terra a contatto con gli ambienti non riscaldati, mantenendone la posizione intermedia all'interno della stratigrafia. La stessa modifica è stata applicata al pavimento del locale hobby, a contatto con il terreno.

Infine, è stato sostituito e aumentato lo strato di isolante che costituisce il soffitto del piano terra, dividendo quest'ultimo dal sottotetto non riscaldato.

Codice	Codice Descrizione		U	m	Yie
		[cm]	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{kg/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
F_16	Soffitto del piano terreno	11.0	0.232	21	0.211
F_17	Pavimento del piano terreno (verso non riscaldati)	31.0	0.232	400	0.106
F_17_SDF_LH	Pavimento del piano terreno (verso locale hobby)	27.0	0.500	398	0.136
F_35_SDF	Pavimento del piano interrato (locali non riscaldati)	24.0	0.525	400	0.223

F_35_LH	Pavimento del piano interrato (locale hobby)	28.2	0.242	402	0.098
R_36_SDF	Copertura inclinata	26.2	1.503	478	0.501

Tabella 8-32: Caratteristiche dei componenti opachi orizzontali

Dato il limite restrittivo da rispettare per i componenti vetrati, questi sono stati sostituiti con finestre e porte vetrate con triplo vetro a controllo solare, a cui è stato applicato anche un trattamento basso emissivo; le intercapedini da 12 mm sono riempite d'Argon.

Inoltre, gli infissi, sono stati progettati con un legno a trasmittanza termica minore rispetto a quello presente nello stato di fatto.

È bene specificare, che per la sola finestra W04, dato l'elevato rapporto tra area telaio e area totale, si considera la stessa stratigrafia appena introdotta, con doppia intercapedine in Argon, da 16 mm anziché 12 mm.

Infine, vengono mantenute le schermature solari: veneziane di colore chiaro sul lato esterno di tutti i serramenti del piano fuori terra, gestite tramite un setpoint impostato sul valore di incidenza solare pari a  $300~\rm W/m^2$ .

Codice	Ag	Af	Aw	Ug	Uf	1	ψ	Uw
[-]	$[m^2]$	$[m^2]$	$[m^2]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	[m]	[W/mK]	$[\mathrm{W/m^2K}]$
W01	1.07	0.31	1.38	0.800	1.800	4.14	0.08	1.264
W02	0.77	0.27	1.04	0.800	1.800	3.54	0.08	1.332
W03	1.68	0.39	2.07	0.800	1.800	5.34	0.08	1.196
W04	0.27	0.17	0.44	0.500	1.800	2.10	0.08	1.372
W05	2.13	0.45	2.58	0.800	1.800	6.14	0.08	1.165
W06	1.53	0.41	1.94	0.800	1.800	5.54	0.08	1.240
W07	2.33	0.46	2.80	0.800	1.800	6.34	0.08	1.147

Tabella 8-33: Caratteristiche dei componenti trasparenti

Codice	$ggl_{,n}$	gg+sh	τν
[-]	[-]	[-]	[-]
W01	0.34	0.12	0.51
W02	0.34	0.12	51
W03	0.34	0.12	51
W04	0.34	0.12	51
W05	0.34	0.12	51

W06 0.34 0.12 51 W07 0.34 0.12 51

Tabella 8-34: Parametri solari dei componenti trasparenti

## 8.4.2.2. Verifica di H'<sub>T</sub> e A<sub>sol,est</sub>

## Verifica di H'<sub>T</sub>

Le considerazioni effettuate per il calcolo dell'H'<sub>T</sub> descritte nel *paragrafo 8.3.2* restano valide per tutte e tre le città; di seguito sono state riportate esclusivamente delle tabelle che riassumono i calcoli effettuati per la città di Milano.

Tipo	Codice	Ponte termico	ψe
			$[\mathrm{W/mK}]$
	C1	Angolo parete esterna isolata locale hobby	-0.07
	R5 (b=0.8)	Parete esterna isolata-Parete interna (verso garage)	0.14
	R 5 (con b=0.4)	Parete esterna isolata-Parete interna (verso scala)	0.12
	IW1	Parete esterna isolata - Separazione interna	0.00
	IW1	Parete esterna isolata - Separazione interna soggiorno	0.00
1	W1	Serramenti	0.19
	IF1	Solaio interpiano - Parete esterna isolata	0.00
	Gf13B (b=0.5)	Solaio interpiano (su cantina e scala) - Parete esterna isolata	0.07
	Gf13B (b=0.9)	Solaio interpiano (su garage e vespaio) - Parete esterna isolata	0.15
	R5 (b=0.9)	Parete esterna isolata piano terra - Soffitto piano terra	0.14
	GF5 (b'=2)	Parete esterna isolata piano terra - Pavimento locale hobby	0.10
0	R6	Parete garage – Soffitto locale hobby	-0.08
2	C1	Angolo partizione interna isolata (verso garage)	-0.07
3	W1	Perimetro porta garage	0.19

Tabella 8-35: Valori di trasmittanza termica lineare dei ponti termici

Nella precedente tabella, i ponti termici sono stati raccolti in base alla loro tipologia:

- 1: ponti termici presenti tra volume climatizzato ed esterno;
- 2: ponti termici presenti tra volume climatizzato e volume non climatizzato;
- 3: ponti termici presenti tra volume non climatizzato ed esterno.

Modello	$\mathrm{H}_{\mathrm{d}}$	$\mathrm{H_{u}}$	${ m H_g}$	${ m H_{tr}}$	S/V	$\mathrm{H'_{T}}$	$\mathrm{H'}_{\mathrm{T,lim}}$
	[W/K]	[W/K]	[W/K]	[W/K]	$[m^{-1}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
Stato di fatto	132	84	27	242	1.05	0.64	0.50
Post ristrutturazione	79	40	14	133	1.05	0.35	0.50

Tabella 8-36: Verifica del coefficiente medio globale di scambio termico

Nella precedente tabella sono state messe in evidenza:

- 1. le differenze tra i valori di H'<sub>T</sub> tra lo stato di fatto e l'edificio post ristrutturazione;
- 2. il rispetto del valore di H'<sub>T</sub> limite imposto dal DM 26/06/2015 per l'edificio sottoposto a ristrutturazione importante di primo livello.

### Verifica di A<sub>sol,est</sub>

Nella seguente tabella è stato riportato il calcolo dell'area solare estiva e l'esito della verifica secondo quanto indicato nel DM 26/06/2015.

Esposizione	$A_{\mathrm{w,p}}$	$A_{ m g}$	$I_{ m sol,media\ Luglio}$	$I_{sol,h,media\ annua,\ Roma}$	$A_{\rm sol,est}/A_{\rm sup,utile}$	Area solare specifica limite	Esito
	$[m^2]$	$[m^2]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	[-]	[-]	
Nord	5.52	4.36	109.03	180.36			
Sud	5.82	4.89	123.84	180.36	0.002	0.03	Verificata
Est	3.87	3.14	175.46	180.36			

Tabella 8-37: Verifica dell'area solare equivalente specifica

Come si può notare dalla tabella, con la sostituzione degli infissi l'Asol, est si è ridotta da 0.016 a 0.002.

## 8.4.2.3. Fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento

Le ipotesi alla base del calcolo dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento sono le stesse descritte nel paragrafo 8.3.93 per l'edificio allo stato di fatto.

<sup>3</sup> Per il calcolo è stato utilizzato l'Object di Energy Plus "ZoneHVAC: IdealLoadsAirSystem", l'impianto ideale non ha limiti di capacità o di portata, l'impianto di climatizzazione è attivo tutto l'anno 24 ore al giorno e si basa esclusivamente sulle temperature di setpoint da mantenere all'interno delle zone.

Successivamente sono stati riportati i valori ottenuti e, con il fine di facilitare un confronto tra l'edificio prima e dopo la ristrutturazione, è stato nuovamente riportato il grafico dei fabbisogni del fabbricato allo stato di fatto, relativo alla versione con i ponti termici.

Mese	Fabbisogno di riscaldamento [kWh]	Fabbisogno specifico di riscaldamento $[\mathrm{kWh/m^2}]$	Fabbisogno di raffrescamento [kWh]	Fabbisogno specifico di raffrescamento [kWh/m²]
Gennaio	865	8.51	0	0.00
Febbraio	513	5.05	0	0.00
Marzo	276	2.72	0	0.00
Aprile	97	0.95	0	0.00
Maggio	0	0.00	-34	-0.33
Giugno	0	0.00	-202	-1.99
Luglio	0	0.00	-319	-3.14
Agosto	0	0.00	-245	-2.41
Settembre	0	0.00	-9	-0.09
Ottobre	155	1.53	0	0.00
Novembre	615	6.06	0	0.00
Dicembre	944	9.29	0	0.00

 $Tabella\ 8\text{-}38:\ Fabbisogno\ termico\ mensile\ post\ ristrutturazione$ 

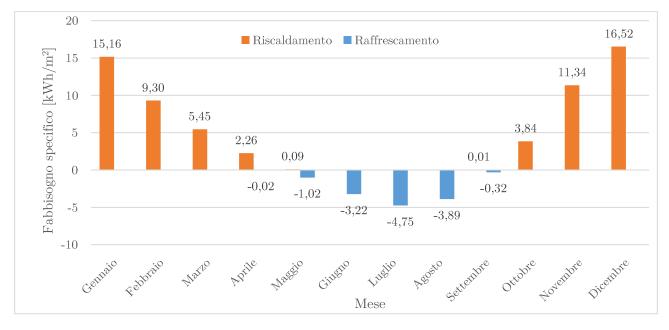


Grafico 8-9: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento per lo stato di fatto

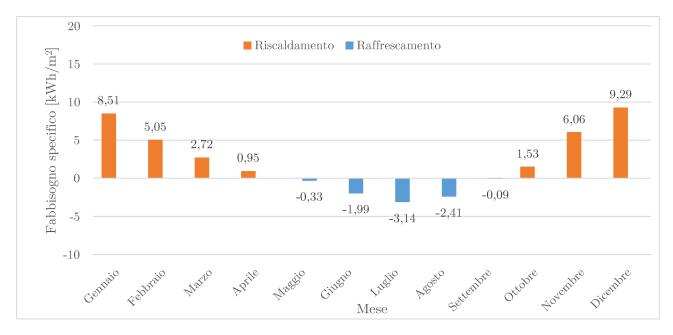


Grafico 8-10: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento post ristrutturazione

### 8.4.3. Roma

## 8.4.3.1. Descrizione dei componenti edili

Le seguenti tabelle mostrano i valori di trasmittanza termica dell'edificio di riferimento per la zona climatica D, e i componenti edili in seguito alle modifiche apportate durante l'intervento di ristrutturazione.

	U edificio di riferimento
	$[\mathrm{W/m^2K}]$
Strutture opache verticali, verso l'esterno, gli ambienti non climatizzati e contro terra	0.29
Strutture opache orizzontali o inclinate di copertura verso l'esterno	0.26
Strutture opache orizzontali di pavimento verso gli ambienti non climatizzati e contro terra	0.29
Chiusure tecniche trasparenti, comprensive degli infissi, verso l'esterno	1.8

Tabella 8-39: Valori di trasmittanza termica dell'edificio di riferimento per la zona climatica D

Gli interventi apportati agli elementi opachi verticali hanno riguardato le pareti a contatto con l'esterno e, come anticipato, è stato scelto di intervenire su di essi sostituendo il tipo di isolante utilizzato e spostando quest'ultimo verso l'esterno.

Inoltre, si è scelto di sostituire le partizioni interne del piano terra a contatto con il vano scala non riscaldato (P\_11\_SDF) con le nuove partizioni P\_13\_NR, in cui si è intervenuti sostituendo il tipo di isolante e di intonaco, al fine di raggiungere i limiti richiesti per le pareti verticali a contatto con gli ambienti non riscaldati.

Codice	Descrizione	$\mathbf{s}$	U	m	$Y_{ie}$
		[cm]	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{kg/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
CV_1	Parete esterna isolata	29.0	0.284	257	0.076
CV_3_SDF	Parete esterna non isolata	23.2	2.107	292	1.318
$CV\_32$	Parete esterna locale hobby (verso terra)	31.2	0.285	295	0.075
P_11_SDF	Partizioni interne	6.0	1.868	18	0.732
P_13_NR	Partizioni interne verso non riscaldato	18.0	0.286	127	0.183
P_1_SDF	Partizione interna soggiorno	22.0	1.763	268	0.907

Tabella 8-40: Caratteristiche dei componenti opachi verticali

Per quanto riguarda i componenti orizzontali, è stato sostituito e aumentato lo strato di isolamento del pavimento del piano terra a contatto con gli ambienti non riscaldati, mantenendone la posizione intermedia all'interno della stratigrafia. La stessa modifica è stata applicata al pavimento del locale hobby, a contatto con il terreno.

Infine, è stato sostituito e aumentato lo strato di isolante che costituisce il soffitto del piano terra, dividendo quest'ultimo dal sottotetto non riscaldato.

Codice	Descrizione	s	U	m	Yie
		[cm]	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{kg/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
F_16	Soffitto del piano terreno	9.0	0.275	20	0.258
F_17	Pavimento del piano terreno (verso non riscaldati)	29.0	0.283	399	0.133
F_17_SDF_LH	Pavimento del piano terreno (verso locale hobby)	27.0	0.500	398	0.136
F_35_SDF	Pavimento del piano interrato (locali non riscaldati)	24.0	0.525	400	0.223
F_35_LH	Pavimento del piano interrato (locale hobby)	27.0	0.267	402	0.109
$R_36\_SDF$	Copertura inclinata	26.0	1.503	478	0.501

 $Tabella\ 8\text{-}41:\ Caratteristiche\ dei\ componenti\ opachi\ orizzontali$ 

Dato il limite da rispettare per i componenti vetrati, questi sono stati sostituiti con finestre e porte vetrate con doppio vetro a controllo solare, a cui è stato applicato anche un trattamento basso emissivo; le intercapedini da 12 mm sono riempite d'Argon.

Inoltre, gli infissi, sono stati progettati con un legno a trasmittanza termica minore rispetto a quello presente nello stato di fatto.

Infine, vengono mantenute le schermature solari: veneziane di colore chiaro sul lato esterno di tutti i serramenti del piano fuori terra, gestite tramite un setpoint impostato sul valore di incidenza solare pari a  $300~{\rm W/m^2}$ .

Codice	$A_{\mathrm{g}}$	$A_{\mathrm{f}}$	$A_{\mathrm{w}}$	$ m U_{g}$	$\mathrm{U_{f}}$	1	ψ	$U_{\mathrm{w}}$
	$[m^2]$	$[m^2]$	$[m^2]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	[m]	$[\mathrm{W/mK}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
W01	1.07	0.31	1.38	1.200	1.800	4.14	0.08	1.575
W02	0.77	0.27	1.04	1.200	1.800	3.54	0.08	1.629
W03	1.68	0.39	2.07	1.200	1.800	5.34	0.08	1.520
W04	0.27	0.17	0.44	1.200	1.800	2.10	0.08	1.808
W05	2.13	0.45	2.58	1.200	1.800	6.14	0.08	1.495
W06	1.53	0.41	1.94	1.200	1.800	5.54	0.08	1.555
W07	2.33	0.46	2.80	1.200	1.800	6.34	0.08	1.481

Tabella 8-42: Caratteristiche dei componenti trasparenti

Codice	$g_{\rm gl,n}$	$g_{\rm g+sh}$	$\tau_{\rm v}$
	[-]	[-]	[-]
W01	0.17	0.06	0.28
W02	0.17	0.06	0.28
W03	0.17	0.06	0.28
W04	0.17	0.06	0.28
W05	0.17	0.06	0.28
W06	0.17	0.06	0.28
W07	0.17	0.06	0.28

Tabella 8-43: Parametri solari dei componenti trasparenti

# 8.4.3.2. Verifica di $H'_T$ e $A_{sol,est}$

# Verifica di H'<sub>T</sub>

Le considerazioni effettuate per il calcolo dell'H'<sub>T</sub> descritte nel *paragrafo 8.3.2* restano valide per tutte e tre le città; di seguito sono state riportate esclusivamente delle tabelle che riassumono i calcoli effettuati per la città di Roma.

Tipo	Codice	Ponte termico	ψe
			[W/mK]
	C1	Angolo parete esterna isolata locale hobby	-0.08
	R5 (b=0.8)	Parete esterna isolata-Parete interna (verso garage)	0.14
	R5 (con b=0.4)	Parete esterna isolata-Parete interna (verso scala)	0.12
	IW1	Parete esterna isolata - Separazione interna	0.00
	IW1	Parete esterna isolata - Separazione interna soggiorno	-0.01
1	W1	Serramenti	0.18
	IF1	Solaio interpiano - Parete esterna isolata	0.01
	Gf13B (b=0.5)	Solaio interpiano (su cantina e scala) - Parete esterna isolata	0.03
	Gf13B (b=0.9)	Solaio interpiano (su garage e vespaio) - Parete esterna isolata	0.12
	R5 (b=0.9)	Parete esterna isolata piano terra - Soffitto piano terra	0.14
	GF5 (b'=2)	Parete esterna isolata piano terra - Pavimento locale hobby	0.08
	R6	Parete garage – Soffitto locale hobby	-0.04
2	C1	Angolo partizione interna isolata (verso garage)	-0.08
3	W1	Perimetro porta garage	0.18

Tabella 8-44: Valori di trasmittanza termica lineare dei ponti termici

Nella precedente tabella, i ponti termici sono stati raccolti in base alla loro tipologia:

- 1: ponti termici presenti tra volume climatizzato ed esterno;
- 2: ponti termici presenti tra volume climatizzato e volume non climatizzato;
- 3: ponti termici presenti tra volume non climatizzato ed esterno.

Modello	$H_{\rm d}$	$\mathrm{H_{u}}$	${ m H_g}$	$H_{\mathrm{tr}}$	S/V	$\mathrm{H'_{t}}$	$H'_{\rm t,lim}$
	[W/K]	[W/K]	[W/K]	[W/K]	$[m^{-1}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
Stato di fatto	132	84	27	242	1.05	0.64	0.53
Post ristrutturazione	91	47	16	154	1.05	0.41	0.53

Tabella 8-45: Verifica del coefficiente medio globale di scambio termico

Nella precedente tabella sono state messe in evidenza:

- 1. le differenze tra i valori di H'<sub>T</sub> tra lo stato di fatto e l'edificio post ristrutturazione;
- 2. il rispetto del valore di H'<sub>T</sub> limite imposto dal DM 26/06/2015 per l'edificio sottoposto a ristrutturazione importante di primo livello.

### Verifica di A<sub>sol,est</sub>

Nella seguente tabella è stato riportato il calcolo dell'area solare estiva e l'esito della verifica secondo quanto indicato nel DM 26/06/2015.

Esposizione	$A_{\mathrm{w,p}}$	$A_{ m g}$	$I_{\rm sol,media\ Luglio}$	$I_{sol,h,media\ annua,\ Roma}$	$A_{\rm sol,est}/A_{\rm sup,utile}$	Area solare specifica limite	Esito
	$[m^2]$	$[m^2]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	[-]	[-]	
Nord	5.52	4.36	124.88	180.36			
Sud	5.82	4.89	132.87	180.36	0.004	0.03	Verificata
Est	3.87	3.14	209.95	180.36			

Tabella 8-46: Verifica dell'area solare equivalente estiva

Come si può notare dalla tabella, con la sostituzione degli infissi l'Asol, est si è ridotta da 0.018 a 0.004.

### 8.4.3.3. Fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento

Le ipotesi alla base del calcolo dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento sono le stesse descritte nel paragrafo 8.3.9<sup>4</sup> per l'edificio allo stato di fatto.

Successivamente sono stati riportati i valori ottenuti e, con il fine di facilitare un confronto tra l'edificio prima e dopo la ristrutturazione, è stato nuovamente riportato il grafico dei fabbisogni del fabbricato allo stato di fatto, relativo alla versione con i ponti termici.

72

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Per il calcolo è stato utilizzato l'Object di Energy Plus "ZoneHVAC: IdealLoadsAirSystem", l'impianto ideale non ha limiti di capacità o di portata, l'impianto di climatizzazione è attivo tutto l'anno 24 ore al giorno e si basa esclusivamente sulle temperature di setpoint da mantenere all'interno delle zone.

Mese	Fabbisogno di riscaldamento [kWh]	Fabbisogno specifico di riscaldamento [kWh/m²]	Fabbisogno di raffrescamento [kWh]	Fabbisogno specifico di raffrescamento $[\mathrm{kWh/m^2}]$
Gennaio	677	6.66	0	0.00
Febbraio	501	4.93	0	0.00
Marzo	314	3.09	0	0.00
Aprile	12	0.12	0	0.00
Maggio	0	0.00	-12	-0.11
Giugno	0	0.00	-106	-1.05
Luglio	0	0.00	-364	-3.58
Agosto	0	0.00	-328	-3.23
Settembre	0	0.00	-34	-0.33
Ottobre	2	0.02	0	0.00
Novembre	318	3.12	0	0.00
Dicembre	610	6.00	0	0.00

Tabella 8-47: Fabbisogno termico mensile post ristrutturazione

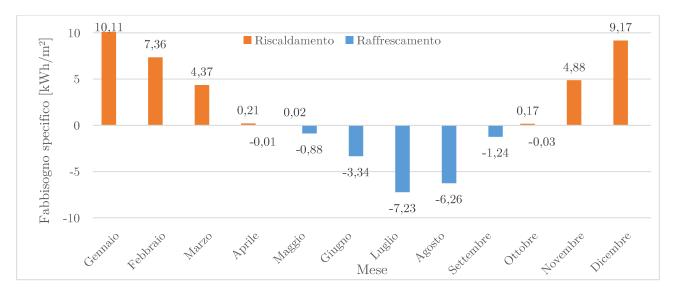


Grafico 8-11: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento per lo stato di fatto

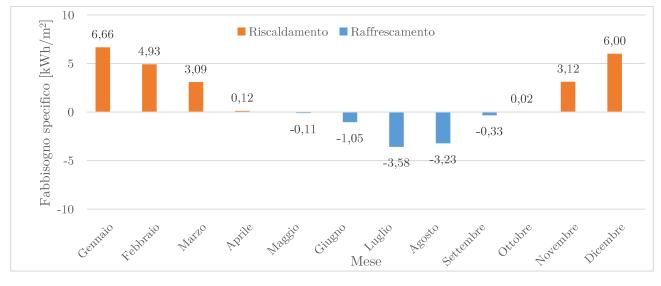


Grafico 8-12: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento post ristrutturazione

### 8.4.4. Palermo

### 8.4.4.1. Descrizione dei componenti edili

Le seguenti tabelle mostrano i valori di trasmittanza termica dell'edificio di riferimento per la zona climatica B, e i componenti edili in seguito alle modifiche apportate durante l'intervento di ristrutturazione.

	U edificio di riferimento
	$[\mathrm{W/m^2K}]$
Strutture opache verticali, verso l'esterno, gli ambienti non climatizzati e contro terra	0.43
Strutture opache orizzontali o inclinate di copertura verso l'esterno	0.35
Strutture opache orizzontali di pavimento verso gli ambienti non climatizzati contro terra	e 0.44
Chiusure tecniche trasparenti, comprensive degli infissi, verso l'esterno	3

Tabella 8-48: Valori di trasmittanza termica dell'edificio di riferimento per la zona climatica B

Gli interventi apportati agli elementi opachi verticali hanno riguardato le pareti a contatto con l'esterno e, come anticipato, è stato scelto di intervenire su di essi sostituendo il tipo di isolante utilizzato e spostando quest'ultimo verso l'esterno.

Inoltre, si è scelto di sostituire le partizioni interne del piano terra a contatto con il vano scala non riscaldato (P\_11\_SDF) con le nuove partizioni P\_13\_NR, in cui si è intervenuti sostituendo il tipo di isolante e di intonaco, al fine di raggiungere i limiti richiesti per le pareti verticali a contatto con gli ambienti non riscaldati.

Codice	Descrizione	$\mathbf{s}$	U	m	$Y_{ie}$
		[cm]	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{kg/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
CV_1	Parete esterna isolata	26.0	0.422	255	0.124
CV_3_SDF	Parete esterna non isolata	23.2	2.107	292	1.318
CV_32	Parete esterna locale hobby (verso terra)	28.2	2.358	294	0.117
P_11_SDF	Partizioni interne	6.0	1.868	18	0.732
P_13_NR	Partizioni interne verso non riscaldato	15.0	0.427	126	0.281
P_1_SDF	Partizione interna soggiorno	22.0	1.763	268	0.907

Tabella 8-49: Caratteristiche dei componenti opachi verticali

Per quanto riguarda i componenti orizzontali, è stato sostituito e aumentato lo strato di isolamento del pavimento del piano terra a contatto con gli ambienti non riscaldati, mantenendone la posizione intermedia all'interno della stratigrafia. La stessa modifica è stata applicata al pavimento del locale hobby, a contatto con il terreno.

Infine, è stato sostituito e aumentato lo strato di isolante che costituisce il soffitto del piano terra, dividendo quest'ultimo dal sottotetto non riscaldato.

Codice	Descrizione	$\mathbf{s}$	U	m	$Y_{ie}$
		[cm]	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{kg/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
F_16	Soffitto del piano terreno	7.0	0.394	16	0.381
F_17	Pavimento del piano terreno (verso non riscaldati)	26.0	0.420	398	0.207
F_17_SDF_LH	Pavimento del piano terreno (verso locale hobby)	27.0	0.500	398	0.136
F_35_SDF	Pavimento del piano interrato (locali non riscaldati)	24.2	0.525	400	0.223
F_35_LH	Pavimento del piano interrato (locale hobby)	24.2	0.386	402	0.109
R_36_SDF	Copertura inclinata	26.2	0.670	478	0.501

Tabella 8-50: Caratteristiche dei componenti opachi orizzontali

Dato il limite meno restringente da rispettare per i componenti vetrati, sono state mantenute finestre e porte vetrate con doppio vetro e intercapedine di 12 mm d'aria.

Alla configurazione dello stato di fatto sono stati applicati opportuni trattamenti a controllo solare e basso emissivi.

Gli infissi sono stati mantenuti in legno, come nella configurazione allo stato di fatto. Infine, vengono mantenute le schermature solari: veneziane di colore chiaro sul lato esterno di tutti i serramenti del piano fuori terra, gestite tramite un setpoint impostato sul valore di incidenza solare pari a  $300 \text{ W/m}^2$ .

Codice	Ag	Af	Aw	Ug	Uf	1	ψ	Uw
	$[m^2]$	$[m^2]$	$[m^2]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	[m]	[W/mK]	$[\mathrm{W/m^2K}]$
W01	1.07	0.31	1.38	1.800	2.100	4.14	0.08	2.107
W02	0.77	0.27	1.04	1.800	2.100	3.54	0.08	2.151
W03	1.68	0.39	2.07	1.800	2.100	5.34	0.08	2.063
W04	0.27	0.17	0.44	1.800	2.100	2.10	0.08	2.294
W05	2.13	0.45	2.58	1.800	2.100	6.14	0.08	2.043

W06	$1.53 \ 0.41$	1.94	1.800	2.100	5.54	0.08	2.092
W07	2.33 0.46	2.80	1.800	2.100	6.34	0.08	2.031

Tabella 8-51: Caratteristiche dei componenti trasparenti

Codice	$\mathrm{ggl}_{,\mathrm{n}}$	gg+sh	τv
	[-]	[-]	[-]
W01	0.44	0.15	0.33
W02	0.44	0.15	0.33
W03	0.44	0.15	0.33
W04	0.44	0.15	0.33
W05	0.44	0.15	0.33
W06	0.44	0.15	0.33
W07	0.44	0.15	0.33

Tabella 8-52: Parametri solari dei componenti trasparenti

# 8.4.4.2. Verifica di $H'_T$ e $A_{sol,est}$

# Verifica di H'<sub>T</sub>

Le considerazioni effettuate per il calcolo dellH'<sub>T</sub> descritte nel paragrafo 8.3.2 restano valide per tutte e tre le città; di seguito sono state riportate esclusivamente delle tabelle che riassumono i calcoli effettuati per la città di Palermo.

Tipo	Codice	Ponte termico	ψe
			$[\mathrm{W/mK}]$
	C1	Angolo parete esterna isolata locale hobby	-0.09
	R5 (b=0.8)	Parete esterna isolata-Parete interna (verso garage)	0.13
	R 5 (con b=0.4)	Parete esterna isolata-Parete interna (versoscala)	0.11
	IW1	Parete esterna isolata - Separazione interna	0.00
	IW1	Parete esterna isolata - Separazione interna soggiorno	-0.01
1	W1	Serramenti	0.17
	IF1	Solaio interpiano - Parete esterna isolata	0.01
	Gf13B (b=0.5)	Solaio interpiano (su cantina e scala) - Parete esterna isolata	-0.03
	Gf13B (b=0.9)	Solaio interpiano (su garage e vespaio) - Parete esterna isolata	0.08
	R5 (b=0.9)	Parete estern isolata piano terra - Soffito piano terra	0.13
	GF5 (b'=2)	Parete esterna isolata piano terra - Pavimento locale hobby	0.04

2	R6	Parete garage – Soffitto locale hobby	-0.23
	C1	Angolo partizione interna isolata (verso garage)	-0.09
3	W1	Perimetro porta garage	0.17

Tabella 8-53: Valori di trasmittanza termica lineare dei ponti termici

Nella precedente tabella, i ponti termici sono stati raccolti in base alla loro tipologia:

- 1: ponti termici presenti tra volume climatizzato ed esterno;
- 2: ponti termici presenti tra volume climatizzato e volume non climatizzato;
- 3: ponti termici presenti tra volume non climatizzato ed esterno.

Modello	$H_{\rm d}$	$\mathrm{H_{u}}$	${ m H_g}$	${ m H_{tr}}$	S/V	$\mathbf{H'}_{\mathrm{t}}$	$\mathrm{H'_{t,lim}}$
	[W/K]	[W/K]	[W/K]	[W/K]	$[m^{-1}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
Stato di fatto	132	84	27	242	1.05	0.64	0.58
Post ristrutturazione	115	62	22	199	1.05	0.53	0.58

Tabella 8-54: Verifica del coefficiente medio globale di scambio termico

Nella precedente tabella sono state messe in evidenza:

- 1. le differenze tra i valori di H'<sub>T</sub> tra lo stato di fatto e l'edificio post ristrutturazione;
- 2. il rispetto del valore di H'<sub>T</sub> limite imposto dal DM 26/06/2015 per l'edificio sottoposto a ristrutturazione importante di primo livello.

### Verifica di A<sub>sol,est</sub>

Nella seguente tabella è stato riportato il calcolo dell'area solare estiva e l'esito della verifica secondo quanto indicato nel DM 26/06/2015.

Esposizione	$A_{\mathrm{w,p}}$	$A_{ m g}$	$I_{sol,media\ Luglio}$	$I_{sol,h,media\ annua,\ Roma}$	$A_{\rm sol,est}/A_{\rm sup,utile}$	Area solare specifica limite	Esito
	$[m^2]$	$[m^2]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	[-]	[-]	
Nord	5.52	4.36	118.75	180.36			
Sud	5.82	4.89	112.62	180.36	0.010	0.03	Verificata
Est	3.87	3.14	185.07	180.36			

Tabella 8-55: Verifica dell'area solare equivalente estiva specifica

Come si può notare dalla tabella, con la sostituzione degli infissi l'Asol,<br/>est si è ridotta da 0.016 a 0.010.

## 8.4.4.3. Fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento

Le ipotesi alla base del calcolo dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento sono le stesse descritte nel paragrafo 8.3.9 per l'edificio allo stato di fatto.

Successivamente sono stati riportati i valori ottenuti e, con il fine di facilitare un confronto tra l'edificio prima e dopo la ristrutturazione, è stato nuovamente riportato il grafico dei fabbisogni del fabbricato allo stato di fatto, relativo alla versione con i ponti termici.

Mese	Fabbisogno di riscaldamento	Fabbisogno specifico di riscaldamento	Fabbisogno di raffrescamento	Fabbisogno specifico di raffrescamento
	[kWh]	$[{ m kWh/m^2}]$	[kWh]	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Gennaio	500	4.92	0	0.00
Febbraio	391	3.85	0	0.00
Marzo	200	1.97	0	0.00
Aprile	11	0.11	0	0.00
Maggio	0	0.00	-39	-0.38
Giugno	0	0.00	-244	-2.40
Luglio	0	0.00	-489	-4.81
Agosto	0	0.00	-419	-4.12
Settembre	0	0.00	-117	-1.15
Ottobre	0	0.00	-5	-0.05
Novembre	76	0.75	0	0.00
Dicembre	389	3.83	0	0.00

Tabella 8-56: Fabbisogno termico mensile post ristrutturazione

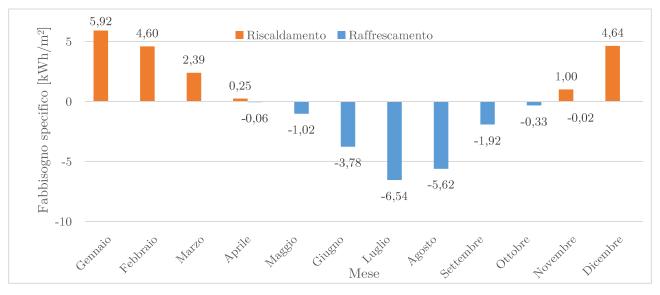


Grafico 8-13: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e raffrescamento per lo stato di fatto

78

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Per il calcolo è stato utilizzato l'Object di Energy Plus "ZoneHVAC: IdealLoadsAirSystem", l'impianto ideale non ha limiti di capacità o di portata, l'impianto di climatizzazione è attivo tutto l'anno 24 ore al giorno e si basa esclusivamente sulle temperature di setpoint da mantenere all'interno delle zone.

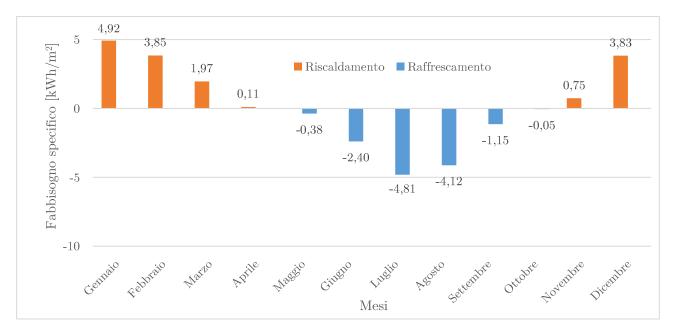


Grafico 8-14: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e raffrescamento post ristrutturazione

## 8.4.5. Confronti tra le tre città

Nel presente paragrafo sono stati riportati i fabbisogni annuali per la climatizzazione dell'edificio prima e dopo la ristrutturazione per Milano, Roma e Palermo.

	Fabbisogno annuale		Fabbisogno specifico annuale	
Città	Riscaldamento	Raffrescamento	Riscaldamento	Raffrescamento
	[kWh]	[kWh]	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Milano	3465	-809	34.10	-7.96
Roma	2434	-844	23.95	-8.30
Palermo	1567	-1312	15.42	-12.91

 $Tabella\ 8\text{-}57\ :Fabbisogno\ termico\ annuale\ di\ riscaldamento\ e\ raffrescamento$ 

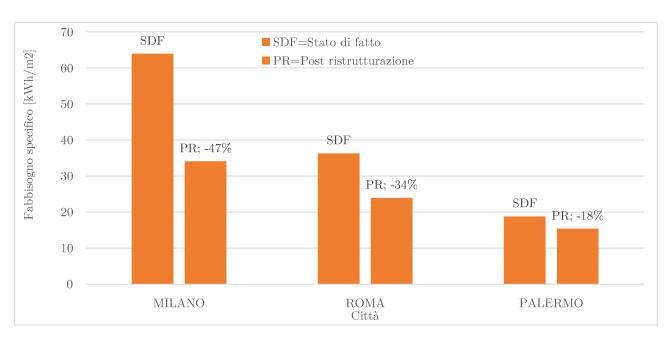


Grafico 8-15: Confronto tra i fabbisogni termici specifici annuali di riscaldamento

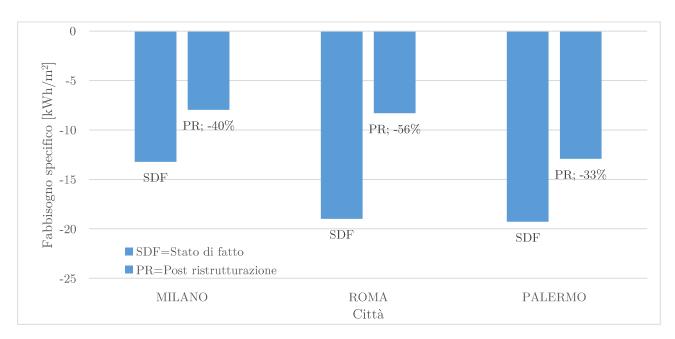


Grafico 8-16: Confronto tra i fabbisogni termici specifici annuali di raffrescamento

Come risulta evidente dai grafici, in seguito agli interventi di ristrutturazione, si è ottenuta un'elevata diminuzione dei carichi di riscaldamento in ogni città: si passa da un 47% per Milano, fino ad un 18% per Palermo.

L'elevata diminuzione ricavata per la città Milano è dovuta ai limiti sui parametri caratterizzanti l'involucro molto più restrittivi per la zona climatica E, rispetto a tutte le altre zone climatiche.

In generale, è stato ricavato un notevole miglioramento anche del comportamento estivo dell'edificio, per il quale si è ottenuta una diminuzione del fabbisogno termico di raffrescamento per ogni città.

# 8.5. Impianti

## 8.5.1. Impianto di riscaldamento, ACS e raffrescamento

Come precedentemente introdotto nel capitolo dedicato agli impianti (capitolo 6), il tipo di generatore selezionato per il riscaldamento e il raffrescamento è una pompa di calore elettrica aria-acqua.

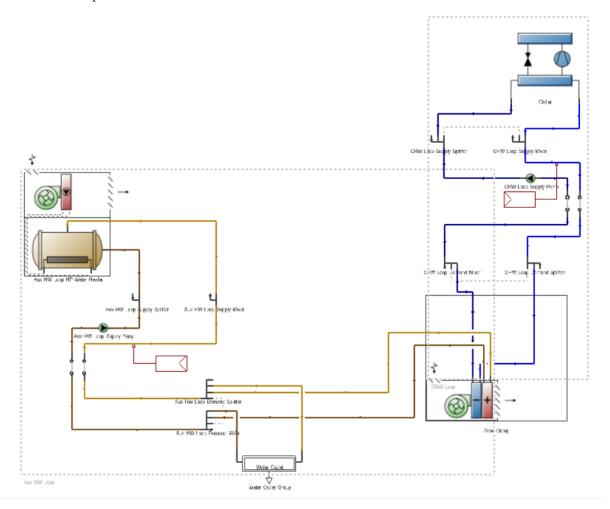


Figura 8-7: Schema idraulico dell'impianto

Per il caso studio in esame, è necessario specificare che la stessa pompa di calore viene utilizzata anche per la produzione di ACS: considerando il consumo di picco giornaliero, pari a 72.5 l, durante lo slot orario 20:00-21:00, per ogni città si prevede l'integrazione di un serbatoio di accumulo da 100 l, dove l'acqua viene mantenuta a 55°C, per poi essere erogata ai terminali dell'acqua calda sanitaria a 40°C.

Nella modellazione, la pompa di calore che si occupa del riscaldamento e della produzione di acqua calda sanitaria è stata progettata per ognuna delle tre città affinchè, nelle condizioni nominali di temperatura dell'aria esterna a 7°C, producesse acqua a 55°C: tale valore è stato scelto per impedire lo sviluppo dei batteri nell'acqua accumulata nel serbatoio. Il circuito di riscaldamento alimenta poi dei ventilconvettori ad una temperatura dell'acqua di 45°C durante il periodo invernale.

Caratteristica	Unità di misura	Valore
Temperatura nominale a bulbo secco dell'aria in ingresso all'evaporatore	$^{\circ}\mathrm{C}$	7
Temperatura nominale a bulbo umido dell'aria in ingresso all'evaporatore	$^{\circ}\mathrm{C}$	6
Temperatura nominale dell'acqua in ingresso al condensatore	$^{\circ}\mathrm{C}$	47
Programmazione temperatura setpoint compressore	$^{\circ}\mathrm{C}$	65
Temperatura minima dell'aria in ingresso per il funzionamento del compressore	$^{\circ}\mathrm{C}$	-10
Temperatura di setpoint del serbatoio di accumulo	$^{\circ}\mathrm{C}$	55
Temperatura di mandata dell'acqua	$^{\circ}\mathrm{C}$	55
Temperatura di uscita dal circuito	$^{\circ}\mathrm{C}$	45
Differenza di temperatura del circuito	$^{\circ}\mathrm{C}$	5

Tabella 8-58: Temperature di funzionamento della pompa di calore

Il chiller è stato invece progettato affinchè nelle condizioni nominali di temperatura dell'aria esterna di 35°C producesse acqua a 7°C, temperatura alla quale vengono alimentati i ventilconvettori nel periodo estivo.

Caratteristica	Unità di misura	Valore
Temperatura nominale dell'acqua refrigerata in uscita	$^{\circ}\mathrm{C}$	7
Temperatura nominale del fluido in ingresso al condensatore	$^{\circ}\mathrm{C}$	35
Temperatura di mandata dell'acqua	$^{\circ}\mathrm{C}$	7
Temperatura di uscita dal circuito	$^{\circ}\mathrm{C}$	7
Differenza di temperatura del circuito	$^{\circ}\mathrm{C}$	5

Tabella 8-59: Temperature di funzionamento della pompa di calore del chiller

I ventilconvettori sono quindi alimentati con acqua a 45°C con un ritorno a 40°C durante il periodo invernale e a 7°C con un ritorno a 12°C durante quello estivo.

Tipo	Caratteristica	Unità di misura	Valore
	Temperatura dell'aria di mandata	$^{\circ}\mathrm{C}$	30
Riscaldamento	Temperatura dell'acqua in ingresso al ventilconvettore	$^{\circ}\mathrm{C}$	45
	Temperatura dell'aria di mandata	$^{\circ}\mathrm{C}$	19
Raffrescamento	Temperatura dell'acqua in ingresso al ventilconvettore	$^{\circ}\mathrm{C}$	7

Tabella 8-60: Temperature di funzionamento dei ventilconvettori

Infine, la pompa di calore ha un funzionamento continuo durante la giornata e per tutto l'anno, in quanto si occuperà sia del riscaldamento, sia della produzione di acqua calda sanitaria. In particolare, la durata del periodo di riscaldamento è stata imposta secondo il  $D.P.R.\ 26/08/1993,\ n.\ 412$ , in base alla zona climatica in questione.

Città	Zona climatica	Periodo di accensione
Milano	E	15 ottobre - 15 aprile
Roma	D	1° novembre - 15 aprile
Palermo	В	1° dicembre - 31 marzo

Tabella 8-61: Periodo di accensione degli impianti di riscaldamento (D.P.R. 26/08/1993)

Il chiller ha un funzionamento continuo durante tutta la giornata nel periodo complementare a quello di riscaldamento previsto per la zona climatica considerata.

# 8.5.2. Impianto fotovoltaico

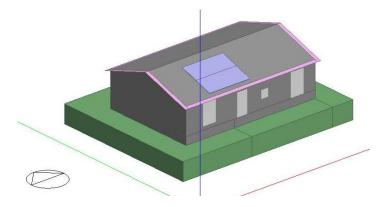
Nel caso di edifici sottoposti a ristrutturazioni rilevanti la potenza elettrica degli impianti alimentati da fonti rinnovabili che devono essere obbligatoriamente installati sopra, all'interno dell'edificio o nelle relative pertinenze risulta essere pari a P e viene calcolata come imposto dal *D.Lgs. 3 marzo 2011, n. 28*.

Caratteristica	Unità di misura	Valore
Superficie in pianta a livello del terreno	$\mathrm{m}^2$	91.2
Coefficiente K	$\mathrm{m^2/kW}$	50
Potenza elettrica obbligatoria	kW	1.824

Tabella 8-62: Calcolo potenza elettrica obbligatoria

In base alla potenza minima da garantire, per ogni città in esame si è prevista la presenza di 8 pannelli fotovoltaici, inclinati secondo la pendenza delle falde di copertura, precisamente sulla falda orientata verso Sud.

Tali elementi sono stati modellati descritto dettagliatamente nel paragrafo 6.2.



 $Figura\ 8\text{-}8:\ Modellazione\ dei\ pannelli\ fotovoltaici$ 

Di seguito vengono riassunti i dati estrapolati da scheda tecnica relativi ad un modulo fotovoltaico con celle solari policristalline, riferite alle condizioni nominali: intensità di irraggiamento pari a  $1000~\rm W/m^2$  e temperatura della cella pari a  $25\rm ^{\circ}C$ .

Caratteristica	Unità di misura	Valore
Numero celle	-	60 (6x10)
Altezza celle	mm	156
Larghezza celle	${ m mm}$	156
Area attiva	$\mathrm{m}^2$	1.46
Altezza pannello	mm	1638
Larghezza pannello	mm	982
Spessore pannello	mm	40
Potenza nominale	W	235
Tensione nominale	V	29.80
Corrente nominale	A	7.90

Tabella 8-63: Dati tecnici dei pannelli fotovoltaici

### 8.5.3. Procedura di calcolo

Nel presente paragrafo verrà definita la procedura di calcolo che ha portato a definire gli indici di prestazione energetica globale dovuti al fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale ed estiva e per la produzione di acqua calda sanitaria dei diversi modelli realizzati.

Infatti, l'indice di prestazione energetica globale dell'edificio è un parametro architettonico che esprime il consumo totale di energia primaria riferito all'unità di superficie utile. Nel caso in esame, tale indice è calcolato con la seguente somma:

$$E_{Pgl,tot} = E_{PH,tot} + E_{PW,tot} + E_{PC,tot}$$

Dove:

- E<sub>PH</sub> è l'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale [kWh/m<sup>2</sup>];
- E<sub>PW</sub> è l'indice di prestazione energetica per la produzione di ACS [kWh/m<sup>2</sup>];
- E<sub>PC</sub> è l'indice di prestazione energetica per la climatizzazione estiva [kWh/m<sup>2</sup>];

Ognuno di questi indici viene calcolato tenendo conto sia del contributo di energia rinnovabile che non rinnovabile, con l'utilizzo dei fattori di conversione presenti nella  $tabella\ n$ .

$$E_{Ptot} = E_{Pren} + E_{Pnren}$$

Tramite gli output disponibili su Energy Plus non è stato possibile ricavare ognuno di questi parametri distintamente, perciò di seguito verranno descritti i passaggi necessari al calcolo di tali indici.

Le pompe di calore ad aria, traggono gran parte della loro energia dalla fonte energetica aria, mentre la restante parte necessaria per il funzionamento del macchinario è generata dall'elettricità.

Al fine di ricavare tali quote, è stato possibile ottenere tramite Energy Plus l'energia termica Q<sub>out</sub> prodotta rispettivamente dalla pompa di calore e dal chiller tenendo conto delle efficienze dei sottosistemi di generazione e di utilizzo.

È stato quindi ricavato il valore di energia termica prodotta per il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria, proveniente dalla pompa di calore tramite l'output "Water Heater Use Side Heat Transfer Rate". Il valore di energia termica prodotta per il raffrescamento proveniente dal chiller è stato invece ricavato tramite l'output "Chiller Evaporator Cooling Rate".

I contributi di energia termica prodotti da pompa di calore e chiller, sono stati poi depurati dell'efficienza dei sottosistemi di utilizzo pari a 0.81 imposta dal DM 26/06/2015, ottenendo la componente relativa alla sola generazione, rispettivamente per la pompa di calore e per il chiller:

$$Q_{gen,out,heatpump} = \frac{Q_{out}}{0.81}$$

$$Q_{gen,out,chiller} = \frac{Q_{out}}{0.81}$$

È stato poi ricavato il contributo di energia elettrica in ingresso alla pompa di calore  $E_{el,heatpump}$  tramite gli output "Cooling Coil Water Heating Electric Power" e "Fan Electric Power", mentre per quanto riguarda l'energia elettrica in ingresso al chiller  $E_{el,chiller}$  è stato utilizzato l'output "Chiller Electric Power".

In questo modo, è stato possibile ricavare la componente di energia estrapolata dall'aria esterna per entrambe le tipologie di impianto tramite la seguente equazione:

$$Q_{env} = Q_{gen,out} - E_{el}$$

Si è giunti quindi a una distinzione tra la quantità di energia utilizzata per la generazione proveniente da fonte rinnovabile Q<sub>env</sub> e la quantità di energia elettrica E<sub>el</sub>, comprensiva sia della quota di energia elettrica da rete, sia di quella prodotta da fotovoltaico.

Tramite l'output "Facility Total Produced Electric Power" è stato poi possibile ricavare l'energia elettrica totale prodotta dall'impianto fotovoltaico; successivamente è stato possibile ricavarne la percentuale effettivamente utilizzata, considerando i consumi elettrici mensili ("Electricity consumptions for end uses"). Infatti, soprattutto nei mesi estivi, viene prodotto un surplus di energia elettrica proveniente da fotovoltaico.

In seguito, è stato possibile suddividere l'energia termica proveniente dall'aria e i consumi elettrici della pompa di calore nelle percentuali utilizzate rispettivamente per il riscaldamento e per la produzione di acqua calda sanitaria, grazie agli output "Zone Air System Sensible Heating Rate" e "Water Use Equipment Heating Rate".

Ad ogni servizio (riscaldamento, ACS e raffrescamento) è stato associato mensilmente il rispettivo consumo di energia elettrica totale, e, in base al quale, è stata ripartita anche l'energia elettrica prodotta da fotovoltaico e destinata a tale servizio.

A questo punto, è stato possibile calcolare la quota di energia primaria rinnovabile e non rinnovabile tramite gli opportuni fattori di conversione:

$$E_{p,nren} = E_{el} \cdot 1.95$$
 
$$E_{p,ren} = E_{el} \cdot 0.47 + Q_{env} \cdot 1 + E_{PV} \cdot 1$$

Infine, si è proceduto al calcolo del parametro RER "Renewable Energy Ratio":

$$RER = \frac{E_{Pren}}{E_{Ptot}}$$

### 8.5.4. Milano

### 8.5.4.1. Specifiche tecniche dell'impianto

A fronte di una richiesta di picco pari a 1.8 kW per il riscaldamento e di 1.1 kW per il raffrescamento è stata scelta da scheda tecnica una pompa di calore aria-acqua a ciclo invertibile che nelle condizioni nominali fosse in grado di soddisfare tali richieste.

In particolare, durante il periodo invernale, la pompa di calore selezionata, nelle condizioni nominali "aria 7°C e acqua 55°C" fornirà una potenza pari a 3.9 kW con una COP di 2.95. Il valore di COP viene poi ridotto a 2.39 per tenere conto dell'efficienza di 0.81 dei sottosistemi di utilizzo imposta dal DM 26/06/2015.

Durante il periodo estivo, invece, la stessa pompa di calore, nelle condizioni nominali "aria 35°C e acqua 7°C" fornirà una potenza pari a 3.6 kW con una COP di 3.24. Il valore di

COP viene poi ridotto a 2.62 per tenere conto dell'efficienza di 0.81 dei sottosistemi di utilizzo imposta dal DM 26/06/2015.

# 8.5.4.2. Indici di prestazione energetica

Di seguito sono riportate le tabelle contenenti le quote relative a energia termica proveniente dall'aria, energia elettrica da rete e energia elettrica prodotta da fotovoltaico relativa ad ogni mese per ogni servizio preso in considerazione.

Riscaldamento				
Mese	Energia elettrica da rete	Energia aerotermica	Energia elettrica da PV	
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	
Gennaio	598	399	86	
Febbraio	286	246	103	
Marzo	69	138	144	
Aprile	0	40	85	
Maggio	0	19	23	
Giugno	1	7	5	
Luglio	1	4	2	
Agosto	2	8	5	
Settembre	0	17	23	
Ottobre	39	90	93	
Novembre	405	289	65	
Dicembre	688	430	65	

Tabella 8-64: Energia richiesta dalla pompa di calore per il riscaldamento

Acqua calda sanitaria				
Mese	Energia elettrica da rete	Energia aerotermica	Energia elettrica da PV	
_	[kWh]	[kWh]	[kWh]	
Gennaio	96	73	14	
Febbraio	69	71	25	
Marzo	30	81	61	
Aprile	0	73	71	
Maggio	0	75	55	
Giugno	8	77	47	

Luglio	16	79	38
Agosto	14	72	36
Settembre	0	58	47
Ottobre	18	69	44
Novembre	75	64	12
Dicembre	96	68	9

Tabella 8-65: Energia richiesta dalla pompa di calore per l'acqua calda sanitaria

Raffrescamento				
Mese	Energia elettrica da rete	Energia aerotermica	Energia elettrica da PV	
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	
Gennaio	0	0	0	
Febbraio	0	0	0	
Marzo	0	0	0	
Aprile	0	0	0	
Maggio	0	16	85	
Giugno	43	91	256	
Luglio	118	163	287	
Agosto	92	136	240	
Settembre	0	4	82	
Ottobre	0	0	0	
Novembre	0	0	0	
Dicembre	0	0	0	

Tabella 8-66: Energia richiesta dalla pompa di calore per il raffrescamento

Di seguito vengono mostrati nella tabella e nei grafici sottostanti gli indici di prestazione energetica ottenuti, relativi a riscaldamento, ACS e raffrescamento:

	Riscaldamento	ACS	Raffrescamento	Globale
	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^3}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Energia elettrica da rete	21	4	2	27
Energia aerotermica	17	8	4	29
Energia elettrica da PV	7	5	9	21
EPn,ren	40	8	5	53
EP,ren	32	15	14	61
RER	44%	65%	75%	54%

Tabella 8-67: Calcolo degli indici di prestazione energetica

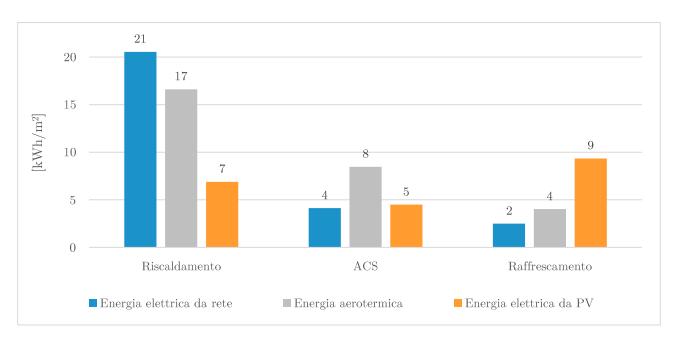


Grafico 8-17: Energia specifica richiesta dalla pompa di calore

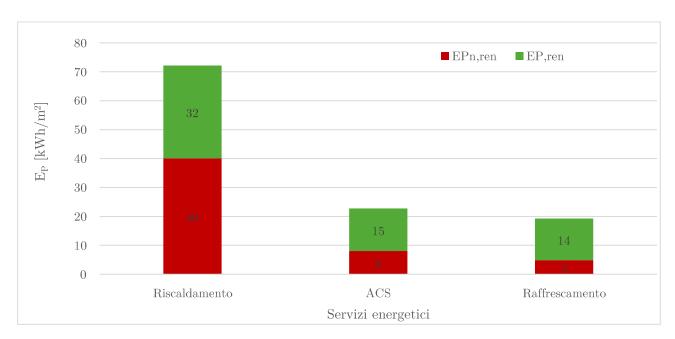


Grafico 8-18: Indici di prestazione energetica

Infine, come richiesto nel *D.Lgs. 3 marzo 2011, n. 28*, si verifica il contemporaneo rispetto della copertura, tramite il ricorso ad energia prodotta da impianti alimentati da fonti rinnovabili, del 76% dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria e del 65% della somma dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria, il riscaldamento e il raffrescamento.

### 8.5.5. Roma

### 8.5.5.1. Specifiche tecniche dell'impianto

A fronte di una richiesta di picco pari a 1.6 kW per il riscaldamento e di 1.3 kW per il raffrescamento è stata scelta da scheda tecnica una pompa di calore aria-acqua a ciclo invertibile che nelle condizioni nominali fosse in grado di soddisfare tali richieste.

In particolare, durante il periodo invernale, la pompa di calore selezionata, nelle condizioni nominali "aria 7°C e acqua 55°C" fornirà una potenza pari a 3.9 kW con una COP di 2.95. Il valore di COP viene poi ridotto a 2.39 per tenere conto dell'efficienza di 0.81 dei sottosistemi di utilizzo imposta dal DM 26/06/2015.

Durante il periodo estivo, invece, la stessa pompa di calore, nelle condizioni nominali "aria  $35^{\circ}$ C e acqua  $7^{\circ}$ C" fornirà una potenza pari a 3.6 kW con una COP di 3.24. Il valore di COP viene poi ridotto a 2.62 per tenere conto dell'efficienza di 0.81 dei sottosistemi di utilizzo imposta dal DM 26/06/2015.

### 8.5.5.2. Indici di prestazione energetica

Di seguito sono riportate le tabelle contenenti le quote relative a energia termica proveniente dall'aria, energia elettrica da rete e energia elettrica prodotta da fotovoltaico relativa ad ogni mese per ogni servizio preso in considerazione.

Riscaldamento				
Mese	Energia elettrica da rete	Energia aerotermica	Energia elettrica da PV	
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	
Gennaio	389	363	107	
Febbraio	262	259	122	
Marzo	84	175	165	
Aprile	0	21	60	
Maggio	0	18	30	
Giugno	0	11	10	
Luglio	1	3	2	
Agosto	1	5	3	

Settembre	0	15	16
Ottobre	0	18	54
Novembre	141	176	97
Dicembre	347	327	104

Tabella 8-68: Energia richiesta dalla pompa di calore per il riscaldamento

Acqua calda sanitaria				
Mese	Energia elettrica da rete	Energia aerotermia	Energia elettrica da PV	
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	
Gennaio	76	84	21	
Febbraio	63	74	29	
Marzo	31	84	61	
Aprile	0	74	68	
Maggio	0	75	57	
Giugno	0	74	52	
Luglio	12	80	43	
Agosto	13	77	38	
Settembre	0	64	47	
Ottobre	0	66	52	
Novembre	45	73	31	

Tabella 8-69: Energia richiesta dalla pompa di calore per l'acqua calda sanitaria

79

21

71

 ${\bf Dicembre}$ 

	Raffrescamento				
Mese	Energia elettrica da rete	Energia aerotermia	Energia elettrica da PV		
	[kWh]	[kWh]	[kWh]		
Gennaio	0	0	0		
Febbraio	0	0	0		
Marzo	0	0	0		
Aprile	0	0	0		
Maggio	0	3	42		
Giugno	0	29	186		
Luglio	94	173	332		
Agosto	94	170	285		
Settembre	0	4	96		
Ottobre	0	0	0		

Novembre	0	0	0
Dicembre	0	0	0

Tabella 8-70: Energia richiesta dalla pompa di calore per il raffrescamento

Di seguito vengono mostrati nella tabella e nei grafici sottostanti gli indici di prestazione energetica ottenuti, relativi a riscaldamento, ACS e raffrescamento:

	Riscaldamento	ACS	Raffrescamento	Globale
	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[{ m kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Energia elettrica da rete	12	3	2	17
Energia termica dall'ambiente esterno	14	9	4	26
Energia elettrica da PV	8	5	9	22
EPn,ren	23	6	4	33
EP,ren	26	15	14	55
RER	53%	72%	79%	63%

Tabella 8-71: Calcolo degli indici di prestazione energetica

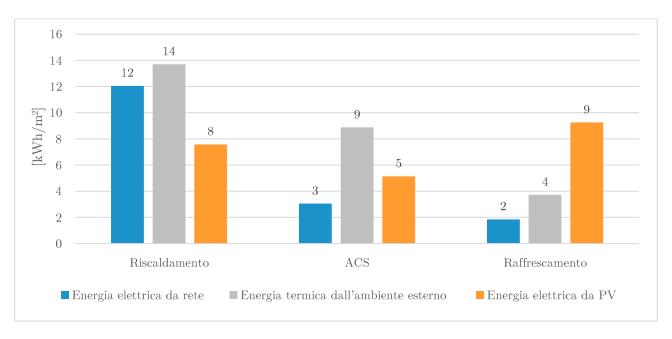


Grafico 8-19; Energia specifica richiesta dalla pompa di calore

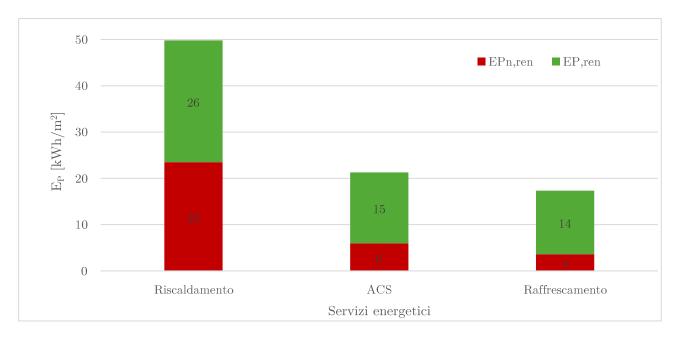


Grafico 8-20: Indici di prestazione energetica

Infine, come richiesto nel *D.Lgs. 3 marzo 2011, n. 28*, si verifica il contemporaneo rispetto della copertura, tramite il ricorso ad energia prodotta da impianti alimentati da fonti rinnovabili, del 82% dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria e del 74% della somma dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria, il riscaldamento e il raffrescamento.

### 8.5.6. Palermo

### 8.5.6.1. Specifiche tecniche dell'impianto

A fronte di una richiesta di picco pari a 1.7 kW per il riscaldamento e di 1.5 kW per il raffrescamento è stata scelta da scheda tecnica una pompa di calore aria-acqua a ciclo invertibile che nelle condizioni nominali fosse in grado di soddisfare tali richieste.

In particolare, durante il periodo invernale, la pompa di calore selezionata, nelle condizioni nominali "aria 7°C e acqua 55°C" fornirà una potenza pari a 3.9 kW con una COP di 2.95. Il valore di COP viene poi ridotto a 2.39 per tenere conto dell'efficienza di 0.81 dei sottosistemi di utilizzo imposta dal DM 26/06/2015.

Durante il periodo estivo, invece, la stessa pompa di calore, nelle condizioni nominali "aria 35°C e acqua 7°C" fornirà una potenza pari a 3.6 kW con una COP di 3.24. Il valore di

COP viene poi ridotto a 2.62 per tenere conto dell'efficienza di 0.81 dei sottosistemi di utilizzo imposta dal DM 26/06/2015.

# 8.5.6.2. Indici di prestazione energetica

Di seguito sono riportate le tabelle contenenti le quote relative a energia termica proveniente dall'aria, energia elettrica da rete e energia elettrica prodotta da fotovoltaico relativa ad ogni mese per ogni servizio preso in considerazione.

Riscaldamento				
Mese	Energia elettrica da rete	Energia aerotermica	Energia elettrica da PV	
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	
Gennaio	258	276	108	
Febbraio	184	218	112	
Marzo	20	120	160	
Aprile	0	19	62	
Maggio	0	18	22	
Giugno	1	9	7	
Luglio	1	2	1	
Agosto	1	2	1	
Settembre	1	13	10	
Ottobre	0	21	38	
Novembre	0	20	60	
Dicembre	195	223	95	

Tabella 8-72: Energia richiesta dalla pompa di calore per il riscaldamento

Acqua calda sanitaria				
Mese	Energia elettrica da rete	Energia aerotermica	Energia elettrica da PV	
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	
Gennaio	66	87	27	
Febbraio	53	79	33	
Marzo	10	85	78	
Aprile	0	72	66	
Maggio	0	78	57	
Giugno	5	78	49	

Luglio	20	84	35
Agosto	21	81	32
Settembre	3	69	43
Ottobre	0	69	49
Novembre	0	69	57
Dicembre	57	84	28

Tabella 8-73: Energia richiesta dalla pompa di calore per l'acqua calda sanitaria

	${f Raffrescamento}$				
Mese	Energia elettrica da rete	Energia aerotermica	Energia elettrica da PV		
	[kWh]	[kWh]	[kWh]		
Gennaio	0	0	0		
Febbraio	0	0	0		
Marzo	0	0	0		
Aprile	0	0	0		
Maggio	0	9	91		
Giugno	25	130	259		
Luglio	168	321	295		
Agosto	178	253	269		
Settembre	13	46	182		
Ottobre	0	0	34		
Novembre	0	0	0		
Dicembre	0	0	0		

Tabella 8-74: Energia richiesta dalla pompa di calore per il raffrescamento

Di seguito vengono mostrati nella tabella e nei grafici sottostanti gli indici di prestazione energetica ottenuti, relativi a riscaldamento, ACS e raffrescamento:

	Riscaldamento	ACS	Raffrescamento	Globale
	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^3}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Energia elettrica da rete	6	2	4	13
Energia aerotermica	9	9	7	26
Energia elettrica da PV	7	5	11	23
EPnren	13	5	7	25
EPren	19	16	20	54
RER	60%	78%	73%	69%

Tabella 8-75: Calcolo degli indici di prestazione energetica

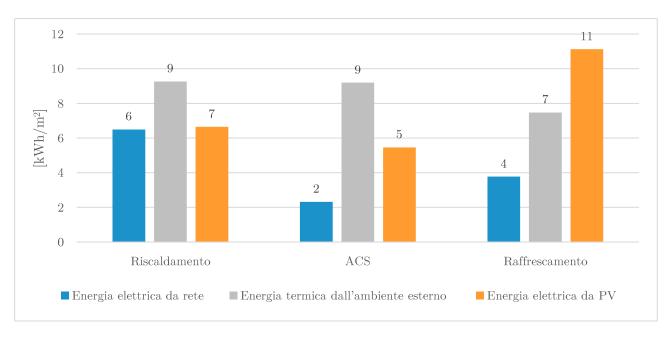


Grafico 8-21: Energia specifica richiesta dalla pompa di calore

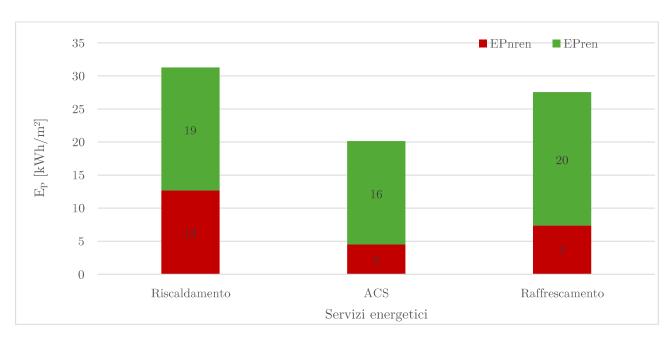


Grafico 8-22: Indici di prestazione energetica

Infine, come richiesto nel *D.Lgs. 3 marzo 2011, n. 28*, si verifica il contemporaneo rispetto della copertura, tramite il ricorso ad energia prodotta da impianti alimentati da fonti rinnovabili, del 86% dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria e del 80% della somma dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria, il riscaldamento e il raffrescamento.

### 8.5.7. Confronti

Di seguito vengono riportati in un apposito diagramma i consumi della pompa di calore relativi a riscaldamento, ACS e raffrescamento, per ognuna delle città in esame.

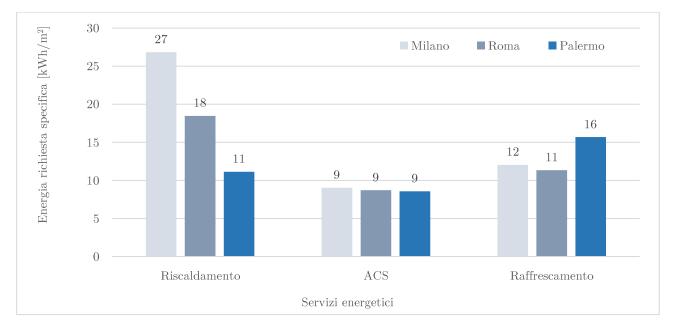


Grafico 8-23: Energia specifica richiesta dalla pompa di calore

Come è possibile osservare dal grafico sopra riportato i grafici dei consumi rispecchiamo l'andamento dei fabbisogni termici di ogni città: i consumi di riscaldamento tendono a diminuire da Milano verso Palermo, al contrario, quelli relativi al raffrescamento, tendono ad aumentare.

In particolare, è possibile notare che il consumo della pompa di calore relativo al raffrescamento per la città di Roma, risulta essere leggermente minore rispetto a quello di Milano: questo può essere motivato dalla diversa prestazione della stessa pompa di calore in due città differenti.

Il rendimento di una pompa di calore risulta strettamente legato alle caratteristiche climatiche del sito in esame, oltre che alla richiesta energetica dell'edificio; perciò, a fronte di una richiesta di raffrescamento confrontabile per le due città (pari a 7.96 kWh/m² per Milano e 8.30 kWh/m² per Roma), probabilmente il minor consumo ottenuto per la città di Roma è collegato alla presenza di temperature minori rispetto a Milano, in

corrispondenza della richiesta di raffrescamento, che permettono all'impianto di ottenere una EER maggiore.

Infine, per quanto riguarda i consumi relativi al servizio di acqua calda sanitaria, questi sono gli stessi per ogni città, così come il relativo fabbisogno termico.

Successivamente, per ogni servizio energetico analizzato, vengono mostrate le quote derivate da fonte rinnovabile (in verde) e non rinnovabile (in rosso), per le tre città considerate.

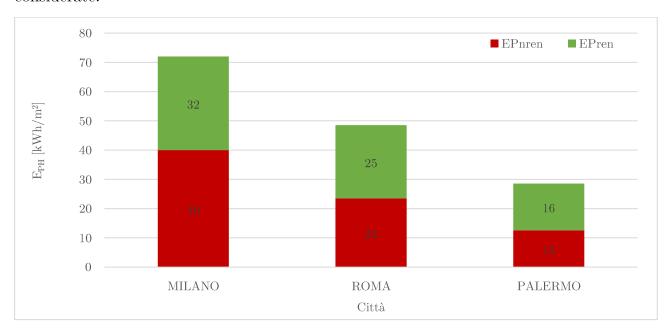


Grafico 8-24: Indici di prestazione per il riscaldamento

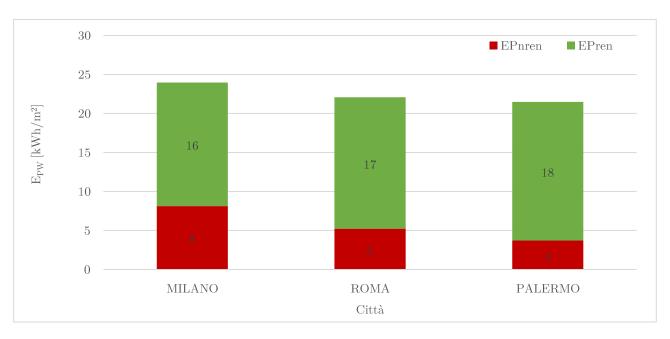


Grafico 8-25: Indici di prestazione per l'acqua calda sanitaria

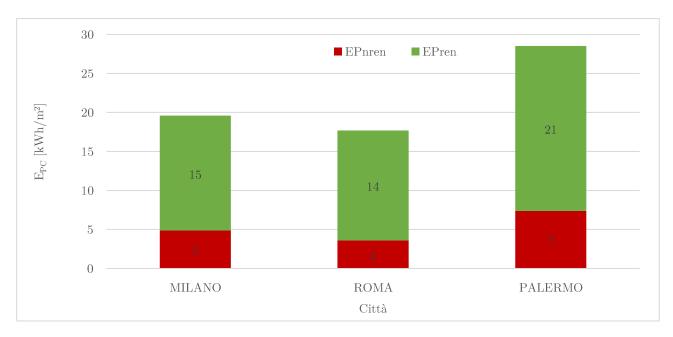


Grafico 8-26: Indici di prestazione per il raffrescamento

Dai grafici sopra riportati, è possibile notare come gli andamenti di energia primaria per i vari servizi energetici rispecchino quelli relativi ai consumi del grafico 8-23.

Osservando le quote di energia primaria rinnovabile e non rinnovabile per i vari servizi energetici considerati, è possibile notare come per il riscaldamento la quota di rinnovabile aumenti da Nord verso Sud, in particolare mentre per Milano tale quota rappresenta il 44% del totale, a Roma il 52%, mentre a Palermo il 55%. L'aumento progressivo da Milano a Palermo è probabilmente collegato alle condizioni climatiche delle zone in esame: infatti, nei mesi invernali, le temperature e i valori di irradianza in generale tendono ad aumentare da nord verso sud, permettendo di sfruttare maggiormente l'energia estrapolata dall'aria esterna e l'energia prodotta da fotovoltaico.

Per quanto riguarda i consumi previsti per il raffrescamento, la quota rinnovabile per ogni città rappresenta circa il 75% del totale, senza un sostanziale aumento o diminuzione da città a città. Questo comportamento può essere dovuto al fatto che, in estate, la pompa di calore ha un rendimento migliore nelle città meno calde (Milano), mentre l'impianto fotovoltaico nelle città con valori di temperatura e irradianza maggiori (Palermo): questo fa sì che sia più difficile prevedere un andamento ben preciso.

# 8.6. Previsioni future

Nel presente paragrafo sono stati riportati i valori di fabbisogni e consumi previsti per la climatizzazione invernale ed estiva dell'edificio nZEB ad uso residenziale, per gli anni metereologici tipici 2050 e 2080, messi a confronto con quelli ottenuti per l'anno del CTI.

## 8.6.1. Milano

Di seguito sono stati riportati i valori di fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento previsti per le tre tipologie di dati climatici annuali considerate, riferiti a una superficie di pavimento climatizzata pari a 102 m<sup>2</sup>.

Inoltre, sono stati riportati degli istogrammi con all'interno l'indicazione dell'aumento o della riduzione dei fabbisogni previsti per il 2050 e il 2080, rispetto all'anno tipico del CTI.

Mese	Fabbisogno specifico di riscaldamento			Fabbisogno specifico di raffrescamento		
	CTI	2050	2080	CTI	2050	2080
	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Gennaio	8.5	8.3	6.8	0.0	0.0	0.0
Febbraio	5.0	6.0	5.2	0.0	0.0	0.0
Marzo	2.7	3.2	2.3	0.0	0.0	0.0
Aprile	1.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0
Maggio	0.0	0.0	0.0	-0.3	0.0	-0.1
Giugno	0.0	0.0	0.0	-2.0	-1.9	-3.0
Luglio	0.0	0.0	0.0	-3.1	-4.1	-4.6
Agosto	0.0	0.0	0.0	-2.4	-2.1	-3.5
Settembre	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-1.2
Ottobre	1.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Novembre	6.1	4.4	3.1	0.0	0.0	0.0
Dicembre	9.3	8.2	7.0	0.0	0.0	0.0

Tabella 8-76: Fabbisogno termico specifico mensile per i tre anni metereologici tipici

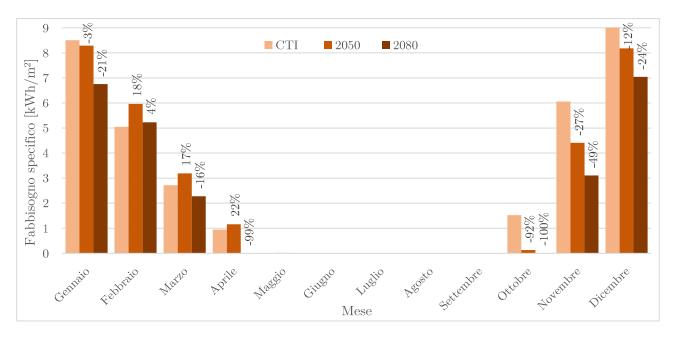


Grafico 8-27: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento per i tre anni metereologici tipici

Come atteso, nella maggior parte dei mesi, i fabbisogni previsti per il riscaldamento diminuiscono con il passare degli anni.

Da tale andamento emerge che, per il mese di ottobre, per l'anno climatico tipico del CTI, si ha un valore di fabbisogno per il riscaldamento che progressivamente diminuisce, fino addirittura ad annullarsi nel 2080.

Tuttavia, è possibile osservare dal grafico sovrastante, che sono presenti delle irregolarità nei mesi di febbraio, marzo e aprile: tali mesi richiedono nel 2050 un fabbisogno di riscaldamento maggiore rispetto a quello relativo all'anno climatico CTI.

Prendendo come esempio il mese di febbraio, il valore di fabbisogno mensile di riscaldamento previsto per l'anno del CTI assume un valore pari a 5.0 kWh/m², mentre, per l'anno tipico 2050 è stato ottenuto un valore di 6.0 kWh/m².

L'aumento di questo fabbisogno per il riscaldamento per l'anno tipico 2050 è giustificato dall'andamento orario delle temperature: per il mese in questione la temperatura media mensile diminuisce da 7.1°C a 6.8°C dal CTI al 2050, infatti, le temperature nel 2050 sono minori rispetto a quelle per l'anno tipo climatico fornito dal CTI per il 57% delle ore complessive del mese.

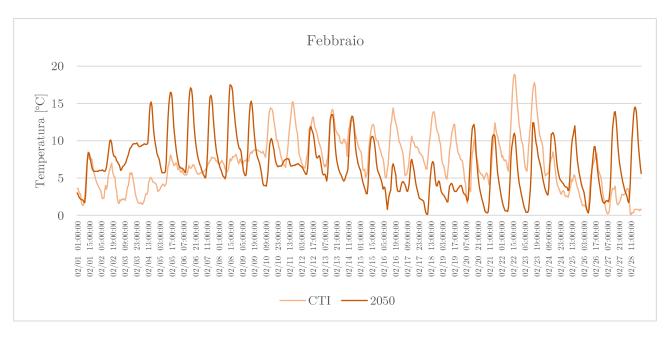


Grafico 8-28: Andamento orario della temperatura nel mese di febbraio

Analizzando l'andamento orario delle temperature, è possibile osservare come, durante l'anno climatico del CTI, si raggiunga una temperatura di picco pari a 18.9 °C, mentre, nel 2050, si ha una temperatura massima di 17.5 °C.

Allo stesso tempo, risulta evidente come per la maggior parte del mese (fino al 25 febbraio), le temperature dell'anno climatico del CTI, non sono mai inferiori a 1.3 °C, al contrario del 2050, dove si verifica più volte una temperatura di 0.1 °C.

Nello stesso mese di febbraio, anche per l'anno 2080 si ha un aumento del fabbisogno di riscaldamento, da  $5.0~\rm kWh/m^2$ a  $5.2~\rm kWh/m^2$ .

Nonostante per il mese di febbraio, nell'anno climatico 2080, la temperatura media mensile aumenti rispetto a quella relativa allo stesso mese per l'anno climatico CTI (da 7.1°C a 7.6°C), analizzando l'andamento orario delle temperature risulta evidente la presenza di giorni consecutivi in cui le temperature, oltre ad essere nel 2080 minori rispetto all'anno CTI, raggiungono ripetutamente valori minimi di temperatura fino a 0°C.

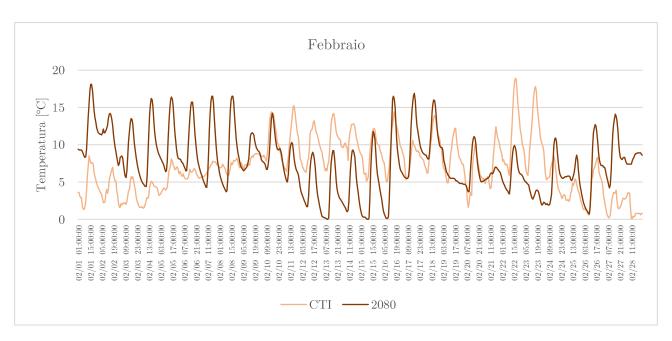


Grafico 8-29: Andamento orario della temperatura nel mese di febbraio

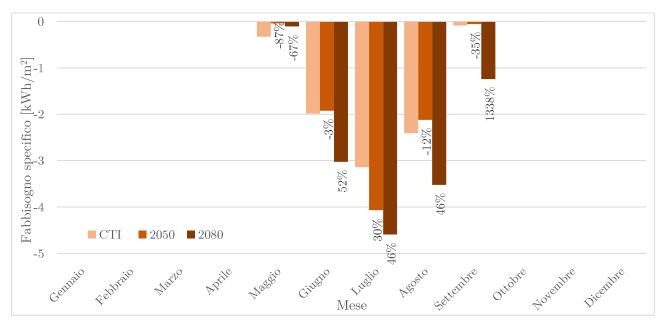


Grafico 8-30: Fabbisogno termico specifico mensile di raffrescamento per i tre anni metereologici tipici

Il grafico sopra riportato rappresenta il fabbisogno calcolato per la climatizzazione estiva dell'edificio e anche in questo caso, come ci si aspettava, nella maggior parte dei mesi, è stato riscontrato un aumento dei fabbisogni di raffrescamento negli anni tipici 2050 e 2080, rispetto all'anno tipico del CTI.

Nonostante l'andamento complessivo, il grafico presenta alcune singolarità.

Ad esempio, nel mese di agosto, è possibile osservare che, a differenza di quanto ci si aspettava, il fabbisogno di raffrescamento per l'anno tipico del 2050 diminuisce del 12% rispetto all'anno tipico del CTI: si passa da 2.4 kWh/m² a 2.1 kWh/m².

A dimostrazione di questo, nel mese in esame, si è verificato che la temperatura media mensile dell'anno climatico tipico 2050 si riduce rispetto all'anno climatico del CTI: si passa da un valore di 24.3 °C a 24.1 °C; in particolare, è stato verificato che per il 52% delle ore complessive del mese le temperature dell'anno tipico 2050 saranno minori rispetto a quelle dell'anno tipico CTI.

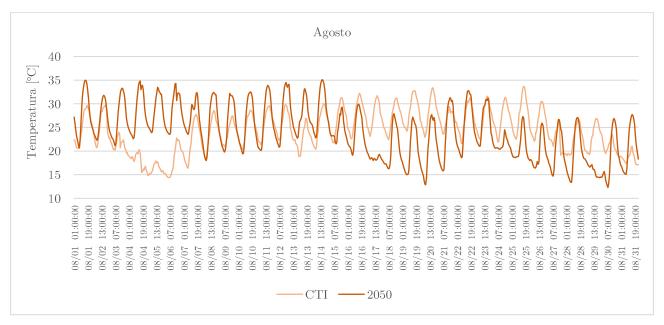


Grafico 8-31: Andamento orario della temperatura nel mese di agosto

Infine, analizzando più specificatamente il valore orario delle temperature nel mese in esame per i due anni tipici in questione, si è verificato che nel 2080 si raggiungeranno temperature più basse di 20°C per un numero di ore maggiori rispetto a quelle dell'anno tipico CTI.

L'analisi precedente, relativa all'effetto che i dati climatici hanno sui fabbisogni, risulta valida anche per i consumi ottenuti per la climatizzazione invernale ed estiva dell'edificio; di conseguenza, di seguito, sono stati riportati i relativi grafici, che presentano un andamento coerente a quello ottenuto per i fabbisogni termici.

Mese	Energia richie	sta specifica di	riscaldamento	Energia richie	sta specifica di	raffrescamento
	CTI	2050	2080	CTI	2050	2080
	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\rm kWh/m^2]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Gennaio	10.7	10.3	8.4	0.0	0.0	0.0
Febbraio	6.2	7.4	6.4	0.0	0.0	0.0
Marzo	3.5	4.0	2.9	0.0	0.0	0.0
Aprile	1.2	1.6	0.8	0.0	0.0	0.0
Maggio	0.0	0.0	0.0	1.1	0.6	0.8
Giugno	0.0	0.0	0.0	3.8	3.7	5.5
Luglio	0.0	0.0	0.0	5.6	7.1	8.0
Agosto	0.0	0.0	0.0	4.6	4.2	6.5
Settembre	0.0	0.0	0.0	0.9	0.7	2.9
Ottobre	2.2	0.8	0.6	0.0	0.0	0.3
Novembre	7.5	5.3	3.8	0.0	0.0	0.0
Dicembre	11.6	10.2	8.7	0.0	0.0	0.0

Tabella 8-77: Energia richiesta specifica mensile per i tre anni metereologici tipici

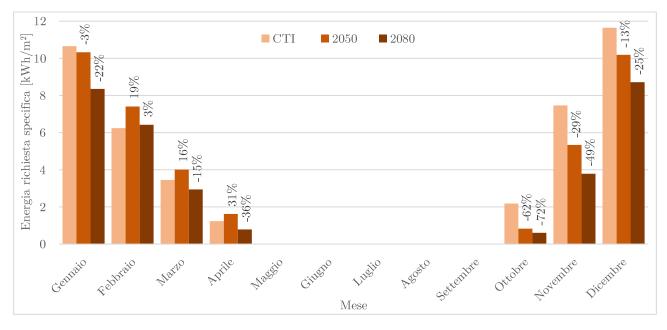


Grafico 8-32: Energia richiesta specifica mensile per il riscaldamento per i tre anni metereologici tipici

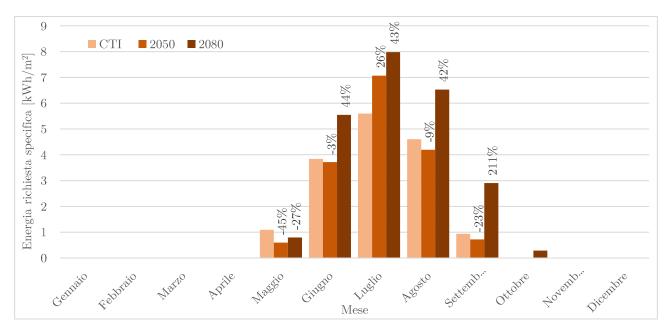


Grafico 8-33: Energia richiesta specifica mensile per il raffrescamento per i tre anni metereologici tipici

### 8.6.2. Roma

Di seguito sono stati riportati i valori di fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento previsti per le tre tipologie di dati climatici annuali considerate, riferiti a una superficie di pavimento climatizzata pari a  $102 \text{ m}^2$ .

Inoltre, sono stati riportati degli istogrammi con all'interno l'indicazione dell'aumento o della riduzione dei fabbisogni previsti per il 2050 e il 2080 rispetto all'anno climatico del CTI.

Mese	Fabbisogno	Fabbisogno specifico di riscaldamento		Fabbisogno specifico di raffrescamento		
	CTI	2050	2080	CTI	2050	2080
	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Gennaio	6.7	6.9	5.5	0.0	0.0	0.0
Febbraio	4.9	5.0	3.5	0.0	0.0	0.0
Marzo	3.1	3.7	1.6	0.0	0.0	0.0
Aprile	0.1	1.1	0.3	0.0	0.0	0.0
Maggio	0.0	0.3	0.0	-0.1	0.0	-0.1
Giugno	0.0	0.0	0.0	-1.0	-1.0	-1.8
Luglio	0.0	0.0	0.0	-3.6	-3.9	-5.2
Agosto	0.0	0.0	0.0	-3.2	-1.9	-6.2
Settembre	0.0	0.0	0.0	-0.3	-0.3	-2.2
Ottobre	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1
Novembre	3.1	3.3	2.0	0.0	0.0	0.0
Dicembre	6.0	6.0	4.7	0.0	0.0	0.0

Tabella 8-78; Fabbisogno termico specifico mensile per i tre anni metereologici tipici

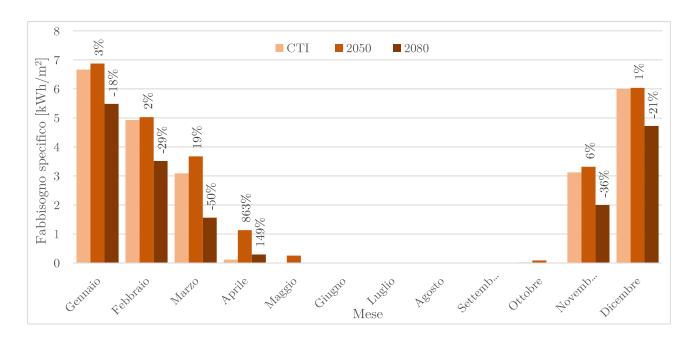


Grafico 8-34: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento per i tre anni metereologici tipici

Osservando i risultati ottenuti relativi al fabbisogno di riscaldamento per la città di Roma, emerge un comportamento anomalo rispetto a quello previsto: i fabbisogni di riscaldamento aumentano per l'anno tipico 2050, mentre diminuiscono successivamente per l'anno tipico 2080.

È possibile notare dal grafico sovrastante che i mesi che presentano delle irregolarità più influenti sulla diminuzione totale di fabbisogno per l'ano 2050, sono il mese di marzo e soprattutto quello di aprile.

Nel mese di aprile, infatti, il valore di fabbisogno mensile di riscaldamento previsto per gli anni correnti assume un valore pari a  $0.1 \text{ kWh/m}^2$ , mentre, per l'anno tipico 2050 è stato ottenuto un valore di  $1.1 \text{ kWh/m}^2$ .

L'aumento di questo fabbisogno per il riscaldamento per l'anno tipico 2050 è giustificato dall'andamento orario delle temperature: per il mese in questione la temperatura media mensile diminuisce da 15.8°C a 14.5°C dal CTI al 2050; infatti, le temperature nel 2050 sono minori rispetto a quelle per l'anno tipo climatico fornito dal CTI per il 65% delle ore complessive del mese.

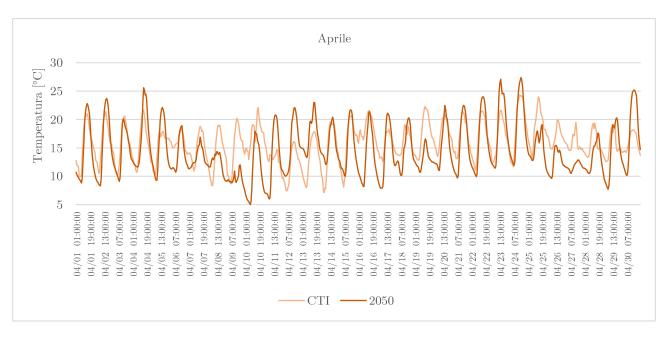


Grafico 8-35: Andamento orario della temperatura nel mese di aprile

Un'altra variabile che incide notevolmente su questo aumento di fabbisogno è la diminuzione di irradianza globale su piano orizzontale: infatti nel mese di aprile è prevista una diminuzione del 19% del valore di irradianza media mensile, da 215.9  $\rm W/m^2$  a 175  $\rm W/m^2$ .

Nello stesso mese di aprile, anche per l'anno 2080 si ha un aumento del fabbisogno di riscaldamento, da  $0.1~\rm kWh/m^2\,a~0.3~\rm kWh/m^2.$ 

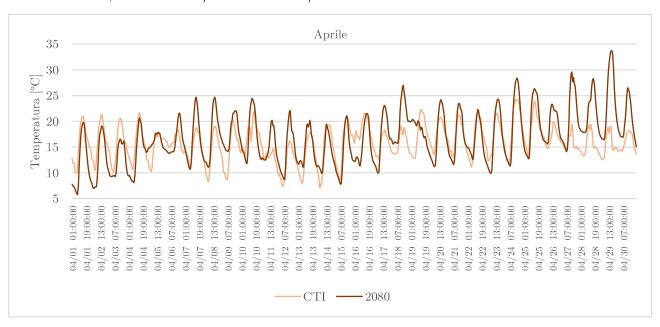


Grafico 8-36: Andamento orario della temperatura nel mese di aprile

Questo può essere giustificato da un andamento orario della temperatura, che presenta nell'anno tipico 2080 un numero maggiore di ore in cui si verificano temperature minori di 13°C rispetto all'anno tipico CTI, soprattutto nella prima parte del mese.

Inoltre, la temperatura minima del mese, passa da 7.1°C a 5.8°C.

Per quanto riguarda il mese di marzo, nonostante la temperatura media mensile aumenti da 11.4 °C a 11.6 °C dall'anno climatico CTI all'anno climatico 2050, dall'andamento orario della temperatura è possibile notare che in numerosi giorni del mese nell'anno climatico 2050 risulta minore rispetto a quella dell'anno climatico CTI e tale differenza risulta molte volte significativa, fino a raggiungere un valore di 9 °C.

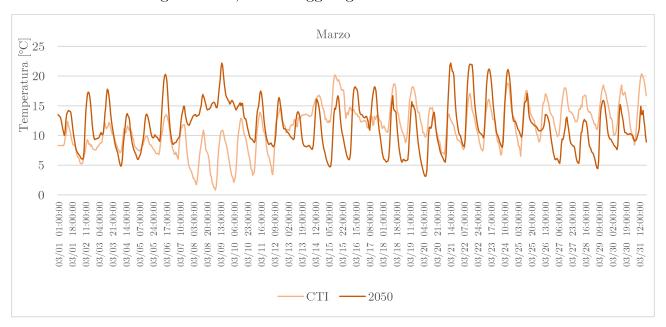


Grafico 8-37: Andamento orario della temperatura nel mese di marzo

In questo caso, il fattore che determina al più questo aumento di fabbisogno di riscaldamento è la diminuzione di irradianza globale su piano orizzontale: il valore medio mensile passa da 154 W/m² nell'anno tipico CTI a 128.3 W/m² nell'anno tipico 2050. Inoltre, l'andamento orario di tale parametro presenta una frequente e notevole diminuzione dei valori di picco (in alcuni punti fino al 93%) all'interno del mese in esame.

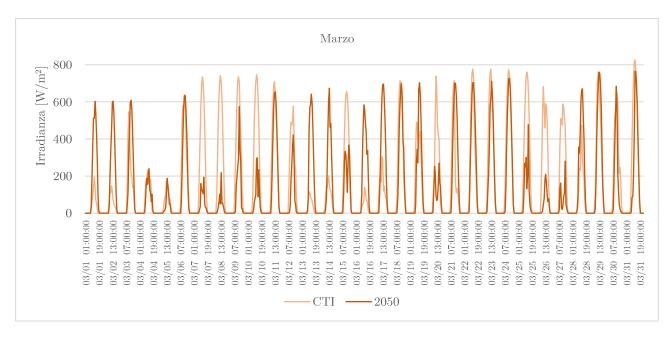


Grafico 8-38: Andamento orario dell'irradiazione globale su piano orizzontale nel mese di marzo

Per il mese di marzo, la diminuzione notevole di irradianza negli stessi giorni in cui si prevede anche una diminuzione di temperatura, sarà causa di una richiesta di fabbisogno di riscaldamento maggiore nel 2050.

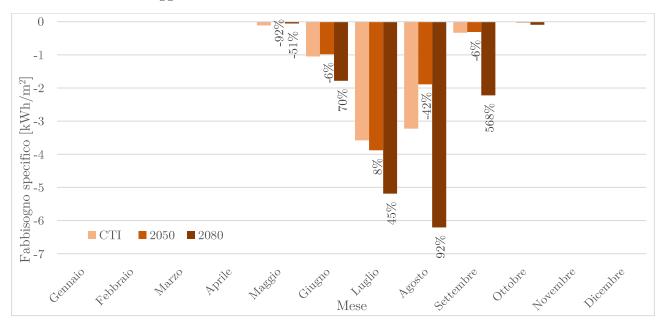


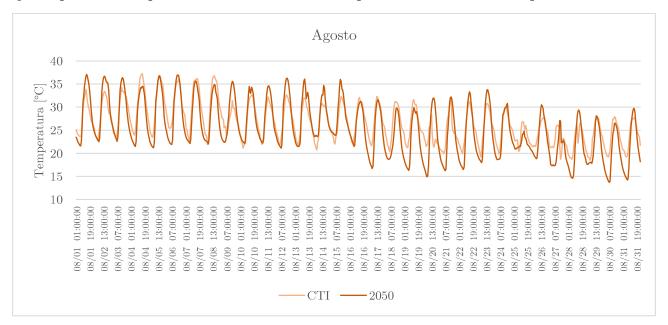
Grafico 8-39: Fabbisogno termico specifico mensile di raffrescamento per i tre anni metereologici tipici

Osservando i risultati ottenuti relativi al fabbisogno di raffrescamento per la città di Roma emerge nuovamente un comportamento anomalo rispetto a quello previsto: i fabbisogni di

raffrescamento diminuiscono per la maggior parte dei mesi estivi nell'anno tipico 2050, mentre aumentano successivamente per l'anno tipico 2080.

È possibile notare dal grafico sovrastante che il mese che presenta un'irregolarità più influente è il mese di agosto, in cui il fabbisogno di raffrescamento diminuisce da  $3.2 \text{ kWh/m}^2$  a  $1.9 \text{ kWh/m}^2$ .

La diminuzione di questo fabbisogno per l'anno tipico 2050 è giustificata dall'andamento delle temperature: per il mese in questione la temperatura media mensile diminuisce da 26.5°C a 25.5°C dal CTI al 2050, infatti, le temperature nel 2050 sono minori rispetto a quelle per l'anno tipo climatico fornito dal CTI per il 67% delle ore complessive del mese.



Grafico~8-40:~Andamento~orario~della~temperatura~nel~mese~di~agosto

Analizzando più specificatamente l'andamento orario delle temperature nel mese in esame per i due anni tipici in questione, si è verificato che il numero di ore in cui si presentano temperature più basse di 20°C, risulta maggiore per l'anno tipico 2050, piuttosto che per l'anno fornito dal CTI: nello specifico, nell'anno tipico CTI solo in 25 ore in tutto il mese si raggiungono temperature minori di 20°C, mentre nell'anno tipico 2050 tale condizione risulta verificata per un totale di 125 ore.

L'analisi precedente, relativa all'effetto che i dati climatici hanno sui fabbisogni, risulta valida anche per i consumi ottenuti per la climatizzazione invernale ed estiva dell'edificio; di conseguenza, di seguito, sono stati riportati i relativi grafici, che presentano un andamento coerente a quello ottenuto per i fabbisogni termici.

Mese	Energia richie	sta specifica di	riscaldamento	Energia richie	sta specifica di	raffrescamento
	CTI	2050	2080	CTI	2050	2080
	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Gennaio	8.5	8.7	6.9	0.0	0.0	0.0
${\it Febbraio}$	6.3	6.4	4.6	0.0	0.0	0.0
Marzo	4.2	4.8	2.3	0.0	0.0	0.0
Aprile	0.8	1.4	1.0	0.0	0.0	0.0
Maggio	0.0	0.0	0.0	0.6	0.4	0.5
Giugno	0.0	0.0	0.0	2.1	2.0	3.4
Luglio	0.0	0.0	0.0	5.9	6.5	8.5
Agosto	0.0	0.0	0.0	5.4	3.6	10.2
Settembre	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	4.1
Ottobre	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.6
Novembre	4.1	4.3	2.7	0.0	0.0	0.0
Dicembre	7.7	7.6	5.9	0.0	0.0	0.0

Tabella 8-79: Energia richiesta specifica mensile per i tre anni metereologici tipici

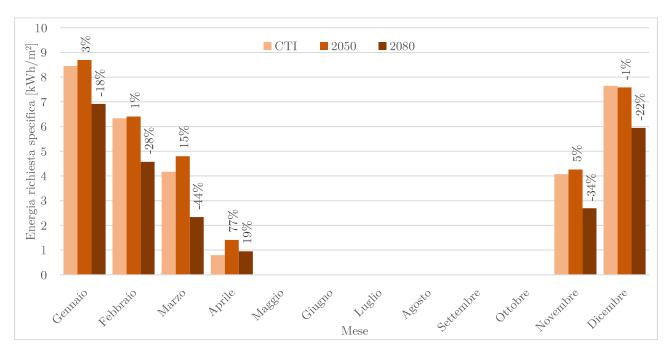


Grafico 8-41: Energia richiesta specifica mensile per il riscaldamento per i tre anni metereologici tipici

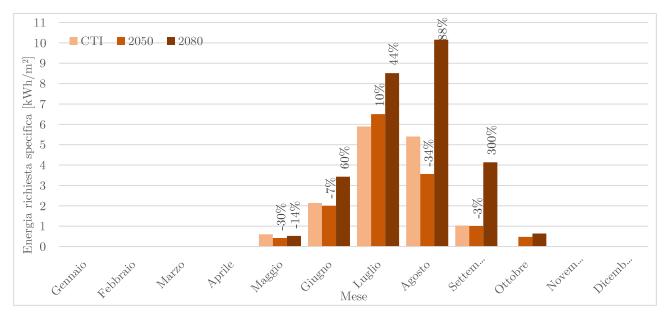


Grafico 8-42: Energia richiesta specifica mensile per il raffrescamento per i tre anni metereologici tipici

# 8.6.3. Palermo

Di seguito sono stati riportati i valori di fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento previsti per le tre tipologie di dati climatici annuali considerate, riferiti a una superficie di pavimento climatizzata pari a 102 m<sup>2</sup>.

Inoltre, sono stati riportati degli istogrammi con all'interno l'indicazione dell'aumento o della riduzione dei fabbisogni previsti per il 2050 e il 2080 rispetto all'anno climatico del CTI.

Mese	Fabbisogno specifico di riscaldamento			Fabbisogno specifico di raffrescamento		
	CTI	2050	2080	CTI	2050	2080
	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Gennaio	4.9	4.4	1.6	0.0	0.0	0.0
Febbraio	3.8	2.7	0.8	0.0	0.0	0.0
Marzo	2.0	1.4	0.7	0.0	0.0	0.0
Aprile	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Maggio	0.0	0.0	0.0	-0.4	0.0	-0.7
Giugno	0.0	0.0	0.0	-2.4	-1.5	-4.1
Luglio	0.0	0.0	0.0	-4.8	-3.6	-6.9
Agosto	0.0	0.0	0.0	-4.1	-4.2	-6.4
Settembre	0.0	0.0	0.0	-1.1	-1.4	-3.7
Ottobre	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	-0.4
Novembre	0.7	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0
Dicembre	3.8	3.2	1.1	0.0	0.0	0.0

Tabella 8-80: Fabbisogno termico specifico mensile per i tre anni metereologici tipici

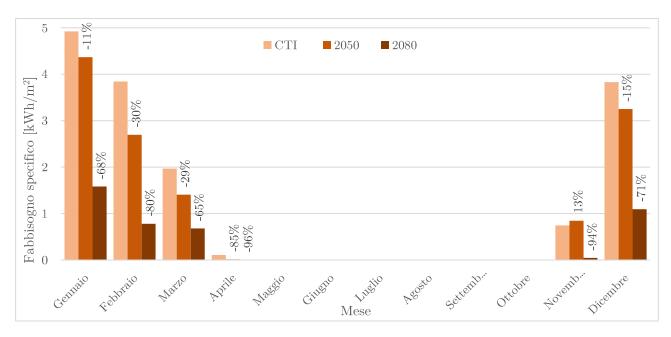


Grafico 8-43: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento per i tre anni metereologici tipici

Osservando i risultati ottenuti relativi al fabbisogno di riscaldamento per la città di Palermo emerge un andamento generale coerente con quello previsto: i fabbisogni di riscaldamento diminuiscono sia per l'anno tipico 2050, sia per l'anno tipico 2080; in particolare, per quest'ultimo arrivano ad annullarsi completamente nel mese di aprile e novembre.

Dal grafico sovrastante, è possibile notare che il mese di novembre presenta un comportamento irregolare rispetto al resto dei mesi, prevedendo un fabbisogno di riscaldamento nel 2050 maggiore rispetto a quello relativo all'anno climatico CTI: da 0.7 kWh/m² a 0.8 kWh/m².

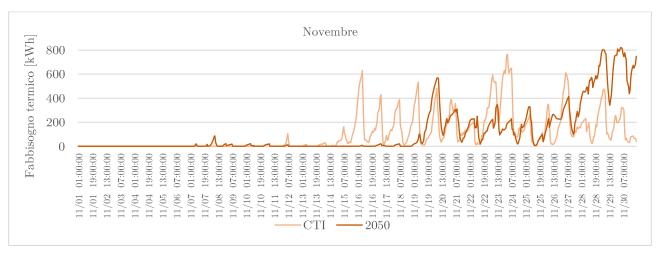


Grafico 8-44: Andamento orario del fabbisogno termico di riscaldamento nel mese di novembre

Analizzando l'andamento orario delle temperature nel mese in esame per i due anni tipici in questione, è possibile dedurre che la richiesta di fabbisogno di riscaldamento aumenta notevolmente nel 2050, rispetto all'anno tipico CTI, proprio negli ultimi giorni del mese.

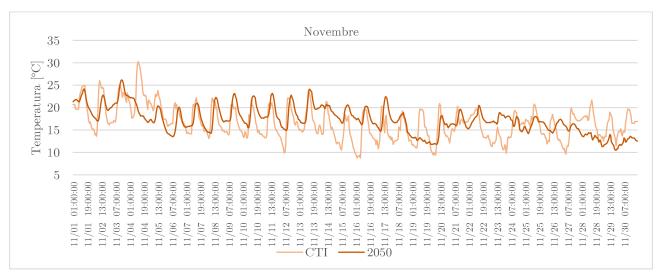


Grafico 8-45: Andamento orario della temperatura nel mese di novembre

Analizzando quindi l'andamento orario delle temperature nella parte finale del mese di novembre, è possibile notare che la temperatura nell'anno climatico 2050 risulta minore rispetto a quella dell'anno climatico CTI e tale differenza risulta notevole, fino a raggiungere in alcuni orari un valore di 8.3 °C.

Inoltre, negli stessi giorni del mese, anche l'irradianza globale su piano orizzontale presenta una notevole diminuzione dei valori di picco per l'anno tipico 2050 rispetto all'anno climatico CTI, come risulta evidente dal grafico sotto riportato.

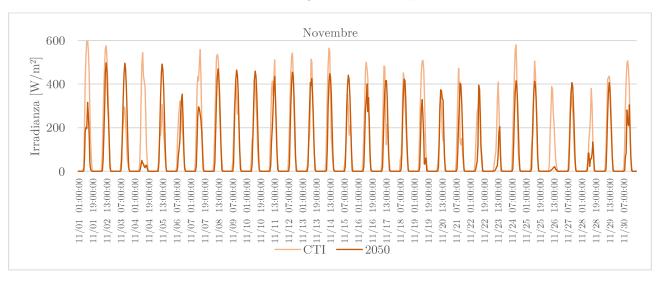


Grafico 8-46: Andamento orario dell'irradianza globale su piano orizzontale nel mese di novembre

Perciò, il verificarsi contemporaneo di entrambe le condizioni è la causa principale dell'aumento di fabbisogno di riscaldamento nel mese di novembre per l'anno 2050.

Il grafico riportato successivamente rappresenta il fabbisogno calcolato per la climatizzazione estiva dell'edificio: a differenza delle aspettative, per alcuni mesi dell'anno tipico 2050 (maggio, giugno, luglio, ottobre) tale fabbisogno diminuisce, mentre per i restanti mesi estivi del 2050 e per tutti i mesi dell'anno tipico 2080 i fabbisogni di raffrescamento aumentano.

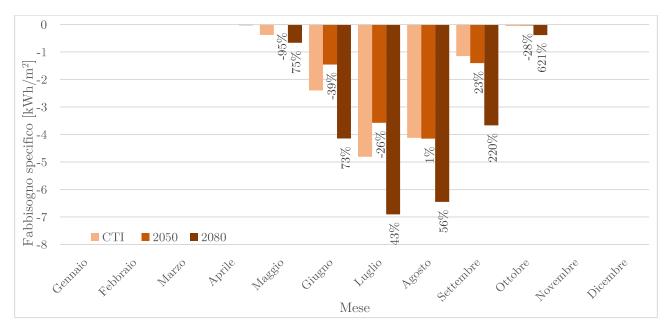


Grafico 8-47: Fabbisogno termico specifico mensile di raffrescamento per i tre anni metereologici tipici

Tra i mesi che presentano delle irregolarità, luglio è quello che più incide in termini di fabbisogno totale.

Infatti, nel mese di luglio, è possibile osservare che, a differenza di quanto ci si aspettava, il fabbisogno di raffrescamento per l'anno tipico del 2050 diminuisce da  $4.8~\rm kWh/m^2$  a  $3.6~\rm kWh/m^2$ , rispetto all'anno relativo al CTI.

A dimostrazione di questo comportamento è stato possibile notare che la temperatura media mensile di luglio dell'anno climatico tipico 2050 si riduce rispetto all'anno climatico del CTI: si passa da un valore di 26.9 °C a 26.7 °C.

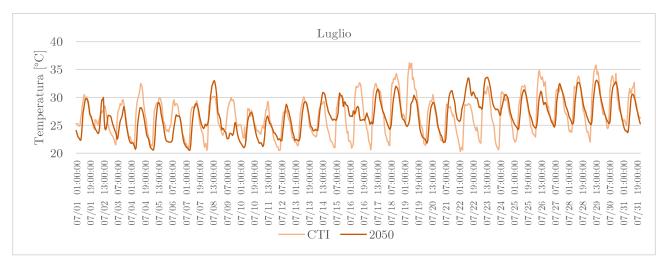


Grafico 8-48: Andamento orario della temperatura nel mese di luglio

Infatti, nel mese in esame, è stato riscontrato che, nel 53% delle ore, le temperature sono maggiori per l'anno climatico tipico del CTI; di seguito è stato riportato il grafico dove sono stati messi a confronto i due andamenti, e dove risulta evidente l'inesistenza di un sostanziale aumento di temperatura nel mese di luglio per l'anno tipico 2050.

Infine, dallo stesso grafico è possibile notare che, nella maggior parte delle ore, i picchi di temperatura massima appartengono all'anno climatico del CTI.

L'analisi precedente, relativa all'effetto che i dati climatici hanno sui fabbisogni, risulta valida anche per i consumi ottenuti per la climatizzazione invernale ed estiva dell'edificio; di conseguenza, di seguito, sono stati riportati i relativi grafici, che presentano un andamento coerente a quello ottenuto per i fabbisogni termici.

Mese	Energia richie	sta specifica di	riscaldamento	Energia richies	sta specifica di	raffrescamento
	CTI	2050	2080	CTI	2050	2080
	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Gennaio	6.3	5.6	2.4	0.0	0.0	0.0
Febbraio	5.1	3.6	1.4	0.0	0.0	0.0
Marzo	2.9	2.3	1.4	0.0	0.0	0.0
Aprile	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5
Maggio	0.0	0.0	0.0	1.1	0.5	1.6
Giugno	0.0	0.0	0.0	4.1	2.9	6.7
Luglio	0.0	0.0	0.0	7.7	6.0	11.0
Agosto	0.0	0.0	0.0	6.9	6.9	10.5
Settembre	0.0	0.0	0.0	2.4	2.9	6.5
Ottobre	0.0	0.0	0.0	0.6	0.5	1.2
Novembre	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0
Dicembre	5.0	4.3	1.7	0.0	0.0	0.0

Tabella 8-81: Energia richiesta specifica mensile per i tre anni metereologici tipici

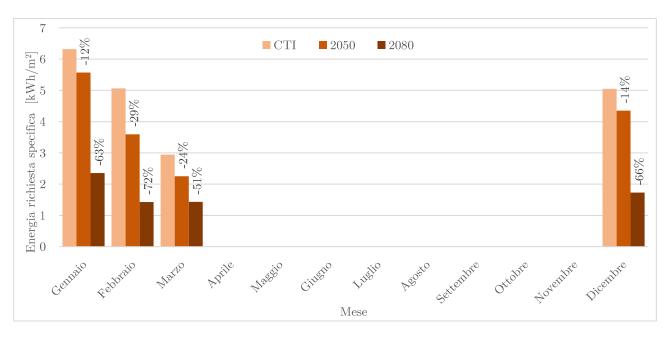


Grafico 8-49: Energia richiesta specifica mensile per il riscaldamento per i tre anni metereologici tipici

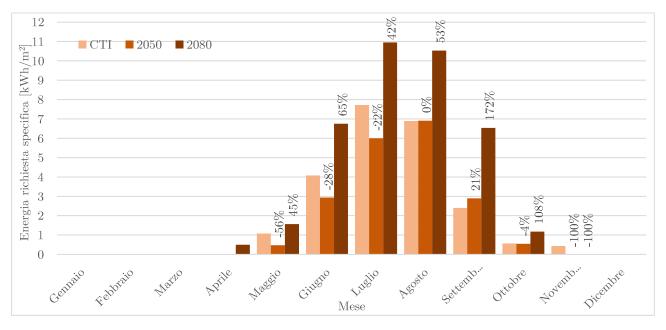


Grafico 8-50: Energia richiesta specifica mensile per il raffrescamento per i tre anni metereologici tipici

# 8.6.4. Confronti

Di seguito sono riportati i valori di fabbisogno annuale specifico di riscaldamento e raffrescamento per le tre città, per i tre anni metereologici tipici considerati, riferiti a una superficie di pavimento climatizzata pari a 102 m<sup>2</sup>.

Mese	Fabbisogno specifico di riscaldamento			Fabbisogno specifico di raffrescamento		
	CTI	2050	2080	CTI	2050	2080
	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Milano	34.1	31.3	24.4	-8.0	-8.2	-12.5
Roma	23.9	26.4	17.6	-8.3	-7.1	-15.5
Palermo	15.4	12.6	4.1	-12.9	-10.6	-22.2

Tabella 8-82: Fabbisogno termico specifico annuale per i tre anni metereologici tipici

A seguito dei risultati ottenuti per le tre città esaminate e gli anni metereologici futuri 2050 e 2080, risulta evidente che l'impatto del cambiamento climatico sulla prestazione energetica degli edifici dipende fortemente dall'anno e dalla zona climatica considerata.

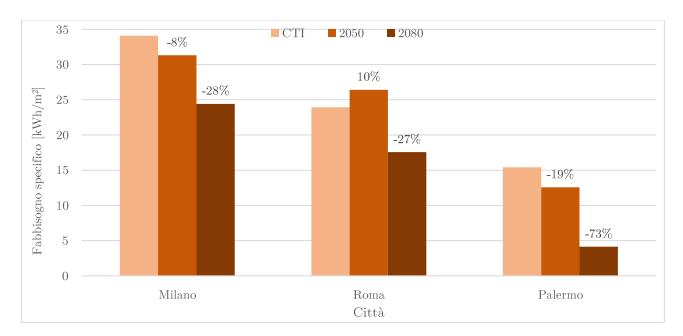


Grafico 8-51: Variazione del fabbisogno termico specifico annuale di riscaldamento per i tre anni metereologici tipici

Per quanto riguarda la richiesta di fabbisogno di riscaldamento, quest'ultima tende a diminuire con il passare degli anni.

Tuttavia, risulta evidente che l'impatto climatico dipende dalla variazione dei dati climatici della zona considerata: la città di Roma, infatti, presenta un comportamento anomalo nell'anno 2050 rispetto alle altre città, richiedendo un aumento di fabbisogno di riscaldamento; tale incremento è stato motivato nel paragrafo apposito (paragrafo 8.6.2).

Inoltre, risulta evidente che nell'anno tipico 2080, la richiesta di fabbisogno di riscaldamento diminuisce notevolmente in percentuale, rispetto a quanto accade nel 2050.

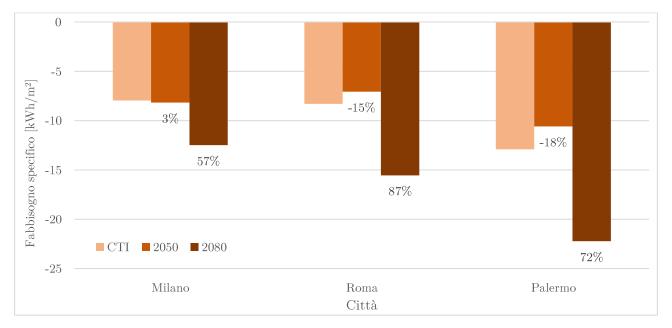


Grafico 8-52: Variazione del fabbisogno termico specifico annuale di raffrescamento per i tre anni metereologici tipici

Per quanto riguarda la richiesta di fabbisogno di raffrescamento, quest'ultima tende ad aumentare con il passare degli anni.

Tuttavia, risulta evidente che l'impatto climatico dipende dalla variazione dei dati climatici della zona considerata: le città di Roma e di Palermo, infatti, presentano un comportamento anomalo nell'anno 2050 rispetto a quello previsto, richiedendo una diminuzione di fabbisogno di raffrescamento rispetto all'anno tipico CTI; questo decremento è stato motivato nei paragrafi appositi (paragrafo 8.6.3 e 8.6.4).

Inoltre, risulta evidente che nell'anno tipico 2080, la richiesta di fabbisogno di raffrescamento aumenta notevolmente in percentuale, rispetto a quanto accade nel 2050.

# 8.7. Ventilazione notturna

Nel presente paragrafo verrà valutato il risparmio in termini di consumo elettrico in seguito all'applicazione della strategia di ventilazione notturna.

Al fine di indagare il potenziale di raffreddamento delle tecniche di ventilazione notturna, sono state effettuate analisi per entrambi gli edifici casi studio, confrontando il comportamento di tali edifici nelle tre differenti località (Milano, Roma e Palermo) e per i tre anni tipici metereologici presi in esame (CTI, 2050 e 2080).

Per ogni città, in ogni anno, sono state messe a confronto la strategia di ventilazione notturna naturale e quella di ventilazione notturna meccanica, modellate su Design Builder come ampliamente discusso nel capitolo apposito (Capitolo 7).

È necessario specificare che, per la modellazione di ventilazione naturale nel caso studio residenziale, tramite l'opzione "Ventilazione calcolata", è stata ipotizzata assenza di infiltrazione.

Infatti, questa impostazione di ventilazione naturale influisce anche sul modo in cui viene trattata l'infiltrazione: non risulta possibile definirla in ricambi d'aria all'ora quando la differenza di pressione tra interno ed esterno è di 50 Pa (n<sub>50</sub>), come è stata considerata in tutte le precedenti simulazioni. Perciò, al fine di eseguire dei confronti coerenti tra i risultati ottenuti dalla situazione in assenza di ventilazione notturna e tra quelle in presenza di ventilazione notturna naturale e meccanica, in ognuno di questi modelli non verrà considerata la presenza di infiltrazione.

Sempre per quanto riguarda la ventilazione naturale, per l'edificio residenziale è stato scelto di attivare un'apertura delle finestre e porte finestre del 25% della loro superficie totale, tra le 21:00 e le 9:00, permettendo l'ingresso di aria esterna solo quando quest'ultima risulta ad una temperatura minore rispetto a quella interna.

#### 8.7.1. Milano

Per la città di Milano, la ventilazione notturna meccanica risulta attiva dalle 21:00 alle 09:00, garantendo 5 ricambi d'aria quando la temperatura esterna è minore di 26°C e quando la temperatura dell'aria esterna è minore rispetto a quella interna di almeno 1°C. La ventilazione notturna naturale avviene, come in ogni città, tramite un'apertura delle finestre e porte finestre del 25% della loro superficie totale, tra le 21:00 e le 9:00,

permettendo l'ingresso di aria esterna solo quando quest'ultima risulta ad una temperatura minore rispetto a quella interna.

Di seguito, per ogni anno meteorologico tipico sono riportati i consumi elettrici relativi all'edificio, in seguito all'applicazione della strategia di ventilazione notturna naturale e ventilazione notturna meccanica, messi a confronto con quelli ottenuti in assenza di ventilazione notturna.

### CTI

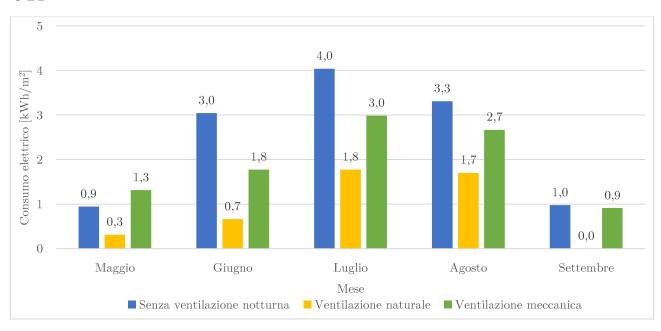


Grafico 8-53: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e presenza di ventilazione notturna

Dal grafico sovrastante, risulta evidente come, in ogni mese, la strategia di ventilazione naturale sia più conveniente in termini di consumi elettrici, rispetto alla strategia di ventilazione meccanica.

Inoltre, è interessante notare come la ventilazione notturna meccanica nel mese di maggio risulti addirittura sconveniente rispetto alla versione in assenza di ventilazione notturna: infatti, come mostrato nella tabella seguente, l'applicazione della ventilazione notturna provoca, come desiderato, una diminuzione dei consumi della pompa di calore nel periodo estivo, ma l'elevato consumo dei ventilatori porta ad un consumo elettrico complessivo sconveniente rispetto alla versione in assenza di ventilazione notturna

Mese	Senza ventilazione notturna	Ventilazione nottur	rna meccanica
	Pompa di calore	Pompa di calore	Ventilatori
	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Maggio	96.0	45.1	88.1

Tabella 8-83: Consumo elettrico pompa di calore e ventilatori

Infine, dal grafico emerge che nel mese di settembre la tecnica di ventilazione naturale notturna riesce addirittura ad annullare i consumi elettrici della pompa di calore, annullando la richiesta di raffrescamento per tutto il mese. Questo avviene, sia perché l'edificio in questo mese richiede un minor quantitativo di aria fredda per rendere efficiente la strategia, sia perchè le condizioni climatiche sono tali da soddisfare la ventilazione per un maggior numero di ore rispetto a quelli estivi più caldi.

### 2050

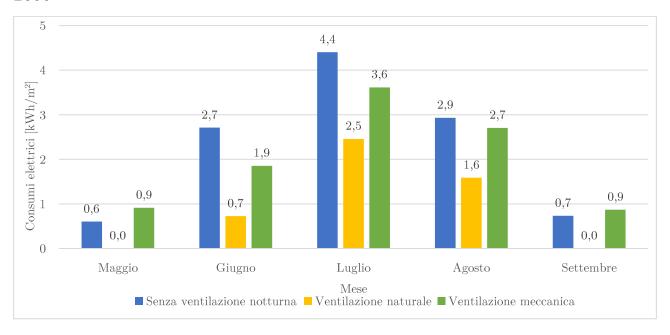


Grafico 8-54: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e presenza di ventilazione notturna

Dal grafico sovrastante, risulta evidente come, in ogni mese, la strategia di ventilazione naturale sia più conveniente in termini di consumi elettrici rispetto alla strategia di ventilazione meccanica.

Inoltre, è interessante notare come la ventilazione notturna meccanica nel mese di maggio e settembre risulti sconveniente rispetto alla versione in assenza di ventilazione notturna: infatti, come mostrato nella tabella seguente, l'applicazione della ventilazione notturna

risulta vantaggiosa in termini di consumi della pompa di calore nel periodo estivo, arrivando addirittura ad annullarlo, ma il consumo dei ventilatori porta ad un consumo elettrico complessivo sconveniente rispetto alla versione in assenza di ventilazione notturna. Probabilmente questo consumo eccessivo potrebbe essere ridotto ottimizzando lo slot orario di attivazione degli stessi.

Mese	Senza ventilazione notturna	Ventilazione notturna meccanica		
	Pompa di calore	Pompa di calore	Ventilatori	
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	
Maggio	61.3	0.0	92.8	
Settembre	74.6	0.0	88.3	

Tabella 8-84: Consumo elettrico pompa di calore e ventilatori

Infine, dalle precedenti considerazioni emerge che, sia nel mese di settembre, sia in quello di maggio, la ventilazione notturna riesce ad annullare i consumi elettrici della pompa di calore: questo avviene, sia perché l'edificio in questo mese richiede un minor quantitativo di aria fredda per rendere efficiente la strategia, sia perchè le condizioni climatiche sono tali da soddisfare la ventilazione per un maggior numero di ore rispetto a quelli estivi. Nonostante ciò, la strategia di ventilazione naturale risulta migliore in quanto non provoca alcun tipo di consumo aggiuntivo.

#### 2080

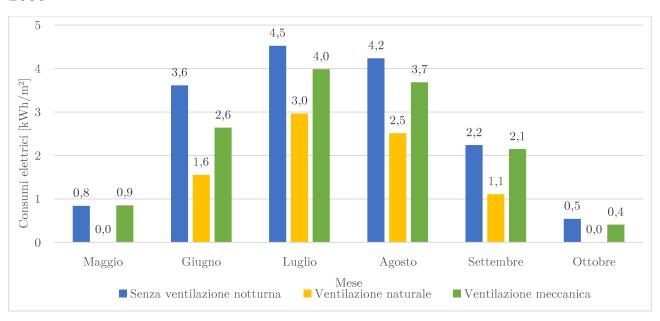


Grafico 8-55: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e presenza di ventilazione notturna

Dal grafico sovrastante, risulta evidente come, in ogni mese, la strategia di ventilazione naturale sia più conveniente in termini di consumi elettrici rispetto alla strategia di ventilazione meccanica.

Inoltre, è interessante notare come la ventilazione notturna meccanica nel mese di maggio risulti sconveniente rispetto alla versione in assenza di ventilazione notturna: infatti, come mostrato nella tabella seguente, l'applicazione della ventilazione notturna risulta vantaggiosa in termini di consumi della pompa di calore nel periodo estivo, arrivando addirittura ad annullarlo, ma il consumo dei ventilatori porta ad un consumo elettrico complessivo sconveniente rispetto alla versione in assenza di ventilazione notturna. Probabilmente questo consumo eccessivo potrebbe essere ridotto ottimizzando lo slot orario di attivazione degli stessi.

Mese	Senza ventilazione notturna	Ventilazione notturna meccanica		
	Pompa di calore	Pompa di calore	Ventilatori	
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	
Maggio	85.4	0.0	86.7	

Tabella 8-85: Consumo elettrico pompa di calore e ventilatori

Infine, dalle precedenti considerazioni emerge che, nel mese di maggio, la ventilazione notturna riesce ad annullare i consumi elettrici della pompa: questo avviene, sia perché l'edificio in questo mese richiede un minor quantitativo di aria fredda per rendere efficiente la strategia, sia perchè le condizioni climatiche sono tali da soddisfare la ventilazione per un maggior numero di ore rispetto a quelli estivi. Nonostante ciò, la strategia di ventilazione naturale risulta migliore in quanto non provoca alcun tipo di consumo aggiuntivo

#### Confronti

La strategia di ventilazione notturna che risulta essere più conveniente per la città di Milano, per ogni anno, corrisponde alla soluzione di ventilazione naturale.

Anno	Senza ventilazione notturna	Con ventilazione notturna		
		Ventilazione naturale	Ventilazione meccanica	
	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[{ m kWh/m^2}]$	$[{ m kWh/m^2}]$	
CTI	12.3	4.4	10.5	
2050	11.4	4.8	10.9	
2080	16.0	8.1	14.2	

Tabella 8-86: Consumo elettrico specifico annuale per il raffrescamento in assenza e presenza di ventilazione notturna

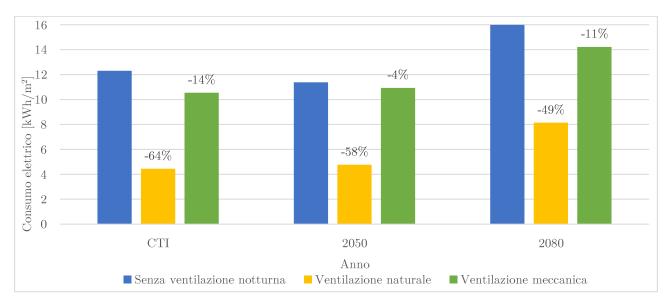


Grafico 8-56: Variazione del consumo elettrico specifico annuale in assenza e presenza di ventilazione notturna

Di seguito è stato riportato un grafico relativo all'efficienza di tale strategia relativa al consumo elettrico della versione in assenza di ventilazione notturna naturale dell'anno considerato, confrontata per gli anni tipici metereologici analizzati (CTI, 2050 e 2080).

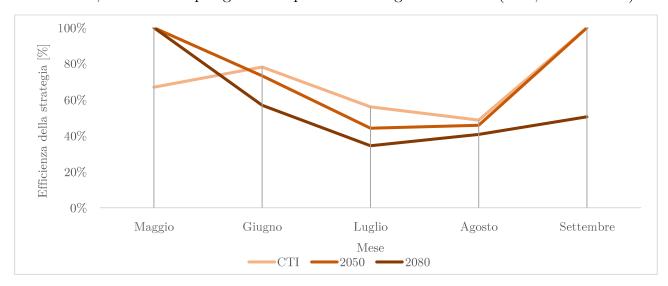


Grafico 8-57: Efficienza della ventilazione notturna naturale per i tre anni metereologici tipici

L'efficienza legata all'applicazione della strategia di ventilazione notturna naturale risulta fortemente influenzata dalla variazione dei dati climatici esterni.

Infatti, l'andamento generale di tale efficienza mostra una diminuzione della stessa al passare degli anni, dall'anno tipico CTI fino all'anno 2080, giustificata dall'aumento complessivo delle temperature come effetto del cambiamento climatico.

In particolare, è interessante notare, che tale andamento non risulta rispettato nel mese di maggio; infatti, in questo mese, la strategia di ventilazione notturna naturale, risulta maggiormente conveniente negli anni tipici 2050 e 2080.

La causa di questo comportamento la si può trovare analizzando l'andamento orario delle temperature di tale mese per i tre anni metereologici tipici in questione

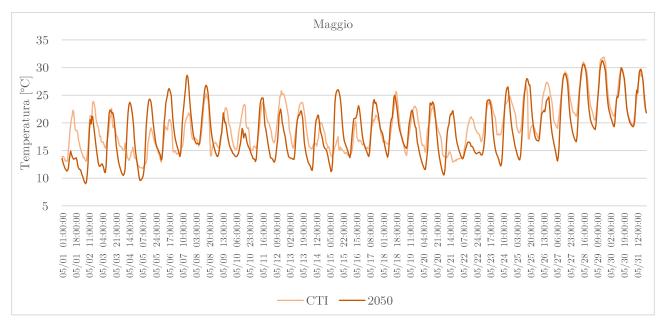


Grafico 8-58: Andamento orario della temperatura nel mese di maggio

Confrontando i valori orari dell'andamento della temperatura relativa all'anno CTI e l'anno 2050, risulta evidente che in quest'ultimo anno, per tutto il mese in esame, nelle ore notturne si raggiungono temperature più basse rispetto a quelle che si verificano nell'anno del CTI.

Inoltre, nel 2050 l'oscillazione della temperatura tra il giorno e la notte è maggiore: questo potrebbe rendere più efficace lo scambio notturno con l'aria fresca che entra in ambiente.

Analoghe considerazioni, soprattutto per quanto riguarda l'aumento dell'escursione termica tra il giorno e la notte, possono essere utilizzate a dimostrazione del fatto che, per lo stesso mese, la strategia di ventilazione notturna naturale risulta maggiormente conveniente nell'anno tipico 2080 rispetto al CTI.

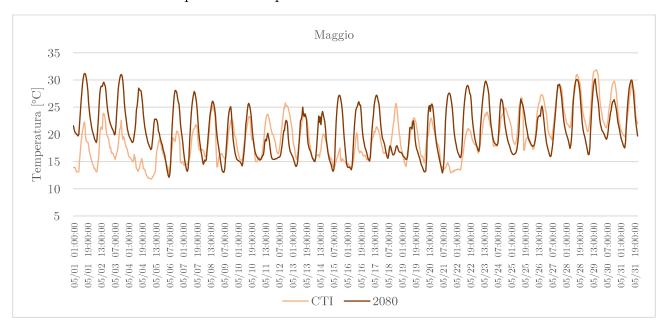


Grafico 8-59: Andamento orario della temperatura nel mese di maggio

## 8.7.2. Roma

Per la città di Roma, la ventilazione notturna meccanica risulta attiva dalle 03:00 alle 08:00, garantendo 5 ricambi d'aria quando la temperatura esterna è minore di 26°C e quando la temperatura dell'aria esterna è minore rispetto a quella interna di almeno 1°C. La ventilazione notturna naturale avviene, come in ogni città, tramite un'apertura delle finestre e porte finestre del 25% della loro superficie totale, tra le 21:00 e le 9:00, permettendo l'ingresso di aria esterna solo quando quest'ultima risulta ad una temperatura minore rispetto a quella interna.

Di seguito, per ogni anno meteorologico tipico sono riportati i consumi elettrici relativi all'edificio, in seguito all'applicazione della strategia di ventilazione notturna naturale e ventilazione notturna meccanica, messi a confronto con quelli ottenuti in assenza di ventilazione notturna.

### CTI

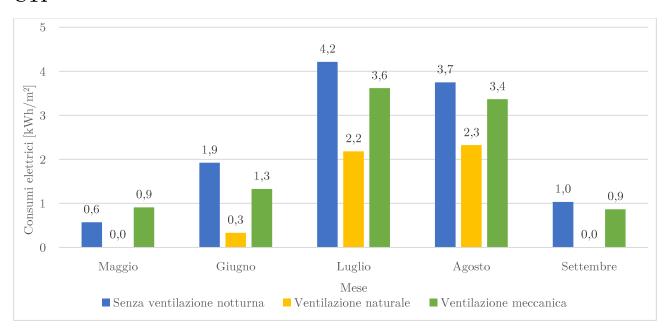


Grafico 8-60: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e presenza di ventilazione notturna

Dal grafico sovrastante, risulta evidente come, in ogni mese, la strategia di ventilazione naturale sia più conveniente in termini di consumi elettrici rispetto alla strategia di ventilazione meccanica.

Inoltre, è interessante notare come la ventilazione notturna meccanica nel mese di maggio risulti addirittura sconveniente rispetto alla versione in assenza di ventilazione notturna: infatti, come mostrato nella tabella seguente, l'applicazione della ventilazione notturna provoca, come desiderato, una diminuzione dei consumi della pompa di calore nel periodo estivo, ma l'elevato consumo dei ventilatori porta ad un consumo elettrico complessivo sconveniente rispetto alla versione in assenza di ventilazione notturna.

Mese	Senza ventilazione notturna	ventilazione notturna Ventilazione notturna mecca		
	Pompa di calore	Pompa di calore	Ventilatori	
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	
Maggio	58.1	43.5	49	

Tabella 8-87: Consumo elettrico pompa di calore e ventilatori

Infine, dal grafico emerge che nel mese di maggio e settembre la ventilazione naturale notturna riesce addirittura ad annullare i consumi elettrici della pompa di calore, annullando la richiesta di raffrescamento per tutto il mese. Questo avviene, sia perché l'edificio in questo mese richiede un minor quantitativo di aria fredda per rendere efficiente la strategia, sia perchè le condizioni climatiche sono tali da soddisfare la ventilazione per un maggior numero di ore rispetto a quelli estivi.

#### 2050

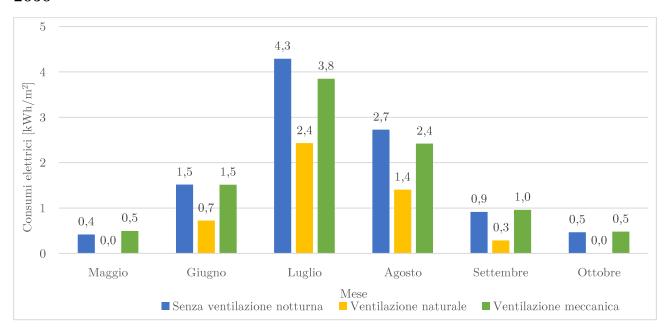


Grafico 8-61: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e presenza di ventilazione notturna

Dal grafico sovrastante, risulta evidente come, in ogni mese, la strategia di ventilazione naturale sia più conveniente in termini di consumi elettrici rispetto alla strategia di ventilazione meccanica.

Inoltre, è interessante notare come la ventilazione notturna meccanica nel mese di maggio e ottobre risulti sconveniente rispetto alla versione in assenza di ventilazione notturna: infatti, come mostrato nella tabella seguente, l'applicazione della ventilazione notturna risulta vantaggiosa in termini di consumi della pompa di calore nel periodo estivo, arrivando addirittura ad annullarlo, ma il consumo dei ventilatori porta ad un consumo elettrico complessivo sconveniente rispetto alla versione in assenza di ventilazione notturna. Probabilmente questo consumo eccessivo potrebbe essere ridotto ottimizzando lo slot orario di attivazione degli stessi.

Mese	Senza ventilazione notturna	Ventilazione notturna meccanica	
	Pompa di calore	Pompa di calore	Ventilatori
	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Maggio	42.3	0.0	50
Ottobre	47.4	0.0	49

Tabella 8-88: Consumo elettrico pompa di calore e ventilatori

Infine, dalle precedenti considerazioni emerge che, sia nel mese di maggio, sia in quello di ottobre, la ventilazione notturna riesce ad annullare i consumi elettrici della pompa di calore: questo avviene, sia perché l'edificio in questo mese richiede un minor quantitativo di aria fredda per rendere efficiente la strategia, sia perchè le condizioni climatiche sono tali da soddisfare la ventilazione per un maggior numero di ore rispetto a quelli estivi. Nonostante ciò, la strategia di ventilazione naturale risulta migliore in quanto non provoca alcun tipo di consumo aggiuntivo.

### 2080

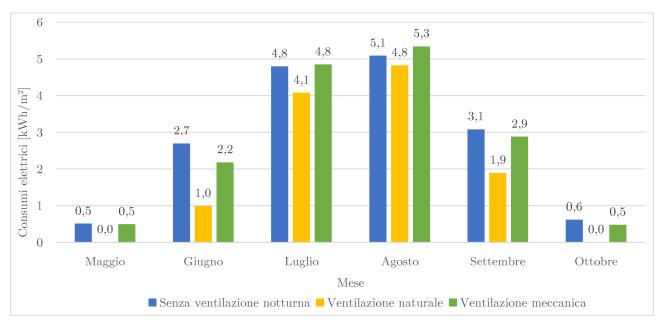


Grafico 8-62: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e presenza di ventilazione notturna

Dal grafico sovrastante, risulta evidente come, in ogni mese, la strategia di ventilazione naturale sia più conveniente in termini di consumi elettrici rispetto alla strategia di ventilazione meccanica.

Inoltre, è interessante notare come la ventilazione notturna meccanica risulti svantaggiosa o poco svantaggiosa in molti dei mesi estivi, tale comportamento può essere giustificato dall'aumento di temperature nelle ore notturne in cui la strategia risulta attiva: questo non permette di ottenere dei vantaggi sostanziali dall'applicazione della tecnica, e, qualora questo avvenisse, la riduzione ottenuta per il consumo della pompa di calore viene compensata dai consumi relativi ai ventilatori.

Infine, dal grafico emerge che nel mese di maggio e settembre la ventilazione naturale notturna riesce addirittura ad annullare i consumi elettrici della pompa di calore, annullando la richiesta di raffrescamento per tutto il mese. Questo avviene, sia perché l'edificio in questo mese richiede un minor quantitativo di aria fredda per rendere efficiente la strategia, sia perchè le condizioni climatiche sono tali da soddisfare la ventilazione per un maggior numero di ore rispetto a quelli estivi.

#### Confronti

La strategia di ventilazione notturna che risulta essere più conveniente per la città di Roma, per ogni anno, corrisponde alla soluzione di ventilazione naturale.

Anno	Senza ventilazione notturna	Con ventilazione notturna	
		Ventilazione naturale	Ventilazione meccanica
	$[{ m kWh/m^2}]$	$[{ m kWh/m^2}]$	$[{ m kWh/m^2}]$
CTI	11.5	4.8	10.8
2050	10.3	4.8	10.0
2080	16.8	11.8	16.5

Tabella 8-89: Consumo elettrico specifico annuale per il raffrescamento in assenza e presenza di ventilazione notturna

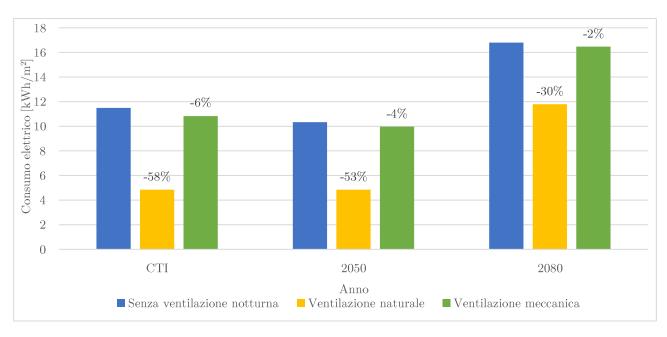


Grafico 8-63: Variazione del consumo elettrico specifico annuale in assenza e presenza di ventilazione notturna

Di seguito è stato riportato un grafico relativo all'efficienza di tale strategia relativa al consumo elettrico della versione in assenza di ventilazione notturna dell'anno considerato, confrontata per gli anni tipici metereologici analizzati (CTI, 2050 e 2080).

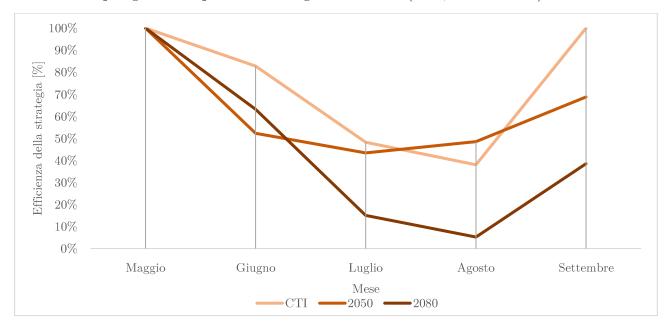


Grafico 8-64: Efficienza della ventilazione notturna naturale per i tre anni metereologici tipici

L'efficienza legata all'applicazione della strategia di ventilazione notturna naturale risulta fortemente influenzata dalla variazione dei dati climatici esterni.

Infatti, l'andamento generale di tale efficienza mostra una diminuzione della stessa al passare degli anni, dall'anno tipico CTI fino all'anno 2080, giustificata dall'aumento complessivo delle temperature come effetto del cambiamento climatico.

È interessante notare, che tale andamento non risulta rispettato nel mese di agosto; infatti, in questo mese, la strategia di ventilazione notturna naturale, risulta maggiormente conveniente nell'anno tipico 2050, rispetto all'anno CTI.

La causa di questo comportamento la si può trovare analizzando l'andamento orario delle temperature di tale mese per i due anni metereologici tipici in questione.

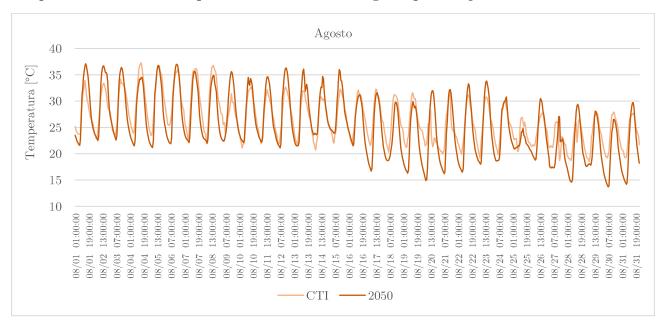


Grafico 8-65: Andamento orario della temperatura nel mese di agosto

Confrontando i valori orari dell'andamento della temperatura relativa all'anno CTI e l'anno 2050, risulta evidente che in quest'ultimo anno, per tutto il mese in esame, nelle ore notturne, si raggiungono temperature più basse rispetto a quelle che si verificano nell'anno del CTI.

Inoltre, nel 2050 l'oscillazione della temperatura tra il giorno e la notte è maggiore: questo potrebbe rendere più efficace lo scambio notturno con l'aria fresca che entra in ambiente. Dall'andamento del grafico relativo alle efficienze emerge un'ulteriore singolarità: per il mese di giugno la strategia di ventilazione notturna risulta più vantaggiosa nell'anno tipico 2080, piuttosto che per il 2050.

Analizzando l'andamento orario delle temperature del mese di giugno per i due anni tipici in questione, risulta che in linea generale queste aumenteranno nell'anno 2080 per tutta la durata del mese; in particolare, è possibile notare un discostamento più elevato tra i due andamenti nella prima metà del mese, che tendono poi a sovrapporsi nella seconda parte.

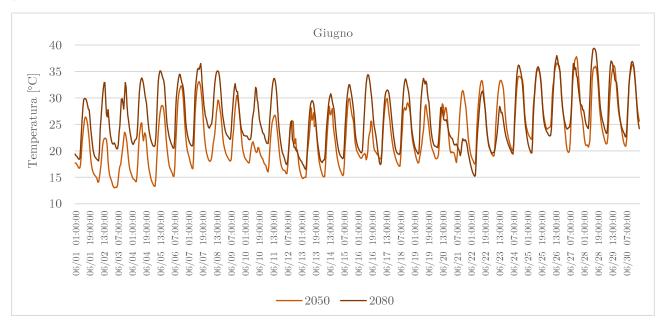


Grafico 8-66: Andamento orario della temperatura nel mese di giugno

Perciò, la maggior efficienza ottenuta per l'anno 2080, rispetto al 2050, può essere giustificata dall'andamento delle temperature delle prime due settimane.

Innanzitutto è bene specificare che, dato che il setpoint interno è mantenuto inferiore a 26°C dalla pompa di calore e dato che le temperature sono sempre minori di 25°C nelle ore notturne per entrambi gli anni, in generale le aperture potranno garantire un adeguato livello di ricambi d'aria; quindi, la differenza di tale comportamento risiede nel fatto che, in questi giorni, in relazione alle temperature esterne, la richiesta di fabbisogno nel 2080 sarà notevolmente superiore rispetto a quella del 2050 e perciò la ventilazione naturale notturna risulterà in percentuale più efficace nel 2080, dato che riuscirà a diminuire maggiormente la richiesta di carico di raffrescamento.

### 8.7.3. Palermo

Per la città di Palermo, la ventilazione notturna meccanica risulta attiva dalle 02:00 alle 09:00, garantendo 5 ricambi d'aria quando la temperatura esterna è minore di 26°C e quando la temperatura dell'aria esterna è minore rispetto a quella interna di almeno 1°C. La ventilazione notturna naturale avviene, come in ogni città, tramite un'apertura delle finestre e porte finestre del 25% della loro superficie totale, tra le 21:00 e le 9:00, permettendo l'ingresso di aria esterna solo quando quest'ultima risulta ad una temperatura minore rispetto a quella interna.

Di seguito, per ogni anno meteorologico tipico sono riportati i consumi elettrici relativi all'edificio, in seguito all'applicazione della strategia di ventilazione notturna naturale e ventilazione notturna meccanica, messi a confronto con quelli ottenuti in assenza di ventilazione notturna.

#### CTI

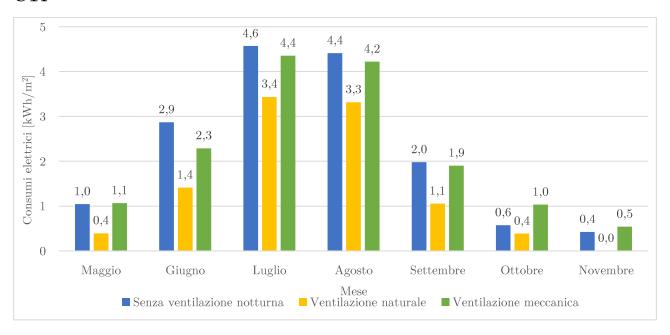


Grafico 8-67: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e presenza di ventilazione notturna

Dal grafico sovrastante, risulta evidente come, in ogni mese, la strategia di ventilazione naturale sia più conveniente in termini di consumi elettrici rispetto alla strategia di ventilazione meccanica.

Inoltre, è interessante notare come la ventilazione notturna meccanica nel mese di maggio, ottobre e novembre, risulti addirittura sconveniente rispetto alla versione in assenza di ventilazione notturna: infatti, come mostrato nella tabella seguente, l'applicazione della ventilazione notturna provoca, come desiderato, una diminuzione dei consumi della pompa di calore nel periodo estivo, ma l'elevato consumo dei ventilatori porta ad un consumo elettrico complessivo sconveniente rispetto alla versione in assenza di ventilazione notturna.

Mese	Senza ventilazione notturna	Ventilazione notturna meccanica			
	Pompa di calore	Pompa di calore	Ventilatori		
	[kWh]	[kWh]	[kWh]		
Maggio	106.3	49.4	58.8		
Ottobre	58.2	46.5	58.5		
Novembre	43.0	0.0	54.9		

Tabella 8-90: Consumo elettrico pompa di calore e ventilatori

Infine, dalle precedenti considerazioni emerge che, nel mese di novembre, la ventilazione notturna, sia naturale che meccanica, riesce ad annullare i consumi elettrici della pompa di calore: questo avviene, sia perché l'edificio in questo mese richiede un minor quantitativo di aria fredda per rendere efficiente la strategia, sia perchè le condizioni climatiche sono tali da soddisfare la ventilazione per un maggior numero di ore rispetto a quelli estivi. Nonostante ciò, la strategia di ventilazione naturale risulta migliore in quanto non provoca alcun tipo di consumo aggiuntivo.

#### 2050

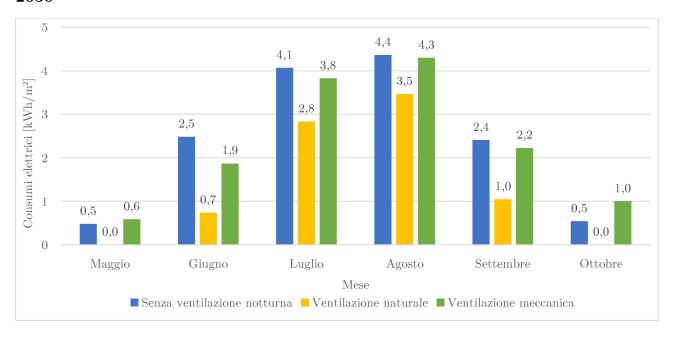


Grafico 8-68: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e presenza di ventilazione notturna

Dal grafico sovrastante, risulta evidente come, in ogni mese, la strategia di ventilazione naturale sia più conveniente in termini di consumi elettrici rispetto alla strategia di ventilazione meccanica.

Inoltre, è interessante notare come la ventilazione notturna meccanica nel mese di maggio e ottobre, risulti addirittura sconveniente rispetto alla versione in assenza di ventilazione notturna: infatti, come mostrato nella tabella seguente, l'applicazione della ventilazione notturna provoca, come desiderato, una diminuzione dei consumi della pompa di calore nel periodo estivo, ma l'elevato consumo dei ventilatori porta ad un consumo elettrico complessivo sconveniente rispetto alla versione in assenza di ventilazione notturna.

Mese	Senza ventilazione notturna	Ventilazione nottur	rna meccanica
	Pompa di calore	Pompa di calore	Ventilatori
	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Maggio	49.0	0.0	59.8
Ottobre	55	46.25	55.7

Tabella 8-91: Consumo elettrico pompa di calore e ventilatori

Infine, dalle precedenti considerazioni emerge che, nel mese di maggio, la ventilazione notturna riesce ad annullare i consumi elettrici della pompa di calore: questo avviene, sia perché l'edificio in questo mese richiede un minor quantitativo di aria fredda per rendere efficiente la strategia, sia perchè le condizioni climatiche sono tali da soddisfare la ventilazione per un maggior numero di ore rispetto a quelli estivi. Nonostante ciò, la strategia di ventilazione naturale risulta migliore in quanto non provoca alcun tipo di consumo aggiuntivo.

#### 2080

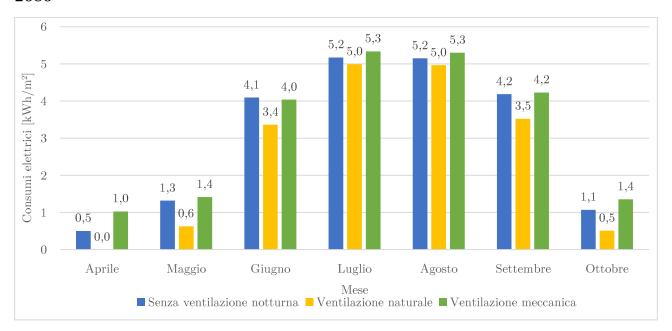


Grafico 8-69: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e presenza di ventilazione notturna

Dal grafico sovrastante, risulta evidente come, in ogni mese, la strategia di ventilazione naturale sia più conveniente in termini di consumi elettrici rispetto alla strategia di ventilazione meccanica.

Inoltre, è interessante notare come la ventilazione notturna meccanica in ogni mese risulti addirittura sconveniente (o poco conveniente) rispetto alla versione in assenza di ventilazione notturna: infatti, come mostrato nella tabella seguente, l'applicazione della ventilazione notturna provoca, come desiderato, una diminuzione dei consumi della pompa di calore nel periodo estivo, ma l'elevato consumo dei ventilatori porta ad un consumo elettrico complessivo sconveniente rispetto alla versione in assenza di ventilazione notturna.

Mese	Senza ventilazione notturna	Ventilazione nottui	rna meccanica
	Pompa di calore	Pompa di calore	Ventilatori
	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Aprile	50.9	45.5	58.8
Maggio	134.1	91.5	51.9
Giugno	415.9	380.4	29.9
Luglio	525.6	531.5	10.8
Agosto	523.4	526.9	11.9
Settembre	425.2	403.1	26.6
Ottobre	108.9	79.3	58.4

Tabella 8-92: Consumo elettrico pompa di calore e ventilatori

# Confronti

La strategia di ventilazione notturna che risulta essere più conveniente per la città di Palermo, per ogni anno, corrisponde alla soluzione di ventilazione naturale.

Anno	Senza ventilazione notturna	Con ventilazione notturna		
		Ventilazione naturale	Ventilazione meccanica	
	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[{ m kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	
CTI	15.9	10.0	16.0	
2050	14.3	8.1	14.9	
2080	21.5	18.0	23.2	

 $Tabella\ 8-93:\ Consumo\ elettrico\ specifico\ annuale\ per\ il\ raffrescamento\ in\ assenza\ e\ presenza\ di\ ventilazione\ notturna$ 

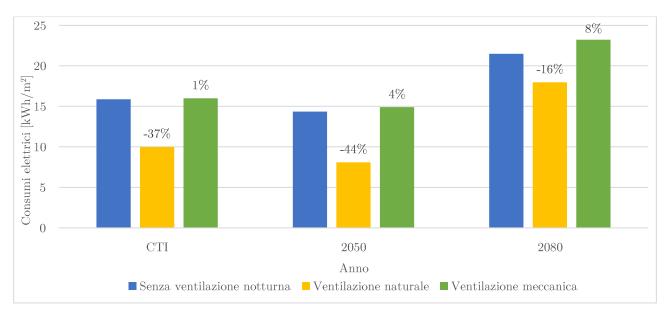


Grafico 8-70: Variazione del consumo elettrico specifico annuale in assenza e presenza di ventilazione notturna

Di seguito è stato riportato un grafico relativo all'efficienza di tale strategia relativa al consumo elettrico della versione in assenza di ventilazione notturna dell'anno considerato, confrontata per gli anni tipici metereologici analizzati (CTI, 2050 e 2080).

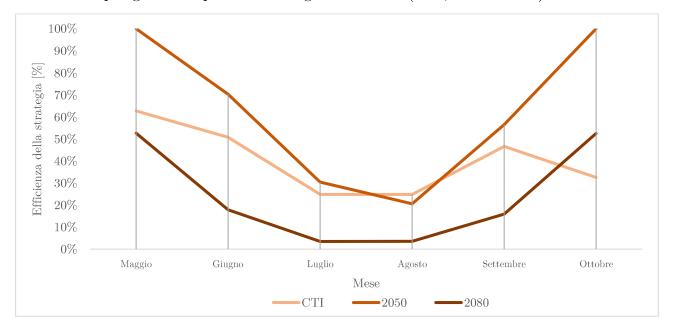


Grafico 8-71: Efficienza della ventilazione notturna naturale per i tre anni metereologici tipici

L'efficienza legata all'applicazione della strategia di ventilazione notturna naturale risulta fortemente influenzata dalla variazione dei dati climatici esterni.

Appare evidente che l'andamento generale di tale efficienza mostra una diminuzione significativa per l'anno tipico 2080, rispetto ad entrambi gli altri anni; tale comportamento è giustificato dall'aumento notevole delle temperature, anche nelle ore notturne, previsto per i mesi estivi nel 2080: questo permette una riduzione significativa delle ore di attivazione della strategia di ventilazione notturna naturale.

È interessante notare, che tale andamento non risulta rispettato nel mese di ottobre; infatti, in questo mese, la strategia di ventilazione notturna naturale, risulta maggiormente conveniente nell'anno tipico 2080, rispetto all'anno CTI, nonostante le temperature del 2080 abbiamo un andamento orario in generale sempre maggiore rispetto al CTI.

Innanzitutto è bene specificare che, dato che il setpoint interno è mantenuto inferiore a 26°C dalla pompa di calore e dato che le temperature sono sempre minori di 25°C nelle ore notturne per entrambi gli anni, le aperture potranno garantire un adeguato livello di

ricambi d'aria; quindi, la differenza di tale comportamento risiede nel fatto che, in relazione alle temperature esterne, la richiesta di fabbisogno nel 2080 sarà notevolmente superiore rispetto a quella del CTI e perciò la ventilazione naturale notturna risulterà in percentuale più efficiente nel 2080, dato che riuscirà a diminuire maggiormente la richiesta di carico di raffrescamento.

Inoltre, per tutti i mesi estivi, eccetto agosto, nel 2050 la strategia di ventilazione notturna naturale risulta essere più efficace, rispetto all'anno tipico CTI.

La motivazione di tale comportamento è ricavabile dall'andamento orario delle temperature per i due anni metereologici tipici in questione.

Ad esempio, per il mese di giugno, dal grafico sottostante emerge a metà mese la presenza di più giorni consecutivi in cui l'andamento della temperatura nell'anno tipico CTI è nettamente superiore rispetto a quella del 2050, non solo di giorno, ma anche di notte; la temperatura notturna nell'anno 2050 risulta tale per cui la ventilazione notturna naturale non si attiverà e non porterà alcun beneficio al carico di raffrescamento.

Inoltre, per l'ultima settimana del mese del 2050, la temperatura, oltre a diminuire durante il giorno provocando una richiesta di fabbisogno minore rispetto all'anno CTI, raggiunge anche durante la notte temperature più basse: perciò, la strategia di ventilazione notturna risulterà in questo anno più efficace di quanto lo sarà nel CTI.

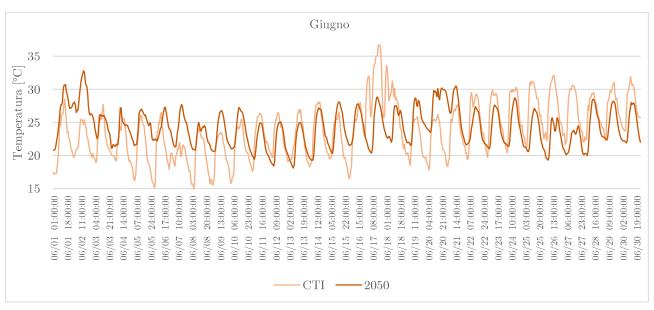


Grafico 8-72: Andamento orario della temperatura nel mese di giugno

Per il mese di luglio, nonostante dal grafico delle efficienze, appaia più efficiente la strategia di ventilazione naturale notturna nell'anno 2050 piuttosto che nell'anno CTI, la riduzione che in entrambi gli anni si verifica rispetto al fabbisogno iniziale in assenza di ventilazione, risulta paragonabile, così come gli andamenti orari delle temperature nel mese in questione.

Infine, a settembre, le temperature per i due anni tipici in questione hanno un andamento più o meno confrontabile per tutto il mese; mostrano invece un significativo discostamento nella settimana dopo il 15 settembre: in questi giorni la temperatura del CTI tende a diminuire (e così la richiesta di carico di raffrescamento), mentre nel 2050 tende ad aumentare. Quindi, la differenza di andamento dell'efficienze risiede nel fatto che, in relazione alle temperature esterne, la richiesta di fabbisogno nel 2050 sarà notevolmente superiore rispetto a quella del CTI e perciò la ventilazione naturale notturna risulterà in percentuale più efficiente nel 2050, dato che riuscirà a diminuire maggiormente la richiesta di carico di raffrescamento.

#### 8.7.4. Confronti

La strategia di ventilazione notturna che risulta essere più efficiente, e di conseguenza più conveniente, per ogni città e per ogni anno meteorologico tipico preso in considerazione, corrisponde alla soluzione di ventilazione naturale.

Infatti, la ventilazione notturna naturale risulta più efficiente rispetto a quella meccanica in termini di consumi elettrici, in quanto, apporta riduzioni significative al consumo totale della pompa di calore senza alcun costo aggiuntivo. Inoltre, la maggior parte delle stanze climatizzate è dotata di almeno una finestra o porta finestra e questo tipo di strategia è attivata in ogni città per più ore consecutive rispetto alla meccanica, perciò si riesce a sfruttarne maggiormente i benefici.

È utile sottolineare che i risultati ottenuti non hanno validità assoluta, ma sono strettamente legati alle scelte progettuali adottate: pertanto, è necessario specificare, che

la progettazione della ventilazione naturale non ha lasciato ampi margini decisionali, in quanto, apportando un beneficio gratuito agli edifici, è stata attivata per tutta la notte, adoperando gli opportuni controlli sulle temperature interne ed esterne.

Al contrario, la ventilazione meccanica risulta strettamente legata a scelte progettuali come il numero di ricambi d'aria e l'orario di funzionamento, in quanto comportano, da un lato, il costo aggiuntivo dovuto ai ventilatori, dall'altro, la riduzione del consumo previsto per il raffrescamento.

Per l'edificio in questione, il numero di ricambi d'aria imposto, genera in ognuna delle situazioni considerate consumi maggiori rispetto a quelli ottenuti tramite ventilazione notturna naturale; probabilmente, diminuendo questo valore si potrebbero ottenere dei benefici maggiori anche in termini di ventilazione notturna meccanica.

Nella seguente tabella sono stati riportati le riduzioni in percentuale del consumo elettrico previsto per la climatizzazione estiva dell'edificio, a seguito dell'attuazione della tecnica di ventilazione notturna: le celle colorate di giallo si riferiscono ad un risparmio energetico legato all'attuazione di ventilazione naturale.

	Milano	Roma	Palermo
CTI	-64%	-5 <mark>8%</mark>	-37 <mark>%</mark>
2050	-5 <mark>8%</mark>	-5 <mark>3%</mark>	-44 <mark>%</mark>
2080	-49 <mark>%</mark>	-30%	-13%

Tabella 8-94: Riduzione massima del consumo elettrico annuale per il raffrescamento con ventilazione notturna

In linea generale, per ogni città, la strategia risente fortemente della variazione dei dati climatici: la propria efficienza diminuisce complessivamente al passare degli anni, nonostante nei singoli mesi tale andamento non sempre viene rispettato. Questo avviene proprio perché, in generale, è previsto un aumento delle temperature al passare degli anni, come effetto del cambiamento climatico.

Dalla tabella sovrastante risulta evidente come l'efficienza della prestazione della ventilazione notturna dipenda fortemente dalla zona climatica.

Infatti, all'interno dello stesso anno, l'efficienza diminuisce progressivamente passando da Milano, a Roma ed infine a Palermo. Tale comportamento è motivato dalla differenza delle temperature riscontrabili nelle ore notturne in ognuna delle città: quest'ultime sono più basse a Milano e sempre maggiori a Palermo. L'aumento significativo di tali temperature, soprattutto nella città di Palermo, genera carichi di raffrescamento maggiori e minori benefici raggiungibili tramite ventilazione naturale, in quanto le ore di attivazione della strategia notturna si riducono bruscamente.

# 9. Edificio ad uso uffici

# 9.1. Descrizione generale

Nonostante le analisi descritte in precedenza siano state condotte immaginando gli edifici in esame situati in tre località differenti, la palazzina adibita ad uffici rappresenta effettivamente una delle sedi dell'INPS, localizzata in Via Carlo Spegazzini 66, a Roma. L'informazione sulla reale collocazione dell'edificio non ha avuto alcuna rilevanza nello studio condotto; tuttavia, tramite l'ausilio di Google Maps, è stato possibile visualizzare alcune delle caratteristiche della costruzione.

Inoltre, il caso studio esaminato, oltre che differenziarsi da quello reale per la collocazione, presenta in alcune parti una composizione architettonica differente, che verrà descritta nel dettaglio successivamente.



Figura 9-1: Foto dell'edificio ad uso uffici

L'edificio adibito a uffici è costituito da una palazzina di sette piani fuori terra di 855 m<sup>2</sup> ciascuno, con un'altezza interpiano di 2.7 m, e da un piano interrato non riscaldato della stessa superficie.

Il piano terra, l'unico a presentare una composizione architettonica diversa dagli altri, è costituito da hall, uffici open space e singoli e servizi; mentre i piani superiori contengono solamente uffici singoli e servizi.

I diversi piani sono collegati tra di loro da tre vani scale, posizionati al centro e alle due estremità dell'edificio; quest'ultimi costituiscono gli unici locali non riscaldati della costruzione, oltre al seminterrato.

Di seguito vengono riportate le piante dell'edificio, dove è possibile visualizzare anche l'orientamento della costruzione, e una tabella contenente i principali dati geometrici relativi al volume riscaldato calcolati utilizzando le misure esterne.

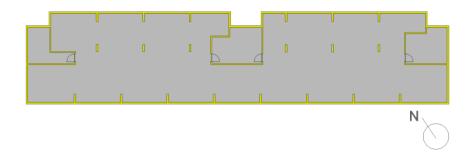


Figura 9-2: Pianta del piano seminterrato

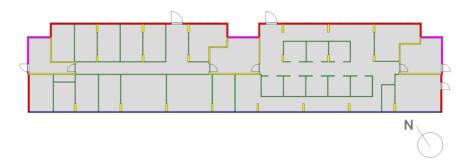


Figura 9-3: Pianta del piano terra

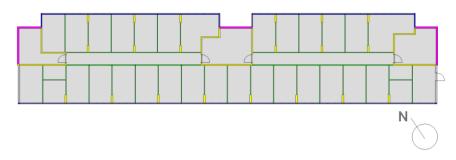


Figura 9-4: Pianta del piano tipo

Caratteristica	Simbolo	Unità di misura	Valore
Volume lordo climatizzato	$V_1$	$\mathrm{m}^3$	16134
Superficie utile climatizzata	$A_{\mathrm{f}}$	$\mathrm{m}^2$	5032
Superficie dell'involucro disperdente	$\mathrm{A}_{\mathrm{env}}$	$\mathrm{m}^2$	5647
Superficie dell'involucro edilizio trasparente	$A_{ m w}$	$\mathrm{m}^2$	1185
Rapporto di forma	S/V	$\mathrm{m}^{\text{-}1}$	0.35

Tabella 9-1: Dati geometrici relativi al volume riscaldato

Poiché lo studio effettuato non si è basato sulla posizione reale dell'edificio, non è stato preso in considerazione un contesto urbano ben preciso, di conseguenza, non è stato valutato alcun contributo di ombreggiamento dovuto ad edifici attorno.

Successivamente verranno descritte nel dettaglio i parametri relativi all'involucro e all'utenza, che caratterizzano il caso studio degli uffici.

### 9.2. Costruzione del modello

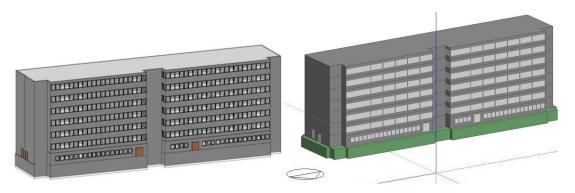


Figura 9-5: Modello di Revit

Figura 9-6: Modello di Design Builder

La metodologia generale eseguita per la modellazione è stata quella descritta nel capitolo 5 tuttavia nel presente paragrafo sono state riportate informazioni più specifiche riguardanti esclusivamente la costruzione del modello del caso studio degli uffici.

Come accennato in precedenza, la creazione del modello geometrico all'interno di Design Builder è stata effettuata tramite l'esportazione da Revit di un file gbXML, che ha consentito di ottenere soltanto elementi geometrici come muri, solai, finestre e porte e rilevare informazioni come l'orientamento dell'edificio.

Per quanto riguarda l'orientamento, durante la modellazione, è stato scelto di mantenere il nord ortogonale alle facciate dell'edificio, in quanto Design Builder, permette di disegnare diversi elementi seguendo una terna di assi cartesiani basata sulle coordinate polari, dunque inserire da subito il nord reale, avrebbe portato a una modellazione poco precisa: il problema è stato risolto inserendo l'informazione sul reale orientamento

dell'edificio direttamente su Energy Plus, utilizzato per ottenere la totalità dei risultati finali.

Come si può notare dalle immagini sottostanti, le stanze degli uffici sono delimitate da alcune partizioni che si agganciano ai pilastri. Revit permette di modellare i due elementi in modo distinto, assegnando a ognuno proprietà differenti, ma con Design Builder ciò non è possibile perché ogni delimitazione fra diverse zone è modellabile utilizzando un solo elemento.

Il problema è stato risolto utilizzando le "Sottosuperfici", elementi che hanno consentito di specificare la presenza di una diversa stratigrafia all'interno di un'altra (in questo caso la presenza dei pilastri a cui si agganciano le partizioni).

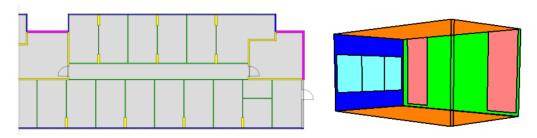


Figura 9-7: Estratto della pianta del piano tipo

Figura 9-8: "Zona" con sottosuperfici

Inoltre, per il caso studio degli uffici, all'interno della scheda "Costruzioni" a livello di edificio è stata inserita la capacità termica dell'aria e dell'arredamento, ricavata dalla UNI EN~ISO~52016-1:2018 e pari a  $10~000~\mathrm{J/m^2K}$ .

Quasi in tutte le fasi di modellazione, i dati di input inseriti all'interno del modello, sono stati strettamente legati alla destinazione d'uso della stanza considerata, di conseguenza, in moltissimi casi, sono stati creati dei template di base (Hall e uffici open space, ufficio singolo, bagno, corridoio) utilizzati per più zone.

Il presente capitolo descrive solo alcune delle operazioni eseguite per modellare l'edificio in quanto, molte altre indicazioni sulla costruzione del modello, sono state inserite all'interno dei paragrafi di pertinenza.

#### 9.3. Edificio allo stato di fatto

I paragrafi che seguono descrivono in modo dettagliato alcuni dei parametri relativi ad involucro ed utenza, che caratterizzano l'edificio prima dell'intervento di riqualificazione. Tramite i dati di input, che verranno riportati successivamente, è stato possibile ricavare i fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento che, insieme ai valori della trasmittanza termica globale e dell'area solare equivalente riportati di seguito, costituiscono alcuni dei parametri utilizzati per confrontare il comportamento dell'edificio prima e dopo l'intervento di ristrutturazione.

### 9.3.1 Descrizione dei componenti edili

piante riportate al paragrafo 7.1.

M8

La seguente tabella contiene i valori di spessore, trasmittanza termica, massa termica superficiale e trasmittanza termica periodica di chiusure opache e partizioni verticali.

Ad ogni tipologia di elemento è stato associato un codice e un colore evidenziati nelle

Codice Colore U Descrizione Yie  $\mathbf{m}$  $[W/m^2K]$  $[W/m^2K]$  $[\mathrm{kg/m^2}]$ [cm]M1Parete esterna in Cls 16.8 3.460375 1.726 M2Parete esterna in mattoni 26.0 1.242 186 0.839M3Parete esterna tipo Spandrel 12.0 0.73791 0.575M48.0 0.6850.674Partizione verticale 31 M50.89 Parete esterna in mattoni con rivestimento in vetro 24.6 1.264 165 M6Parete esterna in Cls con rivestimento in vetro 17.43.392 390 1.609 M7Pilastri in Cls interni 28.0 0.433 2.120 616

 $Tabella\ 9\hbox{-}2\hbox{:}\ Caratteristiche\ dei\ componenti\ opachi\ verticali$ 

6.0

0,617

25

0.601

Porta REI

Le stesse caratteristiche elencate per gli elementi opachi verticali sono contenute nella successiva tabella per le chiusure opache e partizioni orizzontali.

Codice	Descrizione	s	U	m	$Y_{ie}$
		[cm]	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{kg/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
P1	Solaio interpiano	29.2	1,411	538	0.270
P2	Solaio interpiano su interrato	29.2	1.411	538	0.270
Р3	Solaio controterra	44.5	1.410	805	0.110
S1	Solaio di copertura	35.5	1.810	671	0.418

Tabella 9-3: Caratteristiche dei componenti opachi orizzontali

L'abbinamento di un colore ad ogni stratigrafia si è rilevato particolarmente utile durante la fase di associazione delle stratigrafie ad ogni elemento del modello, in quanto Design Builder fornisce una restituzione grafica come quella mostrata nell'immagine sottostante, utile a verificare che l'operazione sia stata eseguita in modo corretto.

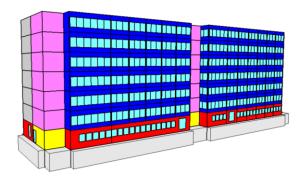


Figura 9-9: Restituzione grafica del modello di Design Builder

Infine, le tabelle successive contengono tutti i dati necessari a caratterizzare l'involucro trasparente: area e trasmittanza termica del vetro e del telaio, perimetro del vetro, trasmittanza termica lineare, fattore solare, trasmissione luminosa e trasmittanza termica dell'intero serramento.

Anche in questo caso ogni tipologia di infisso è caratterizzata da un codice: gli elementi W01 rappresentano le porte vetrate presenti nel prospetto est e ovest; quelli W02 sono elementi dello stesso tipo dei precedenti ma di dimensioni maggiori, inseriti nella facciata nord; le finestre W03 sono posizionate esclusivamente al piano terreno nel prospetto nord; gli infissi W04 sono collocati ad ogni piano e nelle facciate nord e sud, ad eccezione del prospetto nord del piano terreno; ed infine, l'infisso W05 è presente solamente dal primo al sesto piano nella rientranza del prospetto nord.

Codice	Ag	Af	Aw	Ug	Uf	1	ψ	Uw
	$[m^2]$	$[m^2]$	$[m^2]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	[m]	[W/mK]	$[\mathrm{W/m^2K}]$
W01	2.020	1.220	3.24	3.279	5.70	13.60	0.02	4.274
W02	3.340	1.520	4.86	3.279	5.70	17.20	0.02	4.107
W03	1.030	0.170	1.20	3.236	2.80	4.08	0.08	3.447
W04	1.590	0.210	1.80	3.236	2.80	5.08	0.08	3.411
W05	1.022	0.178	1.20	3.236	2.80	4.28	0.08	3.457

Tabella 9-4: Caratteristiche dei componenti trasparenti

Codice	$g_{\mathrm{gl,n}}$	$\tau_{\rm v}$
	[-]	[-]
W01	0.85	0.90
W02	0.85	0.90
W03	0.85	0.90
W04	0.85	0.90
W05	0.85	0.90

Tabella 9-5: Parametri solari dei componenti trasparenti

#### 9.3.2 Calcolo di H'<sub>T</sub> e A<sub>sol,est</sub>

## Calcolo di H'<sub>T</sub>

Le trasmittanze termiche dei singoli componenti elencate precedentemente, unitamente ai dati geometrici, sono state utilizzate per effettuare il calcolo del coefficiente medio globale di scambio termico  $(H_T)$ .

Per il calcolo di  $H_u$  sono stati considerati quattro ambienti non climatizzati: il seminterrato, i due vani scala laterali e il vano scala centrale.

Il valore di H'<sub>T</sub> è stato calcolato in due situazioni differenti: assenza di ponti termici e presenza di ponti termici; di conseguenza, è stato necessario definire le tipologie di ponti termici da valutare prendendo in considerazione i nodi tra le varie stratigrafie.

Nel caso in esame sono stati considerati i ponti termici presenti in corrispondenza dell'incrocio tra due pareti con stratigrafie differenti, dello spigolo di pareti isolate, del nodo di pareti e solai e del telaio dei serramenti.

I valori di trasmittanza termica lineare, riportati nella seguente tabella, sono stati ricavati utilizzando l'Atlante nazionale dei ponti termici, e nei casi in cui le caratteristiche dei ponti termici presenti all'interno si discostavano troppo dal caso in esame, sono state applicate le equazioni presentati nell'articolo scientifico "A building thermal bridges sensitivity analysis", che ha permesso di calcolare i valori in modo più accurato.

Codice	Codice atlante	Ponte termico	$\Psi$ Atlante	Ψ Corretto
			$[\mathrm{W/mK}]$	[W/mK]
M2-M3	R2	Angolo tra M2 e M3	0.27	-
M3-M3	C1	Angolo tra M3 e M3	-0.2	-0.07
M2-M2	C2	Angolo tra M2 e M2	-0.22	-
M2-M1	W5	Giunto tra M2 e M0	0.99	0.08
M3-M1	W7	Giunto tra M3 e M0	0.96	0.09
M2/M5-P1	W7	Giunto tra M2 e P1	0.94	0.12
M2-P2	IF2	Giunto tra M2 e P2	0.94	0.12
M3-P1	IF1	Giunto tra M3 e P1	0.23	0.03
M3-P2	IF1	Giunto tra M3 e P2	0.23	0.03
M2-T	W5	Serramenti in M2	0.14	0.08
M3-T	W1	Serramenti in M1	0.05	0.09

Tabella 9-6: Valori di trasmittanza termica lineare dei ponti termici

Nelle seguenti tabelle vengono riportati i risultati parziali più significativi e i valori di  $H_T$  per le tre località e per le differenti tipologie di modello analizzate.

	Hd	Hu	Htr	S/V	Н'т	$\mathrm{H'_{T,lim}}$
	[W/K]	[W/K]	[W/K]	$[\mathrm{m}^{\text{-}1}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
Milano	7527	760	8287	0.35	1.62	0.80
Roma	7527	760	8287	0.35	1.62	0.80
Palermo	7527	760	8287	0.35	1.62	0.75

Tabella 9-7: Calcolo del coefficiente medio globale di scambio termico in assenza di ponti termici

Città	Hd	Hu	$_{ m Htr}$	S/V	$\mathrm{H'_{T}}$	$\mathrm{H'}_{\mathrm{T,lim}}$
	[W/K]	[W/K]	[W/K]	$[\mathrm{m}^{\text{-}1}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
Milano	7527	760	8287	0.35	1.63	0.80
Roma	7527	760	8287	0.35	1.63	0.80
Palermo	7527	760	8287	0.35	1.63	0.75

Tabella 9-8: Calcolo del coefficiente medio globale di scambio termico in presenza di ponti termici

## Calcolo di Asol, est

L'area solare equivalente estiva è stata calcolata considerando la superficie di involucro trasparente per ogni orientamento, il fattore di riduzione per ombreggiatura, la trasmittanza di energia solare totale della finestra, l'irradianza solare media nel mese di luglio per l'esposizione considerata e quella media annuale sul piano orizzontale a Roma. Nel caso in esame, non è stato considerato alcun contributo di ombreggiamento dovuto ad altri edifici, ma è stato calcolato il fattore di riduzione per ombreggiatura sulle finestre presenti nella rientranza della facciata Nord, dovuta all'edificio stesso.

Nelle tabelle successive vengono riportati alcuni dati utilizzati per il calcolo precedentemente descritto e il valore di  $A_{\text{sol,est}}$  ottenuto per le città di Milano, Roma e Palermo.

Esposizione	$A_{\mathrm{w,p}}$	$A_{ m g}$	$I_{\rm sol,media\ Luglio}$	$I_{sol,h,media\ annua,\ Roma}$	$A_{\rm sol,est}/A_{\rm sup,utile}$	Area solare specifica limite		
	$[m^2]$	$[m^2]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	[-]	[-]		
Nord	528.12	463.52	109.03	180.36				
Sud	680.40	601.02	123.84	180.36	0.11	0.04		
Est	24.48	19.71	175.46	180.36	0.11	0.04		
Ovest	21.24	17.69	175.46	180.36				

Tabella 9-9: Calcolo dell'area solare equivalente estiva per la città di Milano

Esposizione	$A_{\mathrm{w,p}}$	$A_{ m g}$	I <sub>sol,media Luglio</sub>	$I_{sol,h,media\ annua,\ Roma}$	$A_{\rm sol,est}/A_{\rm sup,utile}$	Area solare specifica limite		
	$[\mathrm{m}^2]$	$[\mathrm{m}^2]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	[-]	[-]		
Nord	528.12	463.52	109.03	180.36				
Sud	680.40	601.02	132.87	180.36	0.10	0.04		
Est	24.48	19.71	209.95	180.36	0.12	0.04		
Ovest	21.24	17.69	209.95	180.36				

 $Tabella\ 9\text{-}10:\ Calcolo\ dell'area\ solare\ equivalente\ estiva\ per\ la\ citt\`{a}\ di\ Roma$ 

Esposizione	$A_{\mathrm{w,p}}$	$A_{ m g}$	$I_{\rm sol,media\ Luglio}$	$I_{sol,h,media\ annua,\ Roma}$	$A_{\rm sol,est}/A_{\rm sup,utile}$	Area solare specifica limite		
	$[m^2]$	$[m^2]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	[-]	[-]		
Nord	528.12	463.52	109.03	180.36				
Sud	680.40	601.02	112.62	180.36	0.10	0.04		
Est	24.48	19.71	185.07	180.36	0.10	0.04		
Ovest	21.24	17.69	185.07	180.36				

Tabella 9-11: Calcolo dell'area solare equivalente estiva per la città di Palermo

## 9.3.3 Occupazione

In questo paragrafo verranno indicate le informazioni relative al numero di occupanti presenti nell'edificio e ai profili di occupazione.

Tutti i dati di input utilizzati per la modellazione sono stati classificati in base a quattro tipologie di ambienti presenti all'interno della palazzina uffici: hall e uffici open space, uffici singoli, bagni e corridoi.

Nella tabella successiva sono riportate le indicazioni relative alla densità di occupazione o al numero di occupanti considerati per ogni ambiente riscaldato presente all'interno dell'edificio.

Occupazione	Numero di occupanti	Densità di occupazione
	[pers.]	$[\mathrm{pers./m^2}]$
Hall e uffici open space	-	0.12
Uffici singoli	1	-
Corridoi	0	0
Bagno tipologia A	0.5	-
Bagno tipologia B	2	-

Tabella 9-12: Numero di occupanti

I dati riportati nella tabella precedente sono validi solamente nelle ore in cui il profilo di occupazione assume un valore pari a 1, quindi quando l'edificio contiene il massimo numero di occupanti; in tutte le altre ore il numero di persone presenti seguirà i profili di occupazione riportati di seguito per i giorni feriali, il sabato e la domenica e le festività.

								F	'atto	re d	i oc	cupa	azioi	ne										
											[-]													
Ora del giorno	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Giorni feriali	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1	1	1	1	0.5	1	1	1	0.5	0	0	0	0	0	0
Sabato	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Domenica/Festività	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabella 9-13: Profilo di occupazione

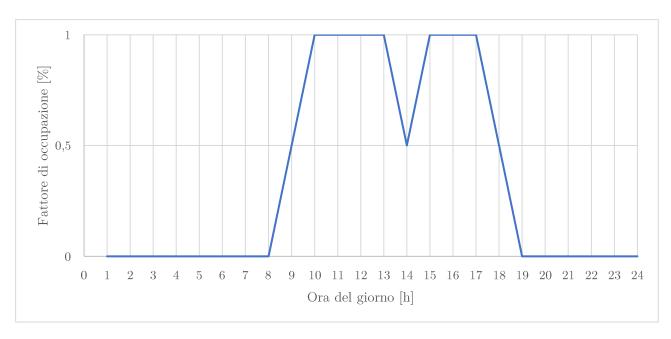


Grafico 9-1: Andamento giornaliero del fattore di occupazione

### 9.3.4 Apporti interni

Gli apporti interni dovuti agli occupanti, alle apparecchiature e all'illuminazione sono elencati nella seguente tabella in funzione dell'ambiente considerato.

Zona	Apporti per persona	Apporti per apparecchiature e illuminazione
	[W/pers.]	$[\mathrm{W/m^2}]$
Hall e uffici open space	118	27
Uffici singoli	118	27
Corridoi	118	12
Bagni	118	12

 $Tabella\ 9\hbox{-}14\hbox{:}\ Apporti\ interni$ 

I valori riportati in tabella si verificano quando il profilo di occupazione riportato al 9.3.3 assume dei valori pari a 1, in tutte le altre ore gli apporti interni variano in funzione della percentuale di occupazione.

Inoltre, è utile sottolineare, che per gli ambienti come bagni e corridoi non è stato considerato alcun contributo dovuto ad apparecchiature, bensì il valore di  $12~\rm W/m^2$  si riferisce alla sola quota dell'illuminazione.

### 9.3.5 Ventilazione

Uno dei dati di input fondamentale per una simulazione energetica è la portata d'aria minima che deve essere immessa all'interno degli ambienti per garantire un'adeguata qualità dell'aria.

I valori riportati nella seguente tabella rappresentano il numero di ricambi d'aria inseriti come dato di input all'interno di Design Builder e sono strettamente collegati all'occupazione: la prima riga fa riferimento alle ore dei giorni feriali in cui si svolge l'attività lavorativa, al contrario, i valori contenuti nella seconda, sono validi per tutte le ore in cui nell'edifico non vi è alcun occupante (vedi profilo di occupazione al paragrafo 9.3.3)

	Numero di ricambi d'aria									
Occupazione	Hall e uffici open space	Uffici singoli	Corridoi	Bagni						
	$[\mathrm{h}^{\text{-}1}]$	$[\mathrm{h}^{\text{-}1}]$	$[h^{-1}]$	[h <sup>-1</sup> ]						
Occupato	1.92	1.02	0.93	0.64						
Non occupato	0.13	0.13	0.13	0.64						

Tabella 9-15: Numeri di ricambi d'aria per la qualità dell'aria

I dati sulla ventilazione per il caso studio degli uffici sono stati inseriti nella scheda "HVAC" per ogni singola zona: è stato riportato il valore massimo di numero di ricambi d'aria in funzione della destinazione d'uso dell'ambiente e, a tale valore è stato associato un programma annuale contenente le frazioni da considerare, a seconda del giorno settimanale e dell'ora.

#### 9.3.6 Fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento

I fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento sono stati calcolati facendo riferimento al componente "ZoneHVAC:IdealLoadsAirSystem" di Energy Plus, il quale permette di studiare le prestazioni dell'edificio senza modellare l'impianto.

Questo oggetto viene infatti descritto come un'unità ideale che per ottenere le temperature di setpoint desiderate all'interno degli ambienti e riportate successivamente, utilizza l'aria per aggiungere o rimuovere calore con il 100% di efficienza.

Zona	Temperatura di setpoint riscaldamento	Temperatura di setpoint raffrescamento
	$^{\circ}\mathrm{C}$	°C
Uffici open space	20	26
Uffici singoli	20	26
Corridoi	16	25
Bagni	20	26

Tabella 9-16: Temperature di setpoint di riscaldamento e di raffrescamento

Inoltre, col fine di modellare un "impianto ideale", per ricavare i fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento, è stato necessario specificare su Energy Plus che il sistema in esame non avesse nessun limite di capacità e di portata.

La metodologia di calcolo utilizzata per la determinazione dei fabbisogni di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale si è basata sulle condizioni standard, che prevede l'utilizzo di dati di input convenzionali e un regime di funzionamento dell'impianto continuo.

Di conseguenza, i sottoparagrafi che seguono, mostrano i risultati ottenuti considerando l'impianto di riscaldamento e di raffrescamento attivo tutto l'anno 24 ore al giorno, per le tre città analizzate.

In aggiunta, per ogni città, sono stati riportati i risultati relativi ai modelli con e senza ponti termici e una tabella contenente l'incidenza che quest'ultimi hanno sui risultati.

Al contrario, gli studi condotti sull'edificio a seguito della ristrutturazione e riportati nei capitoli successivi, sono stati compiuti esclusivamente — sul modello con ponti termici, in quanto:

- 3. si è ritenuto che il modello con i ponti termici fosse più realistico;
- 4. in previsione di un isolamento dell'edificio l'incidenza dei ponti termici rispetto allo stato di fatto assumerà un'influenza maggiore sui risultati.

Inoltre, i risultati che seguono sono stati ottenuti effettuando le simulazioni con Energy Plus, utilizzando 4 timestep per ora e i dati climatici forniti dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI), per Milano, Roma e Palermo.

### 9.3.6.1 Milano

Nel seguente paragrafo sono riportate le tabelle e i grafici contenenti i fabbisogni mensili di riscaldamento e raffrescamento riferiti a tutto l'edificio e quelli specifici per la città di Milano.

I risultati appena descritti sono stati riportati sia per il modello in assenza di ponti termici e sia per quello in cui questi sono stati considerati.

	Fabbisogno di riscaldamento		Fabbisogno riscalda		Fabbise raffresca	9	Fabbisogno raffresc	_
Mesi	Senza ponti termici	Con ponti termici	Senza ponti termici	Con ponti termici	Senza ponti termici	Con ponti termici	Senza ponti termici	Con ponti termici
	[kWh]	[kWh]	[kWh/m <sup>2</sup> ]	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	[kWh]	[kWh]	$[kWh/m^2]$	$[kWh/m^2]$
Gennaio	47393	50938	9.42	10.12	-934	-755	-0.19	-0.15
Febbraio	23239	25420	4.62	5.05	-4521	-3971	-0.90	-0.79
Marzo	9315	10444	1.85	2.08	-12072	-11176	-2.40	-2.22
Aprile	2710	3164	0.54	0.63	-18131	-17062	-3.60	-3.39
Maggio	17	23	0.00	0.00	-40015	-38960	-7.95	-7.74
Giugno	0	0	0.00	0.00	-63589	-63108	-12.64	-12.54
Luglio	0	0	0.00	0.00	-76246	-76139	-15.15	-15.13
Agosto	1	2	0.00	0.00	-71649	-71587	-14.24	-14.23
Settembre	1	1	0.00	0.00	-43797	-42899	-8.70	-8.53
Ottobre	8065	8864	1.60	1.76	-14341	-13678	-2.85	-2.72
Novembre	29044	31607	5.77	6.28	-1663	-1386	-0.33	-0.28
Dicembre	54188	58197	10.77	11.57	-27	-20	-0.01	0.00

 $Tabella\ 9\text{-}17\ Fabbisogno\ termici\ mensili\ in\ assenza\ e\ presenza\ di\ ponti\ termici$ 

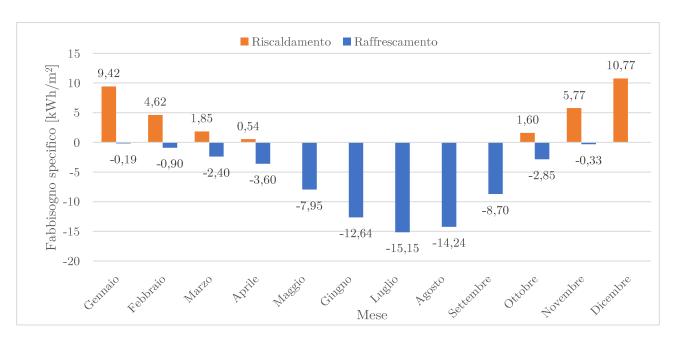


Grafico 9-2: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento in assenza di ponti termici

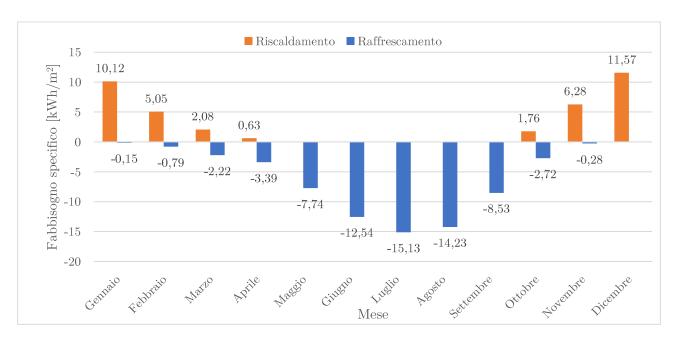


Grafico 9-3: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento in presenza di ponti termici

Come atteso, dai grafici e dalle tabelle sovrastanti, risulta evidente come il fabbisogno di riscaldamento aumenti a causa delle maggiori dispersioni dovute alla presenza di ponti termici.

Nella tabella seguente sono stati riportati i fabbisogni annuali di riscaldamento e raffrescamento dell'edificio per le due versioni e in aggiunta, è stata indicata l'incidenza dei ponti termici sui risultati.

	Senza ponti termici	Con ponti termici	Incidenza
	[kWh]	[kWh]	[%]
Fabbisogno di riscaldamento	173974	188661	8%
Fabbisogno di raffrescamento	-346987	-340740	-2%

Tabella 9-18: Incidenza dei ponti termici sul fabbisogno termico annuale

### 8.3.6.2 Roma

Nel seguente paragrafo sono riportate le tabelle e i grafici contenenti i fabbisogni mensili di riscaldamento e raffrescamento riferiti a tutto l'edificio e quelli specifici per la città di Roma.

I risultati appena descritti sono stati riportati sia per il modello in assenza di ponti termici e sia per quello in cui questi sono stati considerati.

	Fabbisogno di riscaldamento		Fabbisogno riscalda	•	Fabbise raffresc	0	Fabbisogno raffresc	•
	Senza ponti	Con ponti	Senza ponti	Con ponti	Senza ponti	Con ponti	Senza ponti	Con ponti
mese	termici	termici	termici	termici	termici	termici	termici	termici
	[kWh]	[kWh]	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	[kWh]	[kWh]	$[{ m kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Gennaio	24858	27076	4.94	5.38	-4997	-4497	-0.99	-0.89
Febbraio	13427	14843	2.67	2.95	-8409	-7613	-1.67	-1.51
Marzo	7127	8019	1.42	1.59	-14161	-13155	-2.81	-2.61
Aprile	10	15	0.00	0.00	-28520	-27122	-5.67	-5.39
Maggio	4	6	0.00	0.00	-46015	-44805	-9.14	-8.90
Giugno	0	0	0.00	0.00	-68555	-68009	-13.62	-13.52
Luglio	0	0	0.00	0.00	-96909	-97281	-19.26	-19.33
Agosto	0	0	0.00	0.00	-94360	-94767	-18.75	-18.83
Settembre	0	0	0.00	0.00	-57556	-56911	-11.44	-11.31
Ottobre	72	84	0.01	0.02	-33434	-32387	-6.64	-6.44
Novembre	7522	8373	1.49	1.66	-11282	-10519	-2.24	-2.09
Dicembre	18055	19851	3.59	3.94	-6188	-5401	-1.23	-1.07

 $Tabella\ 9\text{-}19:\ Fabbisogno\ termici\ mensili\ in\ assenza\ e\ presenza\ di\ ponti\ termici$ 

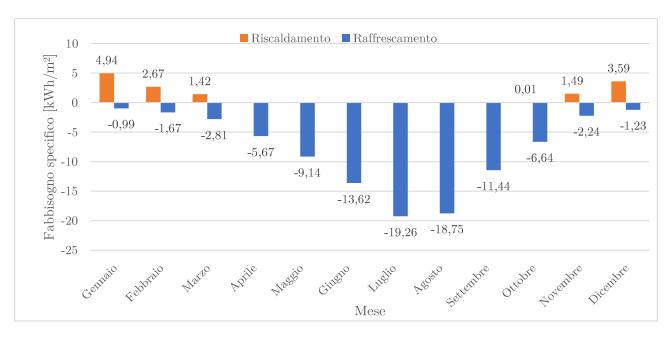


Grafico 9-4: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento in assenza di ponti termici

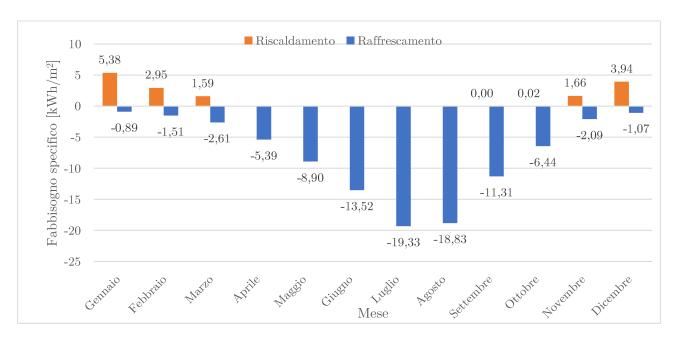


Grafico 9-5:Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento in presenza di ponti termici

Come atteso, dai grafici e dalle tabelle sovrastanti risulta evidente come il fabbisogno di riscaldamento aumenti a causa delle maggiori dispersioni dovute alla presenza di ponti termici.

Nella tabella seguente sono stati riportati i fabbisogni annuali di riscaldamento e raffrescamento dell'edificio per le due versioni e in aggiunta, è stata indicata l'incidenza dei ponti termici sui risultati.

	Senza ponti termici	Con ponti termici	Incidenza
	[kWh]	[kWh]	[%]
Fabbisogno di riscaldamento	71075	78265	10%
Fabbisogno di raffrescamento	-470386	-462468	-2%

Tabella 9-20: Incidenza dei ponti termici sul fabbisogno termico annuale

### 9.3.6.3 Palermo

Nel seguente paragrafo sono riportate le tabelle e i grafici contenenti i fabbisogni mensili di riscaldamento e raffrescamento riferiti a tutto l'edificio e quelli specifici per la città di Roma.

I risultati appena descritti sono stati riportati sia per il modello in assenza di ponti termici e sia per quello in cui questi sono stati considerati.

	Fabbisogno di riscaldamento		Fabbisogno specifico di riscaldamento		Fabbisogno di raffrescamento		Fabbisogno specifico di raffrescamento	
mese	Senza ponti termici	Con ponti termici	Senza ponti termici	Con ponti termici	Senza ponti termici	Con ponti termici	Senza ponti termici	Con ponti termici
	[kWh]	[kWh]	[kWh/m2]	[kWh/m2]	[kWh]	[kWh]	[kWh/m2]	[kWh/m2]
Gennaio	13385	14582	2.66	2.90	-10368	-9705	-2.06	-1.93
Febbraio	6264	7111	1.24	1.41	-10010	-9214	-1.99	-1.83
Marzo	2290	2694	0.46	0.54	-21445	-20217	-4.26	-4.02
Aprile	30	40	0.01	0.01	-26546	-25237	-5.28	-5.02
Maggio	0	0	0.00	0.00	-49256	-48163	-9.79	-9.57
Giugno	0	0	0.00	0.00	-66292	-66028	-13.17	-13.12
Luglio	0	0	0.00	0.00	-84472	-84948	-16.79	-16.88
Agosto	0	0	0.00	0.00	-84235	-84721	-16.74	-16.84
Settembre	0	0	0.00	0.00	-58952	-58719	-11.72	-11.67
Ottobre	0	0	0.00	0.00	-46243	-45476	-9.19	-9.04
Novembre	731	844	0.15	0.17	-23817	-22876	-4.73	-4.55
Dicembre	6305	7064	1.25	1.40	-10586	-9811	-2.10	-1.95

Tabella 9-21: Fabbisogno termici mensili in assenza e presenza di ponti termici

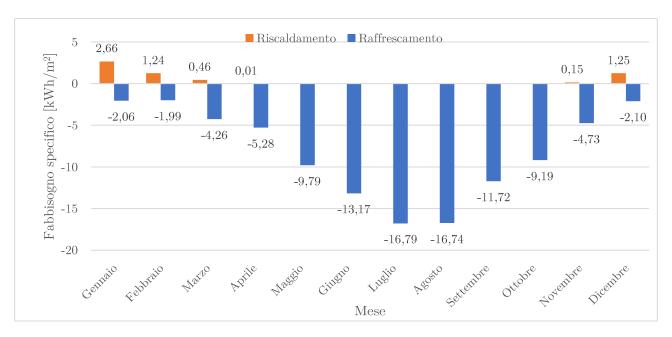


Grafico 9-6: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento in assenza di ponti termici

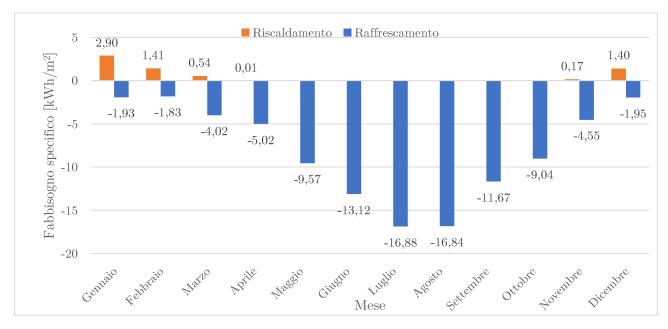


Grafico 9-7: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento in presenza di ponti termici

Come atteso, dai grafici e dalle tabelle sovrastanti risulta evidente come il fabbisogno di riscaldamento aumenti a causa delle maggiori dispersioni dovute alla presenza di ponti termici. Nella tabella seguente sono stati riportati i fabbisogni annuali di riscaldamento e raffrescamento dell'edificio per le due versioni, e in aggiunta, è stata indicata l'incidenza dei ponti termici sui risultati.

	Senza ponti termici	Con ponti termici	Incidenza
	[kWh]	[kWh]	[%]
Fabbisogno di riscaldamento	29006	32335	11%
Fabbisogno di raffrescamento	-492224	-485116	-1%

Tabella 9-22: Incidenza dei ponti termici sul fabbisogno termico annuale

#### 9.3.6.4 Confronti

Nel presente sottoparagrafo sono stati riportati i risultati dei fabbisogni annuali di riscaldamento e raffrescamento per le tre città e per le differenti versioni di modello.

La tabella e il grafico seguenti, riferite al modello senza ponti termici, mettono in evidenza, come atteso, che il fabbisogno di riscaldamento decresce da Milano a Palermo, mentre quello di raffrescamento, presenta un andamento opposto.

	Fabbisogi	no annuale	Fabbisogno specifico annuale		
Città	Riscaldamento	Raffrescamento	Riscaldamento	Raffrescamento	
	[kWh]	[kWh]	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	
Milano	173974	-346987	34.57	-68.96	
Roma	71075	-470386	14.12	-93.48	
Palermo	29006	-492224	5.76	-97.82	

Tabella 9-23: Fabbisogno termico specifico annuale di riscaldamento e di raffrescamento in assenza di ponti termici

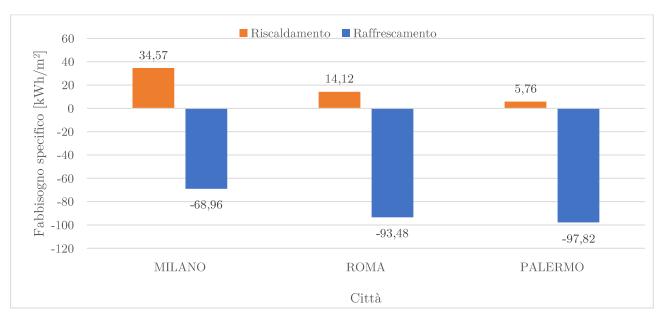


Grafico 9-8: Fabbisogno termico specifico annuale di riscaldamento e di raffrescamento in assenza di ponti termici

Il grafico e la tabella sottostante si riferiscono al modello con i ponti termici e, come per il caso precedente, si può notare come il fabbisogno di riscaldamento diminuisca da Milano a Palermo, mentre il raffrescamento aumenti.

	Fabbisogr	no annuale	Fabbisogno specifico annuale		
Città	Riscaldamento	Raffrescamento	Riscaldamento	Raffrescamento	
	[kWh]	[kWh]	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	
Milano	188661	-340740	37.49	-67.71	
Roma	78265	-462468	15.55	-91.91	
Palermo	32335	-485116	6.43	-96.41	

Tabella 9-24: Fabbisogno termico specifico annuale di riscaldamento e di raffrescamento in presenza di ponti termici

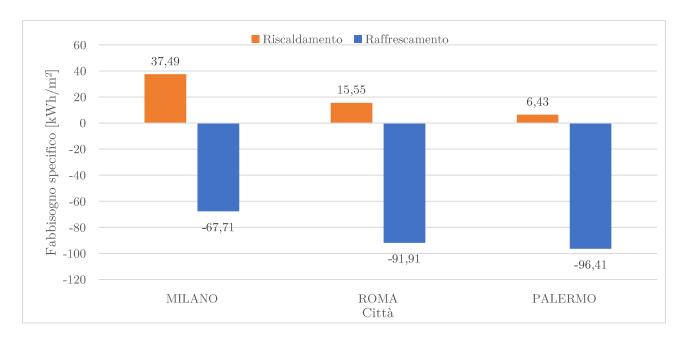


Grafico 9-9: Fabbisogno termico specifico annuale di riscaldamento e di raffrescamento in presenza di ponti termici

# 9.4. Edificio post intervento di ristrutturazione

Gli interventi edilizi applicati al caso studi degli uffici sono stati scelti in modo da ottenere un edificio nZEB: è stata effettuata una ristrutturazione importante di primo livello così come definita all'interno del DM 26/06/2015 (Decreto dei requisiti minimi).

L'intervento di ristrutturazione ha riguardato principalmente le partizioni e le chiusure, opache e trasparenti, che sono state migliorate in funzione dei valori di trasmittanza

termica riferiti al 2019/2021 presenti all'interno della normativa per l'edificio di riferimento.

Tali valori sono correlati alla zona climatica in cui l'edificio risulta collocato e di conseguenza è stato necessario creare un modello per ognuna delle tre città analizzate.

Per tale motivo, all'interno del presente capitolo, è stato inserito un paragrafo per ognuna delle tre città dove sono stati riportati i valori di riferimento di trasmittanza termica forniti dalla normativa, e quelli effettivamente utilizzati per la creazione del modello.

Nonostante le stratigrafie degli elementi architettonici siano molto differenti tra una città e l'altra, i criteri adottati per la ristrutturazione sono stati sempre gli stessi:

- 4. ottenimento di un valore di trasmittanza inferiore a quello previsto per l'edificio di riferimento;
- 5. posizionamento degli strati di isolamento volto a eliminare alcune tipologie di ponti termici;
- 6. inserimento dell'isolamento all'esterno, in modo da aumentare la capacità termica dell'edificio.

In aggiunta, il DM 26/06/2015, fornisce valori limite di trasmittanza termica periodica, fattore solare ed efficienze degli impianti che, non essendo funzione della zona climatica o del rapporto di forma, sono riportati al capitolo 3 per tutte le città e per entrambi i casi studio.

In ogni caso, ogni scelta progettuale adottata in questa fase, ha fatto riferimento a schede tecniche di materiali e impianti, di conseguenza, i dati utilizzati per le simulazioni, non sono gli stessi proposti dalla normativa, ma quest'ultimi sono stati considerati come valori limite, in modo da ottenere in ogni situazione effetti migliorativi rispetto all'edificio di riferimento.

I dati tecnici riferiti alle chiusure trasparenti sono stati ricavati assemblando diversi componenti degli infissi attraverso il sito "Glass Configurator", che ha permesso di

comporre le chiusure, scegliendo tra varie tipologie di vetri, intercapedini e trattamenti, in funzione delle quali è stato possibile ottenere la scheda tecnica.

Il calcolo del coefficiente di trasmissione termica globale e dell'area solare estiva è stato eseguito anche per l'edificio dopo l'intervento di ristrutturazione ma, a differenza del caso precedente, è stato necessario verificare che i valori rispettassero quelli limiti imposti dal  $DM\ 26/06/2015$ .

Nei paragrafi successivi sono stati riportati i calcoli dei parametri appena descritti per ognuna delle tre città e inoltre, essendo i tre modelli caratterizzati da diversi spessori dell'isolante, è stato necessario valutare i ponti termici per tutti e tre i casi, come messo in evidenza successivamente.

La valutazione dei ponti termici si è inoltre differenziata dal modello iniziale, non solo perché sono state cambiate le stratigrafie, ma anche perché è stato scelto di prendere in considerazioni diverse tipologie di ponte termico: alcuni ponti termici, avendo isolato l'edificio dall'esterno, sono stati eliminati e altri, avendo isolato parti dell'edificio dove inizialmente non c'era alcun tipo di isolamento, sono stati valutati solo in questo secondo caso.

Tutti i dati di input utilizzati per modellare l'edificio dopo la ristrutturazione saranno riportati nei successivi paragrafi, ad eccezione dei dati sull'occupazione e la ventilazione, rimasti invariati rispetto al caso precedentemente analizzato.

A differenza del caso precedente, per l'edificio nZEB, sono state effettuate delle considerazioni aggiuntive su impianti di riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione, riportate dettagliatamente nei paragrafi successivi.

## 9.4.1 Apporti interni e illuminazione

### 9.4.1.1 Apporti interni

L'intervento di ristrutturazione, per il caso studio degli uffici, oltre che interessare involucro e impianto di riscaldamento e raffrescamento, ha riguardato anche l'impianto di illuminazione.

I dati di input sull'illuminazione influiscono principalmente su due fattori: apporti interni e consumi elettrici.

Nel caso dello stato di fatto, gli unici risultati desiderati sono stati i fabbisogni per il riscaldamento e il raffrescamento, di conseguenza, i dati sull'illuminazione, sono stati inseriti soltanto come apporti interni, in quanto l'analisi non è stata finalizzata a trovare i consumi elettrici.

La tabella riportata al 9.3.4 (Apporti interni) per lo stato di fatto, contiene dei valori di apporti interni in W/m<sup>2</sup>, inseriti all'interno della scheda "Attività", che tengono conto dei contributi sia di illuminazione che di apparecchiature.

Nel caso del modello post ristrutturazione, essendo un'analisi più approfondita, finalizzata a trovare anche i consumi elettrici, è stato necessario modellare l'illuminazione in modo da avere come output sia apporti interni che consumi elettrici.

Di conseguenza è stato necessario depurare i dati della tabella riportata al 7.3.4, inserendo nel campo degli apporti interni, solamente la quota dovuta alle apparecchiature; di seguito sono stati riportati i nuovi dati inseriti come apporti interni.

Zona	Apporti per persona	Apporti per apparecchiature	
	[W/pers.]	$[\mathrm{W/m^2}]$	
Hall e uffici open space	118	15	
Uffici singoli	118	15	
Corridoi	118	-	
Bagni	118	-	

Tabella 9-25: Valori degli apporti interni dopo l'intervento di ristrutturazione

### 9.4.1.2 Illuminazione

Dopo aver corretto i dati relativi agli apporti interni è stato possibile modellare l'illuminazione a seguito di una fase di progettazione.

Gli apparecchi illuminanti scelti sono dei Tuboled ad alta efficienza, atti a garanti un elevato risparmio energetico.

Per la progettazione illuminotecnica è stato scelto di utilizzare il metodo del fattore di utilizzazione che definisce il flusso utile come:

$$\theta = \frac{E \cdot S}{M \cdot F_u}$$

Dove:

-  $\theta$ : flusso utile [W/m2]

- E: illuminamento [lux]

- S: superficie da illuminare [m2]

- M: fattore di invecchiamento [-]

- Fu: coefficiente di utilizzazione del flusso [-]

L'illuminamento minimo da garantire all'interno dei locali è classificato nella UNI EN 12464-1:2011 in funzione della destinazione d'uso della zona.

Il fattore di invecchiamento M dipende dalla frequenza degli interventi di manutenzione e di pulizia degli apparecchi illuminanti, che a loro volta, sono funzione della destinazione d'uso dell'edificio: gli uffici sono considerati luoghi puliti in cui gli interventi di manutenzione sono frequenti e di conseguenza è stato scelto un valore di 0.8 (valore utilizzato tipicamente per gli uffici).

Il fattore di utilizzazione è stato definito utilizzando tabelle fornite dal produttore ed è servito per quantificare la luce che arriva effettivamente alla superficie considerata e dipende da:

- 1. fattore di riflessioni di pareti e soffitto;
- 2. dimensioni del locale;

## 3. tipologia di apparecchiatura installata.

Nel caso in esame il fattore di riflessione ha fatto riferimento a pareti e soffitti intonacati di bianco; per le dimensioni del locale sono state considerate quelle effettive ma, per gli uffici, è stata considerata l'altezza tra la lampada e il piano di lavoro; in fine, come tipologia di apparecchio, ne è stato considerato uno applicato direttamente al soffitto e senza nessun sistema di schermatura.

Successivamente, prendendo in considerazione la resa e la potenza nominale della lampada scelta, rispettivamente di 140 lm/W e 20 W, è stato possibile utilizzare il flusso utile per ricavare il numero di dispositivi da inserire in ogni stanza.

Nelle tabelle successive sono stati riportati i calcoli effettuati per alcune tipologie stanze.<sup>6</sup>

Locale	A	E	Fu	M	Flusso luminoso	N dispositivi
	$\mathrm{m}^2$	lux	-	-	lm	
Ufficio singolo	20.06	500	0.40	0.8	31344	12
Ufficio doppio	41.18	500	0.42	0.8	61280	22
Scale A	32.40	100	0.37	0.8	10946	4
Scala B	25.20	100	0.37	0.8	8514	4
Scala C	38.00	100	0.37	0.8	12838	5
Bagno	30.00	100	0.37	0.8	10135	4
Hall e Open space	320.00	500	0.57	0.8	350877	126
Corridoio piano 0	60.10	100	0.37	0.8	20304	8
Corridoio piano 1 (A)	39.40	100	0.26	0.8	18942	7
Corridoio piano 1 (B)	49.10	100	0.32	0.8	19180	7

Tabella 9-26: Calcolo del numero di dispositivi luminosi

Potenza installata	Superficie	Densità di potenza	
W	$\mathrm{m}^2$	$ m W/m^2$	
53400	5701	9.37	

Tabella 9-27: Densità di potenza installata per l'illuminazione

I risultati ottenuti trovati come descritto in precedenza sono stati inseriti all'interno di

-

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> I calcoli sono stati effettuati basandosi sulle stanze tipo, che si ripetono nei sette piani sia per dimensioni che caratteristiche.

Design Builder nella scheda "Illuminazione", a seconda della destinazione d'uso della zona.

### 9.4.2 Milano

## 9.4.2.1 Descrizione dei componenti edili

Le seguenti tabelle mostrano i valori di trasmittanza termica dell'edificio di riferimento per la zona climatica E, e i parametri caratterizzanti l'involucro dopo l'intervento di ristrutturazione.

Elemento	U edificio di riferimento
	$(\mathrm{W/m2K})$
Chiusure opache verticali	0.26
Copertura	0.22
Strutture opache orizzontali verso ambienti non climatizzati	0.26
Chiusure trasparenti	1.40

Tabella 9-28: Valori di trasmittanza termica dell'edificio di riferimento per la zona climatica E

Gli interventi apportati sugli elementi opachi verticali hanno riguardato esclusivamente le pareti a contatto con l'esterno e, come anticipato precedentemente, è stato scelto di intervenire su di essi applicando un adeguato strato di isolante verso l'esterno.

Esclusivamente per la parete M3, è stato scelto di aumentare anche lo spessore dello strato massivo, in quando presentava un valore di trasmittanza termica periodica inferiore a 0.10 W/m<sup>2</sup>K.

Codice	Descrizione	s	U	m	$Y_{\mathrm{ie}}$
		[cm]	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{kg/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
M1	Parete esterna in cls	26.8	0.245	398	0.041
M2	Parete esterna in mattoni	31.0	0.252	166	0.034
М3	Parete esterna tipo spandrel	22.0	0.239	162	0,045
M4	Partizione verticale	8.0	0.685	31	0.674
M5	Parete esterna in mattoni con rivestimento in vetro	31.7	0.252	162	0.036
M6	Parete esterna in cls con rivestimneto in vetro	25.4	0.248	393	0.013
M7	Pilastri in cls interni	28.0	2.12	616	0.433
M8	Porta REI	6.0	0.617	25	0.601

Tabella 9-29: Caratteristiche dei componenti opachi verticali

Gli interventi apportati agli elementi orizzontali hanno riguardato la copertura e il solaio a contatto con il piano interrato: in entrambi i casi è stato inserito uno strato di isolante, assente nel caso precedente.

Codice	Descrizione	$\mathbf{s}$	U	m	Yie
		[cm]	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{kg/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
P1	Solaio interpiano	29.2	1.411	538	0.270
P2	Solaio interpiano su interrato	41.2	0.242	542	0.020
Р3	Solaio controterra	44.5	1.410	805	0.110
S1	Solaio di copertura	49.5	0.216	442	0.037

 $Tabella\ 9\text{-}30:\ Caratteristiche\ dei\ componenti\ opachi\ orizzontali$ 

Le porte vetrate W01 e W02 sono state sostituite da infissi con triplo vetro (intercapedine d'Argon), a controllo solare, e con trattamento basso-emissivo; le finestre W03, W04 e W05 presentano le stesse caratteristiche delle porte, ma un doppio vetro anziché un triplo.

Codice	${f A}_{ m g}$	$ m A_f$	$A_{\mathrm{w}}$	$ m U_g$	$\mathrm{U_{f}}$	1	ψ	$U_{\mathrm{w}}$
	$[m^2]$	$[m^2]$	$[m^2]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	[m]	$[\mathrm{W/mK}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
W01	2.020	1.220	3.24	0.50	2.00	13.60	0.08	1.401
W02	3.340	1.520	4.86	0.50	2.00	17.20	0.08	1.252
W03	1.030	0.170	1.20	1.00	2.00	4.08	0.06	1.346
W04	1.590	0.210	1.80	1.00	2.00	5.08	0.06	1.286
W05	1.022	0.178	1.20	1.00	2.00	4.28	0.06	1.362

Tabella 9-31: Caratteristiche dei componenti trasparenti

Codice	$g_{\rm gl,n}$	$\tau_{\rm v}$
	[-]	[-]
W01	0.20	0.23
W02	0.20	0.23
W03	0.26	0.30
W04	0.26	0.30
W05	0.26	0.30

Tabella 9-32: Parametri solari dei componenti trasparenti

# 9.4.2.2 Verifica di $H'_T e A_{sol,est}$

## Verifica di H'<sub>T</sub>

Le considerazioni effettuate per il calcolo dell' $H^{I}_{T}$  sono descritte nel 9.3.2 e sono valide per tutte e tre le città, di seguito sono state riportate esclusivamente delle tabelle che riassumono i calcoli effettuati per la città di Milano.

Codice	Codice atlante	Ponte termico	$\Psi$ Atlante	$\Psi$ Corretto
			$[\mathrm{W/mK}]$	$[\mathrm{W/mK}]$
M1-P2	GF13a	Giunto tra M1 e P2	0.24	-
M2-P2	GF13a	Giunto tra M2 e P2	-0.03	-
M3-P2	GF13a	Giunto tra M3 e P2	0.25	0.15
M6-S1	R1	Giunto tra M6 e S1	0.53	-
M3-S1	R1	Giunto tra M3 e S1	0.52	-
M5-S1	R1	Giunto tra M5 e S1	0.48	-
M2-M2	C1	Giunto tra M2 e M2	-0.09	-
M2-M5/M3	C1	Giunto tra M2/M5 e M3	-0.1	-0.06
M1-M1	C1	Giunto tra M1 e M1	-0.07	-0.06
M3-M3	C1	Giunto tra M3 e M3	-0.09	-
M1-T	W7	Serramenti in M1	0.45	-
M2-T	W7	Serramenti in M2	0.15	-
М3-Т	W7	Serramenti in M3	0.16	0.11

Tabella 9-33: Valori di trasmittanza termica lineare dei ponti termici

Modello	$\mathrm{H}_{\mathrm{d}}$	$\mathrm{H_{u}}$	${ m H_{tr}}$	S/V	H' <sub>T</sub>	$\mathrm{H'_{T,lim}}$
	[W/K]	[W/K]	[W/K]	$[m^{-1}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
Stato di fatto	7527	760	8287	0.35	1.63	0.80
Post ristrutturazione	2559	1113	3672	0.35	0.65	0.80

Tabella 9-34: Verifica del coefficiente medio globale di scambio termico in assenza di ponti termici

Nella precedente tabella sono state messe in evidenza:

- 1. le differenze tra i valori di H<sup>I</sup>t tra lo stato di fatto e l'edificio post ristrutturazione;
- 2. il rispetto del valore di  $H^{I}$ t limite imposto dal DM 26/06/2015 per l'edificio sottoposto a ristrutturazione importante di primo livello.

## Verifica di Asol, est

Nella seguente tabella è stato riportato il calcolo dell'area solare estiva e l'esito della verifica secondo quanto indicato nel  $DM\ 26/06/2015$ .

Esposizione	$A_{\mathrm{w,p}}$	$ m A_{g}$	$I_{\rm sol,media\ Luglio}$	$I_{sol,h,media\ annua,\ Roma}$	$A_{\rm sol,est}/A_{\rm sup,utile}$	Area solare specifica limite	Esito
	$[\mathrm{m}^2]$	$[m^2]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	[-]	[-]	
Nord	528.12	463.52	109.03	180.36			
Sud	680.40	601.02	123.84	180.36	0.02		Verificata
Est	24.48	19.71	175.46	180.36	0.02	0.04	
Ovest	21.24	17.69	175.46	180.36			

Tabella 9-35: Verifica dell'area solare equivalente estiva per la città di Milano

Come si può notare dalla tabella, con la sostituzione degli infissi, l' $A_{\text{sol,est}}$  si è ridotto da 0.11 a 0.02.

### 9.4.2.3 Fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento

Le ipotesi alla base del calcolo dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento sono le stesse descritte nel paragrafo 9.3.6<sup>7</sup> per l'edificio allo stato di fatto.

Successivamente sono stati riportati i valori ottenuti e, con il fine di facilitare un confronto tra l'edificio prima e dopo la ristrutturazione, è stato nuovamente riportato il grafico dei fabbisogni del fabbricato allo stato di fatto per la città di Milano

Mesi	Fabbisogno di	Fabbisogno specifico di	Fabbisogno di	Fabbisogno specifico di
Mesi	riscaldamento	riscaldamento	${\it raffrescamento}$	${\it raffrescamento}$
	[kWh]	$[{ m kWh/m^2}]$	[kWh]	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Gennaio	25414	5.05	0	0.00
Febbraio	12697	2.52	-1	0.00
Marzo	5005	0.99	-90	-0.02
Aprile	1901	0.38	-632	-0.13
Maggio	3	0.00	-8451	-1.68
Giugno	0	0.00	-19330	-3.84
Luglio	0	0.00	-24306	-4.83
Agosto	0	0.00	-25011	-4.97
Settembre	0	0.00	-12270	-2.44

<sup>7</sup> Per il calcolo è stato utilizzato l'Object di Energy Plus "ZoneHVAC: IdealLoadsAirSystem", l'impianto ideale non ha limiti di capacità o di portata, l'impianto di climatizzazione è attivo tutto l'anno 24 ore al giorno e si basa esclusivamente sulle temperature di setpoint da mantenere all'interno delle zone.

176

Ottobre	1039	0.21	-2186	-0.43
Novembre	12631	2.51	-7	0.00
Dicembre	27852	5.53	0	0.00

 $Tabella\ 9\text{-}36:\ Fabbisogno\ termico\ specifico\ mensile\ di\ riscaldamento\ e\ di\ raffrescamento\ post\ ristrutturazione$ 

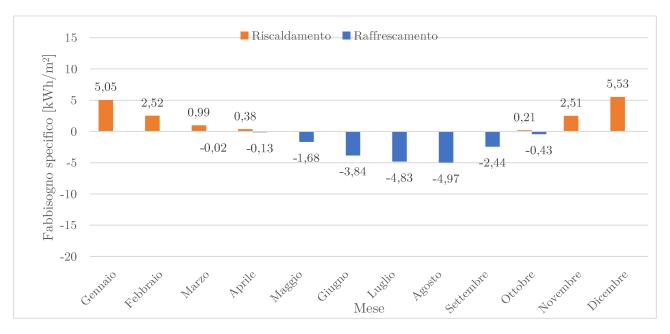


Grafico 9-10: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento post ristrutturazione

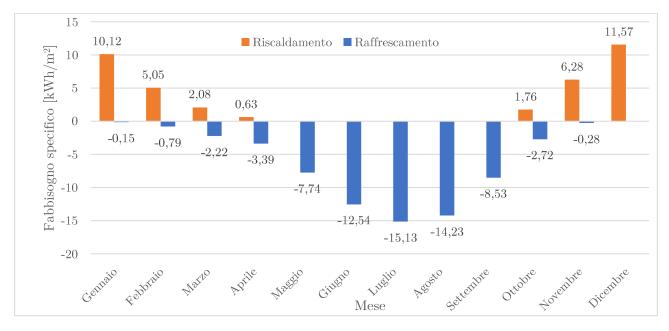


Grafico 9-11: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento allo stato di fatto

### 9.4.3 Roma

# 9.4.3.1 Descrizione dei componenti edili

Le seguenti tabelle mostrano i valori di trasmittanza termica dell'edificio di riferimento per la zona climatica D, e i parametri caratterizzanti l'involucro dopo l'intervento di ristrutturazione.

Elemento	U edificio di riferimento
	$(\mathrm{W/m2K})$
Chiusure opache verticali	0.29
Copertura	0.26
Strutture opache orizzontali verso ambienti non climatizzati	0.29
Chiusure trasparenti	1.80

Tabella 9-37: Valori di trasmittanza termica dell'edificio di riferimento per la zona climatica D

Gli interventi apportati sugli elementi opachi verticali hanno riguardato esclusivamente le pareti a contatto con l'esterno e, come anticipato precedentemente, è stato scelto di intervenire su di essi applicando un adeguato strato di isolante verso l'esterno.

Esclusivamente per la parete M3, è stato scelto di aumentare anche lo spessore dello strato massivo, in quando presentava un valore di trasmittanza termica periodica inferiore a 0.10 W/m<sup>2</sup>K.

Codice	Descrizione	$\mathbf{s}$	U	m	$Y_{\mathrm{ie}}$
		[cm]	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{kg/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
M1	Parete esterna in cls	25.8	0.285	398	0.049
M2	Parete esterna in mattoni	30.0	0.277	165	0.04
M3	Parete esterna tipo spandrel	21.0	0.277	161	0.055
M4	Partizione verticale	8.0	0.685	31	0.674
M5	Parete esterna in mattoni con rivestimento in vetro	30.7	0.277	161	0.042
M6	Parete esterna in cls con rivestimneto in vetro	24.4	0.289	393	0.016
M7	Pilastri in cls interni	28.0	2.12	616	0.433
M8	Porta REI	6.0	0.617	25	0.601

Tabella 9-38: Caratteristiche dei componenti opachi verticali

Gli interventi apportati agli elementi orizzontali hanno riguardato la copertura e il solaio a contatto con il piano interrato: in entrambi i casi è stato inserito uno strato di isolante, assente nel caso precedente.

Codice	Descrizione	s	U	m	$Y_{ie}$
		[cm]	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{kg/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
P1	Solaio interpiano	29.2	1.411	538	0.270
P2	Solaio interpiano su interrato	41.2	0.283	542	0.023
Р3	Solaio controterra	44.5	1.410	805	0.110
S1	Solaio di copertura	49.5	0.247	442	0.043

Tabella 9-39: Caratteristiche dei componenti opachi orizzontali

Le porte vetrate W01 e W02 sono state sostituite da infissi con triplo vetro (intercapedine d'Argon) a controllo solare e con trattamento basso-emissivo; le finestre W03, W04 e W05 presentano le stesse caratteristiche delle porte, ma un doppio vetro anziché un triplo.

Codice	$A_{ m g}$	$A_{\mathrm{f}}$	$A_{\rm w}$	$ m U_{g}$	$\mathrm{U_f}$	1	ψ	$U_{\mathrm{w}}$
	$[m^2]$	$[m^2]$	$[m^2]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	[m]	[W/mK]	$[\mathrm{W/m^2K}]$
W01	2.020	1.220	3.24	1.10	2.00	13.60	0.08	1.775
W02	3.340	1.520	4.86	1.10	2.00	17.20	0.08	1.665
W03	1.030	0.170	1.20	1.00	2.00	4.08	0.06	1.346
W04	1.590	0.210	1.80	1.00	2.00	5.08	0.06	1.286
W05	1.022	0.178	1.20	1.00	2.00	4.28	0.06	1.362

 $Tabella\ 9\hbox{-}40:\ Caratteristiche\ dei\ componenti\ trasparenti$ 

Codice	$g_{\rm gl,n}$	$\tau_{\rm v}$
	[-]	[-]
W01	0.26	0.30
W02	0.26	0.30
W03	0.15	$0,\!24$
W04	0.15	$0,\!25$
W05	0.15	0,26

Tabella 9-41: Parametri solari dei componenti trasparenti

## 9.4.3.2 Verifica di H'<sub>T</sub> e Asol, est

### Verifica di H'<sub>T</sub>

Le considerazioni effettuate per il calcolo dell'H<sup>I</sup>t sono descritte nel 9.3.2 e sono valide per tutte e tre le città, di seguito sono state riportate esclusivamente delle tabelle che riassumono i calcoli effettuati per la città di Roma.

Codice	Codice atlante	Ponte termico	Ψ Atlante	Ψ Corretto
			$[\mathrm{W/mK}]$	[W/mK]
M1-P2	GF13a	Giunto tra M1 e P2	0.25	-
M2-P2	GF13a	Giunto tra M2 e P2	-0.04	-
M3-P2	GF13a	Giunto tra M3 e P2	0.28	-0.16
M6-S1	R1	Giunto tra M 6 e S1 $$	0.53	-
M3-S1	R1	Giunto tra M3 e S1	0.52	-
M5-S1	R1	Giunto tra M5 e S1	0.48	-
M2-M2	C1	Giunto tra M2 e M2	-0.1	-
M2-M5/M3	C1	Giunto tra $M2/M5$ e $M3$	-0.1	-0.06
M1-M1	C1	Giunto tra M1 e M1	-0.08	-0.06
M3-M3	C1	Giunto tra M3 e M3	-0.09	-
M1-T	W7	Serramenti in M1	0.43	-
M2-T	W7	Serramenti in M2	0.14	-
М3-Т	W7	Serramenti in M3	0.15	0.1

Tabella 9-42: Valori di trasmittanza termica lineare dei ponti termici

Modello	$H_{ m d}$ $H_{ m u}$ I		${ m H_{tr}}$	S/V	$\mathrm{H'_{T}}$	$\mathrm{H'}_{\mathrm{T,lim}}$
	[W/K]	[W/K]	[W/K]	$[m^{-1}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
Stato di fatto	7527	760	8287	0.35	1.63	0.80
Post ristrutturazione	2729	1143	3872	0.35	0.69	0.80

Tabella 9-43: Verifica del coefficiente medio globale di scambio termico in assenza di ponti termici

Nella precedente tabella sono state messe in evidenza:

- 1. le differenze tra i valori di H<sup>I</sup><sub>T</sub> tra lo stato di fatto e l'edificio post ristrutturazione;
- 2. il rispetto del valore di  $H^{I}_{T}$  limite imposto dal DM 26/06/2015 per l'edificio sottoposto a ristrutturazione importante di primo livello.

## Verifica di Asol, est

Nella seguente tabella è stato riportato il calcolo dell'area solare estiva e l'esito della verifica secondo quanto indicato nel DM 26/06/2015.

Esposizione	$A_{\mathrm{w,p}}$	$ m A_{g}$	$I_{\rm sol,media\ Luglio}$	$I_{sol,h,media\ annua,\ Roma}$	$A_{\rm sol,est}/A_{\rm sup,utile}$	Area solare specifica limite	Esito
	$[m^2]$	$[m^2]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	[-]	[-]	
Nord	528.12	463.52	109.03	180.36			
Sud	680.40	601.02	132.87	180.36	0.02		Verificata
Est	24.48	19.71	209.95	180.36	0.02	0.04	
Ovest	21.24	17.69	209.95	180.36			

Tabella 9-44: Verifica dell'area solare equivalente estiva per la città di Milano

Come si può notare dalla tabella con la sostituzione degli infissi l' $A_{sol,est}$  si è ridotto da 0.11 a 0.02.

### 9.4.3.3 Fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento

Le ipotesi alla base del calcolo dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento sono le stesse descritte nel paragrafo 9.3.68 per l'edificio allo stato di fatto.

Successivamente sono stati riportati i valori ottenuti e, con il fine di facilitare un confronto tra l'edificio prima e dopo la ristrutturazione, è stato nuovamente riportato il grafico dei fabbisogni del fabbricato allo stato di fatto per la città di Roma.

2000	Fabbisogno di	Fabbisogno specifico di	Fabbisogno di	Fabbisogno specifico di
mese	riscaldamento	riscaldamento	raffrescamento	raffrescamento
	[kWh]	$[{ m kWh/m^2}]$	[kWh]	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Gennaio	13845	2.75	0	0.00
Febbraio	7437	1.48	-16	0.00
Marzo	4791	0.95	-186	-0.04
Aprile	113	0.02	-2547	-0.51
Maggio	0	0.00	-9552	-1.90
Giugno	0	0.00	-19948	-3.96
Luglio	0	0.00	-31170	-6.19
Agosto	0	0.00	-33905	-6.74
Settembre	0	0.00	-17903	-3.56

<sup>8</sup> Per il calcolo è stato utilizzato l'Object di Energy Plus "ZoneHVAC: IdealLoadsAirSystem", l'impianto ideale non ha limiti di capacità o di portata, l'impianto di climatizzazione è attivo tutto l'anno 24 ore al giorno e si basa esclusivamente sulle temperature di setpoint da mantenere all'interno delle zone.

181

Ottobre	0	0.00	-7203	-1.43
Novembre	1976	0.39	-1286	-0.26
Dicembre	10242	2.04	-4	0.00

 $Tabella\ 9\text{-}45:\ Fabbisogno\ termico\ specifico\ mensile\ di\ riscaldamento\ e\ di\ raffrescamento\ post\ ristrutturazione$ 

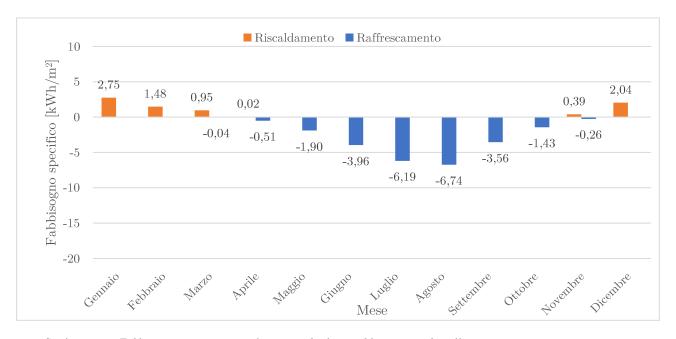
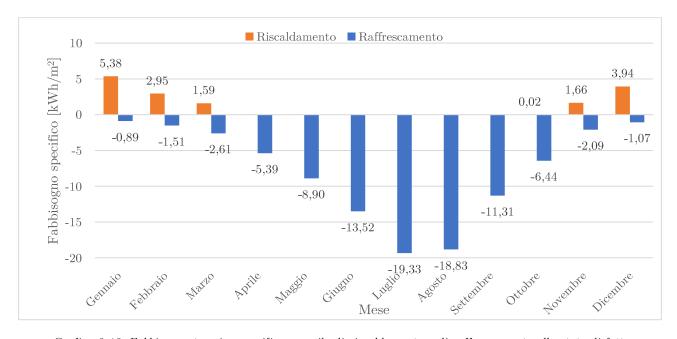


Grafico 9-12: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento post ristrutturazione



 $Grafico\ 9\text{-}13:\ Fabbisogno\ termico\ specifico\ mensile\ di\ riscaldamento\ e\ di\ raffrescamento\ allo\ stato\ di\ fatto$ 

### 9.4.4 Palermo

## 9.4.4.1 Descrizione dei componenti edili

Le seguenti tabelle mostrano i valori di trasmittanza termica dell'edificio di riferimento per la zona climatica B, e i parametri caratterizzanti l'involucro dopo l'intervento di ristrutturazione.

Elemento	U edificio di riferimento		
	$(\mathrm{W/m2K})$		
Chiusure opache verticali	0.43		
Copertura	0.35		
Strutture opache orizzontali verso ambienti non climatizzati	0.43		
Chiusure trasparenti	3		

Tabella 9-46: Valori di trasmittanza termica dell'edificio di riferimento per la zona climatica B

Gli interventi apportati sugli elementi opachi verticali hanno riguardato esclusivamente le pareti a contatto con l'esterno e, come anticipato precedentemente, è stato scelto di intervenire su di essi applicando un adeguato strato di isolante verso l'esterno.

Esclusivamente per la parete M3, è stato scelto di aumentare anche lo spessore dello strato massivo, in quando presentava un valore di trasmittanza termica periodica inferiore a 0.10 W/m<sup>2</sup>K.

Codice	Descrizione	$\mathbf{s}$	U	m	$Y_{\mathrm{ie}}$
		[cm]	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{kg/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
M1	Parete esterna in cls	22.8	0.411	397	0.075
M2	Parete esterna in mattoni	28.0	0.346	165	0.058
M3	Parete esterna tipo spandrel	18.0	0.395	160	0.091
M4	Partizione verticale	8.0	0.685	31	0.674
M5	Parete esterna in mattoni con rivestimento in vetro	27.7	0.393	160	0.078
M6	Parete esterna in cls con rivestimneto in vetro	21.4	0.419	392	0.028
M7	Pilastri in cls interni	28.0	2.12	616	0.433
M8	Porta REI	6.0	0.617	25	0.601

Tabella 9-47: Caratteristiche dei componenti opachi verticali

Gli interventi apportati agli elementi orizzontali hanno riguardato la copertura e il solaio a contatto con il piano interrato: in entrambi i casi è stato inserito uno strato di isolante, assente nel caso precedente.

Codice	Descrizione	s	U	m	$Y_{ie}$
		[cm]	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{kg/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
P1	Solaio interpiano	29.2	1.411	538	0.270
P2	Solaio interpiano su interrato	41.2	0.420	542	0.038
Р3	Solaio controterra	44.5	1.410	805	0.110
S1	Solaio di copertura	49.5	0.345	442	0.063

Tabella 9-48: Caratteristiche dei componenti opachi orizzontali

Le porte vetrate W01 e W02 sono state sostituite da infissi con triplo vetro (intercapedine d'Argon) a controllo solare e con trattamento basso-emissivo; le finestre W03, W04 e W05 presentano le stesse caratteristiche delle porte, ma un doppio vetro anziché un triplo.

Codice	$A_{ m g}$	$A_{\mathrm{f}}$	$A_{\rm w}$	$ m U_{g}$	$\mathrm{U_{f}}$	1	ψ	$U_{\mathrm{w}}$
	$[m^2]$	$[m^2]$	$[m^2]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	[m]	[W/mK]	$[\mathrm{W/m^2K}]$
W01	2.020	1.220	3.24	1.50	2.00	13.60	0.08	2.024
W02	3.340	1.520	4.86	1.50	2.00	17.20	0.08	1.940
W03	1.030	0.170	1.20	1.00	2.00	4.08	0.06	1.346
W04	1.590	0.210	1.80	1.00	2.00	5.08	0.06	1.286
W05	1.022	0.178	1.20	1.00	2.00	4.28	0.06	1.362

Tabella 9-49: Caratteristiche dei componenti trasparenti

Codice	$g_{\rm gl,n}$	$\tau_{\rm v}$
	[-]	[-]
W01	0.27	0.30
W02	0.27	0.30
W03	0.15	$0,\!24$
W04	0.15	$0,\!25$
W05	0.15	0,26

Tabella 9-50: Parametri solari dei componenti trasparenti

## 9.4.4.2 Verifica di H'<sub>T</sub> e Asol, est

### Verifica di H'<sub>T</sub>

Le considerazioni effettuate per il calcolo dell' $H^{I}_{T}$  sono descritte nel 9.3.2 e sono valide per tutte e tre le città, di seguito sono state riportate esclusivamente delle tabelle che riassumono i calcoli effettuati per la città di Palermo.

Codice	Codice atlante	Ponte termico	Ψ Atlante	Ψ Corretto
			$[\mathrm{W/mK}]$	[W/mK]
M1-P2	GF13a	Giunto tra M1 e P2	0.23	-
M2-P2	GF13a	Giunto tra M2 e P2	-0.08	-
M3-P2	GF13a	Giunto tra M3 e P2	0.4	-0.07
M6-S1	R1	Giunto tra M6 e S1	0.5	-
M3-S1	R1	Giunto tra M3 e S1	0.5	-
M5-S1	R1	Giunto tra M5 e S1	0.46	-
M2-M2	C1	Giunto tra M2 e M2	-0.12	-
M2-M5/M3	C1	Giunto tra $M2/M5$ e $M3$	-0.13	-0.07
M1-M1	C1	Giunto tra M1 e M1	-0.09	-0.06
M3-M3	C1	Giunto tra M3 e M3	-0.12	-
M1-T	W7	Serramenti in M1	0.41	-
M2-T	W7	Serramenti in M2	0.13	-
М3-Т	W7	Serramenti in M3	0.12	0.08

Tabella 9-51: Valori di trasmittanza termica lineare dei ponti termici

Modello	$\mathrm{H}_{\mathrm{d}}$	$\mathrm{H_{u}}$	${ m H_{tr}}$	S/V	$\mathrm{H'_{T}}$	$\mathrm{H'}_{\mathrm{T,lim}}$
	[W/K]	[W/K]	[W/K]	$[m^{-1}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$	$[\mathrm{W/m^2K}]$
Stato di fatto	7527	760	8287	0.35	1.63	0.75
Post ristrutturazione	2929	1229	4159	0.35	0.74	0.75

Tabella 9-52: Verifica del coefficiente medio globale di scambio termico in assenza di ponti termici

Nella precedente tabella sono state messe in evidenza:

- 1. le differenze tra i valori di H<sup>I</sup><sub>T</sub> tra lo stato di fatto e l'edificio post ristrutturazione;
- 2. il rispetto del valore di  $H^{I}_{T}$  limite imposto dal DM 26/06/2015 per l'edificio sottoposto a ristrutturazione importante di primo livello.

## Verifica di Asol, est

Nella seguente tabella è stato riportato il calcolo dell'area solare estiva e l'esito della verifica secondo quanto indicato nel DM 26/06/2015.

Esposizione	$A_{\mathrm{w,p}}$	$ m A_{g}$	$I_{\rm sol,media\ Luglio}$	$I_{sol,h,media\ annua,\ Roma}$	$A_{\rm sol,est}/A_{\rm sup,utile}$	Area solare specifica limite	Esito
	$[m^2]$	$[m^2]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	$[\mathrm{W/m^2}]$	[-]	[-]	
Nord	528.12	463.52	109.03	180.36			
Sud	680.40	601.02	112.62	180.36	0.02	0.04	T
Est	24.48	19.71	185.07	180.36	0.02	0.04	Verificata
Ovest	21.24	17.69	185.07	180.36			

Tabella 9-53: Verifica dell'area solare equivalente estiva per la città di Milano

Come si può notare dalla tabella con la sostituzione degli infissi l' $A_{sol,est}$  si è ridotto da 0.11 a 0.02.

### 9.4.4.3 Fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento

Le ipotesi alla base del calcolo dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento sono le stesse descritte nel paragrafo 9.3.69 per l'edificio allo stato di fatto.

Successivamente sono stati riportati i valori ottenuti e, con il fine di facilitare un confronto tra l'edificio prima e dopo la ristrutturazione, è stato nuovamente riportato il grafico dei fabbisogni del fabbricato allo stato di fatto per la città di Palermo.

maga	Fabbisogno di	Fabbisogno specifico di	Fabbisogno di	Fabbisogno specifico di
mese	riscaldamento	riscaldamento	raffrescamento	raffrescamento
	[kWh]	[kWh/m2]	[kWh]	[kWh/m2]
Gennaio	7364	1.46	-174	-0.03
Febbraio	4491	0.89	-48	-0.01
Marzo	2278	0.45	-969	-0.19
Aprile	83	0.02	-2797	-0.56
Maggio	0	0.00	-11582	-2.30
Giugno	0	0.00	-21710	-4.31
Luglio	0	0.00	-31185	-6.20
Agosto	0	0.00	-33334	-6.62
Settembre	0	0.00	-21562	-4.28

<sup>9</sup> Per il calcolo è stato utilizzato l'Object di Energy Plus "ZoneHVAC: IdealLoadsAirSystem", l'impianto ideale non ha limiti di capacità o di portata, l'impianto di climatizzazione è attivo tutto l'anno 24 ore al giorno e si basa esclusivamente sulle temperature di setpoint da mantenere all'interno delle zone.

186

Ottobre	0	0.00	-13659	-2.71
Novembre	142	0.03	-4721	-0.94
Dicembre	2979	0.59	-439	-0.09

 $Tabella\ 9\text{-}54:\ Fabbisogno\ termico\ specifico\ mensile\ di\ riscaldamento\ e\ di\ raffrescamento\ post\ ristrutturazione$ 

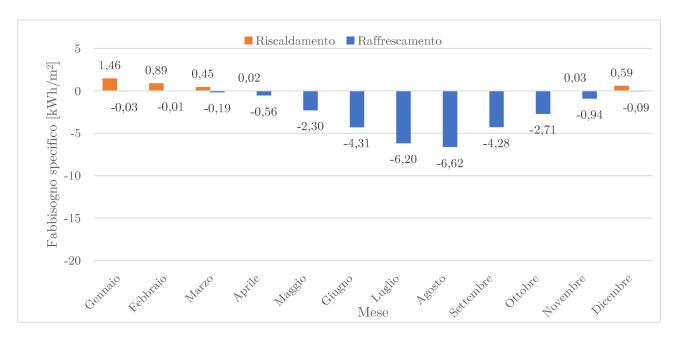


Grafico 9-14: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento post ristrutturazione

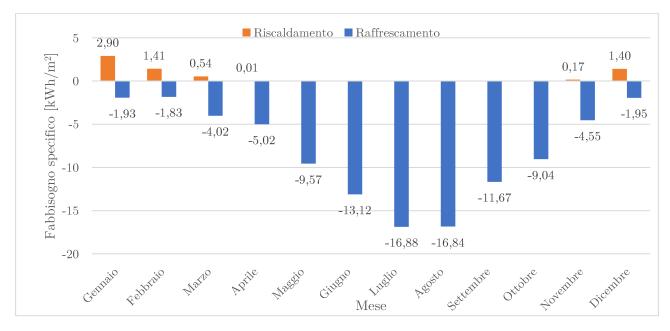


Grafico 9-15: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento allo stato di fatto

### 9.4.5 Confronti

Nel presente paragrafo sono stati riportati i fabbisogni annuali per la climatizzazione dell'edificio prima e dopo la ristrutturazione per Milano, Roma e Palermo.

	Fabbisogr	no annuale	Fabbisogno sp	ecifico annuale
Città	Riscaldamento	Raffrescamento	Riscaldamento	Raffrescamento
	[kWh]	[kWh]	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Milano	86542	-92284	17.20	-18.34
Roma	38403	-123721	7.63	-24.59
Palermo	17337	-142180	3.45	-28.26

Tabella 9-55: Fabbisogno termico annuale di riscaldamento e raffrescamento



 $Grafico\ 9\text{-}16:\ Confronto\ tra\ i\ fabbisogni\ termici\ specifici\ annuali\ di\ riscaldamento$ 

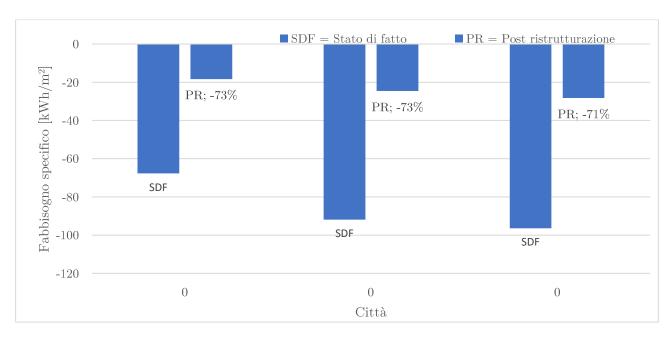


Grafico 9-17: Confronto tra i fabbisogni termici specifici annuali di riscaldamento

Come risulta evidente dai grafici sopra riportati, in seguito agli interventi di ristrutturazione, si è ottenuta un'elevata diminuzione dei carichi di riscaldamento in ogni città; in particolare a Milano, dove, infatti, i limiti sui parametri caratterizzanti l'involucro risultano più restrittivi: a Milano si ha una riduzione del 54%; a Roma del 51%, e a Palermo del 46%.

In generale, è stata ottenuta una notevole riduzione dei fabbisogni anche per quanto riguarda la climatizzazione estiva dell'edificio: in tutte le città si ha una riduzione di circa il 70%.

In questo secondo caso, risulta evidente come la riduzione dei fabbisogni è poco variabile tra una città e l'altra, infatti, a influenzare il carico di raffrescamento, sono soprattutto il fattore solare e di trasmissione luminosa, e la capacità termica interna che, tra una città e l'altra variano di ben poco.

# 9.5. Impianti

### 9.5.1 Impianto di riscaldamento e raffrescamento

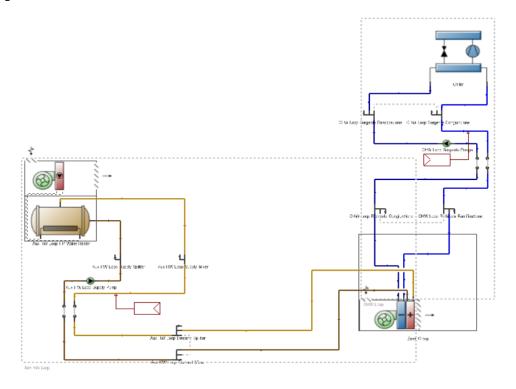


Figura 9-10: Schema idraulico dell'impianto

Come precedentemente introdotto nel capitolo dedicato agli impianti, il tipo di generatore selezionato per il riscaldamento e il raffrescamento è una pompa di calore elettrica aria-acqua.

A differenza del caso studio dell'edificio residenziale, per gli uffici, non è stata presa in considerazione la produzione d'acqua calda sanitaria tuttavia, Design Builder, non consente di modellare la pompa di calore senza collegarla a un serbatoio di accumulo.

Di conseguenza è stato modellato un serbatoio dal volume minimo e la pompa di calore è stata progettata per ognuna delle tre città affinché, nelle condizioni nominali di temperatura dell'aria esterna di 7°C, alimentasse dei ventilconvettori ad una temperatura dell'acqua di 45°C durante il periodo invernale.

Caratteristica	Unità di misura	Valore
Temperatura nominale a bulbo secco dell'aria in ingresso all'evaporatore	$^{\circ}\mathrm{C}$	7
Temperatura nominale a bulbo umido dell'aria in ingresso all'evaporatore	$^{\circ}\mathrm{C}$	6
Temperatura nominale dell'acqua in ingresso al condensatore	$^{\circ}\mathrm{C}$	47
Programmazione temperatura setpoint compressore	$^{\circ}\mathrm{C}$	55
Temperatura minima dell'aria in ingresso per il funzionamento del compressore	$^{\circ}\mathrm{C}$	-10
Temperatura di setpoint del serbatoio di accumulo	$^{\circ}\mathrm{C}$	45
Temperatura di mandata dell'acqua	$^{\circ}\mathrm{C}$	45
Temperatura di uscita dal circuito	$^{\circ}\mathrm{C}$	40
Differenza di temperatura del circuito	$^{\circ}\mathrm{C}$	5

Tabella 9-56: Temperature di funzionamento della pompa di calore

Il chiller è stato invece progettato affinché, nelle condizioni nominali di temperatura dell'aria esterna di 35°C, producesse acqua a 7°C, temperatura alla quale vengono alimentati i ventilconvettori nel periodo estivo.

Caratteristica	Unità di misura	Valore
Temperatura nominale dell'acqua refrigerata in uscita	$^{\circ}\mathrm{C}$	7
Temperatura nominale del fluido in ingresso al condensatore	$^{\circ}\mathrm{C}$	35
Temperatura di mandata dell'acqua	$^{\circ}\mathrm{C}$	7
Temperatura di uscita dal circuito	$^{\circ}\mathrm{C}$	7
Differenza di temperatura del circuito	$^{\circ}\mathrm{C}$	5

Tabella 9-57: Temperature di funzionamento del Chiller

I ventilconvettori sono quindi alimentati con acqua a 45°C con un ritorno a 40°C durante il periodo invernale, e a 7°C con un ritorno a 12°C durante quello estivo.

Tipo	Caratteristica	Unità di misura	Valore
D:ld	Temperatura dell'aria di mandata	$^{\circ}\mathrm{C}$	30
Riscaldamento	Temperatura dell'acqua in ingresso al ventilconvettore	$^{\circ}\mathrm{C}$	45
D . (()	Temperatura dell'aria di mandata	$^{\circ}\mathrm{C}$	19
Raffrescamento	Temperatura dell'acqua in ingresso al ventilconvettore	$^{\circ}\mathrm{C}$	7

Tabella 9-58: Temperature di funzionamento dei ventilconvettori

Il funzionamento della pompa di calore è stato stabilito associando all'impianto una scheda di programmazione che seguisse i periodi di accensione imposte dal  $D.P.R.\ 26/08/1993$ ,  $n.\ 412$  in funzione della zona climatica.

Città	Zona climatica	Periodo di accensione
Milano	E	15 ottobre - 15 aprile
Roma	D	1° novembre - 15 aprile
Palermo	В	1° dicembre - 31 marzo

Tabella 9-59: Periodo di accensione degli impianti di riscaldamento (D.P.R. 26/08/1993)

Inoltre, durante il periodo di accensione, la pompa di calore ha un funzionamento continuo nell'arco della giornata.

Il chiller ha un funzionamento continuo durante tutta la giornata nel periodo complementare a quello di riscaldamento previsto per la zona climatica considerata.

### 9.5.2 Impianto fotovoltaico

La potenza elettrica minima da garantire attraverso i pannelli fotovoltaici è stata stabilita, in accordo con il *D.Lgs. 3 marzo 2011, n. 28*, in funzione della superficie in pianta a livello del terreno e dell'anno di rilascio del titolo edilizio.

Caratteristica	Unità di misura	Valore
Superficie in pianta a livello del terreno	$\mathrm{m}^2$	903.8
Coefficiente K	$\mathrm{m^2/kW}$	50
Potenza elettrica obbligatoria	kW	18

Tabella 9-60: Calcolo potenza elettrica obbligatoria

Una volta stabilita la potenza minima da garantire, è stata scelta una scheda tecnica di pannelli fotovoltaici e, in funzione della loro potenza nominale, è stato possibile stabilire il numero di pannelli minimi da installare.

In aggiunta il *D.Lgs. 3 marzo 2011, n. 28*, impone che il 50 % dei consumi di riscaldamento e raffrescamento debba essere soddisfatto dall'impianto fotovoltaico, di conseguenza il numero di pannelli modellati non è stato quello minimo, ma per ogni città in esame è stata prevista la presenza di 12 stringhe da 20 moduli, metà dei quali orientati verso sudest e gli altri verso sud-ovest e inclinati di 25°.

Nell'immagine sottostante non sono visibili tutti i pannelli fotovoltaici installati in quanto è stato possibile modellarne solo due tipologie e dichiarare in seguito il numero di stringhe desiderate per ogni tipo: in questo caso una tipologia è la stringa orientata a sud-est l'atra è quella orientata a sud-ovest.

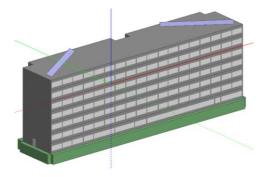


Figura 9-11: Modellazione dei pannelli fotovoltaici

Tali elementi sono stati modellati come descritto dettagliatamente nel capitolo apposito (Capitolo 5) tramite i dati estrapolati da scheda tecnica relativi ad un modulo fotovoltaico con celle solari policristalline, riferite alle condizioni nominali: intensità di irraggiamento pari a 1000 W/m² e temperatura della cella pari a 25°C.

Caratteristica	Unità di misura	Valore
Numero celle	-	60 (6x10)
Altezza celle	$_{ m mm}$	156
Larghezza celle	$_{ m mm}$	156
Area attiva	$ m mm^2$	1.46
Altezza pannello	$\mathrm{mm}$	1638

Larghezza pannello	mm	982
Spessore pannello	mm	40
Potenza nominale	W	245
Tensione nominale	V	30
Corrente nominale	A	7.17

Tabella 9-61: Dati tecnici dei pannelli fotovoltaici

### 9.5.3 Procedura di calcolo

Nel presente paragrafo verrà definita la procedura di calcolo che ha portato a definire gli indici di prestazione energetica globali dovuti al fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale ed estiva dei diversi modelli realizzati.

Infatti, l'indice di prestazione energetica globale dell'edificio è un parametro architettonico che esprime il consumo totale di energia primaria riferito all'unità di superficie utile. Nel caso in esame, tale indice è calcolato con la seguente somma:

$$E_{Pgl,tot} = E_{PH,tot} + E_{PC,tot} + E_{PL,tot}$$

Dove:

- E<sub>PH</sub> è l'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale [kWh/m<sup>2</sup>];
- E<sub>PC</sub> è l'indice di prestazione energetica per la climatizzazione estiva [kWh/m<sup>2</sup>];
- E<sub>PL</sub> è l'indice di prestazione energetica per l'illuminazione [kWh/m<sup>2</sup>];

Ognuno di questi indici viene calcolato tenendo conto sia del contributo di energia rinnovabile che non rinnovabile, con l'utilizzo dei fattori di conversione presenti nel capitolo 3 (Quadro normativo)

$$E_{Ptot} = E_{Pren} + E_{Pnren}$$

Tramite gli output disponibili su Energy Plus non è stato possibile ricavare ognuno di questi parametri distintamente, perciò di seguito verranno descritti i passaggi necessari al calcolo di tali indici.

Le pompe di calore ad aria, traggono gran parte della loro energia dalla fonte energetica aria, mentre la restante parte necessaria per il funzionamento del macchinario è l'elettricità.

Al fine di ricavare tali quote, è stato possibile ottenere tramite Energy Plus l'energia termica  $\mathbf{Q}_{\text{out}}$  prodotta rispettivamente dalla pompa di calore e dal chiller, tenendo conto delle efficienze dei sottosistemi di generazione e di utilizzo.

È stato quindi ricavato il valore di energia termica prodotta per il riscaldamento dalla pompa di calore, tramite l'output "Water Heater Use Side Heat Transfer Rate", e quella prodotta per il raffrescamento dal chiller tramite l'output "Chiller Evaporator Cooling Rate".

I contributi di energia termica prodotti da pompa di calore e dal chiller, sono stati poi depurati dell'efficienza dei sottosistemi di utilizzo pari a 0.81 e imposta dal DM 26/06/2015: è stata così ottenuta la componente relativa alla sola generazione, rispettivamente per la pompa di calore e per il chiller:

$$Q_{gen,out,heatpump} = \frac{Q_{out}}{0.81}$$

$$Q_{gen,out,chiller} = \frac{Q_{out}}{0.81}$$

È stato poi ricavato il contributo di energia elettrica in ingresso alla pompa di calore  $E_{el,heatpump}$  tramite gli output "Cooling Coil Water Heating Electric Power" e "Fan Electric Power", mentre per quanto riguarda l'energia elettrica in ingresso al chiller  $E_{el,chiller}$ , è stato utilizzato l'output "Chiller Electric Power".

In questo modo, è stato possibile ricavare la componente di energia estrapolata dall'aria esterna per entrambe le tipologie di impianto tramite la seguente equazione:

$$Q_{env} = Q_{gen,out} - E_{el}$$

Si è giunti quindi a una distinzione tra la quantità di energia utilizzata per la generazione proveniente da fonte rinnovabile Q<sub>env</sub> e la quantità di energia elettrica E<sub>el</sub>, comprensiva sia della quota di energia elettrica da rete, sia di quella prodotta da fotovoltaico.

Tramite l'output "Facility Total Produced Electric Power" è stato poi possibile ricavare l'energia elettrica totale prodotta dall'impianto fotovoltaico; successivamente è stato

possibile ricavarne la percentuale effettivamente utilizzata, considerando i consumi elettrici mensili ("Electricity consumptions for end uses").

Inoltre, è stato necessario suddividere l'energia prodotta da fotovoltaico tra i diversi servizi energetici: per ogni mese l'energia prodotta da fotovoltaico è stata suddivisa tra i servizi energetici di riscaldamento e raffrescamento proporzionalmente ai consumi, mentre l'elettricità per l'illuminazione, è stata coperta da fotovoltaico solo nei mesi in cui si è verificato un surplus.

In sintesi, per ogni mese e per ogni servizio energetico (riscaldamento, raffrescamento e illuminazione) è sato possibile ottenere il consumo elettrico totale, quello coperto dal fotovoltaico e quello coperto dalla rete elettrica.

A questo punto, è stato possibile calcolare la quota di energia primaria rinnovabile e non rinnovabile tramite gli opportuni fattori di conversione:

$$E_{p,nren} = E_{el} \cdot 1.95$$
 
$$E_{p,ren} = E_{el} \cdot 0.47 + Q_{env} \cdot 1 + E_{pV} \cdot 1$$

Infine, è stato calcolato il parametro RER "Renewable Energy Ratio":

$$RER = \frac{E_{Pren}}{E_{Ptot}}$$

### 9.5.4 Milano

### 9.5.4.1 Specifiche tecniche dell'impianto

A fronte di una richiesta di picco pari a 101.7 kW per il riscaldamento e di 178.3 kW per il raffrescamento è stata scelta da scheda tecnica una pompa di calore aria-acqua a ciclo invertibile che nelle condizioni nominali fosse in grado di soddisfare tali richieste.

In particolare, durante il periodo invernale, la pompa di calore selezionata, nelle condizioni nominali "aria 7°C e acqua 45°C" fornirà una potenza pari a 215.0 kW con una COP di 3.06. Il valore di COP è stato ridotto a 2.48 per tenere conto dell'efficienza di 0.81 dei sottosistemi di utilizzo imposta dal DM 26/06/2015.

Durante il periodo estivo, invece, la stessa pompa di calore, nelle condizioni nominali "aria  $35^{\circ}$ C e acqua  $7^{\circ}$ C" fornirà una potenza pari a 196.4 kW con una COP di 2.65. Il valore di COP è stato ridotto a 2.15 per tenere conto dell'efficienza di 0.81 dei sottosistemi di utilizzo imposta dal DM 26/06/2015.

## 9.5.4.2 Indici di prestazione energetica

Di seguito sono riportate le tabelle contenenti le quote di energia termica proveniente dall'aria, energia elettrica da rete e energia elettrica prodotta da fotovoltaico relativa ad ogni mese per ogni servizio preso in considerazione.

	Riscaldamento				
Mese	Energia elettrica da rete	Energia aerotermica	Energia elettrica da PV		
	[kWh]	[kWh]	[kWh]		
Gennaio	12481	11363	2907		
Febbraio	4547	5467	3669		
Marzo	0	2538	5628		
Aprile	0	559	1182		
Maggio	0	0	0		
Giugno	0	0	0		
Luglio	0	0	0		
Agosto	0	0	0		
Settembre	0	0	0		
Ottobre	284	545	414		
Novembre	6548	4975	2277		
Dicembre	14761	12508	2100		

Tabella 9-62: Energia richiesta dalla pompa di calore per il riscaldamento

Raffrescamento				
Mese	Energia elettrica da rete [kWh]	Energia aerotermica [kWh]	Energia elettrica da PV [kWh]	
Gennaio	0	0	0	
Febbraio	0	0	0	
Marzo	0	0	0	
Aprile	0	377	3787	
Maggio	4960	6260	8229	
Giugno	12360	13339	9225	
Luglio	15878	16448	9809	
Agosto	16987	17597	8310	
Settembre	8227	9047	6971	
Ottobre	2477	1455	3610	
Novembre	0	0	0	
Dicembre	0	0	0	

Tabella 9-63: Energia richiesta dalla pompa di calore per il raffrescamento

Illuminazione			
Mese	Energia elettrica da rete	Energia elettrica da PV	
	[kWh]	[kWh]	
Gennaio	8666	0	
Febbraio	8253	0	
Marzo	9084	407	
Aprile	5568	2272	
Maggio	9491	0	
Giugno	9078	0	
Luglio	8666	0	
Agosto	9491	0	
Settembre	8666	0	
Ottobre	9078	0	
Novembre	9078	0	
Dicembre	7840	0	

Tabella 9-64: Energia elettrica per l'illuminazione

Di seguito vengono mostrati nella tabella e nei grafici gli indici di prestazione energetica ottenuti, relativi a riscaldamento, raffrescamento e illuminazione.

	Riscaldamento	Raffrescamento	Illuminazione	Globale
	$[\mathrm{kWh/m2}]$	[kWh/m2]	$[\mathrm{kWh/m2}]$	$[\mathrm{kWh/m2}]$
Energia elettrica da rete	8	12	20	40
Energia aerotermica	8	13	0	20
Energia elettrica da PV	4	10	1	14
EPnren	15	24	40	78
EPren	15	28	10	53
RER	50%	55%	20%	40%

Tabella 9-65: Calcolo degli indici di prestazione energetica

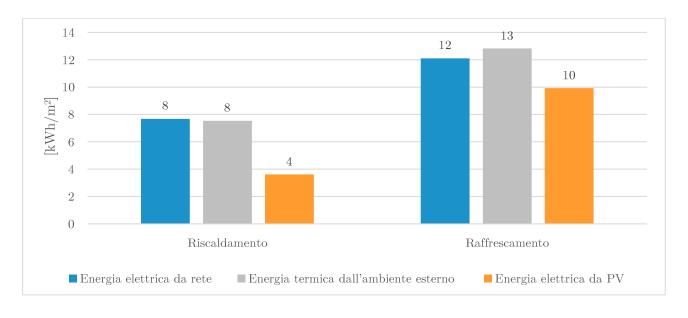


Grafico 9-18: Energia specifica richiesta dalla pompa di calore

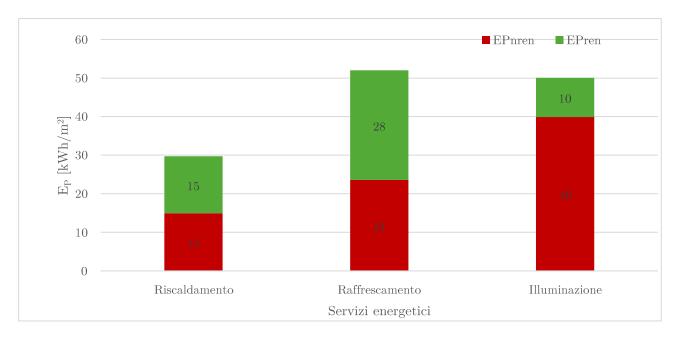


Grafico 9-19: Indici di prestazione energetica

Infine, come richiesto nel D.Lgs.~3~marzo~2011,~n.~28, è stato verificato che il 50 % dei consumi, previsti per il riscaldamento e il raffrescamento, fosse ricoperto da fonti rinnovabili: nel caso in esame l'energia proveniente da fonti rinnovabili è il 63% (solo l'impianto fotovoltaico copre il 38 % dei consumi).

### 9.5.5 Roma

### 9.5.5.1 Specifiche tecniche dell'impianto

A fronte di una richiesta di picco pari a 73.6 kW per il riscaldamento e di 197.8 kW per il raffrescamento è stata scelta da scheda tecnica una pompa di calore aria-acqua a ciclo invertibile che nelle condizioni nominali fosse in grado di soddisfare tali richieste.

In particolare, durante il periodo invernale, la pompa di calore selezionata, nelle condizioni nominali "aria 7°C e acqua 45°C" fornirà una potenza pari a 237.4 kW con una COP di 3.06. Il valore di COP viene poi ridotto a 2.48 per tenere conto dell'efficienza di 0.81 dei sottosistemi di utilizzo imposta dal DM 26/06/2015.

Durante il periodo estivo, invece, la stessa pompa di calore, nelle condizioni nominali "aria 35°C e acqua 7°C" fornirà una potenza pari a 218.0 kW con una COP di 2.53. Il valore di

COP è stato ridotto a 2.05 per tenere conto dell'efficienza di 0.81 dei sottosistemi di utilizzo imposta dal DM 26/06/15.

# 9.5.5.2 Indici di prestazione energetica

Di seguito sono riportate le tabelle contenenti le quote di energia termica proveniente dall'aria, energia elettrica da rete e energia elettrica prodotta da fotovoltaico relativa ad ogni mese per ogni servizio preso in considerazione.

Riscaldamento				
Mese	Energia elettrica da rete	Energia aerotermica	Energia elettrica da PV	
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	
Gennaio	4789	5726	3800	
Febbraio	1672	3022	4554	
Marzo	0	1935	5130	
Aprile	0	25	35	
Maggio	0	0	0	
Giugno	0	0	0	
Luglio	0	0	0	
Agosto	0	0	0	
Settembre	0	0	0	
Ottobre	0	0	0	
Novembre	227	682	2614	
Dicembre	3996	4756	3723	

Tabella 9-66: Energia richiesta dalla pompa di calore per il riscaldamento

	Raffrescamento				
Mese	Energia elettrica da rete	Energia aerotermica	Energia elettrica da PV		
	[kWh]	[kWh]	[kWh]		
Gennaio	0	0	0		
Febbraio	0	0	0		
Marzo	0	0	0		
Aprile	0	1198	6854		
Maggio	5499	6790	9133		
Giugno	12159	13505	10072		
Luglio	21320	19433	11277		
Agosto	24051	22261	9754		
Settembre	12502	12333	7713		
Ottobre	6094	4883	5998		
Novembre	104	67	1199		
Dicembre	0	0	0		

Tabella 9-67: Energia richiesta dalla pompa di calore per il raffrescamento

Illuminazione			
Mese	Energia elettrica da rete	Energia elettrica da PV	
	[kWh]	[kWh]	
Gennaio	8683	0	
Febbraio	8270	0	
Marzo	7998	1512	
Aprile	6444	1412	
Maggio	9510	0	
Giugno	9096	0	
Luglio	8683	0	
Agosto	9510	0	
Settembre	8683	0	
Ottobre	9096	0	
Novembre	9096	0	
Dicembre	7856	0	

Tabella 9-68: Energia elettrica per l'illuminazione

Di seguito vengono mostrati nella tabella e nei grafici gli indici di prestazione energetica ottenuti, relativi a riscaldamento, raffrescamento e illuminazione.

	Riscaldamento	Raffrescamento	Illuminazione	Globale
	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Energia elettrica da rete	2	16	20	39
Energia aerotermica	3	16	0	19
Energia elettrica da PV	4	12	1	17
EPnren	4	32	40	76
EPren	8	36	10	54
RER	66%	53%	20%	42%

Tabella 9-69: Calcolo degli indici di prestazione energetica

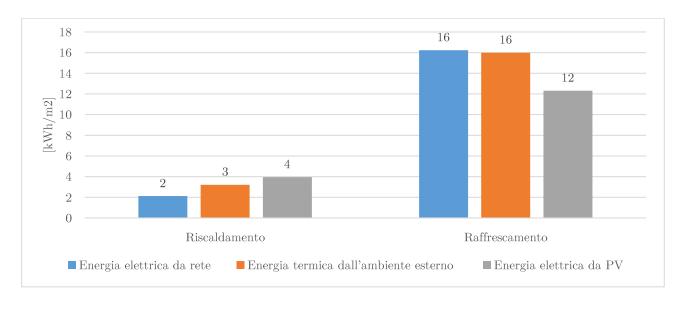


Grafico 9-20: Energia specifica richiesta dalla pompa di calore

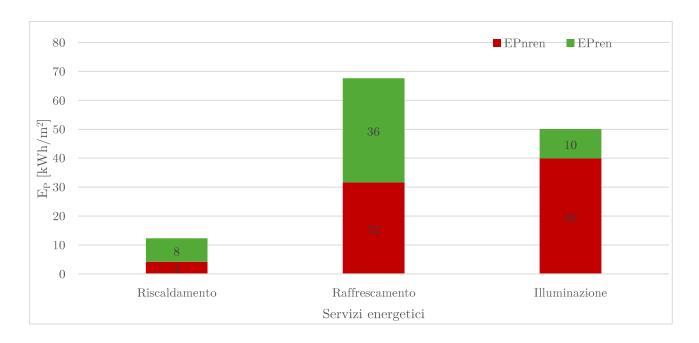


Grafico 9-21: Indici di prestazione energetica

Infine, come richiesto nel *D.Lgs. 3 marzo 2011, n. 28*, è stato verificato che il 50 % dei consumi, previsti per il riscaldamento e il raffrescamento, fosse ricoperto da fonti rinnovabili: nel caso in esame l'energia proveniente da fonti rinnovabili è il 66% (solo l'impianto fotovoltaico copre il 30 % dei consumi).

### 9.5.6 Palermo

### 9.5.6.1 Specifiche tecniche dell'impianto

A fronte di una richiesta di picco pari a 58.8 kW per il riscaldamento e di 171.1 kW per il raffrescamento è stata scelta da scheda tecnica una pompa di calore aria-acqua a ciclo invertibile che nelle condizioni nominali fosse in grado di soddisfare tali richieste.

In particolare, durante il periodo invernale, la pompa di calore selezionata, nelle condizioni nominali "aria 7°C e acqua 45°C" fornirà una potenza pari a 215 kW con una COP di 3.06. Il valore di COP è stato poi ridotto a 2.48 per tenere conto dell'efficienza di 0.81 dei sottosistemi di utilizzo imposta dal DM 26/06/2015.

Durante il periodo estivo, invece, la stessa pompa di calore, nelle condizioni nominali "aria 35°C e acqua 7°C" fornirà una potenza pari a 296.4 kW con una COP di 2.65. Il valore di

COP è stato poi ridotto a 2.15 per tenere conto dell'efficienza di 0.81 dei sottosistemi di utilizzo imposta dal DM 26/06/15.

# 9.5.6.2 Indici di prestazione energetica

Di seguito sono riportate le tabelle contenenti le quote di energia termica proveniente dall'aria, energia elettrica da rete e energia elettrica prodotta da fotovoltaico relativa ad ogni mese per ogni servizio preso in considerazione.

Riscaldamento				
Mese	Energia elettrica da rete	Energia aerotermica	Energia elettrica da PV	
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	
Gennaio	2832	3700	4225	
Febbraio	324	1598	4481	
Marzo	0	820	4295	
Aprile	0	0	0	
Maggio	0	0	0	
Giugno	0	0	0	
Luglio	0	0	0	
Agosto	0	0	0	
Settembre	0	0	0	
Ottobre	0	0	0	
Novembre	0	0	0	
Dicembre	661	980	2855	

Tabella 9-70: Energia richiesta dalla pompa di calore per il riscaldamento

	Raffrescamento				
Mese	Energia elettrica da rete	Energia aerotermica	Energia elettrica da PV		
	[kWh]	[kWh]	[kWh]		
Gennaio	0	0	0		
Febbraio	0	0	0		
Marzo	0	0	0		
Aprile	1198	2320	7657		
Maggio	5751	9244	9209		
Giugno	13390	15601	9192		
Luglio	21372	21250	9698		
Agosto	23056	23484	8920		
Settembre	15123	15631	7106		
Ottobre	9406	10731	6460		
Novembre	4675	3235	4797		
Dicembre	226	181	974		

Tabella 9-71: Energia richiesta dalla pompa di calore per il raffrescamento

Illuminazione							
Mese	Energia elettrica da rete	Energia elettrica da PV					
	[kWh]	[kWh]					
Gennaio	8735	0					
Febbraio	8319	0					
Marzo	6674	2893					
Aprile	7903	0					
Maggio	9566	0					
Giugno	9150	0					
Luglio	8735	0					
Agosto	9566	0					
Settembre	8735	0					
Ottobre	9150	0					
Novembre	9150	0					
Dicembre	7903	0					

Tabella 9-72: Energia elettrica per l'illuminazione

Di seguito vengono mostrati nella tabella e nei grafici gli indici di prestazione energetica ottenuti, relativi a riscaldamento, raffrescamento e illuminazione.

	Riscaldamento	Raffrescamento	Illuminazione	Globale
	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Energia elettrica da rete	1	19	21	40
Energia aerotermica	1	20	0	22
Energia elettrica da PV	3	13	1	16
EPnren	1	37	40	78
EPren	5	42	10	57
RER	77%	53%	20%	42%

Tabella 9-73: Calcolo degli indici di prestazione energetica

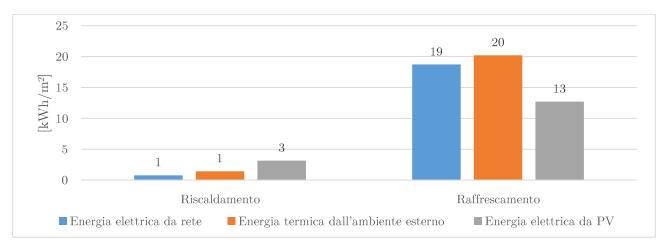


Grafico 9-22: Energia specifica richiesta dalla pompa di calore

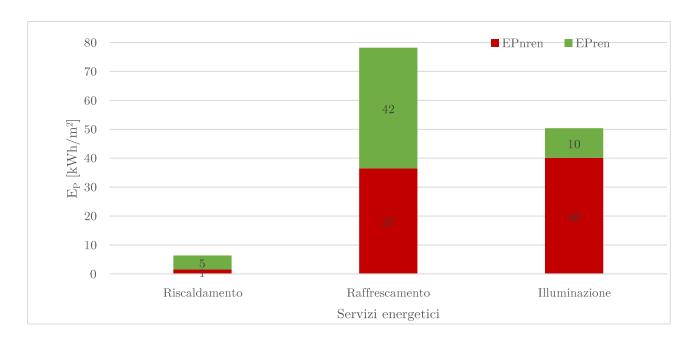


Grafico 9-23: Indici di prestazione energetica

Infine, come richiesto nel D.Lgs.~3~marzo~2011,~n.~28, è stato verificato che il 50 % dei consumi, previsti per il riscaldamento e il raffrescamento, fosse ricoperto da fonti rinnovabili: nel caso in esame l'energia proveniente da fonti rinnovabili è il 66% (solo l'impianto fotovoltaico copre il 28% dei consumi).

### 9.5.7 Confronti

Di seguito vengono riportati in un apposito diagramma i consumi della pompa di calore relativi a riscaldamento e raffrescamento, per ognuna delle città in esame.

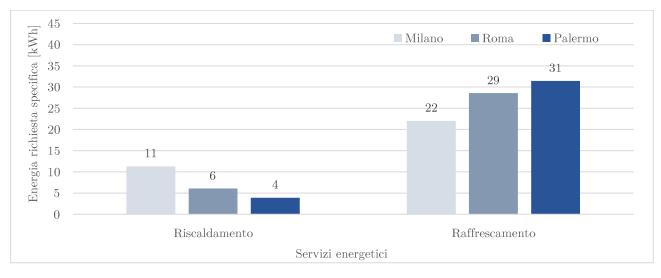


Grafico 9-24: Energia specifica richiesta dalla pompa di calore

I consumi dell'impianto rispecchiano l'andamento osservato nei grafici del capitolo del 9.4.5 relativo ai fabbisogni: il consumo per il riscaldamento diminuisce andando da Milano a Palermo, mentre quello di raffrescamento aumenta.

Infine, per ogni servizio energetico analizzato, vengono mostrate le quote derivate da fonte rinnovabile (in verde) e non rinnovabile (in rosso), per le tre città considerate.

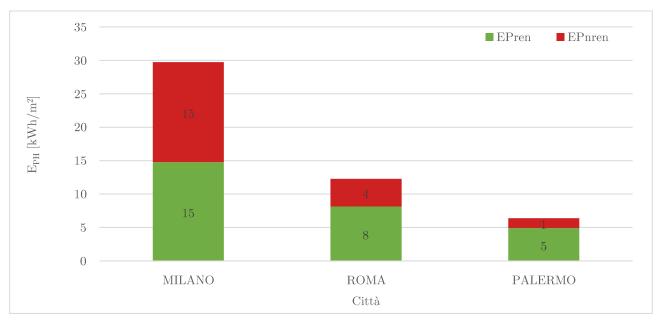


Grafico 9-25: Indici di prestazione energetica per il riscaldamento

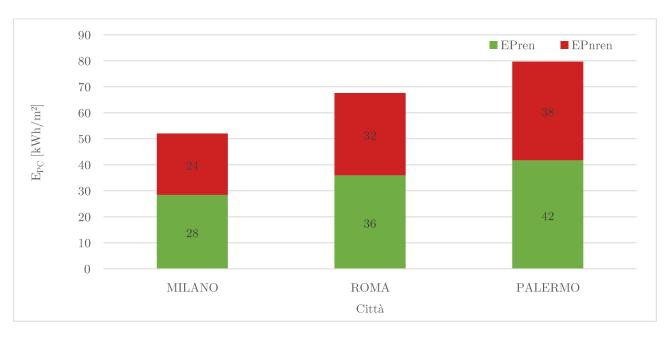


Grafico 9-26: Indici di prestazione energetica per il riscaldamento

Le quote rinnovabili e non rinnovabili di energia primaria dovuta al riscaldamento, seguano l'andamento dei consumi riportati nel grafico 9-24, aumentando da Milano a Palermo.

In aggiunta, aumenta anche la percentuale di energia dovuta a fonti rinnovabili: a Milano risulta pari al 50%, a Roma è il 67 % e a Palermo 83 %.

Allo stesso tempo, osservando il grafico 9-26, si può notare che l'andamento rispecchia quello previsto per l'energia primaria per il raffrescamento (un aumento delle quote rinnovabili e non rinnovabili andando da Milano a Palermo), ma i risultati relativi alla percentuale di energia rinnovabile si discostano dal caso precedentemente descritto: 54% a Milano, 53% a Roma e 52% a Palermo.

La differenza esistente tra l'andamento delle percentuali di energia rinnovabile per il riscaldamento e il raffrescamento, è l'unione di tre considerazioni:

- 1. l'impianto fotovoltaico funziona meglio per città con valori di temperatura e irradianza più alti;
- 2. la pompa di calore in inverno funziona meglio ad alte temperature;
- 3. la pompa di calore in estate funziona meglio a basse temperature.

Alla luce delle tre considerazioni appena riportate risulta evidente come nel caso invernale sia ragionevole ottenere un aumento sostanzioso della percentuale di energia rinnovabile spostandosi da Milano a Palermo, al contrario, per il caso estivo, è più difficile prevedere un andamento ben preciso, in quanto, il fotovoltaico può essere sfruttato maggiormente in una città come Palermo, mentre la l'energia rinnovabile proveniente dall'aria, in città come Milano.

## 9.6. Previsioni future

Nel presente capitolo sono stati riportati i valori di fabbisogni e consumi previsti per la climatizzazione invernale ed estiva dell'edificio nZEB ad uso uffici, per gli anni metereologici tipici 2050 e 2080.

### 9.6.1 Milano

Di seguito sono stati riportati i valori di fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento previsti per le tre tipologie di dati climatici annuali considerate, riferiti a una superficie di pavimento climatizzata pari a 5230 m<sup>2</sup>.

Inoltre, sono stati riportati degli istogrammi con all'interno l'indicazione dell'aumento o la riduzione dei fabbisogni previsti per il 2050 e il 2080 rispetto all'anno climatico del CTI.

Mesi	Fabbisogno specifico di riscaldamento			Fabbisogno specifico di raffrescamento		
	CTI	2050	2080	CTI	2050	2080
	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Gennaio	5.1	4.6	3.2	0	0	0
Febbraio	2.5	2.8	2.1	0	0	0
Marzo	1.0	1.1	0.6	0	0	0
Aprile	0.4	0.4	0	-0.1	-0.1	-0.7
Maggio	0	0	0	-1.7	-1.4	-2.5
Giugno	0	0	0	-3.8	-4.2	-5.6
Luglio	0	0	0	-4.8	-6.1	-6.5
Agosto	0	0	0	-5.0	-5.1	-6.9
Settembre	0	0	0	-2.4	-2.5	-4.5
Ottobre	0.2	0	0	-0.4	-1.1	-1.9
Novembre	2.5	1.0	0.4	0	0	-0.1
Dicembre	5.5	4.4	3.3	0	0	0

 $Tabella\ 9\hbox{-}74\hbox{:}\ Fabbisogno\ termico\ specifico\ mensile\ per\ i\ tre\ anni\ metereologici\ tipici$ 

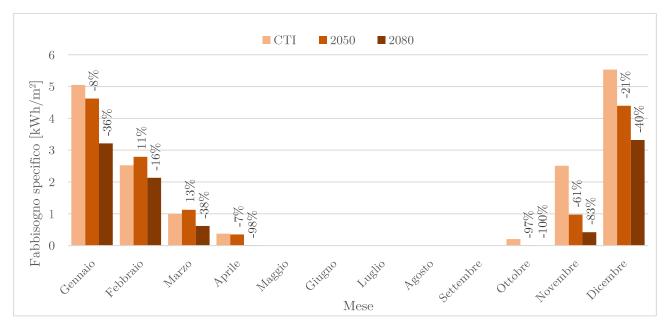


Grafico 9-27: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento per i tre anni metereologici tipici

Come ci si aspettava, nella maggior parte dei mesi, i fabbisogni previsti per il riscaldamento diminuiscono con il passare degli anni.

In particolare, per il mese di ottobre, per l'anno climatico tipico del CTI, si ha un valore di fabbisogno per il riscaldamento di  $0.2 \text{ kWh/m}^2$ , mentre, negli anni successivi, si annulla: le temperature che in media aumentano del 19 % nel 2050 e del 40 % nel 2080.

Tuttavia, è possibile osservare dal grafico sovrastante, che alcuni mesi presentano delle irregolarità commentate di seguito.

Nel mese di febbraio, il valore di fabbisogno mensile di riscaldamento, previsto per gli anni correnti, assume un valore pari a  $2.5 \text{ kWh/m}^2$ , mentre, per l'anno tipico 2050 è stato ottenuto un valore di  $2.8 \text{ kWh/m}^2$ .

L'aumento di fabbisogno per il riscaldamento, nel mese di febbraio, per l'anno tipico 2050, è giustificato dall'andamento delle temperature riportato di seguito: per il 57% delle ore le temperature, a differenza di quanto ci si aspettava, sono maggiori per l'anno tipo climatico fornito dal CTI.

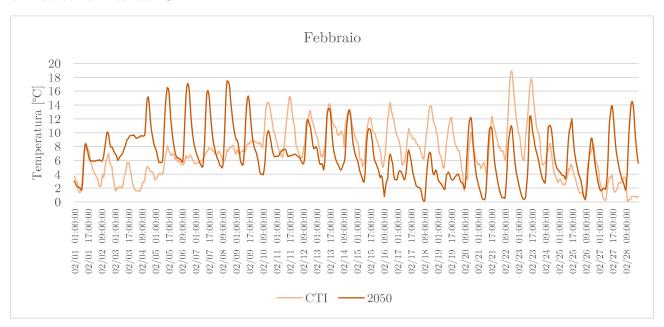


Grafico 9-28: Andamento orario della temperatura nel mese di febbraio

Inoltre, dal precedente grafico, è possibile osservare come durante l'anno climatico del CTI si raggiunga una temperatura di picco pari a 18.9 °C, mentre, nel 2050, si ha una temperatura massima di 17.5 °C.

Allo stesso tempo, risulta evidente come per la maggior parte del mese (fino al 25 febbraio), le temperature dell'anno climatico del CTI, non sono mai inferiori a 1.3 °C, al contrario del 2050, dove si verifica più volte a una Temperatura di 0.1 °C.

In aggiunta, come è possibile osservare nella tabella al capitolo 4, la temperatura media mensile di febbraio nell'anno tipico 2050, diminuisce rispetto all'ano tipico del CTI: si passa da 7.1 °C a 6.8 °C.

Le considerazioni riportate per il mese di febbraio sono valide anche per il mese di marzo che, come si può notare dal grafico precedente, presenta delle irregolarità, tuttavia si è scelto di riportare le analisi condotte sui dati climatici solo per un mese rappresentativo. Il grafico riportato successivamente rappresenta il fabbisogno calcolato per la climatizzazione estiva dell'edificio e anche in questo caso, come ci si aspettava, nella

maggior parte dei mesi, è stato riscontrato un aumento dei fabbisogni di raffrescamento

negli anni tipici 2050 e 2080 rispetto all'anno tipico del CTI.

Grafico 9-29: Fabbisogno termico specifico mensile di raffrescamento per i tre anni metereologici tipici

Mese

In particolare, si può notare che nel mese di aprile, per l'anno climatico corrente e quello tipico del 2050, è stato ottenuto un valore di fabbisogno quasi nullo, mentre, nell'anno tipico 2080, le temperature aumentano così tanto da rendere necessaria l'attivazione dell'impianto: si passa da 0.5 Wh a 3.5 Wh.

Inoltre, nel mese di maggio, è possibile osservare che, a differenza di quanto ci si aspettava, il fabbisogno di raffrescamento per l'anno tipico del 2050 diminuisce del 16 % rispetto all'anno tipico del CTI: si passa da 1.7 kWh/m² a 1.4 kWh/m².

Infatti, nel mese in esame, è stato riscontrato che, nel 57 % delle ore, le temperature sono maggiori per l'anno climatico tipico del CTI; di seguito è stato riportato il grafico dove sono stati messi a confronto i due andamenti, e dove risulta evidente l'inesistenza di un sostanziale aumento di temperatura nel mese di maggio per l'anno tipico 2050.

Inoltre, nello stesso mese, la temperatura media mensile, dell'anno climatico tipico 2050 si riduce rispetto all'anno climatico del CTI: si passa da un valore di 19.4 °C a 18.6 °C.

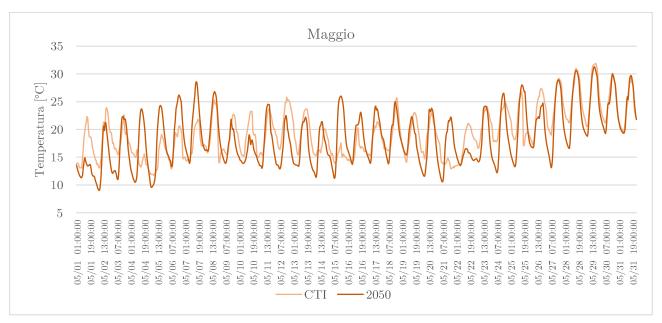


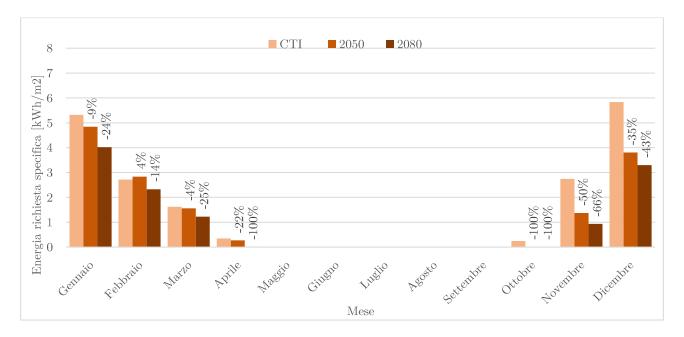
Grafico 9-30: Andamento orario della temperatura nel mese di maggio

L'analisi precedente relativa all'effetto che i dati climatici hanno sui fabbisogni, è valida anche per i consumi calcolati per la climatizzazione invernale ed estiva dell'edificio, di conseguenza, successivamente, sono stati riporti esclusivamente i relativi grafici, che presentano lo stesso andamento dei fabbisogni.

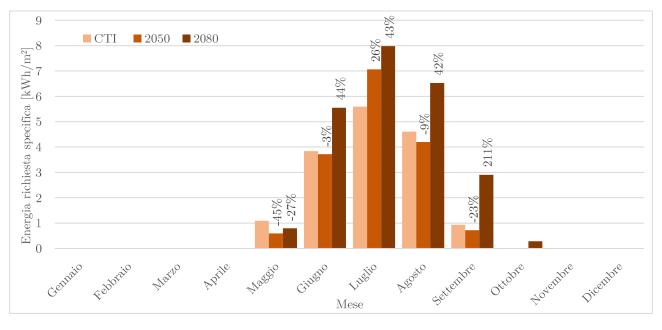
Mese	Energia richie	sta specifica di	riscaldamento	Energia richies	sta specifica di	raffrescamento
	CTI	2050	2080	CTI	2050	2080
	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[{ m kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Gennaio	5.3	4.8	4.0	0.0	0.0	0.0
Febbraio	2.7	2.8	2.3	0.0	0.0	0.0
Marzo	1.6	1.6	1.2	0.0	0.0	0.0
Aprile	0.3	0.3	0.0	0.8	0.8	1.7

Maggio	0.0	0.0	0.0	3.9	3.5	5.1
Giugno	0.0	0.0	0.0	6.9	7.6	10.1
Luglio	0.0	0.0	0.0	8.4	10.8	11.6
Agosto	0.0	0.0	0.0	8.5	9.0	12.1
Settembre	0.0	0.0	0.0	4.8	5.0	8.2
Ottobre	0.2	0.0	0.0	1.5	1.8	2.8
Novembre	2.7	1.4	0.9	0.0	0.0	0.0
Dicembre	5.8	3.8	3.3	0.0	0.0	0.0

Tabella 9-75: Energia richiesta specifica mensile per i tra anni metereologici tipici



 $Tabella\ 9\text{-}76:\ Energia\ richiesta\ specifica\ mensile\ per\ il\ riscaldamento\ per\ i\ tra\ anni\ metereologici\ tipici$ 



 $Grafico\ 9\text{-}31:\ Energia\ richiesta\ specifica\ mensile\ per\ il\ raffrescamento\ per\ i\ tra\ anni\ metereologici\ tipici$ 

## 9.6.2 Roma

Di seguito sono stati riportati i valori di fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento previsti per le tre tipologie di dati climatici annuali considerate, riferiti a una superficie di pavimento climatizzata pari a 5230 m<sup>2</sup>.

Inoltre, sono stati riportati degli istogrammi con all'interno l'indicazione dell'aumento o della riduzione dei fabbisogni previsti per il 2050 e il 2080 rispetto all'anno climatico del CTI.

Mesi	Fabbisogno	specifico di ri	iscaldamento	Fabbisogno s	specifico di ra	ffrescamento
	CTI	2050	2080	CTI	2050	2080
	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Gennaio	2.8	2.6	1.7	0.0	0.0	0.0
Febbraio	1.5	1.3	0.7	0.0	0.0	0.0
Marzo	1.0	0.6	0.2	0.0	-0.1	-0.6
Aprile	0.0	0.2	0.0	-0.5	-0.2	-0.8
Maggio	0.0	0.0	0.0	-1.9	-1.6	-2.6
Giugno	0.0	0.0	0.0	-4.0	-4.3	-5.6
Luglio	0.0	0.0	0.0	-6.2	-7.1	-8.4
Agosto	0.0	0.0	0.0	-6.7	-6.1	-10.4
Settembre	0.0	0.0	0.0	-3.6	-4.3	-6.5
Ottobre	0.0	0.0	0.0	-1.4	-2.4	-3.9
Novembre	0.4	0.3	0.1	-0.3	-0.4	-0.4
Dicembre	2.0	1.8	1.0	0.0	0.0	0.0

Tabella 9-77: Fabbisogno termico specifico mensile per i tre anni metereologici tipici

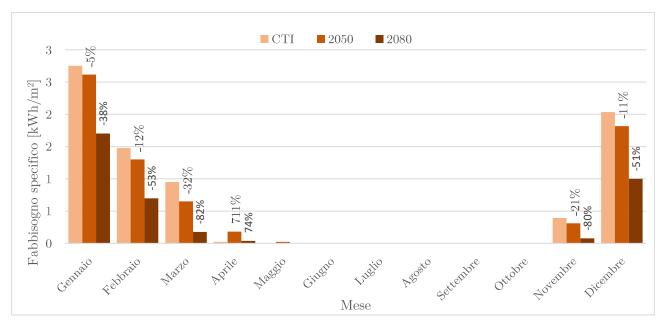


Grafico 9-32: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento per i tre anni metereologici tipici

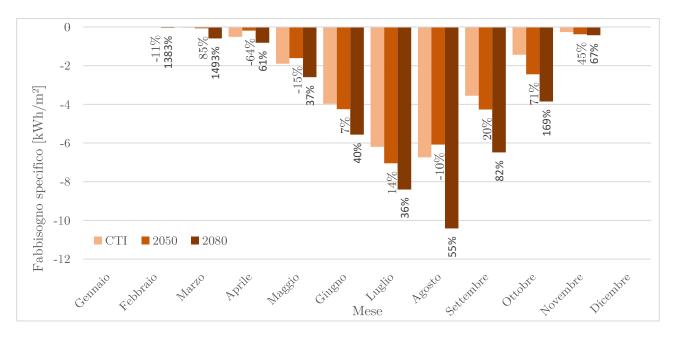


Grafico 9-33: Fabbisogno termico specifico mensile di raffrescamento per i tre anni metereologici tipici

Come ci si aspettava, nella maggior parte dei mesi, i fabbisogni previsti per il riscaldamento diminuiscono con il passare degli anni, mentre quelli del raffrescamento aumentano.

Tuttavia, è possibile osservare come nel mese di aprile, nell'anno tipico del CTI e nel 2080, ci sia esigenza di raffrescare l'edificio, al contrario, nell'anno meteorologico tipico 2050, si ha un fabbisogno di riscaldamento pari a 1006 kWh.

Infatti, le temperature medie mensili ad aprile, assumono i valori 15.8 °C, 14.5 °C, e 16.9 °C, rispettivamente per l'anno meteorologico tipico del CTI, del 2050 e del 2080, mentre, le irradianze medie mensili e globali sul piano orizzontale, sempre in relazione ai tre anni analizzati, assumono ai valori 215.9 Wh/m², 175.2 Wh/m², 191.5 Wh/m²: in entrambi i casi si ha una riduzione per l'anno 2050.

Nel grafico sottostante è stato messo in evidenza l'andamento delle tre temperature, dove, in particolare nell'intervallo che va dal 16 al 24 aprile, si può notare di quanto le temperature dell'anno 2050 siano inferiori rispetto alle altre due tipologie di anni metereologici.

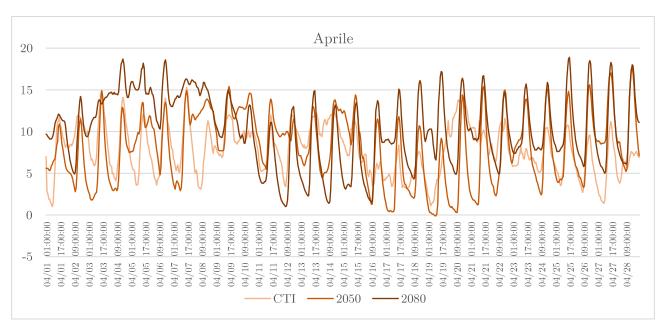


Grafico 9-34: Andamento orario della temperatura nel mese di aprile

Nonostante nella maggior parte dei mesi estivi, il fabbisogno per il raffrescamento, aumenti con il passare degli anni, nel grafico precedente si possono notare delle irregolarità; di seguito a titolo d'esempio è stato analizzato il mese di agosto, per il quale il fabbisogno di raffrescamento diminuisce da  $6.7 \text{ kWh/m}^2$  a  $6.1 \text{ kWh/m}^2$ .

La diminuzione del fabbisogno per l'anno tipico 2050 è giustificata dall'andamento delle temperature: per il mese in questione la temperatura media mensile diminuisce da 26.5°C a 25.5°C dal CTI al 2050, infatti, le temperature nel 2050, sono minori rispetto a quelle per l'anno tipo climatico fornito dal CTI per il 67% delle ore complessive del mese.

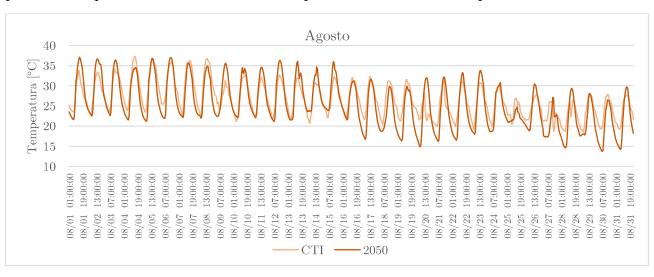


Grafico 9-35: Andamento orario della temperatura nel mese di agosto

Analizzando più specificatamente l'andamento orario delle temperature nel mese in esame per i due anni tipici in questione, si è verificato che il numero di ore in cui si presentano temperature più basse di 20°C, risulta maggiore per l'anno tipico 2050, piuttosto che per l'anno fornito dal CTI: nello specifico, nell'anno tipico CTI solo in 25 ore in tutto il mese si raggiungono temperature minori di 20°C, mentre nell'anno tipico 2050 tale condizione risulta verificata per un totale di 125 ore.

L'analisi precedente relativa all'effetto che i dati climatici hanno sui fabbisogni, è valida anche per i consumi calcolati per la climatizzazione invernale ed estiva dell'edificio, di conseguenza, successivamente, sono stati riporti esclusivamente i relativi grafici, che presentano lo stesso andamento dei fabbisogni.

Mesi	Energia richie	sta specifica di	riscaldamento	Energia richies	sta specifica di	raffrescamento
	CTI	2050	2080	CTI	2050	2080
	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[{ m kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Gennaio	2.8	3.0	1.7	0.0	0.0	0.0
Febbraio	1.8	1.7	1.2	0.0	0.0	0.0
Marzo	1.4	1.1	0.7	0.0	0.0	0.0
Aprile	0.0	0.1	0.0	1.6	1.0	2.2
Maggio	0.0	0.0	0.0	4.3	3.7	5.2
Giugno	0.0	0.0	0.0	7.1	7.7	9.8
Luglio	0.0	0.0	0.0	10.3	11.7	13.8
Agosto	0.0	0.0	0.0	11.1	10.6	16.6
Settembre	0.0	0.0	0.0	6.5	7.7	11.0
Ottobre	0.0	0.0	0.0	3.4	4.8	6.9
Novembre	0.7	0.5	0.0	0.3	0.4	0.8
Dicembre	2.5	1.7	1.6	0.0	0.0	0.0

Tabella 9-78: Energia richiesta specifica mensile per i tra anni metereologici tipici

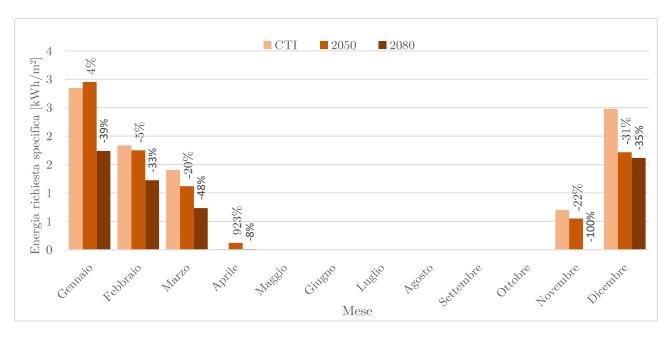


Grafico 9-36: Energia richiesta specifica mensile per il riscaldamento per i tra anni metereologici tipici

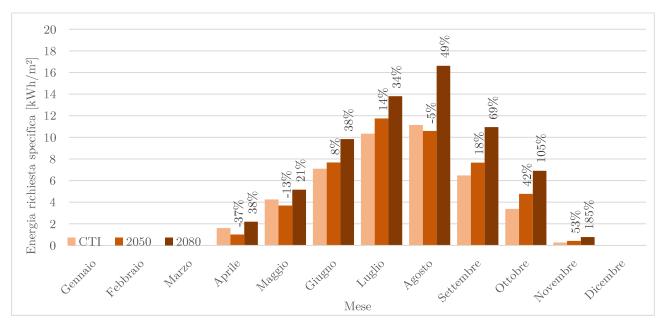


Grafico 9-37: Energia richiesta specifica mensile per il raffrescamento per i tra anni metereologici tipici

# 9.6.3 Palermo

Di seguito sono stati riportati i valori dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento previsti per le tre tipologie di dati climatici annuali considerati, riferiti a una superficie di pavimento climatizzata pari a 5230 m<sup>2</sup>.

Inoltre, sono stati riportati degli istogrammi con all'interno l'indicazione dell'aumento o della riduzione dei fabbisogni previsti per il 2050 e il 2080 rispetto all'anno climatico del CTI.

Mesi	Fabbisogno specifico di riscaldamento		Fabbisogno specifico di raffrescamento			
	CTI	2050	2080	CTI	2050	2080
	[kWh/m2]	[kWh/m2]	[kWh/m2]	[kWh/m2]	[kWh/m2]	[kWh/m2]
Gennaio	1.5	1.0	0.3	0.0	0.0	-0.3
Febbraio	0.9	0.3	0.0	0.0	-0.1	-0.5
Marzo	0.5	0.1	0.0	-0.2	-0.4	-0.7
Aprile	0.0	0.0	0.0	-0.6	-0.8	-1.5
Maggio	0.0	0.0	0.0	-2.3	-1.8	-3.4
Giugno	0.0	0.0	0.0	-4.3	-4.2	-6.5
Luglio	0.0	0.0	0.0	-6.2	-5.5	-8.0
Agosto	0.0	0.0	0.0	-6.6	-7.0	-8.8
Settembre	0.0	0.0	0.0	-4.3	-5.0	-7.0
Ottobre	0.0	0.0	0.0	-2.7	-3.2	-4.0
Novembre	0.0	0.0	0.0	-0.9	-1.0	-1.7
Dicembre	0.6	0.3	0.0	-0.1	-0.1	-0.3

Tabella 9-79: Fabbisogno termico specifico mensile per i tre anni metereologici tipici

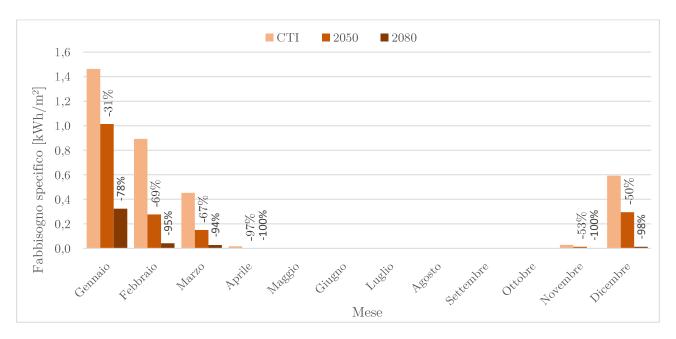


Grafico 9-38: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento per i tre anni metereologici tipici

Come ci si aspettava, nella maggior parte dei mesi, i fabbisogni previsti per il riscaldamento diminuiscono con il passare degli anni.

Inoltre, nel grafico sovrastante è possibile notare come, nel caso di Palermo, a eccezione del mese di gennaio, si sono ottenuti valori di fabbisogni di riscaldamento approssimativamente nulli.

Il grafico riportato successivamente rappresenta il fabbisogno calcolato per la climatizzazione estiva dell'edificio e anche in questo caso, come ci si aspettava, nella maggior parte dei mesi, è stato riscontrato un aumento dei fabbisogni di raffrescamento negli anni tipici 2050 e 2080 rispetto all'anno tipico del CTI.

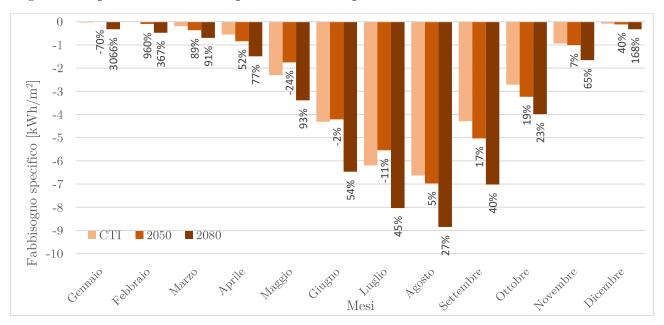


Grafico 9-39: Fabbisogno termico specifico mensile di raffrescamento per i tre anni metereologici tipici

Anche nel caso di Palermo alcuni mesi presentano delle irregolarità; successivamente, a titolo d'esempio, verranno analizzati i dati climatici del mese di luglio.

Nel mese di luglio, è possibile osservare che, a differenza di quanto ci si aspettava, il fabbisogno di raffrescamento per l'anno tipico del 2050 diminuisce del 11 % rispetto all'anno tipico del CTI: si passa da 6.2 kWh/m² a 5.5 kWh/m².

Infatti, nel mese in esame, è stato riscontrato che, nel 53 % delle ore, le temperature sono maggiori per l'anno climatico tipico del CTI; di seguito è stato riportato il grafico dove sono stati messi a confronto i due andamenti, e dove risulta evidente l'inesistenza di un sostanziale aumento di temperatura nel mese di luglio per l'anno tipico 2050.

Inoltre, dallo stesso grafico è possibile notare che, nella maggior parte delle ore, i picchi di temperatura massima appartengono all'anno climatico del CTI.

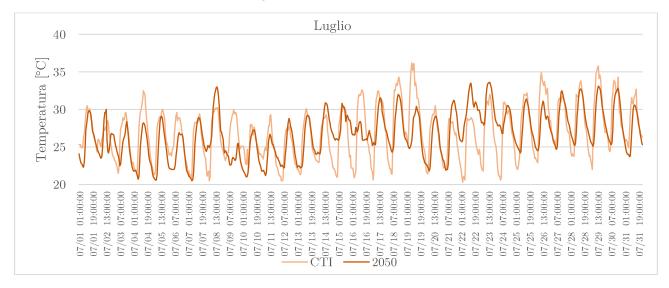


Grafico 9-40: Andamento orario della temperatura nel mese di agosto

In aggiunta, nello stesso mese, la temperatura media mensile, dell'anno climatico tipico 2050 si riduce rispetto all'anno climatico del CTI: si passa da un valore di 26.9 °C a 26.7 °C.

L'analisi precedente, relativa all'effetto che i dati climatici hanno sui fabbisogni, è valida anche per i consumi calcolati per la climatizzazione invernale ed estiva dell'edificio, di conseguenza, successivamente, sono stati riporti esclusivamente i relativi grafici, che presentano lo stesso andamento dei fabbisogni.

Mesi	Energia richie	sta specifica di	riscaldamento	Energia richies	sta specifica di	raffrescamento
	CTI	2050	2080	CTI	2050	2080
	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Gennaio	2.1	1.5	0.9	0.0	0.0	0.0
Febbraio	1.3	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0
Marzo	1.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0
Aprile	0.0	0.0	0.0	2.2	2.7	3.9
Maggio	0.0	0.0	0.0	4.8	4.0	6.4
Giugno	0.0	0.0	0.0	7.6	7.5	10.8
Luglio	0.0	0.0	0.0	10.4	9.6	13.7
Agosto	0.0	0.0	0.0	11.0	11.8	15.1
Settembre	0.0	0.0	0.0	7.5	8.9	12.1
Ottobre	0.0	0.0	0.0	5.3	6.1	7.2
Novembre	0.0	0.0	0.0	2.5	2.6	3.7
Dicembre	0.9	0.8	0.0	0.3	0.0	0.8

Tabella 9-80: Energia richiesta specifica mensile per i tra anni metereologici tipici

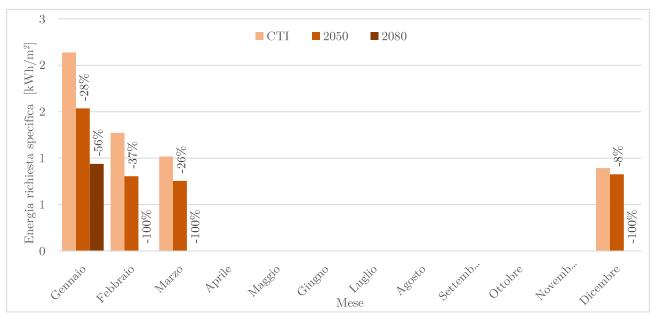
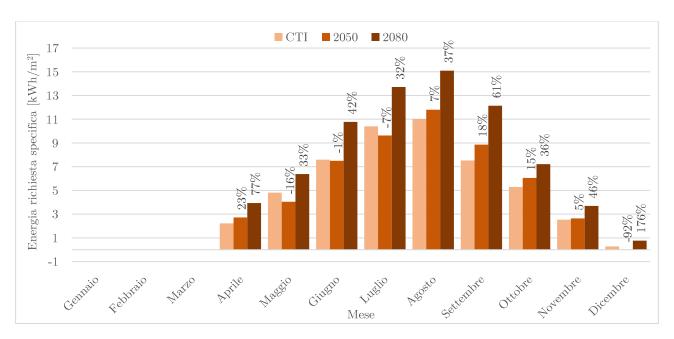


Grafico 9-41: Energia richiesta specifica mensile per il riscaldamento per i tra anni metereologici tipici



 $Grafico\ 9\text{-}42:\ Energia\ richiesta\ specifica\ mensile\ per\ il\ raffrescamento\ per\ i\ tra\ anni\ metereologici\ tipici$ 

# 9.6.4 Confronti

Di seguito sono riportati i valori di fabbisogno annuale specifico di riscaldamento e raffrescamento per le tre città, per i tre anni metereologici tipici considerati, riferiti a una superficie di pavimento climatizzata pari a 5032 m<sup>2</sup>.

Mese	Fabbisogno specifico di riscaldamento		Fabbisogno specifico di raffrescamento			
	CTI	2050	2080	CTI	2050	2080
	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[\mathrm{kWh/m^2}]$
Milano	17.2	14.3	9.6	-18.2	-20.5	-28.7
Roma	7.7	6.8	3.7	-24.6	-26.5	-39.4
Palermo	3.5	1.7	0.3	-28.2	-29.1	-42.7

Tabella 9-81: Fabbisogno termico specifico annuale per i tre anni metereologici tipici

A seguito dei risultati ottenuti per le tre città esaminate e gli anni metereologici futuri 2050 e 2080, risulta evidente che l'impatto del cambiamento climatico sulla prestazione energetica degli edifici dipende fortemente dall'anno e dalla zona climatica considerata.

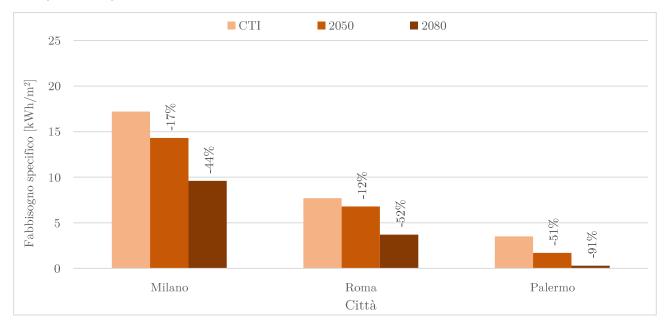


Grafico 9-43: Variazione del fabbisogno termico specifico annuale di riscaldamento per i tre anni metereologici tipici

Per quanto riguarda la richiesta di fabbisogno di riscaldamento, quest'ultima tende a diminuire con il passare degli anni.

Inoltre, risulta evidente che nell'anno tipico 2080, la richiesta di fabbisogno di riscaldamento diminuisce notevolmente in percentuale, rispetto a quanto accade nel 2050.

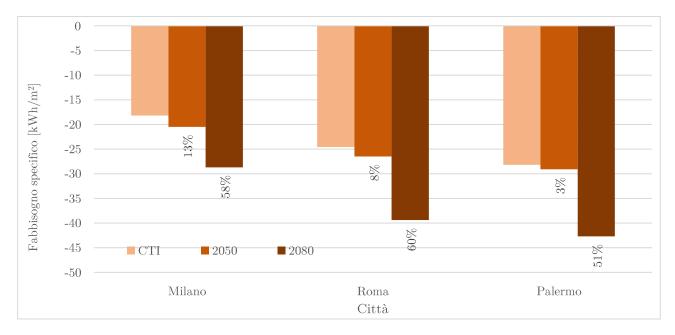


Grafico 9-44: Variazione del fabbisogno termico specifico annuale di riscaldamento per i tre anni metereologici tipici

Per quanto riguarda la richiesta di fabbisogno di raffrescamento, quest'ultima tende ad aumentare con il passare degli anni.

Inoltre, risulta evidente che nell'anno tipico 2080, la richiesta di fabbisogno di raffrescamento aumenta notevolmente in percentuale, rispetto a quanto accade nel 2050.

## 9.7. Ventilazione notturna

Nel presente paragrafo verrà valutato il risparmio in termini di consumo elettrico in seguito all'applicazione della strategia di ventilazione notturna.

Al fine di indagare il potenziale di raffreddamento delle tecniche di ventilazione notturna, sono state effettuate analisi per entrambi i casi studio, confrontando il comportamento di tali edifici nelle tre differenti località (Milano, Roma e Palermo) e per i tre anni tipici metereologici presi in esame (CTI, 2050 e 2080).

Nei seguenti paragrafi, per ogni città, e per ogni tipologia di dati climatici, sono state analizzate due differenti strategie di ventilazione notturna: naturale e meccanica.

Per la ventilazione naturale è stata ipotizzata un'apertura delle finestre pari al 40%, e un periodo di funzionamento che comprende tutte le ore in cui all'interno degli uffici non vi sono occupanti (dalle 19:00 alle 09:00), per tutte le località considerate.

La ventilazione meccanica è stata valutata, per entrambi i casi studio, tramite la metodologia descritta nel capitolo 7, tuttavia, gli slot orari scelti per il suo funzionamento, variano da un caso studio all'altro: tali indicazioni sono state riportate nei paragrafi relativi alle tre diverse località.

In aggiunta, per entrambe le strategie, sono stati considerati dei controlli sulla temperatura dell'aria: la ventilazione naturale si attiva solo quando tra interno e esterno si verifica una differenza di temperatura di 1°C; quella meccanica quando si ha lo stesso valore di differenza di temperatura tra interno e esterno previsto per la naturale, ma allo stesso tempo, una temperatura dell'aria esterna inferiore a 25°C.

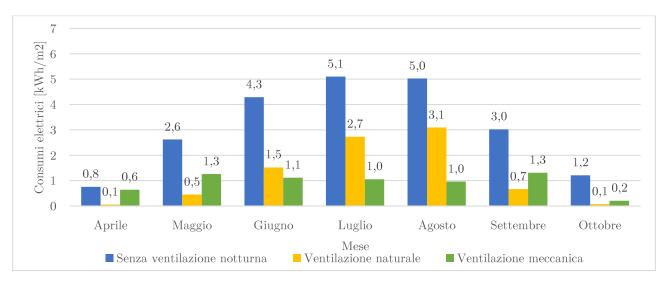
## 9.7.1 Milano

La ventilazione naturale è stata attuata tramite le indicazioni contenute all'interno del capitolo 7 e nell'introduzione del 9.7 per tutte le località.

Allo stesso tempo, per la ventilazione meccanica, nel caso di Milano, è stato scelto un periodo di funzionamento compreso tra le 22:00 e le 9:00 e un numero di ricambi d'aria pari a 5.

Il grafico sottostante mette a confronto le due strategie analizzate riferite all'anno meteorologico tipico fornito dal CTI.

## CTI



 $Grafico\ 9\text{-}45:\ Consumo\ elettrico\ specifico\ mensile\ per\ il\ raffrescamento\ in\ assenza\ e\ presenza\ di\ ventilazione\ notturna$ 

Dalla lettura del grafico risulta evidente come, nei mesi non eccessivamente caldi (aprile, maggio, settembre e ottobre), sia conveniente adottare la ventilazione naturale, al contrario, nei mesi estivi, si ottiene un maggior risparmio energetico attuando una ventilazione di tipo meccanica.

Questo tipo di comportamento può essere spiegato da diverse ragioni:

- 1. nei mesi non eccessivamente caldi (aprile, maggio, settembre e ottobre), l'edificio durante le ore diurne si surriscalda di meno rispetto ai mesi estivi, di conseguenza, affinché la ventilazione notturna sia efficiente, è sufficiente sfruttare la sola portata d'aria proveniente dalle finestre;
- 2. nei mesi con temperature più basse, le ore in cui si attiva il funzionamento della ventilazione naturale sono maggiori.

In sintesi, nei mesi come aprile, maggio, settembre e ottobre, la componente massiva dell'edificio, richiede un minor quantitativo di aria fredda per rendere efficiente la strategia, ma allo stesso tempo, le condizioni climatiche in questi mesi, sono tali da soddisfare la ventilazione per un maggior numero di ore rispetto a quelli estivi.

Questo significa che nei mesi non eccessivamente caldi, si riesce a garantire il raffreddamento della massa esposta dell'edificio, senza l'ausilio di ventilatori meccanici, ma con il solo impiego della ventilazione naturale, che non richiede consumi elettrici.

Al contrario, nei mesi come giugno, luglio e agosto, la componente massiva dell'edificio durante le ore diurne si surriscalda maggiormente, e di conseguenza si ha la necessità di garantire un numero di ricambi d'aria, o un periodo di funzionamento della ventilazione notturna maggiore.

La necessità di garantire, nei mesi estivi, un periodo di funzionamento della ventilazione notturna maggiore, è ostacolata dai controlli impostati sulle temperature che, essendo in questi mesi maggiori, comportano l'ingresso di aria fredda per un minor numero di ore, e di conseguenza, affinché la strategia sia efficiente, è necessario avere un numero di ricambi d'aria maggiore, ottenibili tramite una ventilazione di tipo meccanico.

La descrizione appena riportata per le due strategie di ventilazione studiate per l'anno meteorologico fornito dal CTI, alla luce dei risultati ottenuti, risulta valida anche per gli anni climatici tipici 2050 e 2080, di cui si riportano i grafici successivamente.

#### 2050

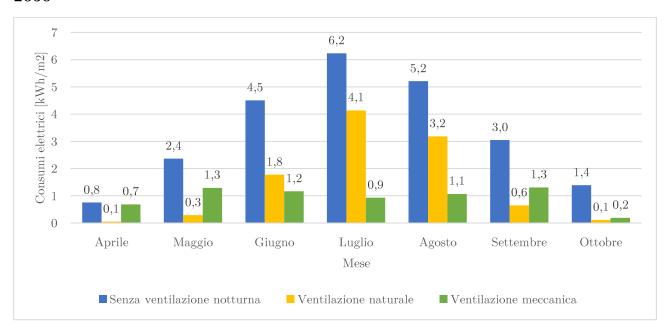
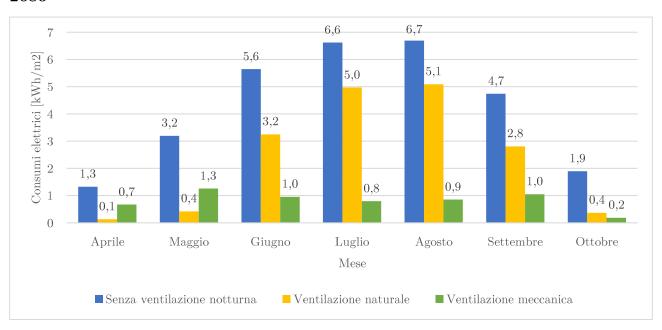


Grafico 9-46: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e presenza di ventilazione notturna

#### 2080



 $Grafico\ 9\text{-}47\ Consumo\ elettrico\ specifico\ mensile\ per\ il\ raffrescamento\ in\ assenza\ e\ presenza\ di\ ventilazione\ notturna$ 

Di seguito sono stati riportati i consumi elettrici annuali riferiti alle tre tipologie di dati climatici.

Anno	Senza ventilazione notturna	Con ventilazione notturna		
		Ventilazione naturale	Ventilazione meccanica	
	$[{ m kWh/m^2}]$	$[{ m kWh/m^2}]$	$[{ m kWh/m^2}]$	
CTI	22.0	8.6	6.5	
2050	23.5	10.2	6.6	
2080	30.1	17.0	5.8	

Tabella 9-82: Consumo elettrico specifico annuale per il raffrescamento in assenza e presenza di ventilazione notturna

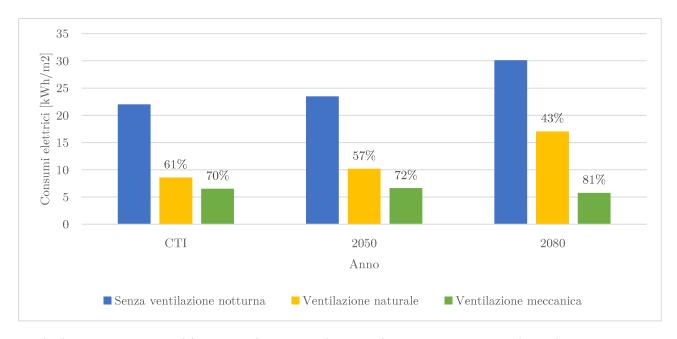


Grafico 9-48: Variazione del consumo elettrico specifico annuale in assenza e presenza di ventilazione notturna

Dai valori sopra riportati risulta evidente come, per tutte e tre le tipologie di anni, la ventilazione meccanica sia quella più efficiente, tuttavia, esistono delle differenze fra un anno e l'altro, messe in evidenza nel seguente grafico, contenente sull'asse delle ordinate la riduzione in percentuale dei consumi elettrici relativi a raffrescamento e ventilazione.

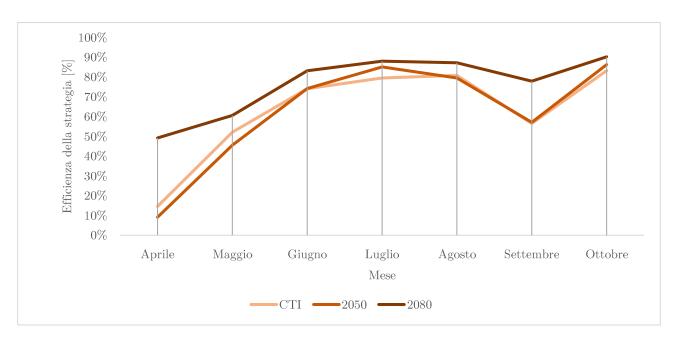


Grafico 9-49: Efficienza della ventilazione notturna meccanica nei tre anni metereologici

Dal grafico sovrastante appare evidente come nel 2080 si abbia una riduzione dei consumi nettamente superiore rispetto agli altri anni.

Questo risultato si allontana dalle previsioni teoriche: le temperature estive dell'anno meteorologico tipico 2080 sono più elevate rispetto a quelle degli altri due anni, di conseguenza la strategia dovrebbe risultare meno efficace.

Tuttavia, osservando i grafici 9-46, 9-47 e 9-48, appare evidente come i consumi ottenuti attuando una ventilazione di tipo meccanico, siano indipendenti dall'anno meteorologico e dal mese a cui si riferiscono: tra un anno e l'altro i consumi confrontati mese per mese rimangono quasi costanti.

Questo può significare che il fluido freddo, introdotto all'interno degli ambienti durante la notte, è sufficiente a garantire il massimo risparmio energetico già nel 2080, e di conseguenza, adottando i dati climatici del CTI e del 2050, il sistema risulta sovradimensionato.

In sintesi, la quota di consumo associata alla ventilazione meccanica, è composta in gran parte dal consumo attribuibile ai ventilatori che, dipendendo solo dal numero di ricambi d'aria e dall'orario di funzionamento, si mantiene inalterato nei mesi e negli anni mentre, quello della pompa di calore, è pressoché nullo.

Alla luce di quanto è stato appena detto è possibile affermare, che per l'anno 2080, l'efficienza della strategia valutata come spiegato precedentemente, risulta nettamente superiore, non tanto per l'influenza di fattori esterni quali i dati climatici, ma piuttosto per via del consumo iniziale che, essendo nettamente superiore rispetto agli altri due anni, fa sì che anche la sua riduzione in percentuale sia maggiore.

Le efficienze calcolate adoperando l'anno climatico tipico del CTI e del 2050, nei mesi di aprile, maggio, giugno, agosto e settembre, sono del tutto equiparabili: in aggiunta ai consumi ottenuti utilizzando un impianto di ventilazione meccanica che, come detto in precedenza, si mantengono costanti negli anni, in tali mesi, risultano comparabili anche i consumi previsti per il raffrescamento in assenza di ventilazione, come risulta evidente anche dai grafici contenuti nel paragrafo 9.6.1.

Nel mese di luglio, come ci si aspettava, si ha un consumo previsto per il raffrescamento senza ventilazione notturna, per l'anno climatico 2050, superiore rispetto a quello ottenuto adoperando i dati climatici del CTI, e l'andamento del grafico rispecchia quello atteso. In fine, nel mese di ottobre, si ha un andamento delle tre funzioni che rispecchia quello atteso (l'anno climatico tipico del 2080 presenta un'efficienza maggiore) e, in aggiunta, si verifica un incremento dell'efficienza per tutte e tre le tipologie di dati climatici, giustificabile da un brusco calo delle temperature esterne.

## 9.7.2 Roma

La ventilazione naturale è stata attuata tramite le indicazioni contenute all'interno del capitolo 7 e nell'introduzione del 9.7 per tutte le località.

Allo stesso tempo, per la ventilazione meccanica, nel caso di Roma, è stato scelto un periodo di funzionamento compreso tra le 03:00 e le 9:00 e un numero di ricambi d'aria pari a 5.

Il grafico sottostante mette a confronto le due strategie analizzate riferite all'anno meteorologico tipico fornito dal CTI.

Anche per Roma come nel caso di Milano, nei mesi non eccessivamente caldi, la strategia di ventilazione naturale risulta essere molto più efficace<sup>10</sup>, tuttavia è stato riscontrato che, nei mesi estivi, al contrario della località precedentemente analizzata, si ottengono dei consumi elettrici, per il raffrescamento nel caso di ventilazione naturale, e per il raffrescamento e la ventilazione nel caso di quella meccanica, equiparabili.

## CTI

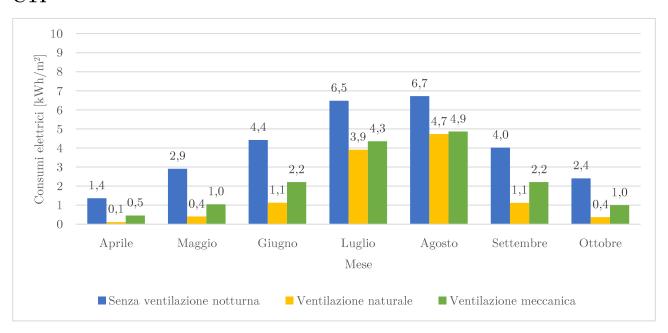


Grafico 9-50: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e presenza di ventilazione notturna

Il grafico sovrastante mostra i risultati ottenuti per l'anno climatico forniti dal CTI, per il quale risulta evidente che in tutti i mesi convenga adottare, come strategia di ventilazione notturna, quella naturale.

La differenza sostanziale tra il grafico in esame, e quello riportato nel paragrafo precedente per la città di Milano, è l'andamento dei consumi elettrici, ottenuti tramite l'adozione di una ventilazione di tipo meccanica.

Nel caso precedente, per tutti gli anni climatici, è stato ottenuto un consumo per il raffrescamento e la ventilazione meccanica, che tra un mese e l'altro si manteneva pressoché costante, al contrario nel caso di Roma, il valore varia in base al mese.

<sup>-</sup>

 $<sup>^{10}</sup>$  La motivazione per quale nei mesi dell'anno intermedi si ha un netto miglioramento adottando la ventilazione naturale è dettagliata a pag.  $224\,$ 

Nel caso precedente è stato messo in evidenza come, la richiesta dell'edificio di aria esterna per raffreddarsi, fosse inferiore al valore garantito tramite l'adozione della strategia di ventilazione meccanica adottata.

In questo secondo caso, essendo la città di Roma caratterizzata da temperature più elevate rispetto al caso precedente, a seguito di un maggior surriscaldamento dell'edificio durante le ore diurne e, allo stesso tempo, di una riduzione del periodo di funzionamento della ventilazione notturna, si ha una richiesta di aria, da parte dell'edificio, maggiore rispetto a quella garantita tramite la strategia adottata.

Di conseguenza la ventilazione meccanica riesce solo in parte a raffrescare la massa esposta dell'edificio, e per questo motivo, insieme alla ventilazione meccanica, si attiva anche l'impianti di climatizzazione, di cui i consumi rendono evidente la dipendenza di tali valori dalle condizioni climatiche esterne

Le considerazioni appena riportate sui consumi calcolati adoperando i dati climatici forniti dal CTI, alla luce dei risultati ottenuti e riportati nel grafico sottostante, possono essere effettuate anche per l'anno meteorologico 2050.

#### 2050

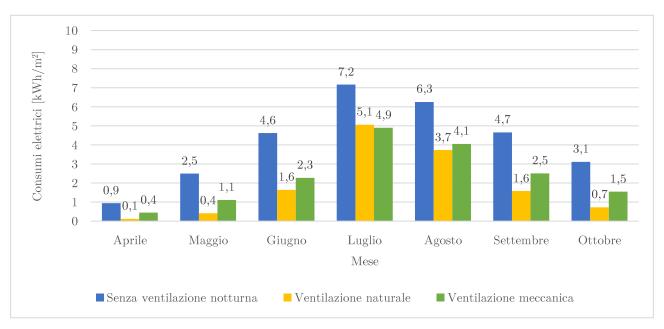


Grafico 9-51: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e presenza di ventilazione notturna

A differenza del caso precedente, per il quale in tutti i mesi si otteneva il maggior risparmio energetico adoperando la ventilazione naturale, in questo caso, esclusivamente per il mese di luglio, si ha un leggero miglioramento usufruendo di una ventilazione di tipo meccanico. Infatti, come è possibile notare nel paragrafo 9.6.2, il mese di luglio, per l'anno climatico 2050, risulta essere quello caratterizzato dal fabbisogno maggiore; ciò significa che presenta delle temperature più elevate e, di conseguenza, la ventilazione si attiva per un minor numero di ore.

Considerando che le ore di attivazione della ventilazione sono inferiori, risulta più efficiente una strategia che, nello stesso slot orario, riesca a garantire un numero di ricambi d'aria maggiore: la ventilazione meccanica.

I consumi previsti per l'anno tipico 2080, si basano sulle stesse considerazioni appena riportate per il 2050, con l'unica eccezione che, in questo terzo caso, i mesi in cui le temperature si alzano e che quindi prediligono una ventilazione di tipo meccanico sono sia luglio che agosto.

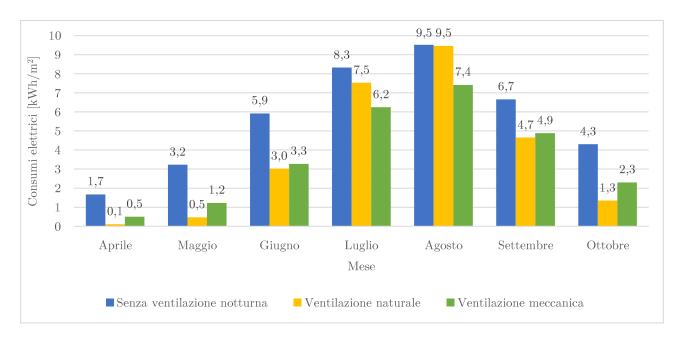
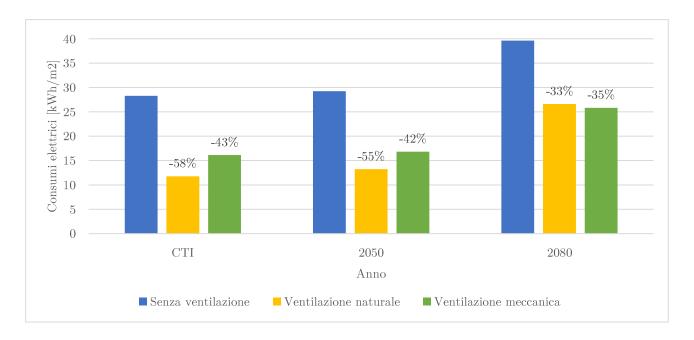


Grafico 9-52: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e presenza di ventilazione notturna

Di seguito sono stati riportati i consumi elettrici annuali riferiti alle tre tipologie di dati climatici.

Anno	Senza ventilazione notturna	Con ventilazione notturna		
		Ventilazione naturale	Ventilazione meccanica	
	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[{ m kWh/m^2}]$	$[{ m kWh/m^2}]$	
CTI	28.3	11.8	16.1	
2050	29.3	13.3	16.8	
2080	39.6	26.6	25.8	

Tabella 9-83: Consumo elettrico specifico annuale per il raffrescamento in assenza e presenza di ventilazione notturna



 $Grafico\ 9\text{-}53:\ Variazione\ del\ consumo\ elettrico\ specifico\ annuale\ in\ assenza\ e\ presenza\ di\ ventilazione\ notturna$ 

Dai valori sopra riportati è possibile notare che, annualmente, prendendo in considerazione l'anno meteorologico del CTI e del 2050 si ha il maggior risparmio energetico scegliendo come strategia di ventilazione notturna quella naturale, al contrario, per il 2080 si ha un leggero miglioramento utilizzando quella meccanica.

Di seguito verranno confrontate l'efficacia delle due strategie per i tre diversi anni.

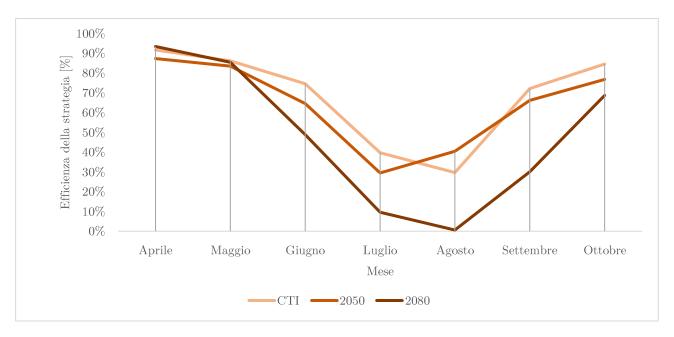


Grafico 9-54: Efficienza della ventilazione notturna naturale nei tre anni metereologici

Nel grafico sopra riportato sono stati diagrammati, per ogni tipologia di dati climatici, e per ogni mese, le riduzioni in percentuale del consumo previsto per il raffrescamento dell'edificio, a seguito dell'applicazione della strategia di ventilazione notturna naturale.

Da una prima lettura del grafico, risulta evidente come, per la maggior parte dei mesi, l'anno meteorologico per il quale si ottiene il maggior risparmio energetico, grazie all'adozione della strategia di ventilazione naturale, è quello caratterizzato da temperature più basse: l'efficacia della strategia è maggiore per l'anno climatico del CTI, media per il 2050 e, nel 2080, si abbassa così tanto da annullarsi nel mese di agosto.

Tuttavia, per il mese di aprile, l'anno climatico per il quale è stata valutata una maggiore efficienza della strategia, è quello tipico 2080, seguito dal CTI e dal 2050.

Anche per la località di Roma sono valide le considerazioni effettuate per Milano, infatti, essendo il mese di aprile caratterizzato da temperature non troppo elevate, si hanno periodi di attivazione della ventilazione più ampi rispetto ad altri mesi.

Allo stesso tempo, la richiesta da parte dell'edifico di aria esterna per raffreddarsi, è inferiore, perché durante le ore diurne si surriscalda di meno.

Di conseguenza, come è evidente dalla lettura dei grafici precedenti, la strategia funziona per garantire il massimo risparmio energetico già nel 2080, anno in cui, in teoria, la ventilazione dovrebbe funzionare nel modo peggiore, pertanto, per gli altri anni, il sistema risulta sovradimensionato.

Infatti, si ottiene per tutti gli anni, un consumo per il raffrescamento con ventilazione notturna naturale di 0.1 kWh/m² mentre, il consumo senza ventilazione, per ogni anno, varia: 1.4 kWh/m² per l'anno climatico fornito dal CTI, 0.9 kWh/m² per il 2050 e 1.7 kWh/m² per il 2080.

In conclusine, ad aprile, si ha un maggior risparmio energetico nel 2080, non perché il sistema funziona meglio, ma per via dei consumi iniziali che sono più alti.

Uno dei mesi a presentare delle irregolarità risulta essere quello di maggio, per il quale possono essere effettuate le stesse considerazioni riportate precedentemente per il mese di aprile, ma basate su valori di consumi iniziali più alti.

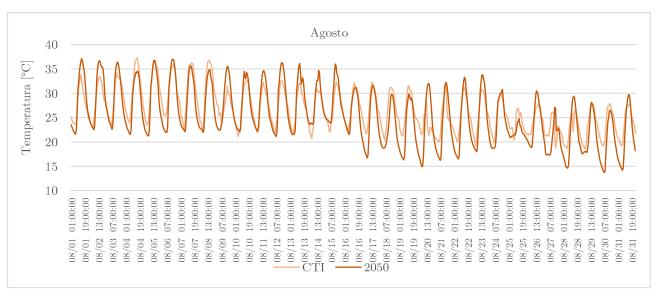


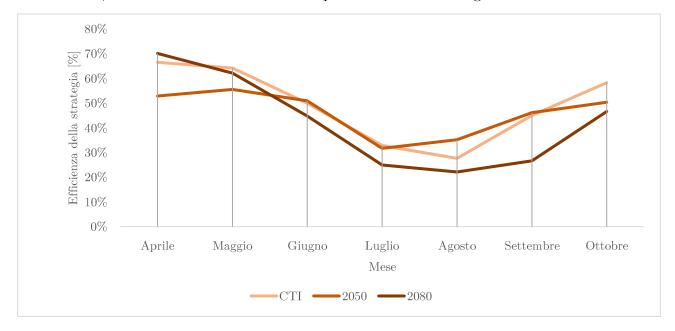
Grafico 9-55: Andamento orario della temperatura nel mese di agosto

È interessante notare che, nel mese di agosto, la strategia di ventilazione notturna naturale, risulta maggiormente conveniente nell'anno tipico 2050.

La causa di questo comportamento la si può trovare analizzando l'andamento orario delle temperature di tale mese per l'anno climatico fornito dal CTI e per il 2050.

Dal grafico risulta evidente che nel 2050, per tutto il mese in esame, nelle ore notturne si raggiungono temperature più basse rispetto a quelle che si verificano nell'anno del CTI.

Inoltre, nel 2050 l'oscillazione della temperatura tra il giorno e la notte è maggiore: questo potrebbe rendere più efficace lo scambio notturno con l'aria fresca che entra in ambiente. Considerando che, per l'anno 2080, la strategia per la quale è garantito il maggior risparmio energetico è la ventilazione meccanica, di seguito sono state confrontati, tra i diversi anni, anche le efficienze relative a questa seconda strategia



 $Grafico\ 9\text{-}56:\ Efficienza\ della\ ventilazione\ notturna\ meccanica\ nei\ tre\ anni\ metereologici$ 

Per i mesi di aprile, maggio e agosto l'andamento delle funzioni relative ai tre anni metereologici considerati, rispecchia quello visto per la ventilazione naturale, con la differenza che, nei mesi più freddi, l'efficienza si abbassa.

Infatti, in questo secondo caso, all'interno dei consumi sono stati considerati anche quelli dei ventilatori ma, come detto in precedenza, per aprile e maggio erano già sufficienti i ricambi d'aria garantiti con la sola apertura delle finestre.

Al contrario, per il mese di agosto, l'efficienza si alza rispetto al caso precedente, in quanto, essendo questo mese caratterizzato da temperature più alte e di conseguenza da un funzionamento della ventilazione che avviene per un numero di ore limitato, si necessita di una portata d'aria maggiore per garantire un risparmio energetico, attuabile soltanto attraverso la ventilazione meccanica.

## 9.7.3 Palermo

La ventilazione naturale è stata attuata tramite le indicazioni contenute all'interno del capitolo 7 e nell'introduzione del 9.7 per tutte le località.

Allo stesso tempo, per la ventilazione meccanica, nel caso di Palermo, è stato scelto un periodo di funzionamento compreso tra le 03:00 e le 9:00 e un numero di ricambi d'aria pari a 5.

Il grafico sottostante mette a confronto le due strategie analizzate riferite all'anno meteorologico tipico fornito dal CTI.

## CTI

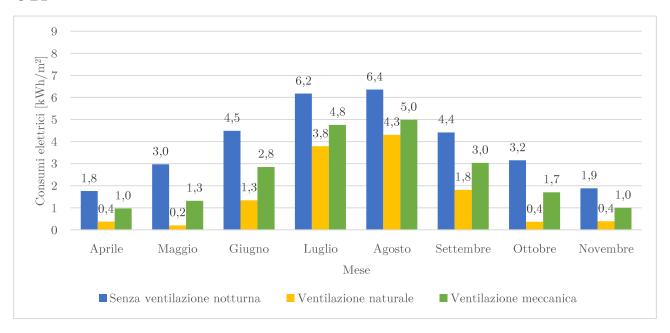


Grafico 9-57: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e presenza di ventilazione notturna

Dal grafico sovrastante è possibile notare come, a differenza delle altre località, sia più vantaggiosa l'adozione della strategia di ventilazione naturale.

Come per le altre città, la ventilazione naturale, ha un periodo di attivazione che comprende tutto il lasso di tempo in cui negli uffici non vi sono occupanti, al contrario, la meccanica funziona per un numero limitato di ore.

Analizzando la differenza tra gli orari di funzionamento delle due strategie e i consumi ottenuti, anche in relazione alle considerazioni effettuate per le altre zone climatiche, è possibile affermare che, nel caso di Palermo, si ha la necessità di ventilare l'edificio per un

maggior numero di ore: i 5 ricambi d'aria garantiti dalle 3:00 alle 9:00, producono un risparmio sui consumi, ma non incidono tanto quanto la ventilazione naturale.

Inoltre, è possibile notare che, anche per la città di Palermo, l'efficienza della ventilazione naturale nei mesi con temperature più basse è maggiore rispetto agli altri<sup>11</sup>.

Gli anni metereologici tipici del 2050 e del 2080 seguono l'andamento appena descritto per l'anno climatico fornito dal CTI.

#### 2050

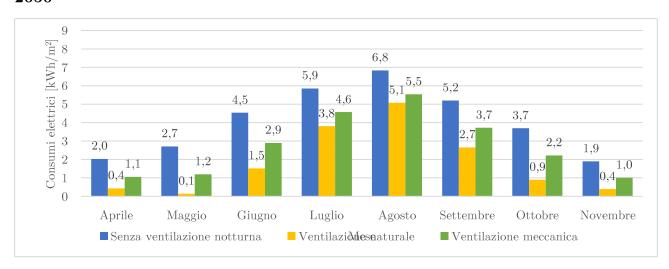


Grafico 9-58: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e presenza di ventilazione notturna

#### 2080

9 8,3 7,9 Consumi elettrici [kWh/m $^2$ ] 1 Consumi elettrici [kWh/m $^2$ ] 2 Consumi elettrici [kWh/m $^2$ ] 3 Consumi elettrici [kWh/m $^2$ ] 4 Consumi elettrici [kWh/m $^2$ ] 5 Consumi elettrici [kWh/m $^2$ ] 6 Consumi elettrici [kWh/m $^2$ ] 7 Consumi elettrici [kWh/m $^2$ ]  $7,5_{7,2}$ 7,17,06,9 6,3  $5,6^{5,9}$ 5,14,3 3,9 2,7 2.8 2,4  $^{2,2}$ Aprile Maggio Giugno Luglio Agosto Settembre Ottobre Novembre Mese Senza ventilazione notturna ■ Ventilazione naturale ■ Ventilazione meccanica

Grafico 9-59: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e presenza di ventilazione notturna

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> La motivazione per quale nei mesi dell'anno intermedi si ha un netto miglioramento adottando la ventilazione naturale è dettagliata a pag. 224

I consumi ottenuti per l'anno climatico 2080 necessitano di considerazioni aggiuntive, utili a spiegare anche i risultati ricavati con le altre tipologie di dati climatici e riportate successivamente.

Le temperature di agosto, dell'anno climatico 2080, sono state utilizzate per progettare lo slot orario di attivazione della ventilazione meccanica, infatti, nel grafico precedente, a differenza degli altri anni, risulta evidente che nel mese in esame si ha un lieve miglioramento adottando una ventilazione notturna meccanica.

Questo accade perché, i controlli che si hanno sulle temperature esterne e interne, in questo caso particolare, fanno sì che l'attivazione di ventilazione naturale e meccanica coincidano e, di conseguenza, risulta migliore la strategia che apporta all'interno un maggior numero di ricambi d'aria: la ventilazione meccanica.

Di seguito sono stati riportati i consumi elettrici annuali riferiti alle tre tipologie di dati climatici.

Anno	Senza ventilazione notturna	Con ventilazione notturna		
		Ventilazione naturale	Ventilazione meccanica	
	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	$[{ m kWh/m^2}]$	$[{ m kWh/m^2}]$	
CTI	31.2	12.6	20.6	
2050	32.7	14.9	22.2	
2080	42.7	28.1	32.7	

Tabella 9-84: Consumo elettrico specifico annuale per il raffrescamento in assenza e presenza di ventilazione notturna

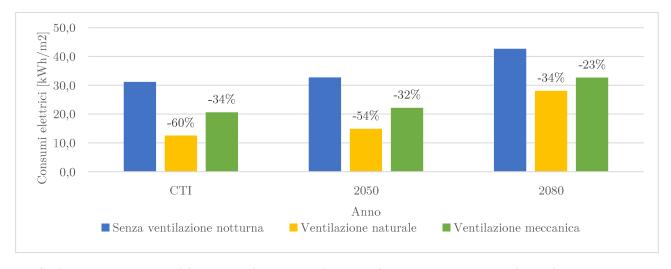


Grafico 9-60: Variazione del consumo elettrico specifico annuale in assenza e presenza di ventilazione notturna

Dai valori sopra riportati risulta evidente come, per tutte e tre le tipologie di anni, la ventilazione naturale sia quella più efficiente, tuttavia, esistono delle differenze fra un anno e l'altro, messe in evidenza nel seguente grafico, contenente sull'asse delle ordinate la riduzione in percentuale dei consumi elettrici relativi a raffrescamento.

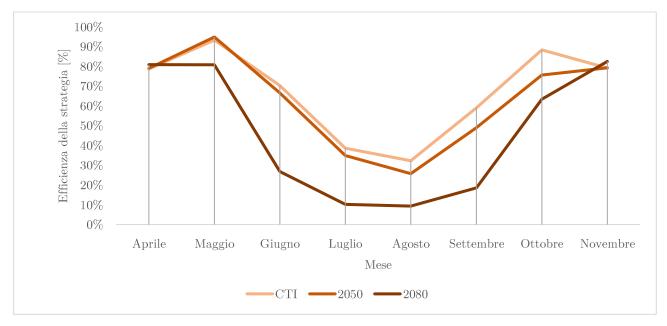


Grafico 9-61: Efficienza della ventilazione notturna meccanica nei tre anni metereologici

Il grafico sopra riportato, in linea generale, rispecchia i risultati previsti a livello teorico: un rendimento peggiore per l'anno climatico 2080, per il quale è previsto un brusco aumento delle temperature.

Inoltre, è possibile notare, che tra l'anno climatico fornito dal CTI e il 2050, fino al mese di luglio, non vi sono differenze sostanziali in termini di risparmio energetico; al contrario, nei restanti mesi, le due funzioni assumono valori alquanto differenti.

Tale andamento trova dei riscontri nei valori delle temperature medi mensili diagrammate successivamente.

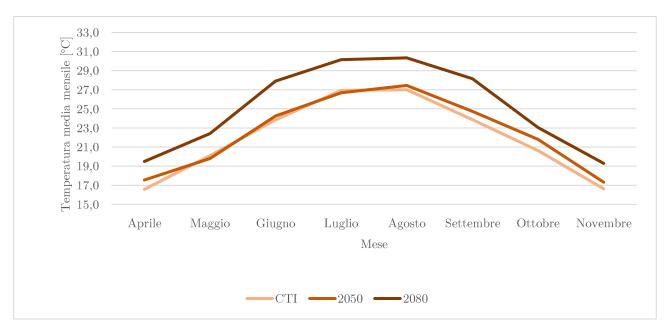


Grafico 9-62: Andamento delle temperature medie mensili nei tre anni metereologici

## 9.7.4 Confronti

Nella seguente tabella sono stati riportati le riduzioni in percentuale del consumo previsto per la climatizzazione estiva dell'edificio, a seguito dell'attuazione di una delle tecniche di ventilazione notturna, analizzate nei paragrafi precedenti.

Per ogni città e per ogni anno meteorologico, sono stati riportati i valori relativi alla strategia che, in seguito alle analisi riportate nei paragrafi precedenti, si è rilevata più efficace: le celle colorate di giallo si riferiscono a un risparmio energetico legato all'attuazione di ventilazione naturale, al contrario, quelle verdi, mettono in evidenza la riduzione del consumo a seguito di una ventilazione meccanica degli ambienti.

	Milano	Roma	Palermo
CTI	-70%	-5 <mark>8%</mark>	-60%
2050	-72%	-5 <mark>5%</mark>	-5 <mark>4%</mark>
2080	-81%	-35%	-34%

Tabella 9-85: Riduzione massima del consumo elettrico annuale per il raffrescamento con ventilazione notturna

La tabella mette ben in evidenza, quanto la zona climatica dell'edificio, e i dati climatici, possano influire sulla scelta di una strategia di ventilazione notturna piuttosto che di un'altra.

Nel presente paragrafo sono state riportate alcune considerazioni riguardanti le differenze che intercorrono tra una città e l'altra, in aggiunta a quanto riportato nelle sezioni relative alle tre località analizzate

La zona climatica E, a cui appartiene la città di Milano, è caratterizzata da temperature più basse, di conseguenza l'edificio si surriscalda di meno durante la giornata e, allo stesso tempo, i controlli esistenti sulla temperatura esterna e interna, rendono possibile il funzionamento della ventilazione notturna per un numero di ore più ampio rispetto alle altre città.

Ciò significa che a Milano, durante tutta la notte, attraverso un impianto meccanico, si riescono a garantire i 5 ricambi d'aria che, in funzione del mese esaminato, portano a consumare la stessa quantità per ogni anno: di conseguenza nell'anno con maggior consumo si ottiene il maggior risparmio energetico (vedi 9.7.1).

Inoltre, è utile precisare che, come mostrano i grafici contenuti nei paragrafi precedenti, nei mesi non pienamente estivi, si ottiene per ogni città e per ogni anno, un risparmio maggiore attraverso una ventilazione di tipo naturale.

Pertanto, i mesi a fare la differenza nella scelta della strategia più efficiente, sono quelli estivi, per i quali si può notare che, spostandosi da Nord a Sud, si ha una riduzione dell'efficienza della ventilazione meccanica (progettata come descritto precedentemente), mentre, attraverso una ventilazione naturale, è possibile ottenere un maggior risparmio energetico.

Infatti, i risultati mettono in evidenza come a Milano, per tutti gli anni, sia da prediligere una ventilazione di tipo meccanico; a Roma la scelta risulta dipendente dall'anno meteorologico considerato; e infine, a Palermo risulta più efficace la ventilazione naturale.

Questo accade perché, nelle aree più calde, e quindi bisognose di un maggior numero di ore di funzionamento della ventilazione notturna, i ricambi d'aria forniti attraverso un impianto meccanico, non sono adeguati a raffrescare sufficientemente la massa esposta dell'edificio.

Di conseguenza, per ottenere in una città come quella di Palermo, una riduzione del consumo di raffrescamento elevata come nel caso di Milano, andrebbero aumentati i ricambi d'aria, tuttavia, nella presente tesi, è stato scelto di adottarne sempre 5, in modo da poter effettuare dei confronti immediati tra diverse zone climatiche e differenti anni metereologici, e evidenziare quali siano i parametri che influiscono maggiormente sull'efficacia della strategia

Aumentando il numero di ricambi d'aria, o il numero di ore di funzionamento dell'impianto, porterebbe a un aumento dei costi dei ventilatori, e quindi a una riduzione dell'efficienza della strategia che andrebbe studiata caso per caso.

Allo stesso tempo, la ventilazione naturale, permette un ingresso di fluido freddo all'interno degli ambienti per tutte le ore in cui non vi sono occupanti, e senza incremento di costi.

Inoltre, il maggior risparmio energetico, ottenuto grazie alla ventilazione notturna naturale nella città di Palermo, è legato anche alla velocità del vento, che risulta molto più elevata rispetto alle altre località.

In conclusione, è importante sottolineare che, quanto è stato appena affermato, è strettamente legato alle caratteristiche delle due strategie analizzate, scelte in fase di progettazione e riportate nei paragrafi relativi a ogni località.

Pertanto, i risultati ottenuti, non hanno validità assoluta, ma mettono ben in evidenza quali sono i parametri che regolano l'efficacia della ventilazione notturna.

Nel caso in esame, le scelte progettuali attuate nei riguardi della ventilazione naturale, non hanno ampi margini decisionali in un ambiente come gli uffici, in quanto è bastato garantire l'apertura degli infissi esistenti, in tutte le ore in cui nell'edificio non ci sono occupanti.

Al contrario, nel caso di ventilazione meccanica, assumono fondamentale importanza le ore di funzionamento dell'impianto, e il numero di ricambi d'aria che questo riesce a garantire; pertanto, i risparmi energetici ottenuti attraverso la strategia in esame, potrebbero variare notevolmente in funzione di tali parametri.

# 10. Conclusioni e sviluppi futuri

Lo scopo della presente tesi è stato quello di valutare gli effetti del cambiamento climatico sulla prestazione energetica degli edifici e di determinare l'entità dei benefici ottenibili in seguito all'applicazione di una strategia di raffrescamento resiliente: la ventilazione notturna.

Per eseguire questo tipo di analisi sono state effettuate simulazioni di tipo dinamico su due edifici esistenti, uno ad uso residenziale e uno ad uso uffici, trasformati in edifici ad energia quasi zero, tramite un intervento di ristrutturazione importante di primo livello. Inoltre, sono state selezionate tre località appartenenti a diverse zone climatiche italiane: Milano, Roma e Palermo e la prestazione energetica di tali edifici è stata valutata per i periodi futuri di medio (2050) e lungo termine (2080), confrontandola poi con quella presente.

In prima fase, dallo studio compiuto, è emersa la necessità di ricorrere alla trasformazione degli edifici esistenti in edifici a energia quasi zero, effettuando interventi di riqualificazione energetica, per arrivare a disporre di un parco immobiliare decarbonizzato e ad alta efficienza energetica<sup>12</sup>.

Secondariamente, a seguito dei risultati ottenuti per le tre città esaminate e per gli anni metereologici tipici futuri, è stato dimostrato quale sia l'impatto del cambiamento climatico sulla prestazione energetica di entrambi gli edifici.

È stato riscontrato che, gli edifici realizzati secondo i requisiti nZEB previsti dalla normativa vigente<sup>13</sup>, saranno comunque soggetti ad un notevole incremento del fabbisogno di raffrescamento, il cui aumento dipenderà fortemente dall'anno e dalla zona climatica considerata.

-

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Direttiva 2018/844/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 30 maggio 2018

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Decreto interministeriale 26 giugno 2015

Ad esempio, il fabbisogno termico annuale per il raffrescamento dell'edificio residenziale, potrebbe aumentare del 3% nel 2050 a Milano, mentre tale valore potrebbe raggiungere una crescita dell'87%, a Roma, nel 2080.

Allo stesso modo, il fabbisogno termico annuale per il raffrescamento dell'edificio ad uso uffici, potrebbe aumentare del 3% nel 2050 a Palermo, mentre tale valore potrebbe raggiungere una crescita del 60%, a Roma, nel 2080.

Anno	UM	Fabbisogno di riscaldamento					
		Milano		Roma		Palermo	
		Residenziale	Uffici	Residenziale	Uffici	Residenziale	Uffici
CTI	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	34.10	17.20	23.90	7.70	15.40	3.50
2050	[%]	-8%	-17%	10%	-21%	-19%	-51%
2080	[%]	-28%	-44%	-27%	-52%	-73%	-91%
Anno	UM	Fabbisogno di raffrescamento					
		Milano		Roma		Palermo	
		Residenziale	Uffici	Residenziale	Uffici	Residenziale	Uffici
CTI	$[\mathrm{kWh/m^2}]$	-8.00	-18.20	-8.30	-24.60	-12.90	-28.20
2050	[%]	3%	13%	-15%	8%	-18%	3%
2080	[%]	57%	58%	87%	60%	72%	51%

Tabella 10-1: Effetti del cambiamento climatico sui due edifici caso studio

Pertanto, i risultati ottenuti, evidenziano l'esigenza di considerare i possibili scenari meteorologici futuri e di prevedere in fase di progettazione misure che permettano agli edifici di adattarsi a questi mutamenti: questo conduce allo sviluppo e all'applicazione di strategie volte a incrementare la resilienza del fabbricato.

A tale proposito, in relazione alle proposte di strategie di raffrescamento resiliente degli edifici suggerite dal progetto di ricerca internazionale EBC Annex 80, è stato scelto di applicare e di valutare gli effetti, sui due edifici caso studio, della tecnica di ventilazione notturna.

Per farlo, è stata esaminata la strategia di ventilazione notturna, sia naturale che meccanica, prendendo in considerazione le tre zone climatiche, i tre differenti anni metereologici tipici, diversi parametri legati esclusivamente alle strategie e mantenendo invariate le caratteristiche degli edifici.

I risultati ottenuti, e riportati nei capitoli di pertinenza, presentano per entrambi gli edifici un notevole beneficio ottenibile sulla riduzione dei consumi elettrici, in seguito all'applicazione di tale strategia.

Tuttavia, emerge quanto l'effetto della ventilazione notturna dipenda dalla tipologia di edificio, dalla zona climatica presa in considerazione e, allo stesso tempo, dai dati metereologici utilizzati.

Tali risultati sono strettamente legati alle scelte progettuali adottate: pertanto, è necessario specificare, che la progettazione della ventilazione naturale non ha lasciato ampi margini decisionali, in quanto, apportando un beneficio gratuito agli edifici, è stata attivata per tutta la notte, adoperando gli opportuni controlli sulle temperature interne ed esterne.

Al contrario, la ventilazione meccanica risulta strettamente legata a scelte progettuali come il numero di ricambi d'aria e l'orario di funzionamento, in quanto comportano, da un lato, il costo aggiuntivo dovuto ai ventilatori, dall'altro, la riduzione del consumo previsto per il raffrescamento.

Alla luce delle precedenti considerazioni, è emerso che nel caso dell'edificio residenziale la strategia più efficiente, per tutte le zone climatiche e per tutti gli anni metereologici tipici adottati, sia quella della ventilazione naturale; mentre, per gli uffici, questa risulta essere la soluzione migliore solamente per la città di Palermo per ogni anno meteorologico tipico e di Roma per l'anno 2080.

La necessità di usufruire di una ventilazione di tipo meccanico all'interno di un edificio ad uso uffici, è probabilmente legata alla presenza di apporti interni più elevati rispetto al caso del residenziale, responsabili del maggior surriscaldamento che subisce l'edificio durante le ore diurne.

Tale surriscaldamento, unitamente ad una bassa inerzia termica specifica (74 kJ/K per gli uffici e 149 kJ/K per il residenziale), fanno sì che si possano ottenere migliori benefici attraverso un numero di ricambi d'aria tale da richiedere l'ausilio di un impianto meccanico.

Infine, considerata la necessità dei due fabbricati di sfruttare tipologie di ventilazione notturna diverse, risulta interessante analizzare le differenze della risposta dei due edifici alla stessa strategia di ventilazione, quella naturale.

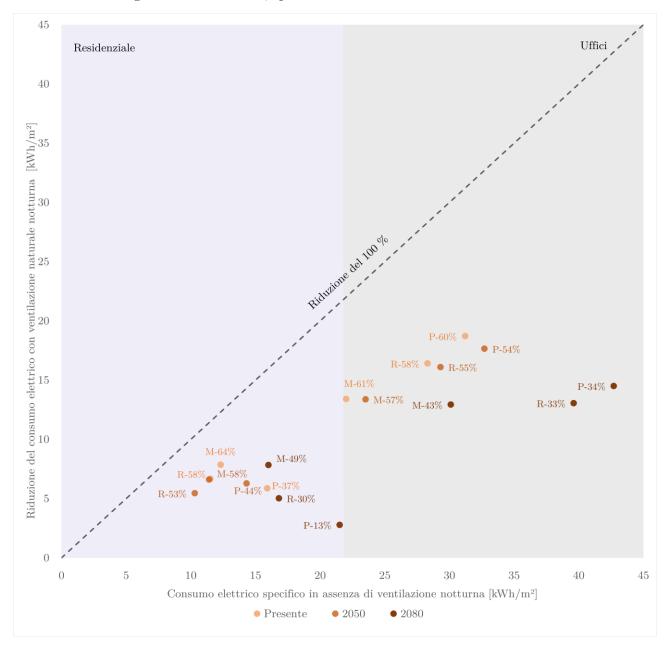


Grafico 10-1: Riduzione del consumo elettrico del carico di raffrescamento tramite ventilazione notturna naturale

I due edifici, grazie all'adozione della ventilazione notturna naturale, riescono a risparmiare, in rapporto al consumo previsto per la climatizzazione estiva in assenza di ventilazione notturna, la stessa percentuale di elettricità, per le città di Milano e Roma. Questi risultati possono essere giustificati dal fatto che, nonostante i due edifici abbiano caratteristiche completamente diverse (ad esempio la capacità termica interna specifica e gli apporti interni), è probabile che la quantità di aperture presenti nei due edifici sia proporzionata alla richiesta di raffrescamento che li caratterizza; tuttavia, per la città di Palermo, le differenze risultano più evidenti, in quanto, per gli uffici, la strategia risulta molto più efficace.

Tale differenza può essere spiegata effettuando delle considerazioni sul numero di aperture dell'edificio residenziale che, tenendo conto delle temperature elevate che caratterizzano la città di Palermo, potrebbero non essere sufficienti a garantire le prestazioni ottenute per le altre città; al contrario, il numero di aperture appartenenti all'edificio ad uso uffici, è tale da assicurare un numero di ricambi d'aria adeguato ad ottenere un considerevole risparmio anche per la zona climatica più calda.

In conclusione, è utile sottolineare che i risultati ottenuti non hanno validità assoluta, ma sono strettamente correlati alle tipologie di edifici analizzati e alle scelte progettuali adottate, relative alla tecnica di ventilazione notturna; nonostante ciò, si rivelano fondamentali per conoscere quali siano i parametri su cui intervenire, in relazione alla zona climatica e all'anno meteorologico tipico considerato, al fine di aumentare la prestazione di tale strategia.

## Lista delle tabelle

Tabella 3-1: Trasmittanza termica U delle strutture opache verticali, verso l'esterno, gli
ambienti non climatizzati o contro terra
Tabella 3-2: Trasmittanza termica U delle strutture opache orizzontali o inclinate di
copertura, verso l'esterno e gli ambienti non climatizzati
Tabella 3-3: Trasmittanza termica U delle opache orizzontali di pavimento, verso l'esterno,
gli ambienti non climatizzati o contro terra
Tabella 3-4: Trasmittanza termica U delle chiusure tecniche trasparenti e opache e dei
cassonetti, comprensivi degli infissi, verso l'esterno e verso ambienti non climatizzati 8
Tabella 3-5: Trasmittanza termica U delle strutture opache verticali e orizzontali di
separazione tra edifici o unità immobiliari confinanti
Tabella 3-6: Valore del fattore di trasmissione solare totale ggl+sh per componenti
finestrati con orientamento da Est a Ovest passando per Sud
Tabella 3-7: Valore massimo ammissibile del coefficiente globale di scambio termico H'T
$[{ m W/m^2 K}]$
Tabella 3-8: Valore massimo ammissibile del rapporto tra area solare equivalente estiva
dei componenti finestrati e l'area della superficie utile Asol, est/Asup utile [-]10
Tabella 3-9:Efficienze medie ηu dei sottosistemi di utilizzazione dell'edificio di riferimento
per i servizi di H, C, W11
Tabella 3-10: Efficienze medie ηgn dei sottosistemi di generazione dell'edificio di
riferimento per la produzione di energia termica per i servizi di H, C, W e per la produzione
di energia elettrica in situ
Tabella 3-11: Fattori di conversione in energia primaria dei vettori energetici
Tabella 4-1: Valori medi di temperatura per la città di Milano, per gli anni metereologici
tipici CTI 2050 e 2080
Tabella 4-2: Valori medi di temperatura per la città di Roma, per gli anni metereologici
7 1 0

Tabella 4-3: Valori medi di temperatura per la città di Palermo, per gli anni metereologic
tipici CTI 2050 e 2080
Tabella 4-4: Valori medi di irradianza globale su piano orizzontale per la città di Milano
per gli anni metereologici tipici CTI 2050 e 20801
Tabella 4-5: Valori medi di irradianza globale su piano orizzontale per la città di Roma
per gli anni metereologici tipici CTI 2050 e 20801
Tabella 4-6: Valori medi di irradianza globale su piano orizzontale per la città di Palermo
per gli anni metereologici tipici CTI 2050 e 208020
Tabella 6-1: Periodo di accensione degli impianti di riscaldamento (D.P.R. 26/08/1993
Tabella 8-1: Dati geometrici relativi al volume riscaldato
Tabella 8-2: Caratteristiche dei componenti opachi verticali
Tabella 8-3: Caratteristiche dei componenti opachi orizzontali
Tabella 8-4: Caratteristiche dei componenti trasparenti
Tabella 8-5: Parametri solari dei componenti trasparenti
Tabella 8-6: Valori di trasmittanza termica lineare dei ponti termici4
Tabella 8-7: Calcolo del coefficiente medio globale di scambio termico in assenza di pont
termici4
Tabella 8-8: Calcolo del coefficiente medio globale di scambio termico in presenza di pont
termici4
Tabella 8-9: Calcolo dell'area solare equivalente estiva per la città di Milano4
Tabella 8-10: Calcolo dell'area solare equivalente estiva per la città di Roma4
Tabella 8-11: Calcolo dell'area solare equivalente estiva per la città di Palermo4
Tabella 8-12: Profilo di occupazione4
Tabella 8-13: Apporti interni4
Tabella 8-14: Portata minima di ventilazione naturale per persona4
Tabella 8-15: Parametri di infiltrazione

Tabella 8-16: Calcolo del volume di acqua calda sanitaria (UNI/TS 11300-2:2014)4
Tabella 8-17: Temperature di riferimento5
Tabella 8-18: Profilo di funzionamento dell'acqua calda sanitaria5
Tabella 8-19: Temperature di setpoint di riscaldamento e di raffrescamento5
Tabella 8-20: Fabbisogno termico mensile in assenza e presenza di ponti termici5
Tabella 8-21: Incidenza dei ponti termici sul fabbisogno termico annuale5
Tabella 8-22: Fabbisogno termico mensile in assenza e presenza di ponti termici5
Tabella 8-23: Incidenza dei ponti termici sul fabbisogno termico annuale5
Tabella 8-24: Fabbisogno termico mensile in assenza e presenza di ponti termici5
Tabella 8-25: Incidenza dei ponti termici sul fabbisogno termico annuale5
Tabella 8-26: Fabbisogno termico annuale di riscaldamento e raffrescamento in assenza d
ponti termici5
Tabella 8-27: Fabbisogno termico specifico annuale di riscaldamento e raffrescamento i
assenza di ponti termici5
Tabella 8-28: Fabbisogno termico specifico annuale di riscaldamento e di raffrescament
in presenza di ponti termici5
Tabella 8-29: Parametri di infiltrazione6
Tabella 8-30: Valori di trasmittanza termica dell'edificio di riferimento per la zon
climatica E6
Tabella 8-31: Caratteristiche dei componenti opachi verticali
Tabella 8-32: Caratteristiche dei componenti opachi orizzontali6
Tabella 8-33: Caratteristiche dei componenti trasparenti
Tabella 8-34: Parametri solari dei componenti trasparenti
Tabella 8-35: Valori di trasmittanza termica lineare dei ponti termici
Tabella 8-36: Verifica del coefficiente medio globale di scambio termico6
Tabella 8-37: Verifica dell'area solare equivalente specifica
Tabella 8-38: Fabbisogno termico mensile post ristrutturazione

Tabella 8-39: Valori di trasmittanza	termica dell'edificio di riferimento per	· la zona
climatica D		68
Tabella 8-40: Caratteristiche dei compo	onenti opachi verticali	69
Tabella 8-41: Caratteristiche dei compo	onenti opachi orizzontali	69
Tabella 8-42: Caratteristiche dei compo	onenti trasparenti	70
Tabella 8-43: Parametri solari dei comp	ponenti trasparenti	70
Tabella 8-44: Valori di trasmittanza ter	rmica lineare dei ponti termici	71
Tabella 8-45: Verifica del coefficiente m	nedio globale di scambio termico	71
Tabella 8-46: Verifica dell'area solare e	quivalente estiva	72
Tabella 8-47: Fabbisogno termico mens	sile post ristrutturazione	73
Tabella 8-48: Valori di trasmittanza	termica dell'edificio di riferimento per	· la zona
climatica B		74
Tabella 8-49: Caratteristiche dei compo	onenti opachi verticali	74
Tabella 8-50: Caratteristiche dei compo	onenti opachi orizzontali	75
Tabella 8-51: Caratteristiche dei compo	onenti trasparenti	76
Tabella 8-52: Parametri solari dei comp	ponenti trasparenti	76
Tabella 8-53: Valori di trasmittanza ter	rmica lineare dei ponti termici	77
Tabella 8-54: Verifica del coefficiente m	nedio globale di scambio termico	77
Tabella 8-55: Verifica dell'area solare e	quivalente estiva specifica	77
Tabella 8-56: Fabbisogno termico mens	sile post ristrutturazione	78
Tabella 8-57: Fabbisogno termico annu	ale di riscaldamento e raffrescamento	79
Tabella 8-58: Temperature di funzionar	mento della pompa di calore	82
Tabella 8-59: Temperature di funzionar	mento della pompa di calore del chiller	82
Tabella 8-60: Temperature di funzionar	mento dei ventilconvettori	83
Tabella 8-61: Periodo di accensione deg	gli impianti di riscaldamento (D.P.R. 26/	(08/1993)
		83
Tabella 8-62: Calcolo potenza elettrica	obbligatoria	84

Tabella 8-63: Dati tecnici dei pannelli fotovoltaici	84
Γabella 8-64: Energia richiesta dalla pompa di calore per il riscaldamento	88
Γabella 8-65: Energia richiesta dalla pompa di calore per l'acqua calda sanitaria	89
Γabella 8-66: Energia richiesta dalla pompa di calore per il raffrescamento	89
Γabella 8-67: Calcolo degli indici di prestazione energetica	89
Γabella 8-68: Energia richiesta dalla pompa di calore per il riscaldamento	92
Γabella 8-69: Energia richiesta dalla pompa di calore per l'acqua calda sanitaria	92
Γabella 8-70: Energia richiesta dalla pompa di calore per il raffrescamento	93
Γabella 8-71: Calcolo degli indici di prestazione energetica	93
Γabella 8-72: Energia richiesta dalla pompa di calore per il riscaldamento	95
Γabella 8-73: Energia richiesta dalla pompa di calore per l'acqua calda sanitaria	96
Γabella 8-74: Energia richiesta dalla pompa di calore per il raffrescamento	96
Γabella 8-75: Calcolo degli indici di prestazione energetica	96
	01
$\Gamma$ abella 8-77: Energia richiesta specifica mensile per i tre anni metereologici tipici1	06
	07
$\Gamma$ abella 8-79: Energia richiesta specifica mensile per i tre anni metereologici tipici1	13
$\Gamma$ abella 8-80: Fabbisogno termico specifico mensile per i tre anni metereologici tipici . 1	14
Γabella 8-81: Energia richiesta specifica mensile per i tre anni metereologici tipici1	18
Γabella 8-82: Fabbisogno termico specifico annuale per i tre anni metereologici tipici.1	20
Γabella 8-83: Consumo elettrico pompa di calore e ventilatori      1	24
Γabella 8-84: Consumo elettrico pompa di calore e ventilatori      1	25
Γabella 8-85: Consumo elettrico pompa di calore e ventilatori      1	26
Γabella 8-86: Consumo elettrico specifico annuale per il raffrescamento in assenza	e
presenza di ventilazione notturna1	27
Γabella 8-87: Consumo elettrico pompa di calore e ventilatori      1	30
Γabella 8-88: Consumo elettrico pompa di calore e ventilatori	32

Tabella 8-89: Consumo elettrico specifico annuale per il raffrescamento in asse	nza e
presenza di ventilazione notturna	133
Tabella 8-90: Consumo elettrico pompa di calore e ventilatori	138
Tabella 8-91: Consumo elettrico pompa di calore e ventilatori	139
Tabella 8-92: Consumo elettrico pompa di calore e ventilatori	141
Tabella 8-93: Consumo elettrico specifico annuale per il raffrescamento in asse	enza e
presenza di ventilazione notturna	141
Tabella 8-94: Riduzione massima del consumo elettrico annuale per il raffrescament	to con
ventilazione notturna	145
Tabella 9-1: Dati geometrici relativi al volume riscaldato	148
Tabella 9-2: Caratteristiche dei componenti opachi verticali	151
Tabella 9-3: Caratteristiche dei componenti opachi orizzontali	152
Tabella 9-4: Caratteristiche dei componenti trasparenti	153
Tabella 9-5: Parametri solari dei componenti trasparenti	153
Tabella 9-6: Valori di trasmittanza termica lineare dei ponti termici	154
Tabella 9-7: Calcolo del coefficiente medio globale di scambio termico in assenza di	ponti
termici	154
Tabella 9-8: Calcolo del coefficiente medio globale di scambio termico in presenza di	ponti
termici	154
Tabella 9-9: Calcolo dell'area solare equivalente estiva per la città di Milano	155
Tabella 9-10: Calcolo dell'area solare equivalente estiva per la città di Roma	155
Tabella 9-11: Calcolo dell'area solare equivalente estiva per la città di Palermo	155
Tabella 9-12: Numero di occupanti	156
Tabella 9-13: Profilo di occupazione	156
Tabella 9-14: Apporti interni	157
Tabella 9-15: Numeri di ricambi d'aria per la qualità dell'aria	158
Tabella 9-16: Temperature di setpoint di riscaldamento e di raffrescamento	159

Tabella 9-17: Fabbisogno termici mensili in assenza e presenza di ponti termici160
Tabella 9-18: Incidenza dei ponti termici sul fabbisogno termico annuale162
Tabella 9-19: Fabbisogno termici mensili in assenza e presenza di ponti termici162
Tabella 9-20: Incidenza dei ponti termici sul fabbisogno termico annuale164
Tabella 9-21: Fabbisogno termici mensili in assenza e presenza di ponti termici164
Tabella 9-22: Incidenza dei ponti termici sul fabbisogno termico annuale166
Tabella 9-23: Fabbisogno termico specifico annuale di riscaldamento e di raffrescamento
in assenza di ponti termici166
Tabella 9-24: Fabbisogno termico specifico annuale di riscaldamento e di raffrescamento
in presenza di ponti termici167
Tabella 9-25: Valori degli apporti interni dopo l'intervento di ristrutturazione170
Tabella 9-26: Calcolo del numero di dispositivi luminosi
Tabella 9-27: Densità di potenza installata per l'illuminazione172
Tabella 9-28: Valori di trasmittanza termica dell'edificio di riferimento per la zona
climatica E
Tabella 9-29: Caratteristiche dei componenti opachi verticali
Tabella 9-30: Caratteristiche dei componenti opachi orizzontali174
Tabella 9-31: Caratteristiche dei componenti trasparenti
Tabella 9-32: Parametri solari dei componenti trasparenti
Tabella 9-33: Valori di trasmittanza termica lineare dei ponti termici175
Tabella 9-34: Verifica del coefficiente medio globale di scambio termico in assenza di ponti
termici
Tabella 9-35: Verifica dell'area solare equivalente estiva per la città di Milano176
Tabella 9-36: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento
post ristrutturazione177
Tabella 9-37: Valori di trasmittanza termica dell'edificio di riferimento per la zona
climatica D

Tabella 9-38: Caratteristiche dei componenti opachi verticali
Tabella 9-39: Caratteristiche dei componenti opachi orizzontali179
Tabella 9-40: Caratteristiche dei componenti trasparenti
Tabella 9-41: Parametri solari dei componenti trasparenti
Tabella 9-42: Valori di trasmittanza termica lineare dei ponti termici180
Tabella 9-43: Verifica del coefficiente medio globale di scambio termico in assenza di pont
termici
Tabella 9-44: Verifica dell'area solare equivalente estiva per la città di Milano181
Tabella 9-45: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento
post ristrutturazione
Tabella 9-46: Valori di trasmittanza termica dell'edificio di riferimento per la zona
climatica B183
Tabella 9-47: Caratteristiche dei componenti opachi verticali
Tabella 9-48: Caratteristiche dei componenti opachi orizzontali
Tabella 9-49: Caratteristiche dei componenti trasparenti
Tabella 9-50: Parametri solari dei componenti trasparenti
Tabella 9-51: Valori di trasmittanza termica lineare dei ponti termici
Tabella 9-52: Verifica del coefficiente medio globale di scambio termico in assenza di pont
termici
Tabella 9-53: Verifica dell'area solare equivalente estiva per la città di Milano186
Tabella 9-54: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento
post ristrutturazione
Tabella 9-55: Fabbisogno termico annuale di riscaldamento e raffrescamento
Tabella 9-56: Temperature di funzionamento della pompa di calore190
Tabella 9-57: Temperature di funzionamento del Chiller190
Tabella 9-58: Temperature di funzionamento dei ventilconvettori

Tabella 9-59:	Periodo di accensione degli impianti di riscaldamento (D.P.R. 26/08/1993)
Tabella 9-60:	Calcolo potenza elettrica obbligatoria191
Tabella 9-61:	Dati tecnici dei pannelli fotovoltaici
Tabella 9-62:	Energia richiesta dalla pompa di calore per il riscaldamento196
Tabella 9-63:	Energia richiesta dalla pompa di calore per il raffrescamento196
Tabella 9-64:	Energia elettrica per l'illuminazione
Tabella 9-65:	Calcolo degli indici di prestazione energetica197
Tabella 9-66:	Energia richiesta dalla pompa di calore per il riscaldamento199
Tabella 9-67:	Energia richiesta dalla pompa di calore per il raffrescamento199
Tabella 9-68:	Energia elettrica per l'illuminazione
Tabella 9-69:	Calcolo degli indici di prestazione energetica200
Tabella 9-70:	Energia richiesta dalla pompa di calore per il riscaldamento
Tabella 9-71:	Energia richiesta dalla pompa di calore per il raffrescamento202
Tabella 9-72:	Energia elettrica per l'illuminazione
Tabella 9-73:	Calcolo degli indici di prestazione energetica
Tabella 9-74:	Fabbisogno termico specifico mensile per i tre anni metereologici tipici .207
Tabella 9-75:	Energia richiesta specifica mensile per i tra anni metereologici tipici211
Tabella 9-76	: Energia richiesta specifica mensile per il riscaldamento per i tra anni
metereologici	tipici211
Tabella 9-77:	Fabbisogno termico specifico mensile per i tre anni metereologici tipici .212
Tabella 9-78:	Energia richiesta specifica mensile per i tra anni metereologici tipici215
Tabella 9-79:	Fabbisogno termico specifico mensile per i tre anni metereologici tipici .217
Tabella 9-80:	Energia richiesta specifica mensile per i tra anni metereologici tipici219
Tabella 9-81:	Fabbisogno termico specifico annuale per i tre anni metereologici tipici. 221
Tabella 9-82:	: Consumo elettrico specifico annuale per il raffrescamento in assenza e
presenza di v	entilazione notturna226

Tabella 9-83: Consumo elettrico specifico annuale per il raffrescamento in assenza e
presenza di ventilazione notturna
Tabella 9-84: Consumo elettrico specifico annuale per il raffrescamento in assenza e
presenza di ventilazione notturna
Tabella 9-85: Riduzione massima del consumo elettrico annuale per il raffrescamento con
ventilazione notturna
Tabella 10-1: Effetti del cambiamento climatico sui due edifici caso studio245

## Lista dei grafici

Grafico 8-1: Andamento giornaliero del fattore di occupazione46
Grafico 8-2: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e raffrescamento in
assenza di ponti termici53
Grafico 8-3: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e raffrescamento in
presenza di ponti termici53
Grafico 8-4: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e raffrescamento in
assenza di ponti termici55
Grafico 8-5: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e raffrescamento in
assenza di ponti termici
Grafico 8-6: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e raffrescamento in
assenza di ponti termici57
Grafico 8-7: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e raffrescamento in
presenza di ponti termici57
Grafico 8-8: Fabbisogno termico specifico annuale di riscaldamento e di raffrescamento in
presenza di ponti termici
Grafico 8-9: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento per
lo stato di fatto67
Grafico 8-10: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento
post ristrutturazione68
Grafico 8-11: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento
per lo stato di fatto73
Grafico 8-12: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento
post ristrutturazione73
Grafico 8-13: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e raffrescamento per
lo stato di fatto

Grafico 8-14: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e raffrescamento post
ristrutturazione79
Grafico 8-15: Confronto tra i fabbisogni termici specifici annuali di riscaldamento80
Grafico 8-16: Confronto tra i fabbisogni termici specifici annuali di raffrescamento80
Grafico 8-17: Energia specifica richiesta dalla pompa di calore90
Grafico 8-18: Indici di prestazione energetica90
Grafico 8-19; Energia specifica richiesta dalla pompa di calore93
Grafico 8-20: Indici di prestazione energetica94
Grafico 8-21: Energia specifica richiesta dalla pompa di calore97
Grafico 8-22: Indici di prestazione energetica97
Grafico 8-23: Energia specifica richiesta dalla pompa di calore98
Grafico 8-24: Indici di prestazione per il riscaldamento
Grafico 8-25: Indici di prestazione per l'acqua calda sanitaria99
Grafico 8-26: Indici di prestazione per il raffrescamento
Grafico 8-27: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento per i tre anni
metereologici tipici102
Grafico 8-28: Andamento orario della temperatura nel mese di febbraio103
Grafico 8-29: Andamento orario della temperatura nel mese di febbraio104
Grafico 8-30: Fabbisogno termico specifico mensile di raffrescamento per i tre anni
metereologici tipici104
Grafico 8-31: Andamento orario della temperatura nel mese di agosto105
Grafico 8-32: Energia richiesta specifica mensile per il riscaldamento per i tre anni
metereologici tipici106
Grafico 8-33: Energia richiesta specifica mensile per il raffrescamento per i tre anni
metereologici tipici107
Grafico 8-34: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento per i tre anni
metereologici tipici

Grafico 8-35: Andamento orario della temperatura nel mese di aprile109
Grafico 8-36: Andamento orario della temperatura nel mese di aprile109
Grafico 8-37: Andamento orario della temperatura nel mese di marzo110
Grafico 8-38: Andamento orario dell'irradiazione globale su piano orizzontale nel mese di
marzo111
Grafico 8-39: Fabbisogno termico specifico mensile di raffrescamento per i tre anni
metereologici tipici111
Grafico 8-40: Andamento orario della temperatura nel mese di agosto112
Grafico 8-41: Energia richiesta specifica mensile per il riscaldamento per i tre anni
metereologici tipici113
Grafico 8-42: Energia richiesta specifica mensile per il raffrescamento per i tre anni
metereologici tipici114
Grafico 8-43: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento per i tre anni
metereologici tipici115
Grafico 8-44: Andamento orario del fabbisogno termico di riscaldamento nel mese di
novembre
novembre
Grafico 8-45: Andamento orario della temperatura nel mese di novembre116
Grafico 8-45: Andamento orario della temperatura nel mese di novembre
Grafico 8-45: Andamento orario della temperatura nel mese di novembre116 Grafico 8-46: Andamento orario dell'irradianza globale su piano orizzontale nel mese di novembre
Grafico 8-45: Andamento orario della temperatura nel mese di novembre
Grafico 8-45: Andamento orario della temperatura nel mese di novembre
Grafico 8-45: Andamento orario della temperatura nel mese di novembre
Grafico 8-45: Andamento orario della temperatura nel mese di novembre

Grafico 8-51: Variazione del fabbisogno termico specifico annuale di riscaldamento per i
tre anni metereologici tipici
Grafico 8-52: Variazione del fabbisogno termico specifico annuale di raffrescamento per i
tre anni metereologici tipici
Grafico 8-53: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e
presenza di ventilazione notturna123
Grafico 8-54: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza $\epsilon$
presenza di ventilazione notturna124
Grafico 8-55: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e
presenza di ventilazione notturna125
Grafico 8-56: Variazione del consumo elettrico specifico annuale in assenza e presenza di
ventilazione notturna127
Grafico 8-57: Efficienza della ventilazione notturna naturale per i tre anni metereologici
tipici127
Grafico 8-58: Andamento orario della temperatura nel mese di maggio128
Grafico 8-59: Andamento orario della temperatura nel mese di maggio129
Grafico 8-60: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e
Grafico 8-60: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e presenza di ventilazione notturna
presenza di ventilazione notturna130
presenza di ventilazione notturna

Grafico 8-66: Andamento orario della temperatura nel mese di giugno136
Grafico 8-67: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e
presenza di ventilazione notturna
Grafico 8-68: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e
presenza di ventilazione notturna
Grafico 8-69: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e
presenza di ventilazione notturna
Grafico 8-70: Variazione del consumo elettrico specifico annuale in assenza e presenza di
ventilazione notturna
Grafico 8-71: Efficienza della ventilazione notturna naturale per i tre anni metereologici
tipici
Grafico 8-72: Andamento orario della temperatura nel mese di giugno143
Grafico 9-1: Andamento giornaliero del fattore di occupazione157
Grafico 9-2: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento in
assenza di ponti termici
Grafico 9-3: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento in
presenza di ponti termici
Grafico 9-4: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento in
assenza di ponti termici
Grafico 9-5:Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento in
presenza di ponti termici
Grafico 9-6: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento in
assenza di ponti termici
Grafico 9-7: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento in
presenza di ponti termici
Grafico 9-8: Fabbisogno termico specifico annuale di riscaldamento e di raffrescamento in
assenza di ponti termici

Grafico 9-9: Fabbisogno termico specifico annuale di riscaldamento e di raffrescamento in
presenza di ponti termici167
Grafico 9-10: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento
post ristrutturazione177
Grafico 9-11: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento
allo stato di fatto177
Grafico 9-12: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento
post ristrutturazione182
Grafico 9-13: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento
allo stato di fatto182
Grafico 9-14: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento
post ristrutturazione187
Grafico 9-15: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento e di raffrescamento
allo stato di fatto187
Grafico 9-16: Confronto tra i fabbisogni termici specifici annuali di riscaldamento188
Grafico 9-17: Confronto tra i fabbisogni termici specifici annuali di riscaldamento188
Grafico 9-18: Energia specifica richiesta dalla pompa di calore197
Grafico 9-19: Indici di prestazione energetica198
Grafico 9-20: Energia specifica richiesta dalla pompa di calore200
Grafico 9-21: Indici di prestazione energetica
Grafico 9-22: Energia specifica richiesta dalla pompa di calore203
Grafico 9-23: Indici di prestazione energetica
Grafico 9-24: Energia specifica richiesta dalla pompa di calore204
Grafico 9-25: Indici di prestazione energetica per il riscaldamento205
Grafico 9-26: Indici di prestazione energetica per il riscaldamento205
Grafico 9-27: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento per i tre anni
metereologici tipici

Grafico 9-28: Andamento orario della temperatura nel mese di febbraio	.208
Grafico 9-29: Fabbisogno termico specifico mensile di raffrescamento per i tre	anni
metereologici tipici	.209
Grafico 9-30: Andamento orario della temperatura nel mese di maggio	.210
Grafico 9-31: Energia richiesta specifica mensile per il raffrescamento per i tra	anni
metereologici tipici	.211
Grafico 9-32: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento per i tre	anni
metereologici tipici	.212
Grafico 9-33: Fabbisogno termico specifico mensile di raffrescamento per i tre	anni
metereologici tipici	.213
Grafico 9-34: Andamento orario della temperatura nel mese di aprile	.214
Grafico 9-35: Andamento orario della temperatura nel mese di agosto	.214
Grafico 9-36: Energia richiesta specifica mensile per il riscaldamento per i tra	anni
metereologici tipici	.216
Grafico 9-37: Energia richiesta specifica mensile per il raffrescamento per i tra	anni
metereologici tipici	.216
Grafico 9-38: Fabbisogno termico specifico mensile di riscaldamento per i tre	anni
metereologici tipici	.217
Grafico 9-39: Fabbisogno termico specifico mensile di raffrescamento per i tre	anni
metereologici tipici	.218
Grafico 9-40: Andamento orario della temperatura nel mese di agosto	.219
Grafico 9-41: Energia richiesta specifica mensile per il riscaldamento per i tra	anni
metereologici tipici	.220
Grafico 9-42: Energia richiesta specifica mensile per il raffrescamento per i tra	anni
metereologici tipici	.220
Grafico 9-43: Variazione del fabbisogno termico specifico annuale di riscaldamento p	per i
tre anni metereologici tipici	.221

Grafico 9-44: Variazione del fabbisogno termico specifico annuale di riscaldamento per
tre anni metereologici tipici
Grafico 9-45: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e
presenza di ventilazione notturna
Grafico 9-46: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e
presenza di ventilazione notturna
Grafico 9-47: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e
presenza di ventilazione notturna
Grafico 9-48: Variazione del consumo elettrico specifico annuale in assenza e presenza d
ventilazione notturna226
Grafico 9-49: Efficienza della ventilazione notturna meccanica nei tre anni metereologic
Grafico 9-50: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e
presenza di ventilazione notturna
Grafico 9-51: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e
presenza di ventilazione notturna230
Grafico 9-52: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e
presenza di ventilazione notturna231
Grafico 9-53: Variazione del consumo elettrico specifico annuale in assenza e presenza d
ventilazione notturna232
Grafico 9-54: Efficienza della ventilazione notturna naturale nei tre anni metereologic
235
Grafico 9-55: Andamento orario della temperatura nel mese di agosto234
Grafico 9-56: Efficienza della ventilazione notturna meccanica nei tre anni metereologic
235
Grafico 9-57: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e
presenza di ventilazione notturna236
1

Grafico 9-58: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e
presenza di ventilazione notturna
Grafico 9-59: Consumo elettrico specifico mensile per il raffrescamento in assenza e
presenza di ventilazione notturna
Grafico 9-60: Variazione del consumo elettrico specifico annuale in assenza e presenza di
ventilazione notturna238
Grafico 9-61: Efficienza della ventilazione notturna meccanica nei tre anni metereologici
Grafico 9-62: Andamento delle temperature medie mensili nei tre anni metereologici 240
Grafico 10-1: Riduzione del consumo elettrico del carico di raffrescamento tramite
ventilazione notturna naturale247

# Lista delle figure

Figura 6-1: Schema di conversione di corrente continua in corrente altern	ata30
Figura 8-1: Pianta del piano seminterrato	36
Figura 8-2: Pianta del piano terra	37
Figura 8-3: Pianta del piano sottotetto	37
Figura 8-4: Modello di Revit	38
Figura 8-5: Modello di Design Builder	38
Figura 8-6: Restituzione grafica del modello di Design Builder	41
Figura 8-7: Schema idraulico dell'impianto	81
Figura 8-8: Modellazione dei pannelli fotovoltaici	84
Figura 9-1: Foto dell'edificio ad uso uffici	147
Figura 9-2: Pianta del piano seminterrato	148
Figura 9-3: Pianta del piano terra	148
Figura 9-4: Pianta del piano tipo	148
Figura 9-5: Modello di Revit	149
Figura 9-6: Modello di Design Builder	149
Figura 9-7: Estratto della pianta del piano tipo	150
Figura 9-8: "Zona" con sottosuperfici	150
Figura 9-9: Restituzione grafica del modello di Design Builder	152
Figura 9-10: Schema idraulico dell'impianto	189
Figura 9-11: Modellazione dei pannelli fotovoltaici	192

### Bibliografia

#### <u>Legislazione</u>

Parlamento Europeo e il Consiglio dell'Unione Europea, Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia, (2010). Testo coordinato con Direttiva 2018/844/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 30 maggio 2018.

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del mare, Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti, Ministero per la semplificazione e la pubblica amministrazione, Decreto interministeriale 26 giugno 2015 - Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici, Gazzetta Ufficiale (2015).

Parlamento Italiano, Decreto Legislativo 3 marzo 2011, n. 28. Attuazione Della Direttiva 2009/28/CE Sulla Promozione Dell'uso Dell'energia Da Fonti Rinnovabili, Recante Modifica e Successiva Abrogazione Delle Direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE. Gazzetta Ufficiale (2011).

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del mare, Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti, Ministero per la semplificazione e la pubblica amministrazione, 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 ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10.

#### Normativa tecnica

Ente Italiano di Normazione, UNI/TS 11300: 2014. Parte 2. Prestazioni energetiche degli edifici. 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, (2014).

Ente Italiano di Normazione, UNI EN ISO 52016-1:2018. Prestazione energetica degli edifici – Fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne e carichi termici sensibili e latenti - Parte 1. Procedure di calcolo, (2018).

Ente Italiano di Normazione, 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 di una superficie inclinata.

Ente Italiano di Normazione, UNI EN 12464-1:2011. Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1: Posti di lavoro in interni.

Comitato europeo di normazione. FprEN 12831-3:2016. Energy performance of buildings - Method for calculation of the design heat load - Part 3: Domestic hot water systems heat load and characterisation of needs, Module M8-2, M8-3.

#### Articoli scientifici

Reviewed, Peer, Lawrence Berkeley, & Breast Cancer. 2010. "Lawrence Berkeley National Laboratory," no. July: 35–43.

Oropeza-Perez, I., & Alberg Østergaard, P., 2018. Active and Passive Cooling Methods for Dwellings: A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 82.

Sadineni, Suresh B., Srikanth Madala, & Robert F. Boehm. 2011. Passive Building Energy Savings: A Review of Building Envelope Components. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (8): 3617–31.

Ramponi, R., Angelotti, A., & Blocken, B., 2014. Energy Saving Potential of Night Ventilation: Sensitivity to Pressure Coefficients for Different European Climates. Applied Energy 123: 185–95.

Wang, Zhaojun, Lingli Yi, & Fusheng Gao. 2009. Night Ventilation Control Strategies in Office Buildings. Solar Energy 83 (10): 1902–13.

Kolokotroni, M., Aronis, A., 1999. Cooling-energy reduction in airconditioned offices by using night ventilation. Applied Energy 63 (4), 241–253.

Kolokotroni, M., Webb, B.C., Hayes, S.D., 1998. Summer cooling with night ventilation for office buildings in moderate climates. Energy and Buildings 27 (3), 231–237.

Geros, V., Santamouris, M., Tsangrasoulis, A., Guarracino, G., 1999. Experimental evaluation of night ventilation phenomena. Energy and Buildings 29 (2), 141–154.

Seppanen, O., Fisk, William J., & Faulkner, D., 2003. Cost benefit analysis of the night-time ventilative cooling in office building. Lawrence Berkeley National Laboratory.

Capozzoli, A., Gorrino, A., & Corrado, V., A building thermal bridges sensitivity analysis. Applied Energy 107 (2013) 229–243.

#### **Documenti**

Capozzoli, A., Corrado, V., Gorrino, A., & Soma, P., 2011. Atlante nazionale dei ponti termici. Conforme alle UNI EN ISO 14683 e UNI EN ISO 10211, Edizioni EDILCIMA.

Annex 80 IEA EBC. 2018. IEA EBC Annex on Resilient Cooling for Residential and Small Commercial Buildings Draft Annex Text, 1–13.

Rooms, Meeting, Main Meeting Room, Subtask A Meeting Room, Subtask B Meeting Room, Subtask C Meeting Room, Subtask D Meeting Room, Coffee Break, et al. 2020. Invitation 2 Nd Expert Web Meeting IEA EBC Annex 80 – Resilient Cooling, no. April: 21–22.

IEA EBC Annex 80. 2018. Resilient Cooling.

US DoE. Energyplus Engineering Reference. 2018.

US DoE. Energyplus Getting Started. 2018.

US DoE. Energyplus Input Output Reference. 2018.

### Sitografia

EnergyPlus - https://energyplus.net/

DesignBuilder - https://designbuilder.co.uk/helpv3.0/

Comitato Termotecnico Italiano (CTI) – Anni tipo climatici - https://www.cti2000.it/index.php?controller=news&action=show&newsid=34985

Glass Configurator - https://www.agc-yourglass.com/configurator/app/request

IEA EBC Annex 80 - Resilient Cooling of Buildings - https://annex80.iea-ebc.org/https://www.caleffi.com/italy/it