



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



MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi energetica di edifici in direzione Zero Energy Buildings in Italia: Studio di edifici-tipo a carattere residenziale

S. Di Turi, I. Falcone, L. Ronchetti, I. Nardi, N. Calabrese

Report RdS/PTR2020/110

ANALISI ENERGETICA DI EDIFICI IN DIREZIONE ZERO ENERGY BUILDINGS IN ITALIA: STUDIO DI EDIFICI-TIPO A CARATTERE RESIDENZIALE

S. Di Turi, I. Falcone, L. Ronchetti, I. Nardi, N. Calabrese (ENEA)

Con il contributo di: A. Carderi, G. Elmo, D. Magrì, L. Volpe

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

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

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

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

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

Linea di attività: *LA1.2 - Analisi energetica di edifici in direzione Zero Energy Buildings in Italia: studio di edifici – tipo a carattere residenziale*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi

Responsabile del Work package: Domenico Iatauro

Indice

SOMMARIO.....	5
SUMMARY.....	6
1 INTRODUZIONE	7
2 L'APPROCCIO METODOLOGICO.....	8
3 LE NUOVE COSTRUZIONI A CARATTERE RESIDENZIALE: DEFINIZIONE E QUADRO GENERALE SULLA DIFFUSIONE DI EDIFICI MONOFAMILIARI E PLURIFAMILIARI IN ITALIA	10
3.1 TECNOLOGIE MAGGIORMENTE UTILIZZATE IN EDIFICI MONO E PLURIFAMILIARI AD ELEVATE PRESTAZIONI.....	15
3.1.1 <i>Edifici monofamiliari</i>	15
3.1.2 <i>Edifici plurifamiliari</i>	21
4 PREMESSE ALLO STUDIO ENERGETICO.....	39
4.1 CRITICITÀ DELLE SIMULAZIONI TERMO-ENERGETICHE CON METODO DI CALCOLO DINAMICO	39
4.2 SCELTA DELLE LOCALITÀ CLIMATICHE DI RIFERIMENTO PER LE SIMULAZIONI E IMPLEMENTAZIONE DEI FILE CLIMATICI	40
4.3 CRITERI GENERALI ADOTTATI PER LA SCELTA DEI CASI STUDIO E PER LE ANALISI ENERGETICHE.....	41
5 SCELTA DEL MODELLO DI EDIFICIO-TIPO MONOFAMILIARE	43
5.1 IPOTESI DI DEFINIZIONE DELLE DUE CONFIGURAZIONI DI EDIFICIO TIPO MONOFAMILIARE E DELLE RELATIVE TECNOLOGIE COSTRUTTIVE E IMPIANTISTICHE APPLICATE - CARATTERISTICHE GENERALI.....	43
5.1.1 <i>Caratteristiche generali geometriche e dimensionali</i>	43
5.1.2 <i>Tecnologie costruttive di involucro</i>	44
5.1.3 <i>Tecnologie impiantistiche</i>	50
5.2 LA COSTRUZIONE DEI MODELLI DI EDIFICIO MONOFAMILIARE PER LE SIMULAZIONI IN REGIME DINAMICO	53
5.2.1 <i>Geometria e involucro opaco e trasparente</i>	53
5.2.2 <i>Profili di occupazione e ventilazione Naturale</i>	59
5.2.3 <i>Definizione dell'HVAC dettagliato</i>	64
5.2.4 <i>Definizione dell'impianto fotovoltaico</i>	73
5.3 ANALISI DEGLI OUTPUT IN DETTAGLIO – MONOFAMILIARE	74
6 RISULTATI ENERGETICI PER L'EDIFICIO MONOFAMILIARE NELLE DIVERSE ZONE CLIMATICHE	82
6.1 VALUTAZIONE DEL FABBISOGNO TERMICO	82
6.2 VALUTAZIONE DEI FABBISOGNI ENERGETICI E PRODUZIONE DA FONTI RINNOVABILI	87
6.2.1 <i>Climatizzazione invernale</i>	87
6.2.2 <i>Climatizzazione estiva</i>	91
6.2.3 <i>Acqua calda sanitaria e produzione da solare termico</i>	95
6.2.4 <i>Produzione da fotovoltaico</i>	100
6.2.5 <i>Sintesi dei fabbisogni complessivi e della copertura da fonti rinnovabili</i>	102
7 SCELTA DEL MODELLO DI EDIFICIO-TIPO PLURIFAMILIARE.....	105
7.1 IPOTESI DI DEFINIZIONE DELLE DUE CONFIGURAZIONI DI EDIFICIO TIPO PLURIFAMILIARE E DELLE RELATIVE TECNOLOGIE COSTRUTTIVE E IMPIANTISTICHE APPLICATE - CARATTERISTICHE GENERALI.....	105
7.1.1 <i>Caratteristiche generali geometriche e dimensionali</i>	105
7.1.2 <i>Tecnologie costruttive di involucro</i>	109
7.1.3 <i>Tecnologie impiantistiche</i>	115

7.2	LA COSTRUZIONE DEI MODELLI DI EDIFICIO PLURIFAMILIARE PER LE SIMULAZIONI IN REGIME DINAMICO.....	119
7.2.1	<i>Geometria e involucro opaco e trasparente</i>	119
7.2.2	<i>Profili di occupazione e ventilazione naturale.....</i>	125
7.2.3	<i>Definizione dell’HVAC dettagliato.....</i>	133
7.2.4	<i>Definizione dell’impianto fotovoltaico</i>	145
7.3	ANALISI DEGLI OUTPUT DI SIMULAZIONE IN DETTAGLIO – EDIFICIO PLURIFAMILIARE.....	146
8	RISULTATI ENERGETICI PER L’EDIFICIO PLURIFAMILIARE NELLE DIVERSE ZONE CLIMATICHE	156
8.1	VALUTAZIONE DEL FABBISOGNO TERMICO	156
8.2	VALUTAZIONE DEI FABBISOGNI ENERGETICI E PRODUZIONE DA FONTI RINNOVABILI	163
8.2.1	<i>Climatizzazione invernale.....</i>	163
8.2.2	<i>Climatizzazione estiva.....</i>	168
8.2.3	<i>Acqua calda sanitaria e produzione da solare termico</i>	171
8.2.4	<i>Produzione da fotovoltaico</i>	177
8.2.5	<i>Sintesi dei fabbisogni complessivi e della copertura da fonti rinnovabili.....</i>	180
9	VALUTAZIONI ECONOMICHE PER GLI EDIFICI ANALIZZATI	182
9.1	METODOLOGIA USATA PER LA STIMA DEI COSTI	182
9.2	COSTI DEI COMPONENTI DI INVOLUCRO	183
9.2.1	<i>Coperture</i>	185
9.2.2	<i>Pareti.....</i>	185
9.2.3	<i>Solai interpiani</i>	185
9.2.4	<i>Fondazioni e solaio di basamento.....</i>	186
9.2.5	<i>Serramenti e infissi.....</i>	186
9.3	COSTI DI REALIZZAZIONE DELL’INVOLUCRO	186
9.4	COSTI DEI SISTEMI IMPIANTISTICI	188
9.4.1	<i>Impianti elettrici e impianti speciali.....</i>	188
9.4.2	<i>Impianto fotovoltaico.....</i>	188
9.4.3	<i>Impianto idrico-sanitario</i>	188
9.4.4	<i>Impianto di produzione di ACS.....</i>	189
9.4.5	<i>Impianto di climatizzazione estiva e invernale</i>	189
9.4.6	<i>Impianto di sollevamento</i>	189
9.4.7	<i>Costi complessivi dei sistemi impiantistici.....</i>	189
9.5	COSTI ACCESSORI	190
9.6	COSTI RELATIVI AGLI ONERI DI PROGETTAZIONE	190
9.7	COSTI COMPLESSIVI	191
9.8	CONFRONTO DEI COSTI DEGLI EDIFICI-TIPO CON COSTI DI RIFERIMENTO DI EDIFICI DI NUOVA COSTRUZIONE AD ALTA PRESTAZIONE GIÀ REALIZZATI.....	192
10	CONCLUSIONI	194
11	RINGRAZIAMENTI	196
12	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	196
13	ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	199
14	INDICE DELLE FIGURE	200
15	INDICE DELLE TABELLE.....	208
	ALLEGATO 1: MODELLI E OUTPUT DELLE ANALISI ENERGETICHE.....	
	ALLEGATO 2: STIMA DEI COSTI DEI MODELLI ANALIZZATI	

Sommario

L'attività di ricerca condotta ha il fine di individuare e analizzare alcuni scenari di edifici di nuova costruzione a carattere residenziale nell'ottica di comprendere se e come l'obiettivo "Zero Energy Building" (ZEB) sia raggiungibile, a partire dall'utilizzo di tecnologie costruttive consolidate tradizionali e innovative.

Un edificio Zero Energy deve avere una richiesta di energia piuttosto esigua e tale da poter essere soddisfatta da fonti rinnovabili in situ. Al più, nel caso di Net ZEB, esso dovrebbe essere in grado di riversare in rete una quota di energia autoprodotta almeno pari a quella prelevata dalla rete stessa. Tale obiettivo deve essere, tuttavia, raggiunto senza trascurarne la fattibilità economica, che rappresenta spesso un vero e proprio ostacolo per la sua realizzazione. La principale sfida è proprio quella di assicurare un costante bilancio tra fabbisogno energetico e produzione di energia in loco, attraverso fonti rinnovabili, la cui grande criticità è la natura stagionale ed estremamente variabile.

L'ottica di una progettazione in chiave Zero Energy Building pone, quindi, una serie di sfide per risolvere le criticità e impone di effettuare una vastità di scelte tale da renderla un campo estremamente complesso e diversificato, che richiede competenze multidisciplinari architettoniche, fisico-tecniche ed economiche, volte all'ottimizzazione delle strategie passive e bioclimatiche ed alla scelta delle tecnologie di involucro e di impianto più idonee alle condizioni climatiche di riferimento, che siano allo stesso tempo economicamente fattibili.

A partire da tali considerazioni, questo report affronta lo studio di due differenti tipologie edilizie a carattere residenziale, riconducibili ad un edificio monofamiliare e ad uno plurifamiliare, analizzando due configurazioni diverse per ciascuna di esse e studiandole con metodi di calcolo dinamici, al fine di valutarne la prestazione energetica. I risultati ottenuti vengono analizzati in dettaglio ed elaborati al fine di fornire i fabbisogni termici ed energetici degli edifici, oltre che la quantificazione della produzione di energia da fonti rinnovabili per ogni configurazione e per ogni zona climatica in cui risulta diviso il territorio italiano.

Parallelamente, sono condotte delle valutazioni economiche, che analizzano, nello specifico, i costi di realizzazione dei casi analizzati e permettono dei confronti con edifici realmente realizzati al fine di valutare la fattibilità economica degli edifici-tipo proposti.

Tutti i casi studio, appositamente ideati, sono, quindi, il frutto di una valutazione della reale possibilità di realizzare edifici *zero energy* da un punto di vista tecnico ed economico.

Il lavoro dimostra che l'obiettivo ZEB è raggiungibile a patto che si tengano in considerazione alcuni aspetti non trascurabili, quali la necessità dell'utilizzo di metodi dinamici avanzati di calcolo, seppur complessi, per una stima realistica dei fabbisogni. Inoltre, è necessaria la distinzione tra i bilanci annuali e mensili che pongono non poche criticità nell'aspetto di compensazione tra fabbisogno energetico dell'edificio e produzione dell'energia necessaria da fonti rinnovabili. Il tutto non può prescindere da una conoscenza dettagliata di tutti gli aspetti tecnico-costruttivi ed economici che concorrono alla realizzazione di un edificio ZEB.

Summary

This research activity aims at identifying and analysing new residential buildings scenarios, in order to assess if and how the objective of "Zero Energy Building" (ZEB) is achievable, starting from the use of consolidated construction technologies, both traditional and innovative.

A Zero Energy Building must have a very low energy demand that can be satisfied by renewable sources on site. At most, in the case of Net ZEB, it should be able to transfer into the grid a percentage of produced energy at least equal to that supplied by the grid itself. However, this objective must be achieved without ignoring its economic feasibility, which often represents a critical issue for its realization. The main challenge is precisely to ensure a constant balance between energy needs and energy production on site through renewable sources, whose great limit is represented by seasonal and extremely variable nature.

Therefore, the perspective of a Zero Energy Building design poses a series of critical issues and is characterized by numerous choices to be made, which makes it an extremely complex and diversified field. It requires multidisciplinary skills, architectural, physical-technical and economic ones, aiming at optimizing passive and bioclimatic strategies and at the choice of the most suitable envelope and system technologies for the reference climatic conditions, but at the same time economically feasible.

Starting from these considerations, the report presents the results of the study of two different residential buildings types, single-family house and multi-storey building, for which two different configurations have been proposed. They were modelled and simulated with dynamic calculation methods, in order to evaluate their energy performance. The obtained results are analysed in detail and processed in order to provide the thermal and energy needs of the buildings, as well as the obtained production of energy from renewable sources for each configuration and each climatic zone in which the Italian territory is divided.

At the same time, an economic assessment was finally conducted, analysing construction costs and making comparisons with existing high performance buildings in order to understand the real economic feasibility of the proposed buildings.

All the proposed designed cases are, therefore, the result of an evaluation of the real possibility of creating Zero Energy Buildings from a technical and economic point of view.

The work demonstrates that the ZEB goal is achievable if certain non-negligible aspects are taken into consideration, such as the need to use advanced, but complex dynamic calculation methods for a realistic estimate of needs. In addition, it is necessary to distinguish between the annual and monthly balances, which pose many critical issues in the aspect of compensation between the energy needs of the building and the production of the necessary energy from renewable sources. All this have to be achieved with a detailed knowledge of all the technical-constructive and economic aspects that contribute to the construction of a Zero Energy Building.

1 Introduzione

L'attività di ricerca condotta ha il fine di individuare e analizzare alcuni scenari di edifici di nuova costruzione a carattere residenziale nell'ottica di comprendere se e come l'obiettivo "Zero Energy Building" sia raggiungibile, a partire dall'utilizzo di tecnologie costruttive consolidate tradizionali e innovative.

Nel report della prima annualità [1] è stato messo in evidenza come non esista una definizione univoca di Edificio Zero Energy, data la molteplicità di aspetti che esso ingloba. È, tuttavia, chiaro che uno Zero Energy Building (ZEB) debba avere una richiesta di energia molto esigua e tale da poter essere soddisfatta da fonti rinnovabili in situ [2,3]. Al più, nel caso di Net ZEB, esso dovrebbe essere in grado di riversare in rete una quota di energia prodotta almeno pari a quella fornita dalla rete stessa. Raggiungere tale obiettivo significa ottenere edifici la cui prestazione energetica supera gli standard normativi vigenti e il concetto di nearly Zero Energy Building, in un tentativo di upgrade del parco edilizio, nel caso specifico di nuova costruzione, e nell'ottica del raggiungimento di un parco decarbonizzato e confacente agli obiettivi previsti nella Strategia Energetica Nazionale e nel Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima. Tale scopo deve essere, tuttavia, raggiunto senza trascurare l'aspetto della fattibilità economica, che rappresenta spesso una vera e propria criticità per la sua realizzazione. Nello stesso documento [1] sono state individuate le tecnologie costruttive e impiantistiche più promettenti nell'ottica di una progettazione in direzione ZEB, in quanto è indispensabile ottenere un involucro energeticamente efficiente (obiettivo perseguibile con tecniche più o meno consolidate sul mercato) e impianti meccanici diversificati in grado di soddisfare i fabbisogni dell'edificio stesso, garantendo al contempo il comfort al suo interno. La principale sfida è proprio quella di assicurare un costante bilancio tra fabbisogno energetico e produzione di energia in loco, attraverso fonti rinnovabili, la cui grande criticità è la natura stagionale ed estremamente variabile.

L'ottica di una progettazione in chiave Zero Energy Building pone, quindi, una serie di sfide e una vastità di scelte tale da renderla un campo estremamente complesso e diversificato, che richiede competenze multidisciplinari architettoniche, fisico-tecniche, economiche, volte all'ottimizzazione delle strategie passive e bioclimatiche e alla scelta delle tecnologie di involucro e di impianto più idonee alle condizioni climatiche di riferimento e allo stesso tempo economicamente fattibili.

A partire da tali considerazioni, il report prodotto si pone l'obiettivo di fornire lo studio di due differenti tipologie edilizie a carattere residenziale, adottando configurazioni diverse e appositamente messe a punto per l'analisi di una casistica significativa che possa fornire spunti di riflessione sulla realizzabilità stessa degli ZEB.

Tale studio viene affrontato con metodi di calcolo dinamici avanzati, che richiedono una modellazione estremamente dettagliata di ogni componente del sistema edificio-impianto e dell'uso che di tale edificio viene fatto in termini di occupazione e profili di utilizzo relativi ai differenti servizi energetici.

Se, da un lato, tale metodo costringe ad uno sforzo progettuale vero e proprio e, quindi, unico nel suo genere, dall'altro, l'accuratezza dei risultati, calibrati su base oraria e su file climatici aggiornati consente di ottenere analisi approfondite sul comportamento dell'edificio stesso e di valutare pertanto i risultati ottenuti sulla base di una profonda conoscenza dei casi analizzati. Ogni configurazione diventa peculiare per le differenti condizioni al contorno implementate e la caratterizzazione specifica di tutti i sistemi. Ciò determina la necessità di adottare un approccio iterativo volto al ricercare le soluzioni ottimali per il raggiungimento dell'obiettivo ZEB.

Indispensabile è, infine, l'analisi rigorosa dei risultati ottenuti e la consapevolezza che essi siano fondamentalmente ancorati al modello studiato e al metodo di calcolo, seppur forniscano spunti interessanti e generalizzabili per la progettazione in direzione ZEB e l'analisi del significato stesso di tale obiettivo.

2 L'approccio metodologico

Sin da subito è opportuno focalizzare l'attenzione sull'approccio metodologico scelto, in modo da rendere con maggior chiarezza il lavoro effettuato ed esposto nel seguito. Lo studio ha visto l'adozione di una metodologia di tipo iterativo (Figura 1), con la scelta di casi studio, appositamente ideati e ritenuti significativi per l'attività di ricerca condotta.

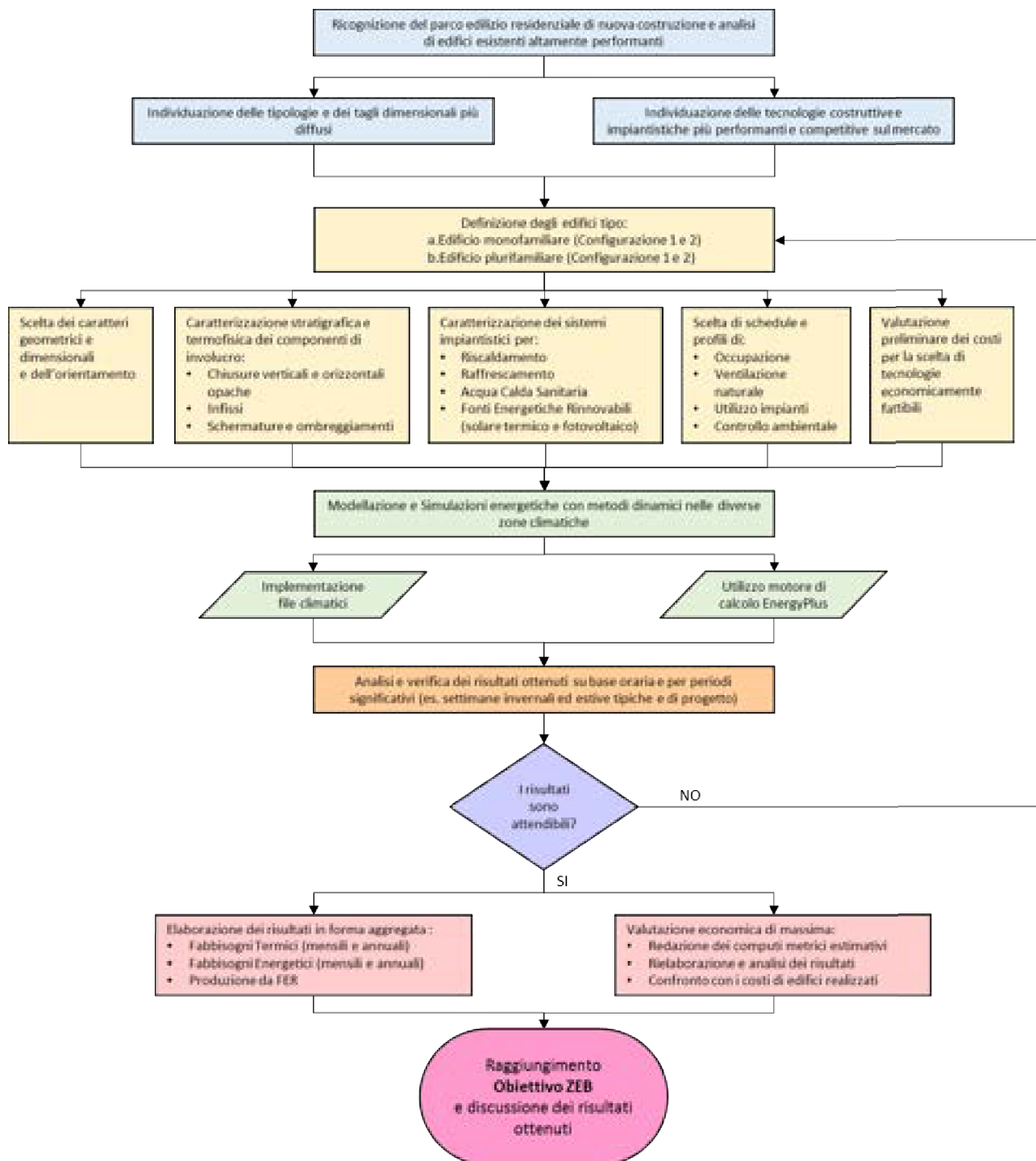


Figura 1. Diagramma di flusso della metodologia adottata

Data la complessità e la vastità delle casistiche e delle variabili in gioco, la prima parte dell'attività ha previsto una ricognizione del settore edilizio residenziale in Italia, rivolta all'analisi ed all'individuazione delle tipologie di edifici residenziali e dei tagli dimensionali più diffusi nel parco immobiliare delle nuove costruzioni, anche facendo riferimento a dati Istat, dati rivenienti dal mercato, ricerca di esempi già realizzati e letteratura scientifica relativa a casi studio di ZEB o net ZEB. Sono stati, quindi, analizzati una serie di casi "virtuosi" esistenti, descrivendone la tipologia, le caratteristiche progettuali e le strategie volte ad incrementare la prestazione energetica.

A tale quadro introduttivo, è seguita la vera e propria elaborazione degli scenari di edificio tipo a carattere residenziale. Ciò ha determinato l'individuazione e la caratterizzazione termo-energetica di due diverse configurazioni di edificio monofamiliare e due differenti configurazioni di edificio plurifamiliare, appositamente definite ed elaborate. La prima configurazione adottata per ogni edificio tipo è stata, per scelta, più tradizionale e vicina ai valori di riferimento dettati dalla normativa vigente, che pur normando edifici nZEB, richiede comunque standard molto efficienti sia in termini di involucro che di impianto. Tali configurazioni rappresentano, quindi, uno spunto di riflessione rispetto agli attuali standard, per capire se questi ultimi possano essere sufficienti a raggiungere l'obiettivo ancor più ambizioso dello *zero energy building*. Le seconde configurazioni hanno, invece, prediletto tecnologie consolidate nel mercato negli ultimi anni, ma più innovative e caratterizzate da migliori prestazioni. È d'obbligo precisare che la scelta di analizzare tali configurazioni è stata motivata dalla volontà di ottenere edifici effettivamente realizzabili, prediligendo tecnologie costruttive e sistemi impiantistici all-electric integrati con fonti rinnovabili avanzati, ma presenti e diffusi sul mercato ed economicamente fattibili.

Tutte le configurazioni sono state, inoltre, adattate e personalizzate a seconda delle differenti zone climatiche, per ognuna delle quali è stata scelta una località rappresentativa (generalmente capoluogo di regione o di provincia), in quanto siti di interesse per il mercato delle nuove costruzioni.

Definiti i caratteri generali dei casi studio, si è passati alla fase di modellazione e analisi energetica con metodo di calcolo dinamico, implementato in EnergyPlus, nei diversi contesti climatici. Il metodo utilizzato ha imposto la scelta di una serie di parametri specifici per le componenti di involucro e di impianto. Sono stati caratterizzati, nel dettaglio, i componenti costruttivi, quali chiusure verticali e orizzontali, tipologie di infissi, sistemi di schermatura, e tutti gli elementi utili a massimizzare la prestazione dell'involucro dal punto di vista termico, definendo le caratteristiche stratigrafiche e termo-fisiche e incrementando l'utilizzo di strategie passive. Sono stati, inoltre, caratterizzati tutti gli impianti di climatizzazione estiva e invernale e di produzione di acqua calda sanitaria, indispensabili non solo per compensare il fabbisogno energetico, ma anche per garantire le condizioni di comfort all'interno degli ambienti sia in estate che in inverno. Al fine di raggiungere l'obiettivo ZEB si è considerato l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili (FER) per la copertura del fabbisogno energetico, con l'implementazione di tutte le caratteristiche dei sistemi di produzione da FER (solare termico e fotovoltaico) e l'inserimento di sistemi di controllo, regolazione e accumulo. Di ogni tecnologia è stata effettuata, a monte, una valutazione preliminare dei costi per capirne la reale fattibilità, rendendo tale aspetto parte integrante del processo di definizione degli edifici tipo. Infine, sono stati definiti singolarmente gli "schedule" e i profili di occupazione, ventilazione naturale, utilizzo dei sistemi impiantistici di climatizzazione e acqua calda sanitaria e tutto ciò che concerne il controllo ambientale. Ciò ha determinato numerose iterazioni nel processo di modellazione, finalizzate alla scelta dei parametri ottimali e funzionali al raggiungimento dell'obiettivo ZEB. Infine, sono stati implementati tutti i file climatici delle località scelte con i dati climatici più aggiornati su base oraria, in quanto indispensabili per ottenere risultati attendibili in fase di simulazione.

I risultati ottenuti sono stati studiati in dettaglio andando a verificare il funzionamento dei singoli componenti impiantistici, l'andamento dei profili impostati, i dati di temperatura, gli apporti solari, le prestazioni termo-energetiche degli involucri e il comportamento globale dell'edificio per periodi di riferimento e su base oraria. Soltanto in seguito alla verifica dell'attendibilità dei risultati stessi ed all'eventuale modifica dei modelli stessi, coerentemente con il metodo iterativo adottato, si è passati alla fase di elaborazione dell'ingente quantità di dati ottenuti, al fine di fornire dei risultati in forma aggregata riferiti al periodo invernale ed estivo di riferimento per ogni zona climatica, riguardanti i fabbisogni termici ed energetici ottenuti, oltre alla

quantificazione della produzione di energia da fonti rinnovabili. In tal modo, è stato possibile confrontare i risultati ottenuti per i vari edifici e procedere alla discussione volta ad ottenere una visione globale delle prestazioni stesse.

Parallelamente sono state condotte delle valutazioni economiche di massima delle soluzioni adottate: sono stati, quindi, analizzati i costi di realizzazione dei modelli simulati redigendo per ciascuno di essi i computi metrici estimativi di componenti di involucro, sistemi impiantistici e opere accessorie. Le stime ottenute sono state successivamente rielaborate e messe a confronto con edifici effettivamente realizzati per capire la fattibilità economica reale degli edifici studiati.

Tutti i casi proposti sono, quindi, il frutto di una valutazione della reale possibilità di realizzare edifici zero energy da un punto di vista tecnico ed economico, in modo da ottenere possibili edifici-tipo ad alta efficienza, variati a seconda delle zone climatiche presenti sul territorio italiano.

Il report presenta, quindi, la descrizione dei casi analizzati e tutti i risultati raggiunti, rielaborati e riassunti in forma grafica e tabellare e ampiamente discussi. Inoltre, a corollario del lavoro, nell'Allegato I, vengono fornite le schede riassuntive con i parametri impostati per tutte le configurazioni studiate nei singoli contesti climatici e alcuni output di dettaglio ritenuti significativi, oltre all'elenco di tutte le variabili analizzate, rivenienti dalle simulazioni dinamiche. L'Allegato II, invece, presenta il dettaglio delle stime dei costi, elaborate per ogni configurazione scelta.

3 Le nuove costruzioni a carattere residenziale: definizione e quadro generale sulla diffusione di edifici monofamiliari e plurifamiliari in Italia

Negli ultimi anni il mercato delle costruzioni ha subito in Italia una crisi profonda, dovuta al blocco sostanziale degli investimenti che hanno visto una crescita lenta ed esigua (del 2,3% durante il 2019) [4]. Nel comparto residenziale privato si registra, tuttavia, un andamento positivo, seppur lieve. Lo sviluppo recente dello smart working da parte dei dipendenti assunti e dei lavoratori autonomi ha portato all'utilizzo dello spazio-casa anche come spazio-ufficio. Tale prospettiva necessita di un'attenta rivisitazione della distribuzione spaziale e soprattutto rivela come le nuove costruzioni siano in grado più delle vecchie di rispondere alle nuove esigenze abitative in termini di comfort e necessità. I motivi di insoddisfazione, dovuti alle caratteristiche fisiche degli edifici (qualità dei materiali da costruzione e delle finiture, aspetto estetico esterno dell'edificio, layout interno e organizzazione degli spazi, dimensioni dell'abitazione) e ad aspetti legati alla sostenibilità ambientale ed economica (isolamento termico e acustico, classe energetica, spese di gestione), sono, infatti, molto più accentuati nelle abitazioni "datate", piuttosto che in quelle nuove o riqualificate dopo il 2015 [5]. In particolare, secondo le stime ANCE [4], gli investimenti in nuove abitazioni hanno registrato un incremento del 7,7% nel 2017, del 4,5% nel 2018 e del 5,4% nel 2019 in termini reali, mentre dovrebbero aver registrato nel 2020 un incremento del 2,5% (dato da confermare data l'emergenza Coronavirus che ha posto in blocco tutto il settore produttivo, compreso quello edile). Gli investimenti in nuove abitazioni nel 2019 sono risultati pari a 17.545 milioni di euro tendenzialmente con un incremento del 5,4% in termini reali (+7,4% in valori correnti) [4, p.31]. Inoltre, i Dati ISTAT riportano un incremento tra il 2016 e il 2018 del numero di permessi di costruire, Scia e Dia (+25%), anche se per il 2020 anche tale incremento manifesta una sofferenza in termini di concessioni per nuove abitazioni. Sicuramente il lato positivo delle nuove abitazioni risiede nel fatto che esse possono assecondare maggiormente le richieste del cliente da un punto di vista dimensionale, energetico, della sostenibilità e della flessibilità e ciò determina un aumento dei prezzi di circa l'1,3%.

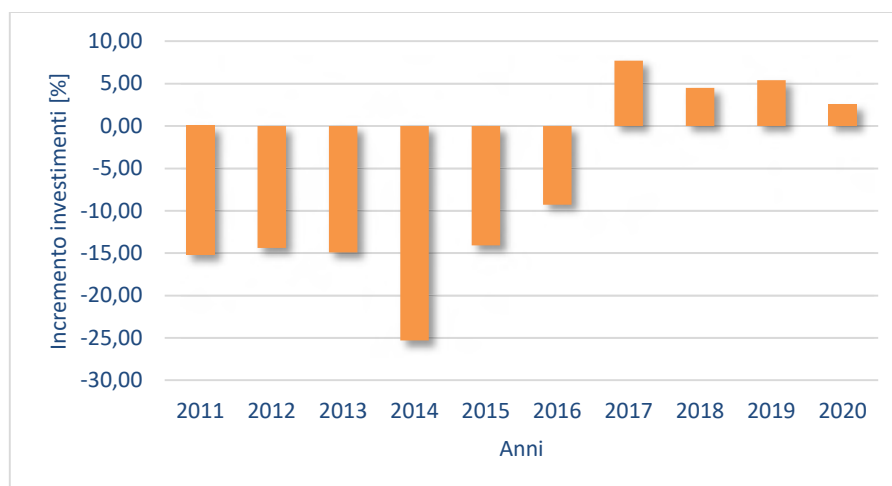


Figura 2. Andamento degli investimenti per le nuove abitazioni in termini di decremento o incremento percentuale annuo. Rielaborazione da [4]

Importante per determinare un trend nelle nuove costruzioni è anche l'indagine sociologica sui nuclei familiari e sulla loro crescita.

La tendenza è quella di famiglie sempre più piccole con un numero medio di componenti che va dai 2,7 negli anni 1997-1998 a 2,3 negli anni 2017-2018. In più, aumentano le famiglie unipersonali che sono passate dal 21,5% al 33% rispettivamente negli stessi periodi, arrivando a rappresentare un terzo delle famiglie. Inoltre, circa il 50% delle famiglie è composto da coppie senza figli e single e, per tale motivo, le unità abitative più grandi sono ormai meno richieste e desiderate in quanto i nuclei familiari sono più piccoli [4]. In aggiunta, si presta maggior attenzione alla progettazione della distribuzione interna per ottimizzare gli spazi, soprattutto in aree urbanizzate e prossime alle città.

Non è da sottovalutare, però, che la generazione dei *millennials* e l'emergenza da Coronavirus hanno sviluppato un diverso modo di utilizzare lo spazio domestico che spesso coincide con lo spazio lavorativo e di svago, tanto da orientarsi all'utilizzo piuttosto che al possesso dell'abitazione stessa, intesa come luogo dove è necessario ottenere alti livelli di prestazione energetica, domotica e tecnologica. Tale considerazione è confermata anche dal Rapporto immobiliare 2019 dell'Associazione Bancaria Italiana sul settore residenziale [6]. Le superfici compravendute nel 2018, infatti, si vanno via via riducendo: il taglio maggiormente dinamico è stato quello compreso tra 50 e 85 m², seguito da quello compreso tra 85 e 115 m² (Figura 3).

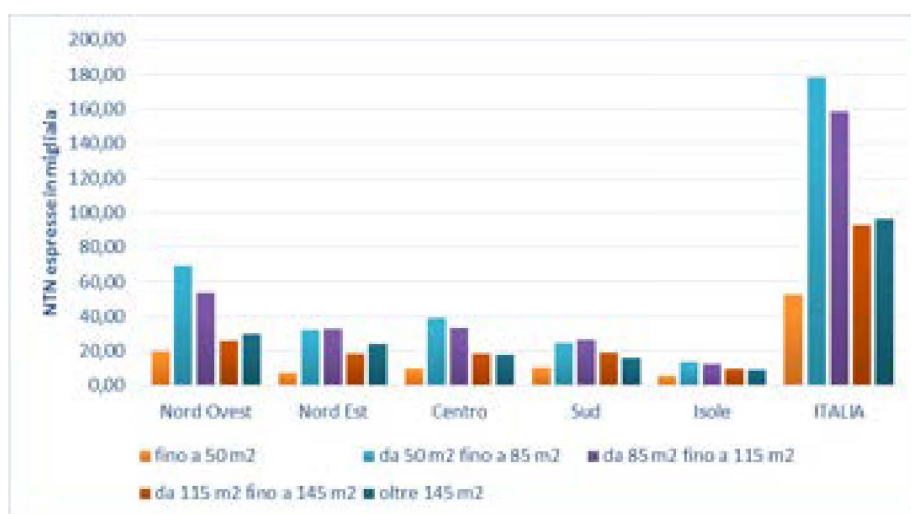


Figura 3. Numero di Transazioni Normalizzate (NTN) 2018 per classi di superficie delle abitazioni per area. Rielaborazione da [6]

Dalla Figura 4 e dalla Figura 5, si nota come in tutta Italia, nelle città più grandi (come i capoluoghi di provincia e regione), c'è una prevalenza di vendite di alloggi di taglia più piccola (da 50 e 85 m²), mentre nelle città di minori dimensioni sono quasi confrontabili le vendite di alloggi più piccoli con quelli più grandi dagli 85 ai 115 m².

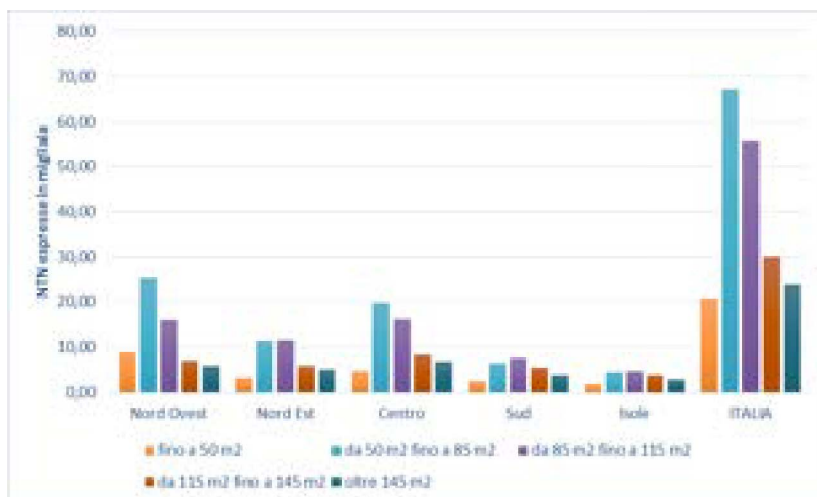


Figura 4. Numero di Transazioni Normalizzate (NTN) 2018 per classi di superficie delle abitazioni per area nei capoluoghi. Rielaborazione da [6]

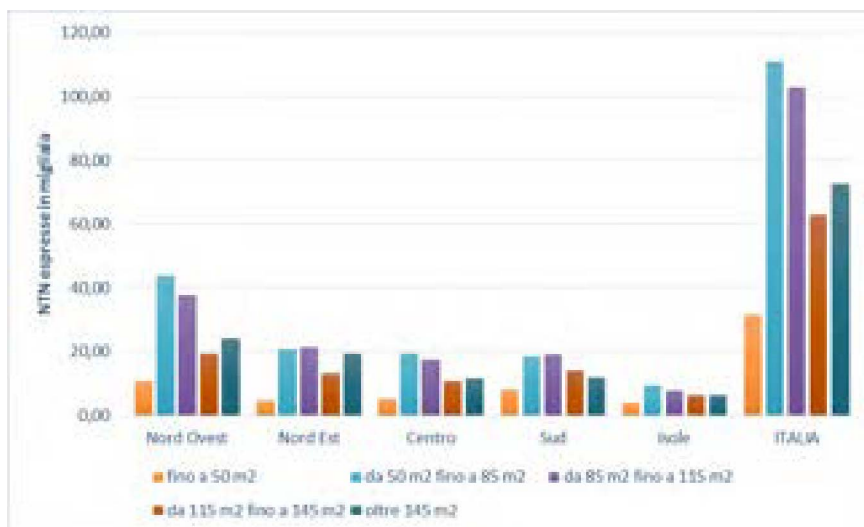


Figura 5. Numero di Transazioni Normalizzate (NTN) 2018 per classi di superficie delle abitazioni per area nei non capoluoghi. Rielaborazione da [6]

Come si evince dalla Figura 6, l'intero parco immobiliare italiano è caratterizzato dalla presenza cospicua di edifici monofamiliari (secondo il censimento Istat [7] al 2011 ammontavano a circa 6.541.746), seguiti dai plurifamiliari (secondo il censimento Istat [7] al 2011 ammontavano a circa 5.427.491).

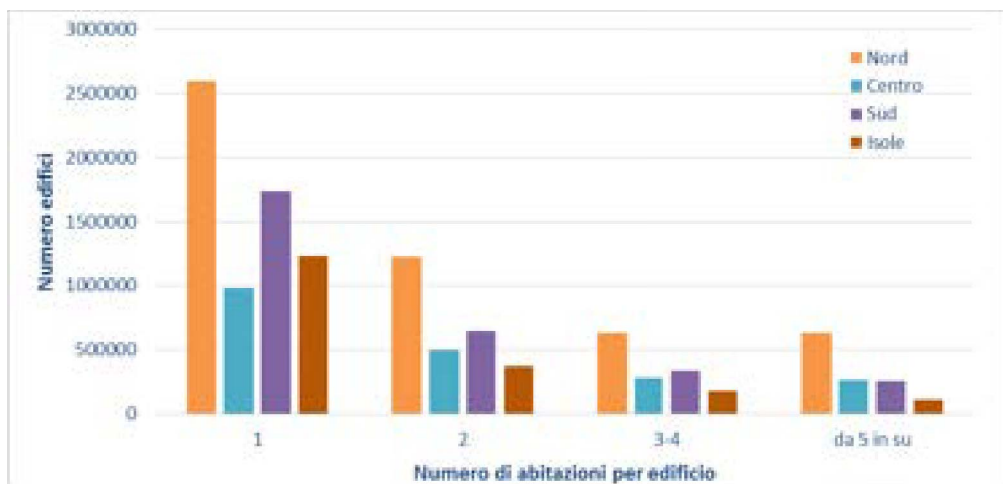


Figura 6. Numero di abitazioni per edificio relazionate al numero di edifici totali presenti nelle varie zone d'Italia. Rielaborazione da Dati Istat [7]

Secondo la definizione fornita all'interno del Progetto Tabula [8], con l'espressione *casa monofamiliare* si intende "quella casa caratterizzata da un'unica unità immobiliare, su uno o due piani, di tipo isolato o confinante con un altro edificio" e presenta le caratteristiche riportate nella Tabella 1.

Tabella 1. Parametri geometrici e dimensionali relativi agli edifici costruiti dopo il 2005 [8]

TIPOLOGIA	VOLUME LORDO CLIMATIZZATO [m ³]	SUPERFICIE UTILE DI PAVIMENTO [m ²]	RAPPORTO DI FORMA [m ⁻¹]	N. PIANI	N. APPARTAMENTI
Casa monofamiliare	607	174	0,72	2	1

In Italia, secondo i dati ISTAT del censimento 2011 [7], l'edilizia ad uso residenziale rappresenta quasi l'85% dell'intero tessuto edificato e di questa più del 50% è rappresentato da case monofamiliari, cioè ad una abitazione (ben 6.541.746 edifici). L'annuario statistico 2018 [9] porta questo dato al 60% circa per i nuovi fabbricati residenziali costruiti nel 2017, come mostra la Tabella 2.

Tabella 2. Ripartizione percentuale degli edifici residenziali per numero di abitazioni nell'anno 2017. Rielaborazione da [9]

N. di abitazioni	N. di fabbricati	%
1 abitazione	10.474	61
2 abitazione	2.584	15
3 - 15 abitazioni	3.723	22
>16 abitazioni	462	3
TOT	17.243	

In Figura 7 si evince che, analizzando i dati degli edifici residenziali per numero di piano, prevalgono le residenze a 2 piani sia rispetto al numero complessivo degli edifici residenziali sia rispetto al numero degli edifici residenziali ad un interno.

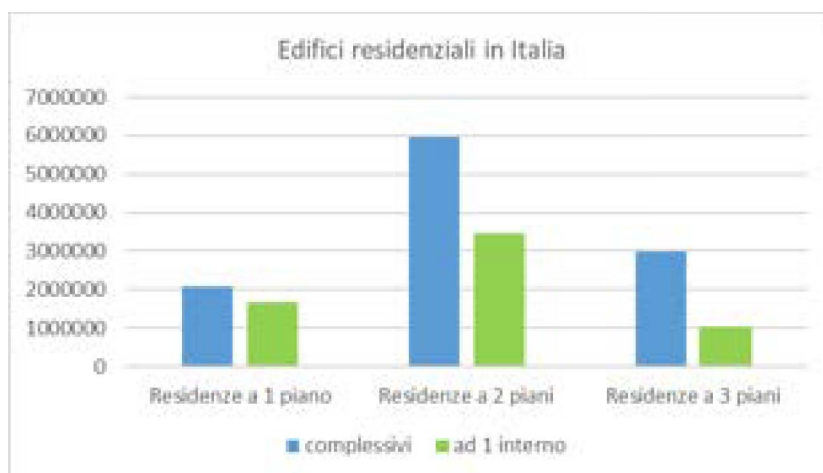


Figura 7. Ripartizione degli edifici residenziali per numero di piani. Rielaborazione da [7]

Sempre secondo il Progetto Tabula [8], l'*edificio pluri- o multi-familiare* è, invece, “un edificio di ridotte dimensioni caratterizzato da un numero limitato di unità immobiliari da 2 a 5 piani e fino a 15 appartamenti oppure da 2 a 4 piani e da 16 a 20 appartamenti”. Secondo la stessa fonte, il *blocco di appartamenti* è invece un “edificio di grandi dimensioni caratterizzato da un numero più elevato di unità immobiliari”. Di entrambi si riportano in Tabella 3 i dati geometrici individuati per gli edifici costruiti dopo il 2005 [8].

Tabella 3. Parametri geometrici e dimensionali relativi agli edifici costruiti dopo il 2005. Fonte: [8]

TIPOLOGIA	VOLUME LORDO CLIMATIZZATO [m ³]	SUPERFICIE UTILE DI PAVIMENTO [m ²]	RAPPORTO DI FORMA [m ⁻¹]	N. PIANI	N. APPARTAMENTI
Edifici multifamiliari	2959	829	0,54	3	13
Blocchi di appartamenti	8199	2124	0,40	7	31

Gli edifici multifamiliari così definiti farebbero pensare alla tipologia in linea, i blocchi di appartamenti agli edifici a torre.

La tendenza degli ultimi anni, come si nota nella Figura 8, rivela che gli edifici di nuova costruzione con più di nove abitazioni hanno superato quelli monofamiliari, confermando il cambiamento dello stile di vita e la necessità di costruire edilizia abitativa ad alta densità in territori sempre più urbanizzati, dove è necessario limitare il consumo di suolo.

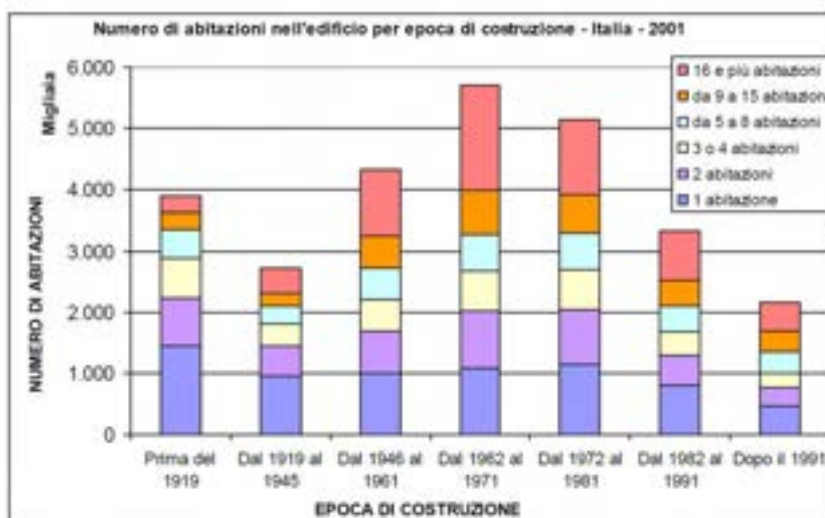


Figura 8. Elaborazione Dati Istat. Abitazioni in edifici ad uso abitativo per epoca di costruzione e numero di abitazioni nell'edificio – Italia (dati censimento 2001). Fonte: [7]

Quali scegliere, quindi, come edifici tipo per lo studio condotto? Sicuramente le due tipologie sono interessanti e indipendenti. Per tale motivo si è deciso di analizzarle entrambe a partire dalle tecnologie più ampiamente diffuse su territorio nazionale, come illustrato di seguito.

3.1 Tecnologie maggiormente utilizzate in edifici mono e plurifamiliari ad elevate prestazioni

Secondo Deng et al. [10] il processo di progettazione di un edificio altamente performante, *net zero energy*, deve passare attraverso almeno tre punti importanti: l'analisi dei dati climatici, l'applicazione di soluzioni attive e passive, l'integrazione di sistemi da fonti rinnovabili. Inoltre, punti chiave della progettazione passiva sono un corretto orientamento e forma, un adeguato isolamento termico dell'involucro, magari con un rivestimento esterno con alta riflettanza alla radiazione solare e ad alta emissività, un adeguato sfruttamento della massa termica, una schermatura solare orientabile e un adeguato utilizzo della ventilazione naturale (specialmente notturna) nonché sistemi di ricambio d'aria e ventilazione naturale e meccanica e sistemi di controllo delle schermature [11]. È, quindi, fondamentale conoscere le tecnologie costruttive e impiantistiche attualmente diffuse sul mercato e che costituiscono parte fondamentale del sistema edificio-impianto

3.1.1 Edifici monofamiliari

Lo studio effettuato è partito dalla selezione e dall'analisi di alcuni edifici monofamiliari realizzati e ritenuti significativi per caratteristiche costruttive, soluzioni tecnologiche e aspetti impiantistici. A titolo esemplificativo, da Scheda 1 a Scheda 3 si riporta una estrema selezione di edifici analizzati in differenti zone climatiche.

Scheda 1. Casa Botticelli – Catania (zona climatica B)

L'edificio monofamiliare ha una forma a U, con un patio interno comunicante con il giardino che contribuisce all'illuminazione naturale e mette in atto una ventilazione notturna e a flusso incrociato (Figura 9). Le tecnologie usate sono tradizionali con struttura portante in calcestruzzo armato e tamponamenti in laterizio porizzato, l'isolamento è in lana di roccia mentre i serramenti sono in PVC con triplo vetro.

L'edificio è monitorato per scopi di ricerca e gestito da un sistema BACS, che controlla le persiane esterne, un sistema di ventilazione a modalità mista, i pannelli solari termici e fotovoltaici e uno scambiatore di calore aria-terra.

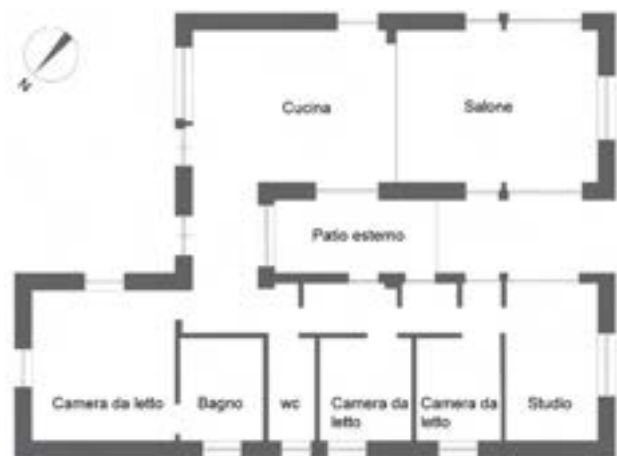


Figura 9. Casa Botticelli a Mascalucia (CT): pianta (rielaborata da [12]), foto aerea della copertura, foto del prospetto e del patio interno [13].

Scheda 2. BNZEB – Benevento (zona climatica C)

Il BNZEB, frutto del progetto “SMARTCASE”, è un edificio monofamiliare che svolge anche la funzione di laboratorio di ricerca adatto alla verifica e alla misurazione della domanda di energia residenziale, della produzione di energia rinnovabile, della qualità dell’ambiente interno e altri aspetti di efficientamento legati allo specifico contesto (Figura 10). L’edificio ha una struttura in pannelli in X-LAM con isolamento in fibra di legno; la climatizzazione invernale ed estiva e la produzione di acqua calda sanitaria sono affidate ad una pompa di calore. È stata realizzato anche un sistema di ventilazione meccanica con recupero di calore e filtrazione elettronica. Il sistema di ombreggiamento della facciata a sud è stato studiato attentamente per ottenere una geometria che consentisse di sfruttare i guadagni solari nella stagione invernale e massimizzare l’effetto di ombreggiamento in estate. Sulle finestre con fronte a est sono installati brise soleil orientabili automaticamente con profili in alluminio anodizzato e lame in legno. Sui doppi vetri sono montati rivestimenti basso-emissivi e film variocromici.



Figura 10. BNZEB-Benevento: pianta rielaborata e foto di un prospetto [11], foto della struttura in fase di realizzazione [14].

Scheda 3. Edificio a energia zero – Bergamo (zona climatica E)

L'edificio è realizzato secondo i principi dell'architettura bioclimatica, nell'uso dei materiali (cappotto con fibre naturali), nello sfruttamento degli apporti solari gratuiti passivi, nell'involucro compatto senza sporgenze o rientranze (Figura 11). Un sistema di sensori collegati alla unità di controllo o PLC (hardware o software intelligente per l'automazione dei sistemi) consente di controllare, gestire e monitorare tutti i dispositivi che consumano energia. Il sistema di monitoraggio è capace di auto-apprendere l'inerzia termica dell'edificio e, in funzione dei calendari di funzionamento, gestire l'accensione e lo spegnimento intelligente dei sistemi di emissione o dei circolatori diminuendo i consumi e garantendo un maggior comfort per gli occupanti. L'utilizzo delle fonti rinnovabili (solare, biomassa e geotermico) hanno consentito di raggiungere l'autosufficienza.

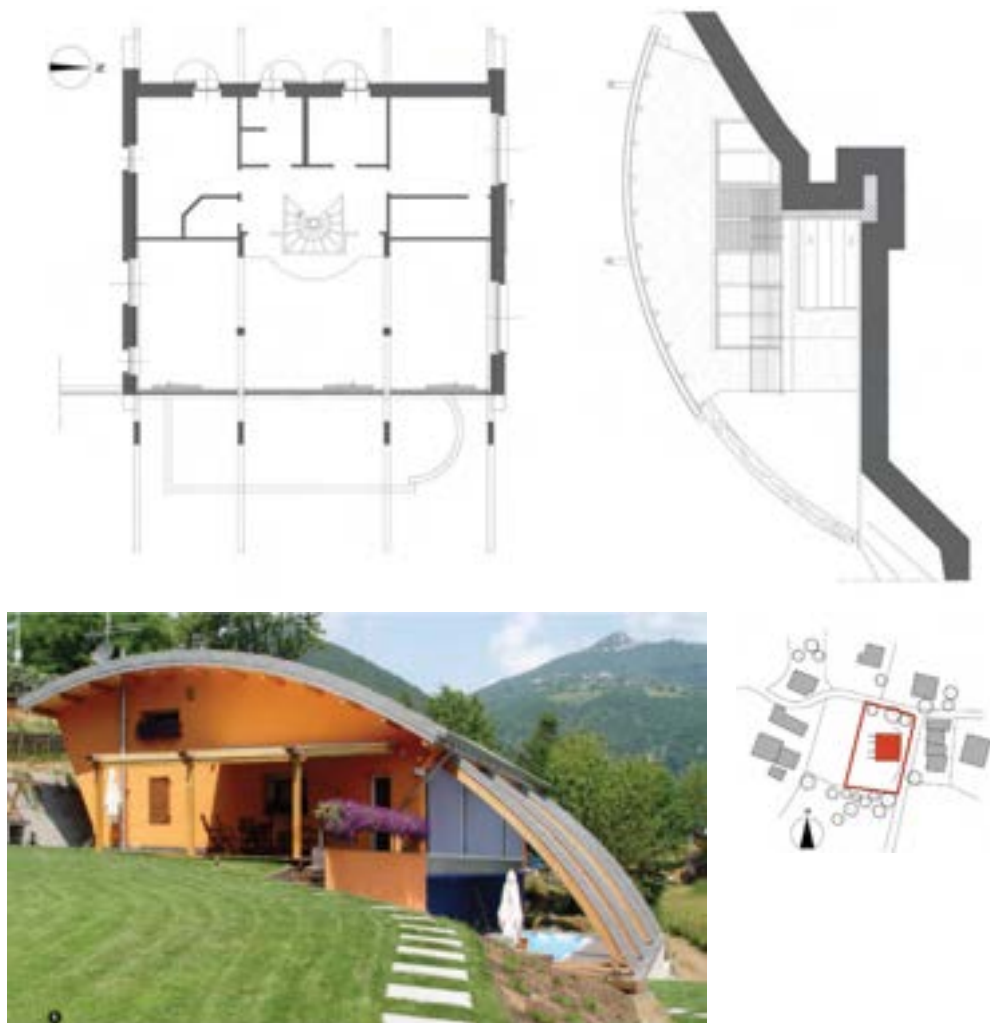


Figura 11. Edificio a energia zero, Bergamo: rielaborazione di pianta e prospetto nord da [15], foto del prospetto sud [15].

Gli esempi riportati, particolarmente virtuosi, utilizzano strategie passive di architettura bioclimatica ormai acquisite, come la corte interna per la ventilazione notturna e sistemi di ombreggiamento fissi e orientabili, affiancate a sistemi più avanzati da un punto di vista tecnologico, come i sistemi domotici di gestione dei sistemi di ombreggiamento e rivestimenti basso-emissivi e film variocromici sui vetri. La Tabella 4 e la Tabella 5 riportano le caratteristiche di involucro e degli impianti utilizzati in una selezione di edifici monofamiliari di nuova edificazione ad alte prestazioni energetiche.

Tabella 4. Dati relativi agli edifici nZEB di nuova costruzione censiti nell'Osservatorio nZEB a cura di ENEA: parametri geometrici e descrizione dell'involucro con le relative trasmittanze.

FONTE	NOME	ZONA CLIMATICA	ANNO	N. PIANI	SUPERFICIE (m ²)	PARETI ESTERNE		U _{PAR} (W/m ² K)	COPERTURE	U _{COP} (W/m ² K)	U _{PAV}	INFISSI	U _G (W/m ² K)	U _F (W/m ² K)
						sistema costruttivo	tipo di isolante							
[16]	Residenza monofamiliare Sammy a Lerma (AL)	E	2013	2	523	blocco di laterizio semipieno	fibra di vetro	0,17	-	0,275	0,254	Legno triplo vetro	1,1	1,8
[16]	Residenza monofamiliare a Riva di Chieri (TO)	E	2017	3 (di cui 1 interrato)	156	X-lam	fibra di legno	0,09	assi di legno e fibre di legno	0,12	0,12	Triplo vetro	0,6	-
[16]	Residenza monofamiliare a Mansuè (TV)	E	2018	1	174	X-lam	lana di roccia	0,13	legno e fibra di vetro	0,16	0,16	PVC a 5 camere con triplo vetro basso emissivo	0,6	1,1
[16]	Residenza monofamiliare a Tollo (CH)	D	2017	1	108,57	struttura a telaio in legno	lana di roccia	0,12	-	0,13	0,15	Triplo vetro	0,8	-
[16]	Residenza monofamiliare a Mesagne (BR)	C	2014	3	227	blocco di calce e canapa		0,107	-	0,147	0,146	Finestre con telaio in PVC e triplo vetro	0,55	0,92
[16] - [12]	"Casa Botticelli" a Mascalucia (CT)	B	2012	1	144	blocco di laterizio semipieno	lana di roccia	0,13		0,13	0,23	Pvc con triplo vetro	0,90	1,10
[11]	BNZEB di Benevento	C	2017	1	70	X-lam	fibra di legno	0,17	legno e fibra di legno	0,23	0,35	PVC con vetro doppio	1,1	1,17
[15]	Edificio a energia zero a Bergamo (BG)	E	2010	2	180,55		fibre naturali	0,178	travi di legno lamellare	0,184	0,248		1,1	

Tabella 5. Dati relativi agli edifici nZEB di nuova costruzione censiti nell'Osservatorio nZEB a cura di ENEA: descrizione dei sistemi impiantistici con i relativi parametri e ulteriori informazioni.

FORTE	NOME	IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE INVERNALE	POTENZA INV (kW)	IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE ESTIVO	POTENZA EST (kW)	VMC	POTENZA (kW) / RICAMBI D'ARIA VMC (m³/h)	ACS	FER	SUP. PV (m²)	POTENZA PV (kWp)	ILLUMINAZIONE	ALTRE INFO	COPERTURA DA FER (%)
[16]	Residenza monofamiliare Sammy a Lerma (AL)	PDC aria-aria + pavimento radiante	13,1 (inverno)	PDC aria-aria + pavimento radiante	/	VMV con HR 24/7 + 2' sist di immissione con serra captante in inverno	280	PDC+solare termico	PV +Solare Termico	81,34	11	LED	-	94
[16]	Residenza monofamiliare a Riva di Chieri (TO)	PDC aria-acqua	3,80	PDC aria-acqua	3,80	VMC con HR	220	PDC +accumulo termico 300 l	PV	38,4	6	-	CasaClima Gold + Passivhaus	50,3
[16]	Residenza monofamiliare a Mansuè (TV)	PDC aria-aria	4,00	PDC aria-aria	3,5	VMC con HR	165	PDC dedicata (1.42 (Potenza termica))	PV	32,683	6	LED	CasaClima Gold	82,7
[16]	Residenza monofamiliare a Tollo (CH)	PDC	4,32	PDC	7,39	VMC con HR	0,15	come climatizzazione invernale	PV	22,96	6,3	-	-	87,62
[16]	Residenza monofamiliare a Mesagne (BR)	PDC aria-acqua	13,3	PDC aria-acqua	10,7	VMC (l'aria da immettere passa per uno scambiatore termico con terreno)		come climatizzazione invernale	PV	8	-	-	-	100
[16] - [12]	"Casa Botticelli" a Mascalucia (CT)	PDC aria-acqua	-	Come climatizzazione invernale	-	VMC	0,60	PDC elettrica aria-acqua e impianto solare termico	PV	-	-	-	BACS + Certificato CasaClima+ scambiator e ipogeo	100
[11]	BNZEB di Benevento	PDC aria-aria + DX multi-split di riserva	3,18 (max)	PDC aria-aria + DX multi-split di riserva	2,14 (max)	VMC con HR	-	PDC aria-aria + 2 boiler da 180 l in totale	PV +Solare Termico + Geotermia	26,08	3,3	LED	Scambiator e di calore, Batteria al litio, BACS	89
[15]	Edificio a energia zero a Bergamo (BG)	PDC geotermica + termocamino + pav. radiante	20	PDC geotermica		n.p.	-	Termocamino a pellet e legna + sistema di accumulo	PV + Geotermia + Biomassa	139,59	19,74	A basso consumo	Sistema di gestione degli impianti	100

Dall'analisi degli edifici esaminati in Tabella 4 e Tabella 5 si possono desumere alcune considerazioni. Innanzitutto si nota che la maggior parte delle strategie passive utilizzate consiste in un alto isolamento di pareti opache e trasparenti, i cui valori medi di trasmittanza (Tabella 6) sono molto più bassi rispetto ai requisiti minimi imposti per legge e non si registrano scostamenti rilevanti tra zone climatiche.

Tabella 6. Valori medi di trasmittanza dei componenti di involucro dei casi studio di Tabella 4

Zona climatica	Trasmittanze medie [W/m ² K]				
	U _{PARETI}	U _{COPERTURA}	U _{PAVIMENTO}	U _{vetro}	U _{telaio}
A	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
B	0,13	0,13	0,23	0,90	1,10
C	0,14	0,16	0,25	0,83	1,05
D	0,12	0,13	0,15	0,80	n.d.
E	0,15	0,14	0,20	0,96	1,45
F	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

La soluzione costruttiva maggiormente impiegata per le pareti opache risulta essere la struttura a secco in pannelli di legno lamellare X-lam, seguita dalla tipologia a umido con i blocchi in laterizio porizzato.

Tra i materiali isolanti maggiormente impiegati nell'isolamento a cappotto della parete ci sono la lana di roccia (43%) e la fibra di legno (29%). Ciò è anche confermato da un rapporto Cresme del 2014 [17], nel quale emerge che i materiali isolanti maggiormente acquistati (e quindi più utilizzati) nell'edilizia sono il polistirene estruso (XPS) per circa il 40%, a seguire il poliuretano e la lana di roccia con un'incidenza rispettivamente pari a circa il 13 e il 15% e, infine, le fibre naturali, quali il sughero e le fibre di legno, (7%) a pari merito con il vetro cellulare. La lana di roccia si abbina facilmente sia alla soluzione in blocchi di laterizio che alla struttura in legno, mentre la fibra di legno è associata esclusivamente alle strutture in legno. Per quanto riguarda le superfici finestrate, la soluzione più diffusa è il triplo vetro con il telaio in PVC, seguito dal telaio in legno lamellare.

A livello impiantistico si riscontrano con maggior diffusione le pompe di calore aria-aria o aria-acqua abbinate a un impianto fotovoltaico (PV) per la produzione di energia elettrica e un impianto di ventilazione meccanica controllata (VMC), prevalentemente con recupero di calore (HR). Più raramente si riscontra la presenza di pannelli solari termici per la produzione di acqua calda sanitaria (ACS).

Inoltre, solo pochi edifici adottano soluzioni più ricercate come pompe di calore geotermiche e sistemi domotici e di gestione degli impianti (Building Automation and Control System - BACS e Controllori Logici Programmabili - PLC) o sistemi di accumulo termici per ACS ed elettrici (Batterie). Sono altresì impiegati sistemi di illuminazione a LED o a basso consumo.

3.1.2 Edifici plurifamiliari

Per quanto riguarda gli edifici plurifamiliari di nuova costruzione, alcuni di essi trovano spazio in contesti virtuosi che possono essere presi come esempio per l'individuazione di edifici tipo in ambito residenziale di nuova costruzione. I più significativi si trovano a Milano e a L'Aquila e presentano target e modalità differenti di concepire l'edificio plurifamiliare, accomunate però dall'attenzione ad elevati standard prestazionali in termini energetici, architettonici, distributivo-funzionali ed estetici.

La città di Milano rappresenta una città all'avanguardia in tal senso, come dimostrano i tanti edifici plurifamiliari ad alta densità abitativa di nuova costruzione presenti sul territorio (Tabella 7), anche grazie ai cambiamenti profondi subiti dal tessuto urbano e a livello infrastrutturale ed alla capacità di attrarre importanti capitali internazionali per competere con le altre capitali europee.

Tabella 7. Elenco di 84 edifici di nuova costruzione plurifamiliari a Milano [18]

Edifici di nuova costruzione a Milano			
1. Palazzo Luini	22. Monte 16	43. M27	65. Moisè Loria
2. Via Moscova 38	23. IQ9 house	44. MC 16	66. Le dimore di P.zza PO
3. Garibaldi 115 - 123	24. Isola 10	45. Muratori 13	67. Residenza Cecchi
4. Solferino 23	25. Isola nel verde	46. Tiraboschi 3	Fusario
5. Town house	26. Novetredici - Zucchi	47. Corio 2	68. Residenza di Via
6. Beatrice d'Este 36	27. Timavo	48. Stone tower	Costanza
7. Torre Vigentina	28. Portanuova (certificati	49. Now House	69. Solari A+
8. Procaccini 17 - 25	LEED)	50. Urban garden	70. Domus eleganza
9. Residenza	29. Fara 18	51. Trebbia 3	71. Filelfo 3
CastelVetro	30. Campanini 4	52. San Mansueto	72. Residence Sempione
10. Porta Volta Home	31. Porta nuova centro	53. Altaguardia 11	73. Leone XIII
11. Montello	32. Giardini d'inverno	54. Atto Vannucci	74. Residenze Parco
12. Mantegna 6	33. POMASEIUNO	55. Trento 6	Vittoria
13. Marussig 08	34. Uberti 25	56. Solari A+	75. CityLife
14. Moscati 09	35. Kramer 19	57. Ripa di porta ticinese	76. Papini 3
15. Aleardi 15	36. Bellotti 2	87	77. Alberto Maria 3,15, 61
16. Bertini 21	37. Residenze il Bosco	58. Cassala 55	78. Albani 20
17. Londonio 11	38. Residenze Bacone 7/A	59. Pacioli 2	79. AM 19
18. Chieti 9.1	39. Menotti 11	60. Living Tortona	80. Sanzio 39
19. Monviso 41	40. Residenze Carlo Erba	61. Casa verde noce	81. Aurora
20. Giusti Garden	41. Residenze Caldara 38	62. Salaino 10	82. Cucchiari 21
21. Garibaldi Green	42. Lattuada 9	63. Gli orti dei Navigli	83. Borgo Alto
Building		64. Vivere solari	84. Principe Eugenio

A titolo illustrativo, si riportano di seguito le schede descrittive di tre progetti milanesi che rendono l'idea di quanto tali edifici siano performanti da ogni punto di vista, compreso quello energetico (Scheda 4, Scheda 5, Scheda 6). Tra questi degno di nota è il progetto CityLife (2004-2018) che ha caratterizzato il ventennio 2000-2020 e che raggiunge elevatissimi standard residenziali tra gli edifici plurifamiliari [5]. Nell'obiettivo Milano 2030 la qualità dell'abitare diventa inscindibile da quella del contesto, con un'attenzione particolare allo stile di vita contemporaneo e liquido dell'abitare.

Scheda 4. Complesso Aurora - Milano

Si tratta di un complesso di tre edifici residenziali, di cui due lineari (di 5 e 6 piani) e uno a torre di 19 piani alto 70 m, in relazione tra loro ma anche indipendenti per garantire la spazialità e la vista aperta, nella zona Fiera di Milano City (Figura 12). L'edificio è caratterizzato da ampi loggiati per garantire l'ombreggiamento, sistemi di automazione e sistemi domotici per luci e tapparelle, impianto di ventilazione meccanica controllata, impianto FTTH (banda larga ultra-veloce e tv satellitare), climatizzazione estiva con pannelli radianti a pavimento integrati da impianto di deumidificazione; riscaldamento centralizzato a pannelli radianti a pavimento con contabilizzatore dei consumi. L'edificio è in classe energetica A [19].



Edificio C, piano 18



Figura 12. Viste del complesso edilizio Aurora a Milano e pianta di uno dei piani dell'edificio a torre dello stesso complesso tratta da [19].

Scheda 5. Piranesi44 – Milano

Il complesso è all'avanguardia in termini di efficienza energetica e presenta una classe energetica A con consumi minimi e massimo risparmio economico. Utilizza la geotermia come fonte rinnovabile di energia dal sottosuolo e pannelli radianti a pavimento (Figura 13).



Figura 13. Viste del complesso edilizio Piranesi44 a Milano e piante di alcuni alloggi. Tratta da [19].

Scheda 6. CityLife

CityLife è stato realizzato tra il 2007 e il 2014 al fine di riqualificare il quartiere storico della Fiera di Milano e ha visto coinvolti i più grandi architetti a livello internazionale degli ultimi anni (Zaha Hadid, Arata Isozaki, Daniel Libeskind). Caratterizzato da un parco pubblico che diventa un nuovo polmone verde cittadino e da tre torri ed edifici adibiti ad una serie di funzioni (uffici, pubblica utilità, musei e servizi commerciali), il quartiere presenta lo sviluppo di molteplici complessi residenziali organizzati in cinque aree diverse. Certificati in classe A, gli appartamenti prevedono in dotazione moderni sistemi di domotica con servizi di sicurezza avanzati e strutture per lo sport e il benessere [20]. L'uso delle fonti rinnovabili è la forza del complesso: il sistema di teleriscaldamento viene alimentato dal termovalorizzatore di Figino, rifornisce le torri a uffici e l'acqua calda sanitaria alle abitazioni, mentre l'acqua di falda alimenta gli scambiatori e le pompe di calore per il riscaldamento e il raffrescamento delle residenze. In tal modo, non è più necessario l'utilizzo di caldaie poiché lo scambiatore termico trasferisce il calore prelevato dalla rete agli ambienti climatizzati. Infine, i pannelli fotovoltaici in copertura alimentano gli impianti a servizio degli spazi comuni riducendo i consumi energetici [21]. Il sito è diventato il primo quartiere di Milano in classe A ad emissioni localizzate zero [22].

Residenze Hadid [20,23]

Si tratta di sette edifici plurifamiliari tutti diversi l'uno dall'altro con piani in numero variabile da 5 a 13 e 225 appartamenti in totale di svariate dimensioni. Tutti gli appartamenti utilizzano soluzioni strutturali e impiantistiche estremamente avanzate (Figura 14).



Figura 14. Descrizione e viste delle residenze del complesso CityLife. Immagini tratte da [20, 24].

Residenze Arata Isozaki + Andrea Maffei [25]

Il complesso, progettato attraverso il “penrose pattern”, incarnando la complessità della città di Milano, comprende tipologie residenziali e per uffici, in cui si alternano terrazze, pietra, vetro e frangisole (Figura 15).



Figura 15. Descrizione e viste delle residenze del complesso CityLife. Immagini tratte da [25].

Residenze Libeskind [20,24]

Il complesso di otto edifici plurifamiliari è scandito da balconate differenti ad ogni piano con altezze che variano da 4 a 13 piani e 382 appartamenti tutti diversi, da bilocali ad attici a doppia altezza che sembrano ville con giardini pensili e ampie vetrate (Figura 16). Le residenze risultano ottimizzate energeticamente e altamente sostenibili ed efficienti (classe energetica A), con particolare attenzione posta all'utilizzo dei materiali e di sistemi avanzati di riscaldamento e condizionamento oltre che di sistemi da fonti rinnovabili, come pannelli fotovoltaici. Inoltre, presentano sistemi domotici avanzati per l'accensione, lo spegnimento e il controllo anche da remoto di tutte le principali funzioni domestiche [21].



Figura 16. Descrizione e viste delle residenze del complesso CityLife. Immagini tratte da [20, 24].

Oltre alla città di Milano, anche il caso di L'Aquila è molto significativo per il particolare vissuto della città che ha visto la distruzione del centro storico in seguito al terremoto del 2009 e la necessità di implementare edifici di nuova costruzione su tutto il territorio limitrofo.

I tre progetti chiave che hanno portato alla realizzazione dei nuovi fabbricati sono il Progetto C.A.S.E. (19 Complessi antisismici sostenibili ed ecocompatibili) [26], gli insediamenti Map (21 Moduli abitativi provvisori) [27] e gli adeguamenti in 16 Aree di accoglienza (2009-2013) [28].

Tra le forme abitative essenziali se ne possono distinguere cinque tra cui *complessi plurifamiliari lineari* (case in linea di matrice rurale) e *isolati, aggregati plurifamiliari composti* (raggruppamenti densi ottenuti nel corso del tempo) e *palazzi plurifamiliari isolati e urbani* [28]. Le forme dell'abitare risultano estremamente variabili. Tra quelle citate e di cui si trova una descrizione approfondita in [28], di particolare interesse ai fini di questa trattazione sono alcune tipologie presentate in sintesi nelle schede di seguito (Scheda 7 e Scheda 8).

Scheda 7. Complesso plurifamiliare puntuale – L'Aquila

Il complesso plurifamiliare puntuale o isolato è costituito da edifici dalla pianta compatta su lotti liberi, con un elemento di distribuzione verticale che dà accesso a tre o quattro livelli fuori terra con un possibile piano interrato aggiuntivo adibito a parcheggio o deposito (Figura 17). La struttura è in calcestruzzo e mattone con finiture ad intonaco o mattoni faccia a vista. La copertura è a padiglione, a capanna o piana.

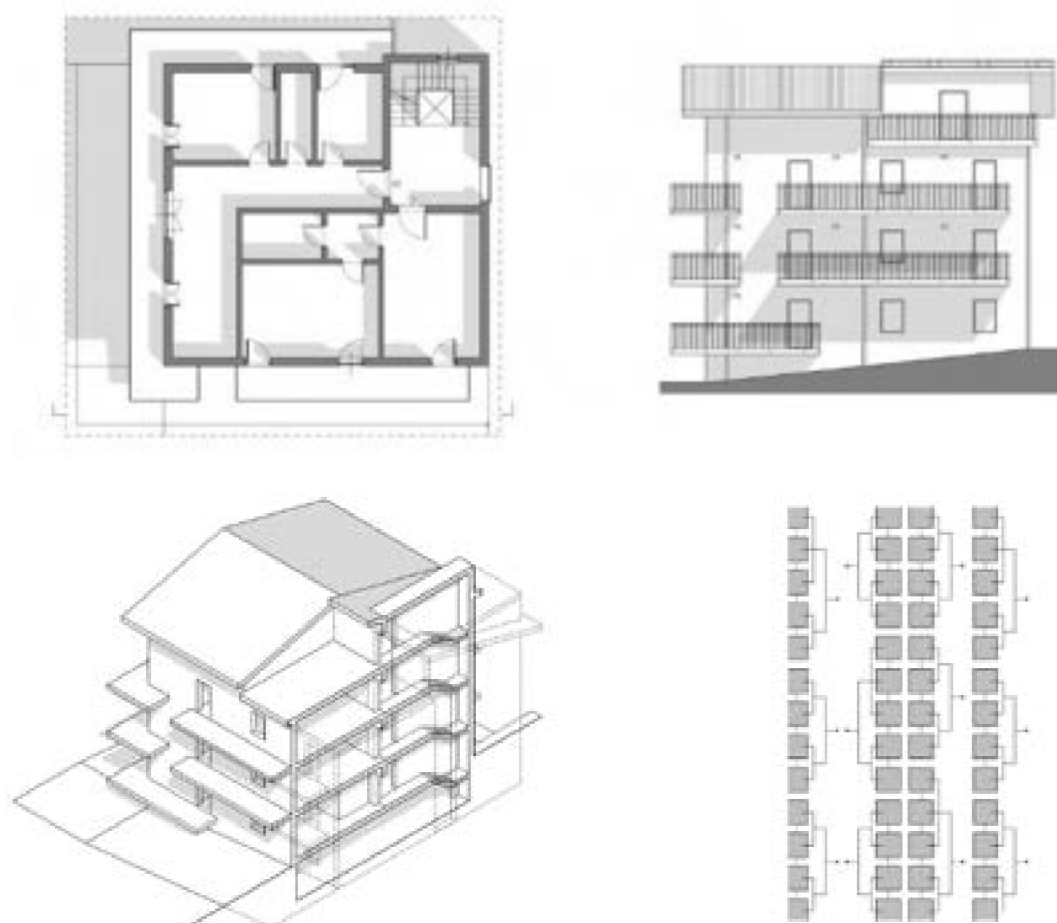


Figura 17. Complesso plurifamiliare isolato in via Don Luigi Sturzo a L'Aquila: pianta, prospetto, spaccato assonometrico e modello aggregativo tratti da [28].

Scheda 8. Palazzo plurifamiliare puntuale – L'Aquila

Il palazzo plurifamiliare puntuale, nella tipica conformazione a stecca, è caratterizzato da un doppio affaccio longitudinale e la forma volumetrica può più o meno avvicinarsi a quella a torre (Figura 18). È dotato di un corpo scala, spesso unico spazio collettivo insieme all'ingresso. Generalmente, si ha un numero di piani superiori a quattro con il primo adibito a usi commerciali. La struttura portante è in calcestruzzo armato mentre le rifiniture variano dal cemento a vista, all'intonaco, al mattone e alla ceramica smaltata. Le coperture possono essere a falda o piane. Il modello è quasi esportabile universalmente in quanto genera una tessitura uniforme e regolare.

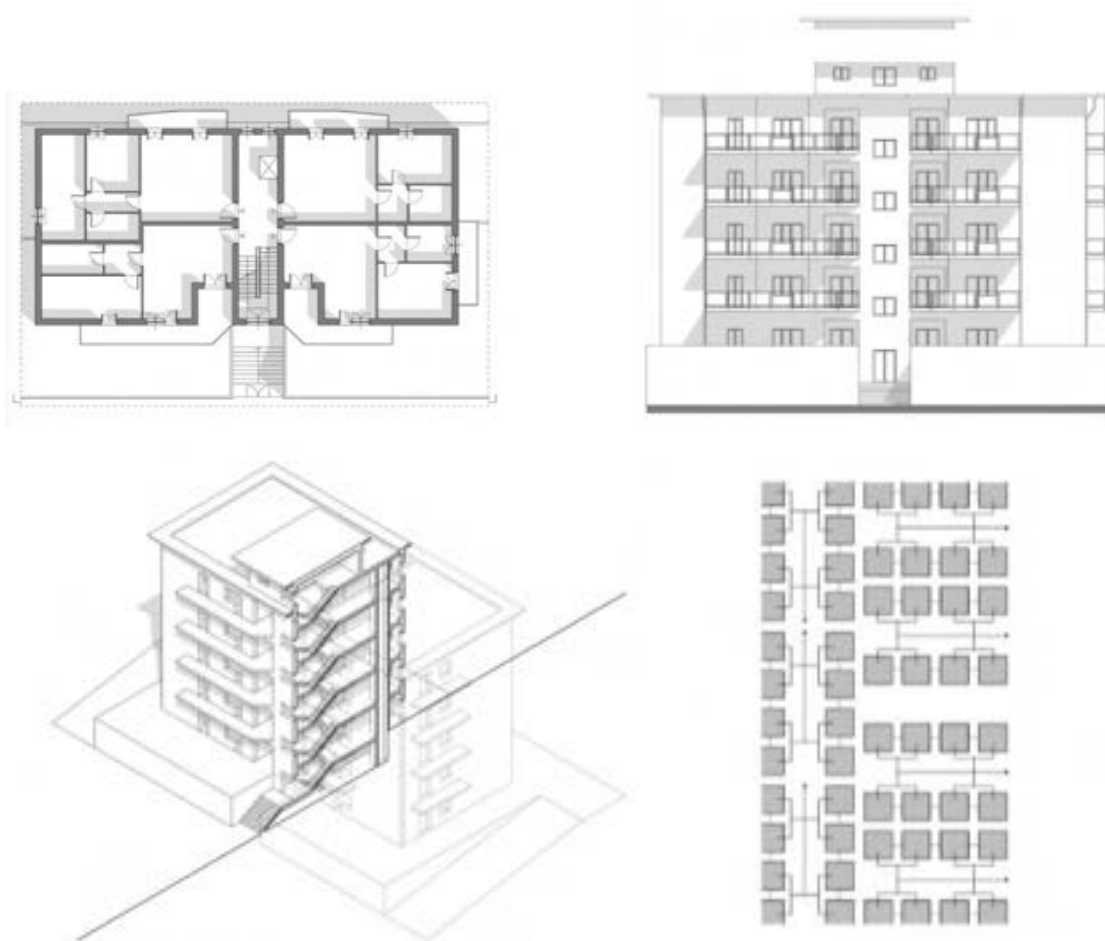


Figura 18. Palazzo plurifamiliare puntuale in via Strinella a L'Aquila: pianta, prospetto, spaccato assonometrico e modello aggregativo tratti da [28].

Tra i più importanti progetti degli ultimi anni, simbolo del tentativo di opporsi alla distruzione generata da catastrofi o disastri naturali come i terremoti, si colloca il progetto C.A.S.E. già citato. Oltre all'estrema attenzione ai requisiti antisismici per garantire la totale sicurezza degli abitanti, uno degli obiettivi prioritari del progetto è quello di contenere i consumi energetici e garantire un'elevata sostenibilità ambientale, attraverso l'utilizzo di soluzioni avanzate e innovative, ma allo stesso tempo realizzabili in tempi ridottissimi. Alcune delle strutture sono ancora utilizzate, altre sono ora a disposizione del Comune in caso di ulteriori emergenze (come ad esempio, per la quarantena di medici impegnati nell'emergenza sanitaria da Covid-19), altre ancora diventeranno studentato per i giovani universitari che frequentano i poli accademici dell'Università degli Studi di L'Aquila.

Scheda 9. Progetto C.A.S.E. – L'Aquila (Figure e descrizioni tratte da [26]).

Wood Beton

Distribuzione con tre vani scala e vano ascensore integrato. Strutture con pareti perimetrali portanti e pilastri puntuali. Blocchi edilizi suddivisi in quattro porzioni con allineamenti sfalsati. I prospetti asimmetrici dati dalle variazioni volumetriche esaltano il loro carattere indipendente (Figura 19).

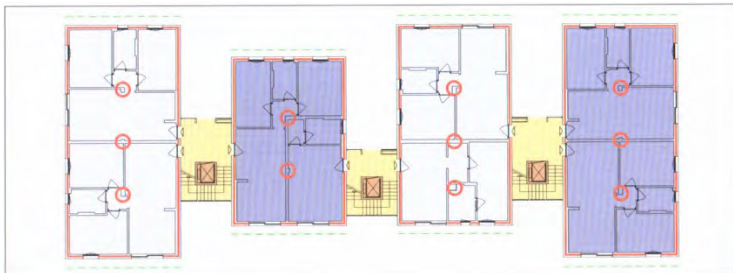


Figura 19. Complesso Wood Beton a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].

Consorzio stabile Consta

Distribuzione a ballatoio con unico vano scala centrale e ascensore in vano dedicato. Strutture verticali puntuali a pilastri. Blocchi edilizi bipartiti allineati sui fronti principali. I prospetti, simmetrici, associati con gli elementi metallici di facciata richiamano la regolarità della pianta (Figura 20).

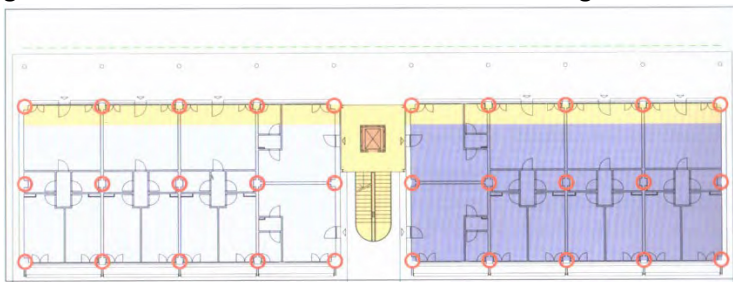


Figura 20. Complesso Consorzio Stabile Consta a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].

Consorzio stabile Etruria

Distribuzione con due vani scala a sviluppo rettilineo e ascensore in vano dedicato. Strutture verticali a pareti portanti. Blocchi edilizi tripartiti allineati su entrambi i fronti. I prospetti, simmetrici, attraverso la sovrastruttura metallica del colonnato inglobano balconi ed aggetti in un unico reticolo (Figura 21).

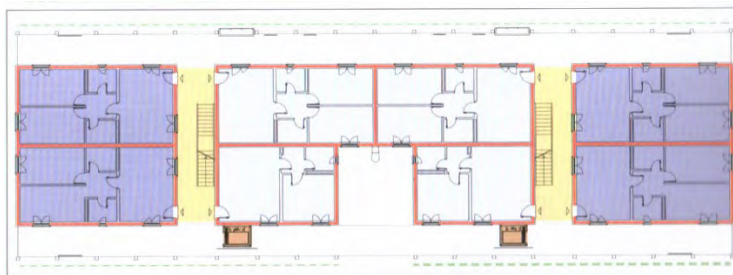


Figura 21. Complesso Consorzio Stabile Etruria a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].

Costruzioni G. Maltauro

Distribuzione con due vani scala che circondano i vani ascensore interni all'edificio. Strutture verticali puntuali in carpenteria metallica. Blocco edilizio allineato su due fronti principali. I prospetti, simmetrici, sono coerenti con lo sviluppo in pianta che per mezzo di bucatore e balconi vengono movimentati (Figura 22).

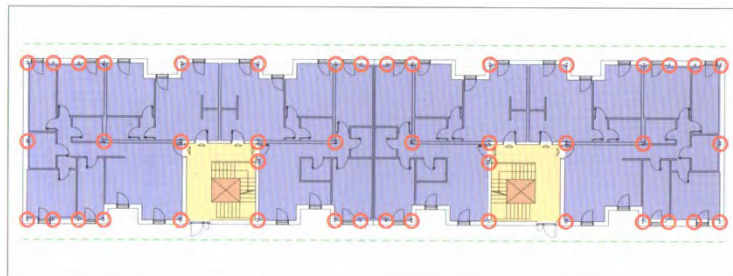


Figura 22. Complesso Costruzioni G. Maltauro a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].

Coge Costruzioni Generali

Distribuzione con due vani scala passanti e ascensore in vano dedicato. Strutture verticali puntuali a setti e pilastri. Blocchi edilizi allineati sul fronte principale. Il prospetto, asimmetrico, contraddice la regolarità della pianta introducendo dinamismo nella composizione di facciata (Figura 23).

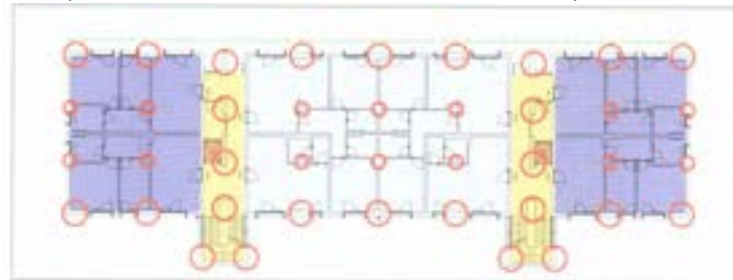


Figura 23. Complesso Costruzioni Generali a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].

Ing. Armido Frezza

Distribuzione con tre vani scala passanti e ascensore in vano dedicato. Strutture a pareti portanti. Blocchi edilizi allineati su entrambi i fronti. I prospetti, simmetrici, ripropongono la scansione quadripartita della pianta mediante le altezze delle unità edilizie (Figura 24).



Figura 24. Complesso ing. Armido Frezza a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].

Meraviglia

Distribuzione con tre vani scala esterni. Strutture verticali puntiformi. Blocchi edilizi allineati su entrambi i fronti con aggetti laterali. I prospetti, simmetrici, ripropongono la percezione simmetrica della pianta. I fronti si differenziano per una diversa collocazione delle sovrastrutture metalliche (Figura 25).



Figura 25. Complesso Meraviglia a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].

Eschilo

Distribuzione interna all'edificio con due vani scala-ascensore collegati da un unico corridoio. Strutture verticali puntiformi a pilastri in acciaio. Blocchi edilizi allineati su entrambi i fronti. I prospetti, simmetrici e simili tra loro, riportano nell'alzato dell'edificio la decisa e compatta simmetria della pianta (Figura 26).

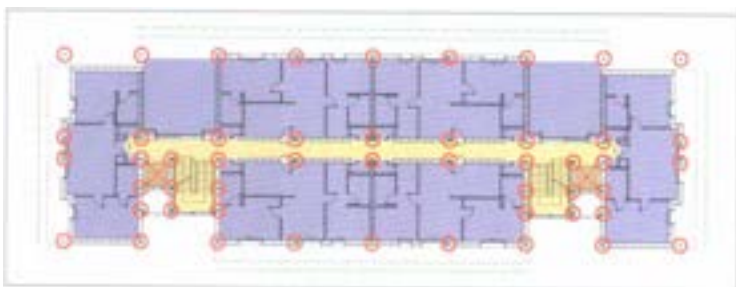


Figura 26. Complesso Eschilo a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].

Iter Gestione e Appalti

Distribuzione con due vani scala passanti e ascensore in vano dedicato. Strutture verticali rettilinee a parete. Blocchi edilizi tripartiti. I prospetti, simmetrici, sono concordi alla regolarità della pianta presentando nell'estrusione un incavo (Figura 27).



Figura 27. Complesso Iter Gestione e Appalti a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].

Donati

Distribuzione a ballatoio con doppio vano scala e unico ascensore in vano dedicato. Strutture verticali puntuali a pilastri e setti. Blocchi edilizi allineati sui fronti principali. I prospetti, asimmetrici, sono caratterizzati dall'aggetto dei bovindi e dal ballatoio che creano due facciate completamente differenti (Figura 28).



Figura 28. Complesso Donati a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].

Consorzio stabile Arcale

Distribuzione con tre vani scala-ascensore interni al perimetro dell'edificio. Strutture verticali a pareti portanti. Blocchi edilizi allineati sui due fronti principali. I prospetti, asimmetrici, propongono una lettura antinomica del tema pieno-vuoto avvolgendo l'edificio con facciate chiuse e sfondate (Figura 29).



Figura 29. Consorzio stabile Arcale a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].

D'Agostino Costruzioni Generali

Distribuzione con due vani scala passanti e ascensore in vano dedicato. Strutture verticali puntuali a pilastro. Blocchi edilizi allineati sul fronte principale. I prospetti, simmetrici, si presentano con una pelle continua, spezzata dall'incavo centrale, formata dal sistema scorrevole degli oscuranti (Figura 30).



Figura 30. Complesso D'Agostino Costruzioni Generali a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].

Orceana Costruzioni

Distribuzione a ballatoio con doppio vano scala e unico ascensore in vano dedicato. Strutture verticali a pareti portanti in legno tipo platform-frame. Blocchi edilizi disallineati su entrambi i fronti. I prospetti, simmetrici, sono caratterizzati dall'aggetto del ballatoio da una parte e dalla linearità delle bucature dall'altra (Figura 31).

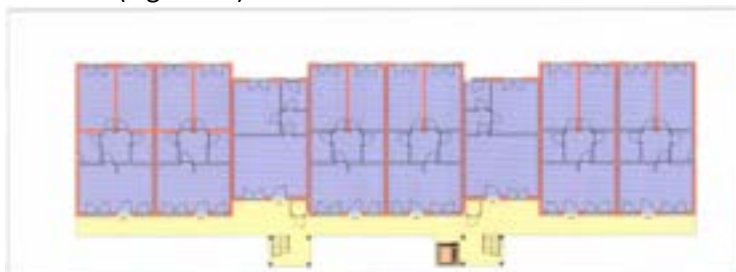


Figura 31. Complesso Orceana Costruzioni a L'Aquila: con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].

Imprese Costruzioni Pellegrini

Distribuzione con due vani scala passanti e ascensore in vano dedicato. Strutture verticali a pareti portanti. Blocchi edilizi disallineati sul fronte principale. I prospetti, simmetrici, vengono arricchiti attraverso l'articolazione dei balconi formando un gioco di piani sfalsati, meglio marcato su quello principale (Figura 32).

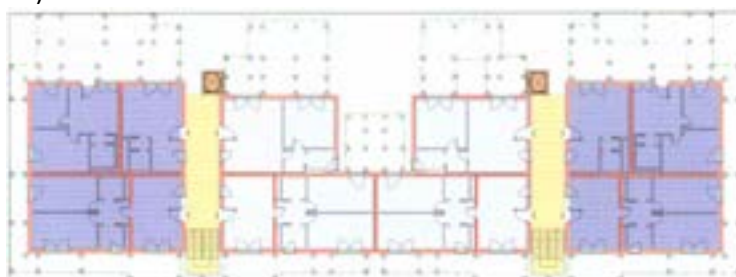


Figura 32. Complesso Imprese Costruzioni Pellegrini a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].

COSBAU

Distribuzione con due vani scala e ascensore in vano dedicato. Strutture verticali puntiformi (platform-frame). Blocchi edilizi con diversi allineamenti su entrambi i fronti. I prospetti, simmetrici, confermano nel loro sviluppo l'organicità della pianta (Figura 33).



Figura 33. Complesso COSBAU a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].

ILLE Prefabbricati

Distribuzione a ballatoio con scala a sviluppo rettilineo e ascensore in vano dedicato. Strutture verticali puntiformi (platform-frame). Blocchi edilizi allineati su entrambi i fronti. Il prospetto, simmetrico, attraverso la sovrastruttura metallica del ballatoio, viene racchiuso in una gabbia strutturale continua (Figura 34).

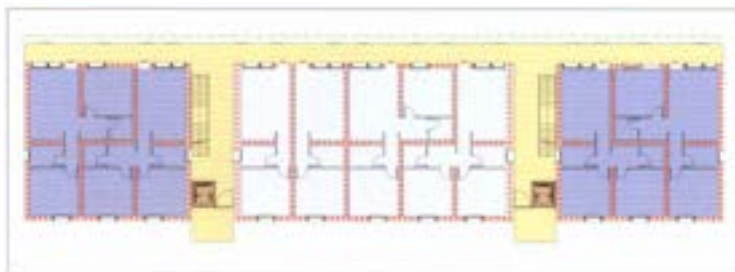


Figura 34. Complesso ILLE Prefabbricati a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].

Nei progetti appena citati nel par. 3.1.2 a L'Aquila sono state privilegiate differenti tipologie di strutture, realizzate in poche settimane: sei imprese hanno scelto il calcestruzzo armato, otto le strutture in legno e due l'acciaio (Tabella 8).

Tabella 8. Tecnologie costruttive per gli edifici del progetto C.A.S.E. Elaborazione da [26]

DITTA	EDIFICI REALIZZATI	TECNOLOGIA COSTRUTTIVA
Wood Beton spa	8	Legno a pannelli portanti a strati incrociati
Rti Consorzio Stabile Consta Soc. Cons spa/Sicap spa	12	C.a. prefabbricato a telaio
Consorzio Etruria Soc. coop. A.R.L	7	C.a. e polistirene a pareti portanti
Impresa costruzioni Giuseppe Maltauro spa/Taddei spa	28	Acciaio
Coge Costruzioni Generali spa/Consorzio Esi	7	C.a. prefabbricato a telaio con nodo a umido
Rti Ing. Armido Frezza srl/Walter Frezza Costruzioni/Archilegno srl	7	Legno a pannelli portanti a strati incrociati
Meraviglia spa	8	Legno a telaio travi e pilastri
Rti Eschilo Uno srl/Cogeim spa/Alfa Costruzioni 2008 srl	8	Acciaio
Rti Iter Gestione e Appalti spa/Sced spa/Vitale Costruzioni spa	22	Legno a pannelli portanti a strati incrociati
Rti Donati spa/Tirrena Lavori srl/Dema Costruzioni srl/Q5 srl	12	C.a. prefabbricato a telaio
Consorzio Stabile Arcale	7	Legno a pannelli portanti a strati incrociati
D'Agostino Angelo Antonio Costruzioni Generali srl	7	C.a. prefabbricato a telaio
Orceana Costruzioni spa	22	Legno a platform-frame
Impresa Costruzioni – Ing. Raffaello Pellegrini srl	12	C.a. a prefabbricato a pareti portanti
Cosbau spa	12	Legno a platform-frame
Ille	6	Legno a platform-frame

Interessante è la varietà delle strutture in legno realizzate secondo tre sistemi costruttivi differenti: a pannelli portanti con strati incrociati (tipo X-Lam), a pannelli intelaiati tipo *platform frame* (montanti e traversi rivestiti sulle due facce da OSB con isolante all'interno) e a telaio travi-pilastri (con pannelli tipo *platform frame* per irrigidimento trasversale e solai in travature in legno). I sistemi in acciaio sono costituiti, invece, da telai imbullonati controventati e solai in lamiera grecata. I sistemi in calcestruzzo armato sono, infine, prefabbricati (a telaio tamponati con pannelli prefabbricati in cls o sistemi leggeri tipo aquapanel o cemento rinforzato) o semi-prefabbricati con pilastri, travi e setti prefabbricati e i soli nodi gettati a umido.

Particolare attenzione è stata rivolta all'efficienza energetica e al comfort delle abitazioni. Sono stati applicati sistemi di schermature solari e pacchetti costruttivi ad alta inerzia termica con materiali da costruzione a bassa energia inglobata caratterizzati da un processo di produzione a basso consumo di energia e basse emissioni. Gli involucri sono altamente efficienti con l'utilizzo di materiali isolanti naturali (fibra di legno, sughero, lana di roccia) e sintetici (polistirene, polistirolo o poliuretano) e superfici trasparenti dotate di gas inerte, il tutto volto a ridurre al massimo le dispersioni verso l'esterno.

Per quanto riguarda i sistemi impiantistici, sono stati previsti sistemi centralizzati con una centrale di produzione e accumulo dotata di caldaie a condensazione del tipo modulare sia per riscaldamento che per produzione di acqua calda sanitaria della potenza media di circa 115 kW (Tabella 9), mentre non sono stati previsti sistemi per il raffrescamento estivo. Inoltre, sono stati ampiamente utilizzati pannelli radianti a pavimento e a soffitto, e sistemi di regolazione altamente efficienti con compensazione della temperatura esterna in centrale, valvole di miscelazione a tre vie in ogni appartamento e valvole termostatiche o termostati ambiente per una regolazione modulante in ogni locale.

Tabella 9. Caratteristiche impianti di riscaldamento e ACS nel progetto C.A.S.E. Elaborazione da [26]

GENERAZIONE	POTENZA MEDIA [kW]
Caldaie a condensazione	115 kW (per in media 25 appartamenti)
EMISSIONE	Efficienza
Pannelli radianti	0,95
Ventilconvettori	0,95

Tutte le case risultano in classe B, A e A+, grazie anche all'utilizzo di pannelli solari termici e fotovoltaici per fornire parte del fabbisogno energetico grazie all'impiego di fonti rinnovabili (Tabella 10), e classificate con un ottimo punteggio secondo i protocolli LEED e ITACA (Tabella 11).

Tabella 10. Caratteristiche sistemi da fonti rinnovabili nel progetto C.A.S.E. Elaborazione da [26]

Solare Termico			
SUPERFICI [m ²]	PRODUZIONE ANNUA [kWh/anno]	PRODUZIONE DI ACS GIORNALIERA [litri/giorno]	RIDUZIONE EMISSIONI CO ₂ [kg/anno]
7500	2.694.000	937.500	690.000
Fotovoltaico			
SUPERFICI [m ²]	PRODUZIONE ANNUA [kWh/anno]	PRODUCIBILITÀ [kWh/kWp]	RIDUZIONE EMISSIONI CO ₂ [kg/anno]
n.d.	5.640.000	1,2	3.000.000

Tabella 11. Certificazioni LEED e Protocollo ITACA. Tratta da [26]

REALIZZATORE	STRUTTURA	LOCALITÀ	ITACA		LEED	
			VAL 1	VAL 2		
WOOD BETON	LEGNO	CESE DI PRETURO	3,24	3,41	65/110	ORO
ARCALE	LEGNO	CESE DI PRETURO	3,23	3,41		
COGE	CLS	BAZZANO	3,23	3,40	70/110	ORO
COSBAU	LEGNO	CESE DI PRETURO	3,17	3,34	70/110	ORO
MALTAURO	ACCIAIO	BAZZANO	3,11	3,28	67/110	ORO
ORCEANA	LEGNO	CESE DI PRETURO	3,08	3,25		
ILLE	LEGNO	TEMPERA	3,03	3,20		
ITER	LEGNO	CESE DI PRETURO	2,99	3,16		
MERAVIGLIA	LEGNO	CESE DI PRETURO	2,91	3,06	63/110	ORO
FREZZA	LEGNO	BAZZANO	2,81	2,96		
CONSTA	CLS	BAZZANO	2,59	2,71	64/110	ORO
ESCHIOLO	ACCIAIO	BAZZANO	2,53	2,66	61/110	ORO
PELLEGRINI	CLS	CESE DI PRETURO	2,46	2,60		
D'AGOSTINO	CLS	SANT'ELIA 1	2,33	2,46		
ETRURIA	CLS	SANT'ELIA 1	2,26	2,38		
DONATI	CLS	SANT'ELIA 1	1,90	2,00		

Nonostante gli edifici di L'Aquila risalgano al 2009 e non rispondano più all'attuale normativa in materia energetica, molte delle tecnologie utilizzate sono attualmente diffuse e performanti con i dovuti adeguamenti agli standard attuali.

Dall'analisi di una parte degli edifici nZEB di nuova costruzione realizzati in Italia, invece, le cui schede dettagliate sono riportate nel documento finale stilato per l'Osservatorio nZEB ENEA [16], si evince che il cospicuo isolamento risulti la soluzione adottata più di frequente anche negli edifici multifamiliare.

A livello di involucro (Tabella 12), infatti, sono estremamente diffuse le tecnologie che utilizzano come isolante l'EPS, la lana di roccia e lana di vetro per le pareti, la lana minerale per le coperture. Inoltre, è diffuso l'utilizzo di vetri tripli basso emissivi soprattutto nelle zone più fredde.

Per gli impianti (Tabella 13) sono, invece, predilette, anche in questo caso, le soluzioni all-electric con utilizzo di pompe di calore (PdC) aria-acqua accoppiate all'impianto fotovoltaico (PV) per la produzione di energia elettrica e all'impianto solare termico per la produzione di acqua calda sanitaria (ACS).

Inoltre, è spesso presente un impianto di ventilazione meccanica (VMC) con recupero di calore (HR) e talvolta sistemi di accumulo termici (soprattutto per ACS) ed elettrici (Batterie).

Infine, molti degli edifici individuati presentano sistemi di domotica per la termoregolazione e il comfort climatico e per la gestione complessiva dei consumi e dei carichi energetici.

Tabella 12. Dati relativi agli edifici nZEB di nuova costruzione censiti nell'Osservatorio nZEB a cura di ENEA: parametri geometrici e descrizione dell'involucro con le relative trasmittanze. Rielaborazione dei dati tratti da [16]

NOME	COMUNE	ZONA CLIMATIC A	ANN O	DESTINAZIONE D'USO	N. PIANI	N. UNITÀ	SUP. (M ²)	PARETI ESTERNE	U _{PAR} (W/M ² K)	COPERTURE	U _{COP} (W/M ² K)	INFISSI	U _G (W/M ² K)
Edificio a torre in zona Mirafiori a Torino	Torino	E	2016	Condominio a torre	10	26 + (1 ufficio)	2006	Cappotto 20 mm	0.13	Isolamento 20 mm	0.15	Alluminio e Triplo vetro basso emissivo	1
Edificio condominiale a Civitanova Marche (MC)	Macerata	D	2016	Piccolo condominio	3	15	-	Blocchi laterizio porizzato e intercapedine in EPS	0.21	-	-	Telaio in PVC, vetrocamera basso emissivo	1.1
Edificio nello "Smart Village" Murialdo - Viterbo (VT)	Viterbo	D	2015	Grande condominio	4	13	2000	Blocchi in laterizio porizzato e lana di roccia	0.18	Tetto rovescio con 20 cm in XPS, 20 cm di ghiaia (tot. spessore 80 cm)	0.18	Legno triplo vetro con doppio rivestimento basso emissivo	0.8
Edificio plurifamiliare in zona Infernetto	Roma	D	2018	Piccolo condominio	3	27	1100	Blocchi di laterizio con stiferite in intercapedine (6 cm)	0.28	Isolamento con 100 mm XPS, cemento alleggerito (100mm)	0.26	PVC, vetrocamera Argon selettivo	1
Edificio condominiale «Casa di Luce»	BAT	C	2016	Grande condominio	5	21	3200	Mattone di tufo interno + biomattone in calce e canapa esterno + intonaco calce canapulino	0.18	-	-	Infissi termoisolanti	0.14
Edificio condominiale a Putignano	Bari	D	2018	Piccolo condominio	3	8	737	Isolamento a cappotto in eps78	0.15	Pannelli in lana di roccia	0.18	Doppio e triplo vetro	1.1 e 0.65

Tabella 13. Dati relativi agli edifici nZEB di nuova costruzione censiti nell'Osservatorio nZEB a cura di ENEA: descrizione dei sistemi impiantistici con i relativi parametri e ulteriori informazioni. Rielaborazione dei dati tratti da [16]

NOME	IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE INVERNALE	POTENZA INV (kW)	IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE ESTIVO	POTENZA EST (kW)	VMC	POTENZA (kW) / RICAMBI D'ARIA VMC (m³/h)	ACS	FER	SUP. PV (m²)	POTENZA INSTALLATA PV (kWp)	ILLUMINAZIONE	ALTRE INFO	COPERTURA DA FER (%)
Edificio a torre in zona Mirafiori a Torino	PDC aria-aria per ogni appartamento	2.30	PDC aria-aria per ogni appartamento	2.30	VMC con HR per ciascuna unità abitativa	2.30	PDC aria-acqua per ciascun appartamento	Fotovoltaico	180	24	LED per le parti comuni	CasaClima classe A	94
Edificio condominiale a Civitanova Marche (MC)	PDC aria-acqua	-	PDC aria-acqua	-	VMC con HR	-	PDC aria-acqua + accumulo termico 200l	Fotovoltaico (pannelli policristallino)	19.2	3.24	-	I dati si riferiscono ad ogni alloggio	87
Edificio nello "Smart Village" Murialdo - Viterbo (VT)	PDC centralizzato. Pavimento radiante	41.40	PDC centralizzato. Pavimento radiante	35.5	VMC con HR e sistema passivo By Pass della VMR + deumidificatore in cascata per l'estivo	-	Solare termico integrato con caldaia a condensazione da 30kW+accumulo 2000 l	Fotovoltaico (pannelli monocristallino)	96	15	-	-	65
Edificio plurifamiliare in zona Infernetto	3 PDC aria-acqua	60	Come climatizzazione invernale	-	-	-	Come climatizzazione invernale + solare termico	Fotovoltaico monocristallino	62	-	-	-	65.8
Edificio condominiale «Casa di Luce»	PDC aria-aria + pavimento radiante	-	PDC aria-aria + pavimento radiante	-	VMC con HR scambiatore di calore a doppio flusso incrociato	-	Solare termico e integrazione di calore	Fotovoltaico	-	0.80 per appartamento	-	-	87
Edificio condominiale a Putignano	Compact P + PDC aria-aria	0.75	Come climatizzazione invernale	-	VMC con HR	-	Come climatizzazione invernale + accumulo 180l	Fotovoltaico	106.6	4.6	-	-	-

4 Premesse allo studio energetico

4.1 Criticità delle simulazioni termo-energetiche con metodo di calcolo dinamico

Lo scopo di questo studio, sebbene perseguito mediante un approccio teorico, è di fornire spunti di riflessione per una progettazione in direzione ZEB. Una delle difficoltà principali è stata, da un lato, la necessità di ideare dei modelli di edificio molto dettagliati che consentano di ottenere una simulazione coerente ed un'analisi controllata, arrivando quasi al grado di dettaglio di una progettazione vera e propria; dall'altro, la volontà di non perdere la generalità dei modelli stessi per fornire indicazioni estendibili e valide per un contesto più ampio.

Tutte le ipotesi descritte sono il frutto, quindi, di una serie di considerazioni che hanno riguardato la selezione e l'analisi a monte delle scelte tecnologiche, costruttive, impiantistiche e progettuali da cui è derivato l'edificio analizzato. Le scelte e le ipotesi fatte sono frutto di una valutazione approfondita che, nell'ambito di un approccio di tipo iterativo, ha visto alternarsi decisioni progettuali e fasi di verifica delle scelte adottate, mirando alla definizione della configurazione più opportuna da analizzare, in funzione anche degli obiettivi prefissati. In base a quanto detto, è risultato fondamentale impiegare una metodologia di calcolo dinamica, che consente, dunque, di simulare il comportamento del sistema edificio-impianto nel tempo.

Tale metodo presuppone, tuttavia, una dovizia di particolari e un dettaglio progettuale tale da rendere doverosa un'analisi quanto più dettagliata di tutti i parametri richiesti in fase di modellazione e ciò rende la fase di costruzione del modello e, successivamente, quella di analisi dei risultati ottenuti molto onerosa in termini di dati ottenuti ed estrapolazione dei risultati di interesse. Tutte le ipotesi fatte sono, quindi, il risultato di una serie di considerazioni cicliche che hanno portato spesso alla revisione delle assunzioni iniziali ed al "cambiamento in corsa" delle stesse al fine di ottenere risultati attendibili e quanto più veritieri seppur nell'ottica di uno studio teorico che possa fornire spunti di riflessione per una progettazione in direzione ZEB. Alla luce di ciò è d'obbligo precisare che la metodologia di calcolo dinamica è sicuramente una delle più avanzate e consente di prevedere e simulare il comportamento dell'edificio nel tempo. Richiede, quindi, un estremo grado di dettaglio che superi le semplificazioni generalmente assunte in condizioni stazionarie e semi-stazionarie, in quanto valuta il comportamento del sistema edificio-impianto al variare delle condizioni al contorno, dipendendo fortemente dalla precisione dei dati in ingresso e dall'orizzonte temporale considerato per la simulazione.

Le simulazioni stazionarie e semi-stazionarie utilizzano come periodi di riferimento rispettivamente l'intera stagione di riscaldamento e raffrescamento o al più le medie mensili, con una conseguente riduzione in termini di dati in input e una semplificazione notevole del modello matematico ottenuto grazie alla costanza nel tempo di tali parametri: vengono, infatti, utilizzati per le condizioni al contorno e per le variabili climatiche valori medi stagionali o mensili per il calcolo dei consumi energetici e dei carichi termici per il dimensionamento degli impianti. Inoltre, anche nella definizione delle caratteristiche di involucro, viene considerata la trasmittanza termica delle strutture, ma si sottovalutano gli effetti inerenti proprietà come l'inerzia termica, lo sfasamento dell'onda termica nel tempo, il fattore di attenuazione o smorzamento dell'onda termica e la trasmittanza termica periodica. Tutte queste peculiarità sono, invece, considerate adottando un metodo di calcolo dinamico, che obbliga sicuramente ad una definizione più complessa, dettagliata e meno generalizzabile del caso studio, ma nello stesso tempo permette il raggiungimento di una descrizione accurata del comportamento del sistema edificio-impianto, andando a considerare la variabile tempo su scala oraria o sub-oraria. Tutti i dati climatici inseriti sono, quindi, orari o sub-orari e devono pertanto essere il frutto di un'elaborazione dettagliata così come diventa necessario ipotizzare profili di occupazione, funzionamento degli impianti, ventilazione naturale, utilizzo delle schermature, controllo ambientale e così via per ogni giorno dell'anno: valori non più standard ma adeguati alla tipologia di edificio che si sta analizzando e all'obiettivo dello studio stesso.

Il comportamento termico del sistema complesso edificio-impianto è strettamente dipendente dalla variabilità delle condizioni ambientali al contorno.

Il flusso termico trasmesso attraverso l'involucro è fortemente dipendente non soltanto dai materiali che lo caratterizzano e dalle proprietà termo-fisiche ad essi intrinseche, ma anche dalla variabilità delle condizioni

interne all'edificio (ad esempio modalità di occupazione e tipologie e gestione degli impianti) e, contemporaneamente, dalle condizioni climatiche esterne (ad esempio temperatura, umidità, radiazione solare).

Si rende necessario il ricorso a valutazioni di tipo dinamico per poter analizzare numericamente tali effetti, in quanto un approccio dinamico consente l'introduzione della variabile temporale, correlata agli effetti della capacità termica dei materiali, nel computare i fenomeni di trasmissione del calore.

Ciò comporta, infine, anche in uscita, una mole di dati e risultati estremamente vasta che richiede un lavoro aggiuntivo di selezione, controllo e aggregazione per ottenere risultati oggettivi e leggibili, con un dispendio di gran lunga più oneroso in termini di tempo e risorse sia in termini di un vero e proprio sforzo progettuale a monte, sia in termini di analisi conclusive a valle del lavoro svolto, derivanti dagli output su base oraria e sub-oraria.

Altra criticità è l'aspetto della qualità dei risultati ottenuti, che spesso rischiano di discostarsi anche di molto da valori realistici.

Alla luce di quanto detto tutto il lavoro che segue è frutto dello studio a tutto tondo dei casi analizzati e sfrutta il metodo di calcolo dinamico, utilizzando come supporto il motore di calcolo EnergyPlus, che consente di effettuare la stima dei carichi energetici e l'analisi dei fabbisogni termici ed energetici, adattati all'utenza e ai profili impostati. Per la modellazione ci si è avvalsi, inoltre, dell'interfaccia grafica esterna di supporto *DesignBuilder* vers. 6, seppur, in molti casi, soprattutto nella definizione dettagliata dei sistemi impiantistici, si sia reso necessario lavorare direttamente sugli "oggetti" di EnergyPlus e servirsi della relativa trattazione manualistica di supporto. Si tratta ovviamente di uno strumento di calcolo e come tale non è possibile utilizzarlo come strumento di valutazione della bontà delle scelte e delle informazioni immesse, di cui il gruppo di lavoro si è assunto il compito di valutare congruenza e correttezza.

4.2 Scelta delle località climatiche di riferimento per le simulazioni e implementazione dei file climatici

La scelta delle località climatiche che potessero essere idonee agli obiettivi della ricerca ha comportato una serie di riflessioni sulla significatività delle località rispetto alle zone climatiche.

Come si è evinto dalle indagini di mercato e statistiche, il parco immobiliare di nuova costruzione riguarda soprattutto aree a forte espansione urbana, come possono essere quelle periferiche dei capoluoghi di provincia e di regione, sicuramente più densi dal punto di vista della popolazione e con maggiori richieste.

Per tale motivo e per rendere significativa l'analisi, si è deciso per ogni zona climatica di considerare le città elencate in Tabella 14. Le zone climatiche A e B sono state considerate insieme, data l'esigua estensione in Italia della zona climatica A, di fatto sottoposta agli stessi limiti di legge della zona climatica B.

Tabella 14. Località utilizzate per le simulazioni nelle differenti zone climatiche

Regione	Città	Zona	GG	Altitudine	Latitudine	Longitudine
Sicilia	Palermo	B (A)	751	14	38°06'56"N	13°21'40"E
Campania	Napoli	C	1034	17	40°50'N	14°15'E
Lazio	Roma	D	1415	20	41°53'35"N	12°28'58"E
Lombardia	Milano	E	2404	122	45°28'01"N	9°11'24"E
Veneto	Belluno	F	3001	389	46°08'27"N	12°12'56"E

Una volta effettuata la scelta delle località, ci si è resi subito conto dell'inadeguatezza dei file climatici presenti nel database di EnergyPlus, in quanto non aggiornati agli ultimi dati effettivamente disponibili ed elaborati dal Comitato Termotecnico Italiano [29].

Per tale motivo, tutti i file climatici sono stati ricavati ex novo dalle elaborazioni CTI e costruiti nel software Elements (Figura 35), andando ad inserire i dati relativi alla località e ai parametri climatici (temperatura a bulbo secco, pressione atmosferica, umidità relativa, velocità del vento). Il programma calcola le variabili restanti, in modo tale da ottenere il file climatico completo.

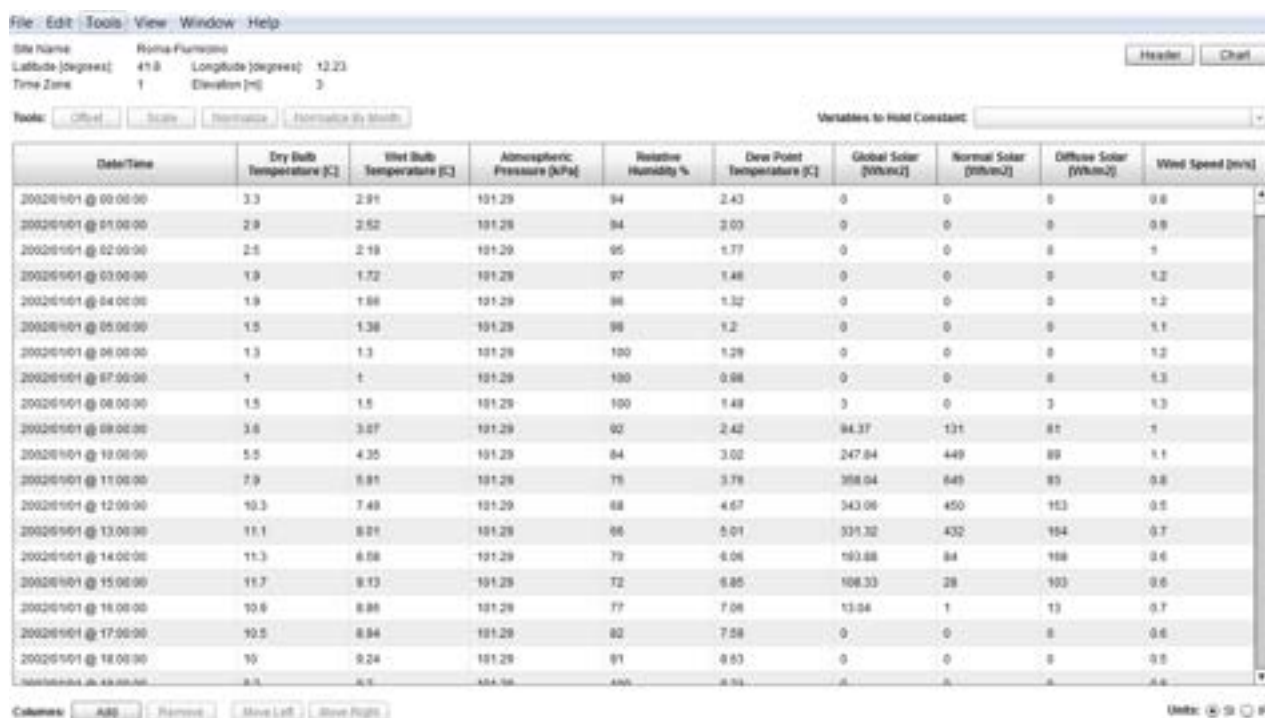


Figura 35. Esempio di inserimento di dati per la creazione del file climatico in Elements (in questo caso riferito alla città di Roma)

Particolare attenzione è stata posta alle grandezze riguardanti la radiazione solare. Si è, infatti, dovuta ricavare la componente diretta normale della radiazione solare, che non viene fornita dai dati CTI. Per fare ciò ci si è avvalsi dei dati di radiazione solare disponibili in ENEA [30 e 31], che utilizza il modello di stima per la radiazione HE08k/39st, e si è considerato il valore medio orario dell'angolo zenitale per il calcolo dell'irradianza diretta normale (DNI).

In tal modo, considerando le due componenti di radiazione diretta normale e diffusa si è ricavata in Elements la radiazione globale, con la verifica che essa risulti coerente ai dati forniti dal CTI stesso.

Il metodo applicato ha permesso di ottenere file climatici ad hoc per le singole località, aggiornati agli ultimi dati monitorati.

4.3 Criteri generali adottati per la scelta dei casi studio e per le analisi energetiche

Prima di entrare nello specifico della descrizione dei modelli analizzati e delle analisi energetiche è doveroso anticipare alcune assunzioni, alla base dello studio effettuato.

La scelta dei modelli di edificio mono e plurifamiliare si è basata sull'obiettivo di ottenere edifici zero energy, standard ad oggi non definito dalla normativa vigente. Pertanto, da un lato, l'analisi condotta è stata indipendente e svincolata dagli standard attuali sugli edifici di nuova costruzione (il Decreto Requisiti Minimi (Appendice A) [32], infatti, regola lo standard "nearly zero energy building" e non quello "zero energy building"), in quanto si cerca di ottenere un obiettivo ben più spinto e performante; dall'altro, si è cercato comunque di rientrare negli obblighi richiesti per tutti i parametri relativi al fabbricato e all'impianto così come normati per l'edificio di riferimento.

Ad esempio, per ciascun componente di involucro, sono stati rispettati il valore di trasmittanza U dell'edificio di riferimento per zona climatica (Tabella 15) per il soddisfacimento della verifica invernale dell'involucro (Decreto Requisiti Minimi (Appendice A) [32]), nonché i valori di trasmittanza termica periodica Y_{IE} (Tabella 16) o della massa superficiale per il soddisfacimento della verifica estiva, ad esclusione degli edifici in zona climatica F, laddove il valore medio mensile dell'irradianza sul piano orizzontale, nel mese di massima

insolazione estiva $I_{m,s}$, è maggiore o uguale a 290 W/m^2 . Inoltre, sulle strutture opache delimitanti il volume climatizzato verso l'esterno, in conformità alla UNI EN ISO 13788, è stata verificata l'assenza:

- di rischio di formazione muffe, con particolare attenzione ai ponti termici;
- di condensazioni interstiziali.

Tabella 15. Trasmittanza termica delle strutture nell'edificio di riferimento [32]

Zona climatica	Trasmittanze (2021) [W/m ² K]			
	U _{PARETI}	U _{COPERTURA}	U _{PAVIMENTO}	U _{SERRAMENTI}
A e B	0,43	0,35	0,44	3,00
C	0,34	0,33	0,38	2,20
D	0,29	0,26	0,29	1,80
E	0,26	0,22	0,26	1,40
F	0,24	0,20	0,24	1,10

Tabella 16. Trasmittanza termica periodica delle strutture nell'edificio di riferimento [32]

Componenti	Località con $I_{m,s} > 290 \text{ W/m}^2$
PARETI VERTICALI	$M_s > 230 \text{ kg/m}^2$ oppure $Y_{IE} < 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$
COPERTURE	$Y_{IE} < 0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$

Nell'individuare le soluzioni tecnologiche più performanti da adottare in ottica ZEB si è partiti, quindi, dall'individuazione di caratteristiche di involucro che rispettassero innanzitutto i requisiti di legge validi per le nuove costruzioni, quindi con i parametri U e Y_{IE} o M_s definiti dal Decreto, per valutare successivamente, in fase di modellazione dell'edificio, l'eventualità di rendere più restrittivi i relativi parametri o di agire principalmente sugli impianti per ottimizzare il consumo di energia del fabbricato.

Ulteriore precisazione è necessaria per la scelta dei periodi studiati di riscaldamento e raffrescamento. Per condurre le simulazioni in regime dinamico, per il periodo invernale è stato preso a riferimento il periodo definito dalla normativa [33,34] per l'accensione degli impianti per ciascuna zona climatica. Per la zona F si è deciso di adottare le stesse condizioni fissate per la zona E per ottenere una maggiore confrontabilità dei risultati (Tabella 17).

Tabella 17. Ore giornaliere di riscaldamento ipotizzate per zona climatica e relativo periodo di accensione

Zona climatica	Periodo di accensione	Ore massime di riscaldamento
A	1 dicembre - 15 marzo	6
B	1 dicembre - 31 marzo	8
C	15 novembre - 31 marzo	10
D	1 novembre - 15 aprile	12
E	15 ottobre - 15 aprile	14
F	Fissato come in zona E	Fissato come in zona E

Per la valutazione del fabbisogno estivo invece in mancanza di riferimenti normativi, si è individuato il periodo di quattro mesi che va da giugno a settembre.

Tutte le simulazioni sono state condotte su base oraria, giornaliera e mensile.

5 Scelta del modello di edificio-tipo monofamiliare

Il modello di residenza monofamiliare oggetto di questo studio è stato concepito cercando da un lato di soddisfare caratteristiche di semplicità e generalità al fine di renderlo il più versatile possibile in modello, per poterlo facilmente adattare ad esigenze e condizioni a contorno, dall'altro di avvicinarsi quanto più possibile ad un modello di edificio fattibile, che incontri le tendenze del mercato, e che per dimensioni, materiali, tecnologie e utilizzo, possa riprodurre con coerenza e affidabilità la realtà, in modo da poter essere preso a riferimento per alcune considerazioni a livello energetico ed economico estensibili in una visione più ampia.

5.1 Ipotesi di definizione delle due configurazioni di edificio tipo monofamiliare e delle relative tecnologie costruttive e impiantistiche applicate - caratteristiche generali

L'edificio è stato concepito con l'obiettivo di ottenere un fabbisogno energetico pari a zero o comunque minimo attraverso un'ottimizzazione delle strategie passive bioclimatiche e attive, e tramite il ricorso a produzione di energia da fonti rinnovabili.

Si è scelto, pertanto, un modello di edificio monofamiliare compatto, di forma rettangolare su due piani con una superficie utile complessiva di 75 m² circa (caratteristiche che, come precedentemente riportato dall'analisi dei dati presenti in letteratura nel cap. 3, risultano maggiormente diffuse e richieste su territorio nazionale).

La semplicità della forma può consentire agevolmente di ampliare e caratterizzare all'occorrenza l'analisi differenziando i sistemi di schermatura e/o eventuali sistemi di ombreggiamento quali logge e balconi in base alle zone climatiche.

5.1.1 Caratteristiche generali geometriche e dimensionali

Gli spazi all'interno del modello di residenza monofamiliare duplex seguono una distribuzione il più possibile funzionale. Al piano terra vi sono la zona giorno, collegata mediante scala interna con il disimpegno del piano primo, la cucina e un bagno con lavanderia. Al piano primo, invece, si trova la zona notte con due camere e un bagno. Trattandosi di un modello dalla geometria compatta la scelta dell'orientamento dell'edificio ha portato a prediligere un modello idealmente isolato dal contesto urbano. I dati generali del modello di edificio monofamiliare sono brevemente riportati in Tabella 18.

Alle aperture, come si vedrà in dettaglio nel seguito, sono stati comunque associati sistemi di schermatura e programmi di funzionamento customizzati, per ridurre al massimo eventuali problemi legati agli apporti solari in zone climatiche più calde.

Tabella 18. Dati generali del modello di edificio monofamiliare

Dati geometrici e generali	
Superficie lorda totale	101 m ²
Superficie netta	≈ 75 m ²
H _{tot} interpiano:	3,0 m
N. occupanti:	4 persone (famiglia tipo 2 adulti + 2 bambini)

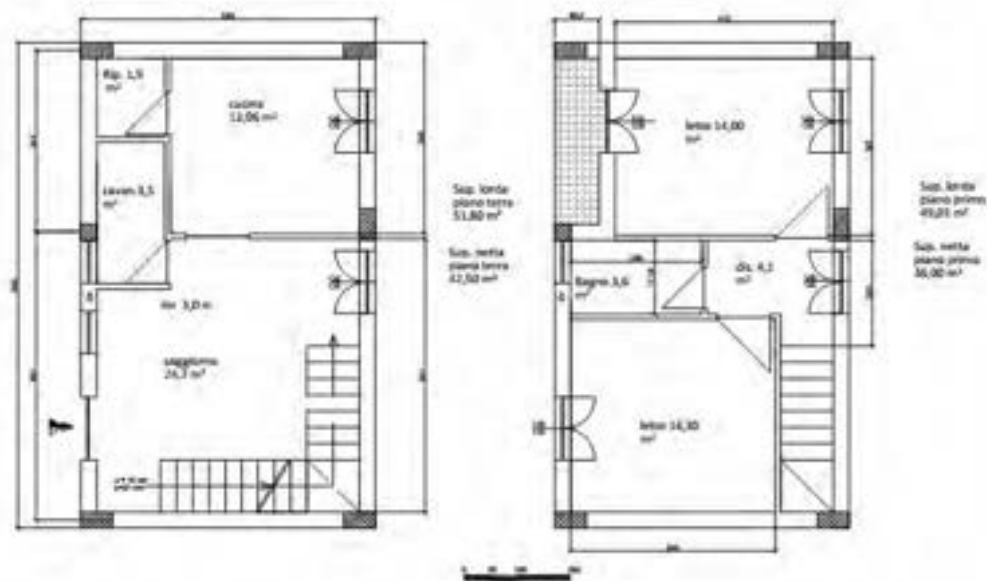


Figura 36. Layout piano terra e primo

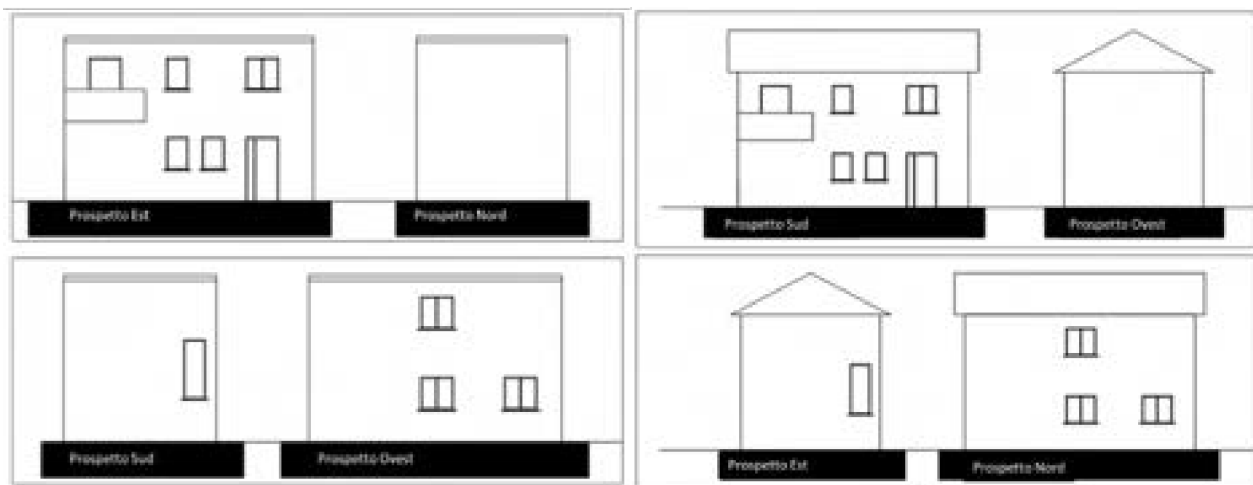


Figura 37. Prospetti residenza monofamiliare, configurazione 1 e 2

5.1.2 Tecnologie costruttive di involucro

Sono state analizzate due configurazioni per la residenza monofamiliare, scelte cercando di mantenere caratteristiche di generalità e verosimiglianza. Una prima configurazione prevede l'impiego di tecnologie e materiali che potremmo definire più "convenzionali" essendo caratterizzata da una struttura in c.a. e dall'utilizzo, per l'involucro opaco, di blocchi in laterizio alveolato cui è associato un sistema di isolamento a cappotto in lana di roccia. La scelta è ricaduta sul laterizio porizzato in quanto risulta ad oggi una delle soluzioni tecnologiche maggiormente utilizzate e che consente ottimi valori di comfort invernale (per valori contenuti di trasmittanza termica U) ed estivo nelle zone con clima mediterraneo. Questa soluzione consente il raggiungimento di valori ottimali di sfasamento e attenuazione dell'onda termica, e presenta inoltre ottimi valori di traspirabilità e durabilità che la rendono una soluzione ancora più vantaggiosa da un punto di vista di sostenibilità dell'ambiente. Nella tipologia monofamiliare la configurazione 1 prevede l'impiego di blocchi porizzati, cioè alleggeriti additivando all'impasto di argilla polistirolo o farine naturali che ne migliorano le caratteristiche termiche, e rettificati a incastro (per una posa più rapida), cui viene associato uno spessore (variabile in base alla zona climatica) di isolante in lana di roccia a cappotto, che consente il raggiungimento

di buoni valori di trasmittanza, l'eliminazione dei ponti termici e della formazione di condensa superficiale. La seconda configurazione invece, nel caso della residenza monofamiliare vede l'impiego di pannelli in X-lam associati ad un sistema di isolamento a cappotto questa volta con pannelli in fibra di legno. Il pannello X-lam consente di coniugare buona resistenza e ottime performance energetiche, la posa in opera a secco permette di ridurre notevolmente i tempi di cantierizzazione, senza contare che il materiale con cui è realizzato (legno al 99,4%) è considerato uno dei materiali sostenibili per eccellenza. Alcune fonti di letteratura [35, 36] mostrano che gli edifici in legno necessitano di una energia di produzione più bassa e risultano avere le più basse emissioni di carbonio rispetto alle costruzioni che impiegano altri materiali come argilla cotta, alluminio, acciaio e cemento. Per il solaio di copertura sono state valutate sia la tipologia piana, associata alla configurazione 1, sia la tipologia a falde per la configurazione 2, considerando tuttavia che la prima tipologia è generalmente più usata nei territori con climi più caldi (zone climatiche A, B, e C), mentre la seconda è sicuramente più idonea a climi più rigidi. Entrambe sono state comunque simulate ed analizzate in tutte le zone climatiche. Per quanto riguarda i solai di copertura e interpiano si mantiene per omogeneità la tipologia usata per le pareti (X-lam e laterizio rispettivamente). In entrambe le configurazioni, invece, per il solaio controterra è stata scelta una tipologia performante con vespaio aerato isolato, valida per tutte le zone climatiche. La Tabella 19 mostra in maniera qualitativa le scelte per ciascuna configurazione.

Tabella 19. Componenti di involucro per il modello di edificio tipo monofamiliare. Gli spessori variano a seconda della zona climatica analizzata

MONOFAMILIARE 1	
Codice struttura	Descrizione
Involucro opaco - Pareti verticali esterne per il modello di edificio tipo	
PVE1	Parete in blocco di laterizio alveolato + isolamento a cappotto in lana di roccia
Involucro opaco - Solaio interpiano	
SI1	Solaio in latero-cemento con isolante termico e acustico
Involucro opaco - Solaio contro-terra	
SCT1	Fondazione a travi rovesce in c.a. e vespaio aerato con isolamento (EPS) e impermeabilizzazione
Involucro opaco - Solaio di copertura	
COP1	Copertura piana in latero-cemento + isolamento in lana di roccia
Involucro trasparente - Serramenti	
VD1	PVC e Doppio Vetro (zone A, B, C, D)
VT1	PVC e Triplo Vetro (E, F)
MONOFAMILIARE 2	
Codice struttura	Descrizione
Involucro opaco - Pareti verticali esterne per il modello di edificio tipo	
PVE2	Parete in pannelli X-lam + isolamento a cappotto in fibra di legno
Involucro opaco - Solaio interpiano	
SI2	Solaio in pannelli X-lam con isolante termico e acustico
Involucro opaco - Solaio contro-terra	
SCT1	Fondazione a travi rovesce in c.a. e vespaio aerato con isolante in EPS
Involucro opaco - Solaio di copertura	
COP2	Copertura a falde ventilata in X-lam + isolamento in fibra di legno
Involucro trasparente - Serramenti	
VD2	Legno e Doppio Vetro (zone A, B, C, D)
VT2	Legno e Triplo Vetro (E e F)

In Tabella 20 invece sono riportati gli spessori di isolante per ciascuna zona climatica, per entrambe le configurazioni di edificio monofamiliare.

Tabella 20. Valutazione degli spessori di isolante per ciascuna zona climatica, per entrambe le configurazioni di edificio monofamiliare

Configurazione 1 - monofamiliare						
<i>Tipo di chiusura</i>	<i>Tecnologia scelta</i>	<i>Spessori di isolante per zona climatica</i>				
		A-B	C	D	E	F
Orizzontale di copertura	COP1	6	7	8	10	12
Verticale esterna	PVE1	3	5	7	8	8
<i>Tipologia di vetri per zona climatica</i>						
Infissi	Taglio termico	VD1	VD1	VD1	VT1	VT1
Configurazione 2 - monofamiliare						
<i>Tipo di chiusura</i>	<i>Tecnologia scelta</i>	<i>Spessori di isolante per zona climatica</i>				
		A-B	C	D	E	F
Orizzontale di copertura	COP2	3	4	7	10	12
Verticale	PVE2	8	8	9	11	12
<i>Tipologia di vetri per zona climatica</i>						
Infissi	Taglio termico	VD2	VD2	VD2	VT2	VT2

Nella Tabella 21 di seguito riportata sono sintetizzate le caratteristiche termo fisiche dei componenti di involucro della configurazione 1, in Tabella 22 quelli della configurazione 2.

Tabella 21. Tabella riassuntiva delle caratteristiche termo-fisiche, dei componenti di involucro per la configurazione 1 – edificio monofamiliare

CONFIGURAZIONE 1 MONOFAMILIARE tradizionale						
PVE1	Chiusura verticale esterna: Parete in blocco di laterizio porizzato + isolamento esterno in lana di roccia					
	Descrizione degli strati	Spessore (s) [m]	Conducibilità termica (l) [W/mK]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m³]	Resistenza termica [m²K/W]
1	Intonaco calce cemento interno	0,02	0,9	1000	1800	
2	Laterizio porizzato e rettificato	0,3	0,23	840	860	
3	Lana di roccia	Varia a seconda della zona climatica	0,035	1030	78	
4	Intonaco calce cemento	0,02	0,9	1000	1800	
S11	Chiusura orizzontale intermedia tra appartamenti: Solaio in latero-cemento con strato di isolante termico e acustico					
	Descrizione degli strati	Spessore (s) [m]	Conducibilità termica (l) [W/mK]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m³]	Resistenza termica [m²K/W]
1	Pavimentazione in piastrelle	0,02	0,94	840	1700	
2	Malta sottofondo	0,015	1	1000	1800	
3	Calcestruzzo	0,06	0,34	1000	270	
4	Isolamento termico (Lana di roccia)	0,04	0,036	1030	78	
5	Barriera al vapore	0,002	0,17	840	662	
6	Calcestruzzo	0,06	0,34	1000	270	
7	Solaio latero-cementizio	0,18				1,58
8	Intonaco interno	0,015	0,54	1000	1500	
COP1	Chiusura orizzontale superiore: Copertura piana isolata					
	Descrizione degli strati	Spessore (s) [m]	Conducibilità termica (l) [W/mK]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m³]	Resistenza termica [m²K/W]
1	Pavimentazione per esterni	0,03	1	800	2000	
2	Malta di sottofondo	0,025	1,4	650	2100	
3	Impermeabilizzazione	0,01	0,23	1000	1100	
4	Lana di roccia	Varia a seconda della zona climatica	0,036	1030	140	
5	Barriera al vapore	0,01	0,17	840	662	
6	Massetto delle pendenze	0,05	0,41	1200	840	
7	Solaio latero-cemento	0,3				1,58
8	Intonaco interno	0,015	0,9	1000	1500	

Tabella 22. Tabella riassuntiva delle caratteristiche termo-fisiche, dei componenti di involucro per la configurazione 2 – edificio monofamiliare

CONFIGURAZIONE 2 MONOFAMILIARE (X-LAM)						
PVE2	Chiusura verticale esterna: Parete XLAM con isolante in fibra di legno					
	Descrizione degli strati	Spessore (s) [m]	Conduktività termica (l) [W/mK]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m³]	Resistenza termica [m²K/W]
1	Rasante	0,004		840	1800	0,15
2	Isolante in fibra di legno	Variabile per zona climatica	0,042	2100	140	
3	Pannello XLAM 3 strati	0,1	0,13	1600	500	
4	Camera d'aria	0,026		1000	1	0,16
5	Cartongesso	0,02	0,25	1090	900	
SI2	Chiusura orizzontale intermedia tra appartamenti: Solaio in XLAM on strato di isolante termico e acustico					
	Descrizione degli strati	Spessore (s) [m]	Conduktività termica (l) [W/mK]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m³]	Resistenza termica [m²K/W]
1	Pavimentazione in piastrelle	0,02	0,9	840	2300	
2	Malta sottofondo	0,015	1	1000	1800	
3	Calcestruzzo	0,06	0,34	1000	270	
4	Fibra di legno	0,04	0,041	2100	140	
5	Barriera al vapore	0,002	0,17	840	662	
6	Calcestruzzo	0,06	0,34	1000	270	
7	Xlam 5 strati	0,16	0,13	1600	500	
8	Cartongesso	0,015	0,25	1000	900	
COP2	Chiusura orizzontale superiore: Copertura piana isolata					
	Descrizione degli strati	Spessore (s) [m]	Conduktività termica (l) [W/mK]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m³]	Resistenza termica [m²K/W]
1	Manto copertura	0,02	0,84	800	1900	
2	air gap	0,05		1000	1	0,16
3	Membrana bitume	0,002	0,23	1000	1100	
4	Fibra di legno	Variabile per zona climatica	0,039	2100	140	
5	Barriera al vapore	0,002	0,17	840	662	
6	Pannello X-LAM 5 strati	0,16	0,13	1600	500	
7	Air gap	0,025				0,16
8	Rasante/collante	0,01				0,15
9	Cartongesso	0,025	0,25	1000	900	

Tabella 23. Tabella riassuntiva delle caratteristiche termo-fisiche del solaio su vespaio aerato comune ad entrambe le configurazioni – edificio monofamiliare

SCT Chiusura orizzontale di base: Solaio contro terra							
	Descrizione degli strati	Spessore (s) [m]	Conduktività termica (l) [W/mK]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (p) [kg/m³]	Resistenza termica [m²K/W]	
1	Pavimento /piastrelle	0,03	0,8	850	1700		
2	Malta sottofondo	0,02	1,4	650	2100		
3	Calcestruzzo	0,05	0,34	1000	270		
4	Vespaio EPS	0,10	0,037	1200	12		
5	Barriera al vapore	0,02	0,17	840	662		
6	Calcestruzzo	0,14	0,34	1000	270		
7	Air gap	0,35				0,16	
8	C.a. - platea	0,15	0,34	1000	270		

Nella Tabella 24 sono riportate sinteticamente le caratteristiche degli infissi per ciascuna configurazione in ciascuna zona climatica.

Tabella 24. Tabella riassuntiva delle caratteristiche degli infissi nelle due configurazioni analizzate, per ciascuna zona climatica

Caratteristiche						Trasmittanza [W/m²K]	Trasmittanza rif.(2021) [W/m²K]
Configu-razioni	Zona climatica	Vetro	Spessore strati	Gas interc.	Materiale telaio	U _w	U _{SERRAMENTI}
1	A e B	doppio vetro -alta prestazione	4-12-4	Argon	PVC - profilo vuoto	1,85	3
	C	doppio vetro -alta prestazione	4-12-4	Argon	PVC - profilo vuoto	1,8	2,2
	D	doppio vetro -alta prestazione	4-12-4	Argon	PVC - profilo vuoto	1,8	1,8
	E	triplo vetro alta prestazione	4-12-4-12-4	Argon	PVC - profilo vuoto	0,9	1,4
	F	triplo vetro alta prestazione	4-12-4-12-4	Argon	PVC - profilo vuoto	0,9	1,1
2	A e B	doppio vetro -alta prestazione	4-12-4	Argon	Legno tenero spessore 90 mm	1,85	3
	C	doppio vetro -alta prestazione	4-12-4	Argon	Legno tenero spessore 90 mm	1,8	2,2
	D	doppio vetro -alta prestazione	4-12-4	Argon	Legno tenero spessore 90 mm	1,8	1,8
	E	triplo vetro alta prestazione	4-12-4-12-4	Argon	Legno tenero spessore 90 mm	0,9	1,4
	F	triplo vetro alta prestazione	4-12-4-12-4	Argon	Legno tenero spessore 90 mm	0,9	1,1

5.1.3 Tecnologie impiantistiche

L'obiettivo di evitare l'utilizzo di fonti da combustibili fossili ha determinato la scelta dell'ipotesi (Tabella 25) descritta di seguito in dettaglio, comune ad entrambe le configurazioni di involucro, caratterizzata da un sistema di climatizzazione invernale ed estiva che si avvale di una pompa di calore aria-acqua monoblocco inverter, a servizio di terminali del tipo a ventilconvettori.

Tabella 25. Schematizzazione dell'ipotesi adottata di configurazioni impiantistiche per il modello di edificio tipo monofamiliare

Configurazione impiantistica adottata
Climatizzazione
Pompa di calore aria-acqua monoblocco per il riscaldamento e il raffrescamento
Presenza di accumuli a servizio del sistema di climatizzazione
Terminali a ventilconvettori
Acqua calda sanitaria
Pompa di calore aria-acqua
1 Accumulo per ACS
Fonti rinnovabili
Pannelli fotovoltaici installati in copertura
Pannelli solari termici per acqua calda sanitaria

La scelta è ricaduta su tale tipologia per conservare flessibilità di modellazione nelle differenti zone climatiche senza incorrere in eventuali problemi di condensa estiva, che invece possono presentarsi nel caso di pannelli radianti.

La potenza della pompa di calore è stata scelta valutando il fabbisogno nelle differenti zone climatiche e con le differenti configurazioni di involucro, e calcolando la potenza necessaria in riscaldamento e raffrescamento.

Per semplicità di modellazione e sempre al fine di garantire flessibilità nell'analisi, si è scelto una pompa con caratteristiche che in alcune condizioni possono risultare leggermente sovrastimate.

Per la residenza si è fissata una temperatura di set-point pari a 20°C in inverno e 26°C in estate. Di seguito nella Tabella 26 sono riportati i parametri significativi del sistema di generazione per la climatizzazione estiva ed invernale.

Tabella 26. Descrizione e parametri significativi del sistema di generazione per la climatizzazione estiva e invernale adottato nell'edificio monofamiliare

Climatizzazione invernale ed estiva		
Generazione	Pompa di calore aria-acqua per riscaldamento e raffrescamento	
	Caratteristiche in riscaldamento	
	Temperatura di set-point in inverno	20°C
	Potenza Termica nominale	15,70 kW
	Temperatura aria esterna 7°C – 87% U.R., temperatura acqua 30/35°C - EN 14511	
	COP nominale	4,10
	Temperatura aria esterna 7°C – 87% U.R., temperatura acqua 30/35°C - EN 1451	
	Potenza Termica nominale	14,70 kW
	Temperatura aria esterna 7°C – 87% U.R., temperatura acqua 40/45°C - EN 14511	
	COP nominale	3,23
	Temperatura aria esterna 7°C – 87% U.R., temperatura acqua 40/45°C - EN 1451	
	Mandata acqua ventilconvettori	45°C
	Ritorno acqua in pompa di calore	40°C
	$\Delta T_{\text{Mandata-Ritorno}}$	5°C
	Caratteristiche in raffrescamento	
	Temperatura di set-point in estate	26°C
	Potenza frigorifera nominale	16,60 kW
	Temperatura aria esterna 35°C, temperatura acqua 23/18°C - EN 14511	
	EER nominale	4,00
	Mandata acqua ventilconvettori	7°C
	Ritorno acqua in pompa di calore	12°C
	$\Delta T_{\text{Mandata-Ritorno}}$	5°C
Emissione Ventilconvettori	Alimentazione elettrica V/Ph/Hz	230±10V/1/50
	Portata d'aria m ³ /h	560
	Caratteristiche in riscaldamento	
	Potenza kW	3,3
	Portata d'acqua m ³ /h	0,57
	Caratteristiche in raffrescamento	
	Potenza kW	2,97
	Portata d'acqua m ³ /h	0,52

Per quanto riguarda l'acqua calda sanitaria è stato previsto invece un sistema a pompa di calore dedicata integrato con solare termico e serbatoio di accumulo.

Per un dimensionamento di massima è stato stimato un fabbisogno di acqua calda sanitaria di circa 70 l/persona, ottenendo così un indice di consumo di 3,2 l/m²giorno, utile alla definizione del sistema in sede di modellazione (Tabella 27).

Tabella 27. Stima dell'indice di consumo giornaliero di acqua calda sanitaria

CALCOLO FABBISOGNO ACS	
Superficie utile	75 m ²
Consumo medio (pro capite/giorno);	70 l
N persone	4
Tasso di consumo	3.2 l/m ² g)

A servizio delle pompe sono stati anche ipotizzati sistemi di accumulo termico per riscaldamento e acqua calda, dimensionati in modo tale da potersi adattare opportunamente alle esigenze del carico.

Al fine di garantire la produzione di acqua calda sanitaria da fonte rinnovabile si è ipotizzato nella simulazione l'impiego di un collettore solare a tubi sottovuoto (Tabella 28) con una superficie lorda totale di circa 5,3 m² e una superficie captante di circa m² 3,26 ed in associazione ad un serbatoio di accumulo di 250 l. I collettori sono di elevata efficienza secondo il principio "heatpipe", con spegnimento automatico in funzione della temperatura.

Tabella 28. Caratteristiche del collettore solare ipotizzato nell'edificio monofamiliare

Pannello solare termico	
N. tubi	18
Superficie lorda	5,30 m ²
Superficie di assorbimento	3,26 m ²
Superficie di apertura	3,46 m ²
Distanza tra i collettori	44 mm
Rendimento ottico riferito alla superficie di assorbimento	76,7 %

Per annullare l'eventuale ombra generata dal collettore solare che comprometterebbe efficienza dei pannelli fotovoltaici in copertura, si è individuato un collettore indicato per l'installazione orizzontale su superfici piane.

Ad integrazione dell'impianto solare termico, per sopperire all'eventuale mancanza di produzione di acqua calda sanitaria soprattutto in inverno, si è ipotizzata comunque la presenza di una pompa di calore aria-acqua con caratteristiche riportate in Tabella 29.

Tabella 29. Caratteristiche pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria – edificio monofamiliare

Pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria	
COP	3,64
Temperatura min/max aria	-7/42 °C
Potenza elettrica assorbita media	700 W
Capacità nominale accumulo	250 l

Per quanto riguarda l'impianto fotovoltaico, si stima che il consumo medio di una famiglia ammonta almeno a 3000/3500 kWh l'anno di energia elettrica con le normali utenze. Per la residenza monofamiliare la massima superficie occupabile e disponibile, sia per i pannelli fotovoltaici che per il solare termico, in copertura equivale a circa 53 m², mentre è previsto un angolo di inclinazione per i pannelli pari a 30°, distanziando opportunamente le file dei pannelli in modo da evitare problemi di ombreggiamento.

Si è scelto di disporre quindi i pannelli in 3 file da 4 pannelli ciascuna, per una superficie totale di 21,6 m² ed una potenza di picco pari a 4,44W.

In Tabella 30 si riportano le caratteristiche adottate per i pannelli fotovoltaici, presupponendo di utilizzare sistemi estremamente avanzati dal punto di vista tecnologico, data la poca disponibilità di superficie libera su cui è possibile installarli.

Tabella 30. Caratteristiche dei pannelli fotovoltaici adottati nel modello di edificio monofamiliare

Modulo	
Tipo	Monocristallino
Dimensioni	1,69 x 1,05 m
Superficie	1,76 m ²
Potenza nominale	370 W
Efficienza	20,09 %
Superficie disponibile	53 m ²
Potenza di picco totale	4,44 W

5.2 La costruzione dei modelli di edificio monofamiliare per le simulazioni in regime dinamico

Come si è detto già nei paragrafi precedenti si è scelto di differenziare le due configurazioni di casa monofamiliare, per tecnologie, materiali e ovviamente in base alle esigenze climatiche. La geometria, invece, fatta salva la scelta di modellare due tipologie distinte di copertura, è comune, così come la distribuzione interna degli spazi.

5.2.1 Geometria e involucro opaco e trasparente

Per l'edificio monofamiliare è stata realizzato un layout opportunamente semplificato per renderlo funzionale all'importazione, per la costruzione del modello è stata impiegata l'interfaccia grafica di *EnergyPlus*, procedendo con la definizione dei blocchi componenti, dei due piani della casa collegati mediante vano scala interno, la rappresentazione del balcone, l'individuazione delle partizioni interne. Di seguito sono riportati i modelli realizzati per la configurazione 1 (Figura 38) e per la configurazione 2 (Figura 39).

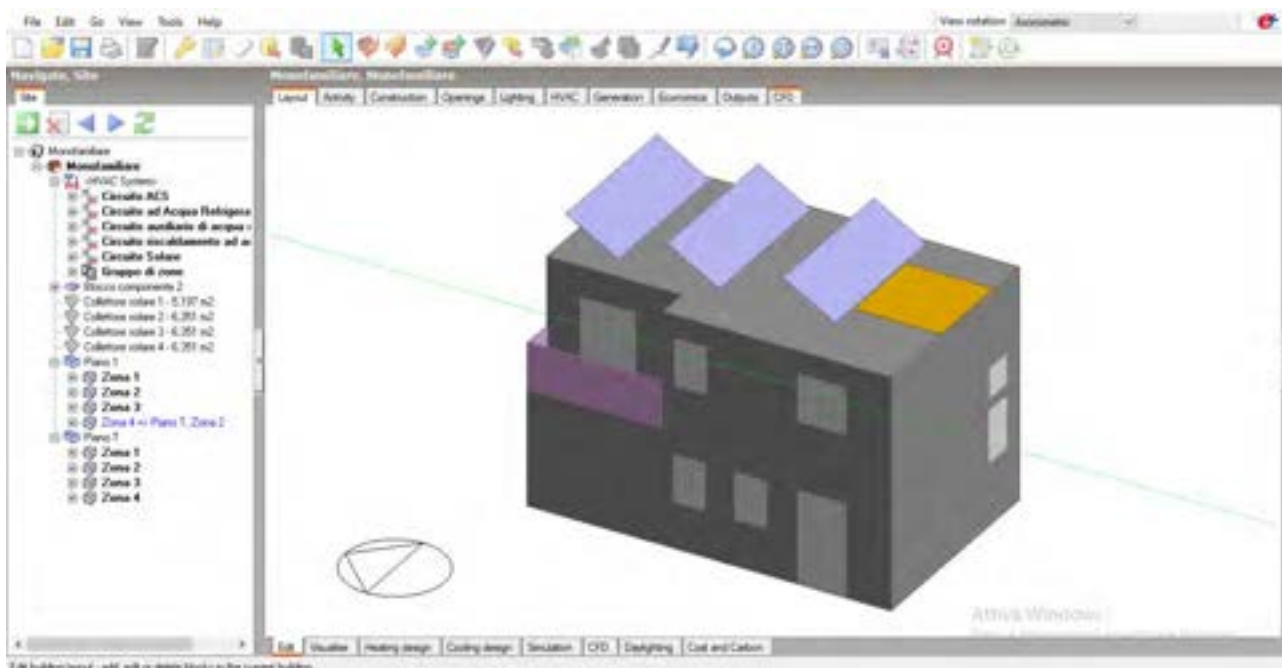


Figura 38. Modello edificio monofamiliare – configurazione 1

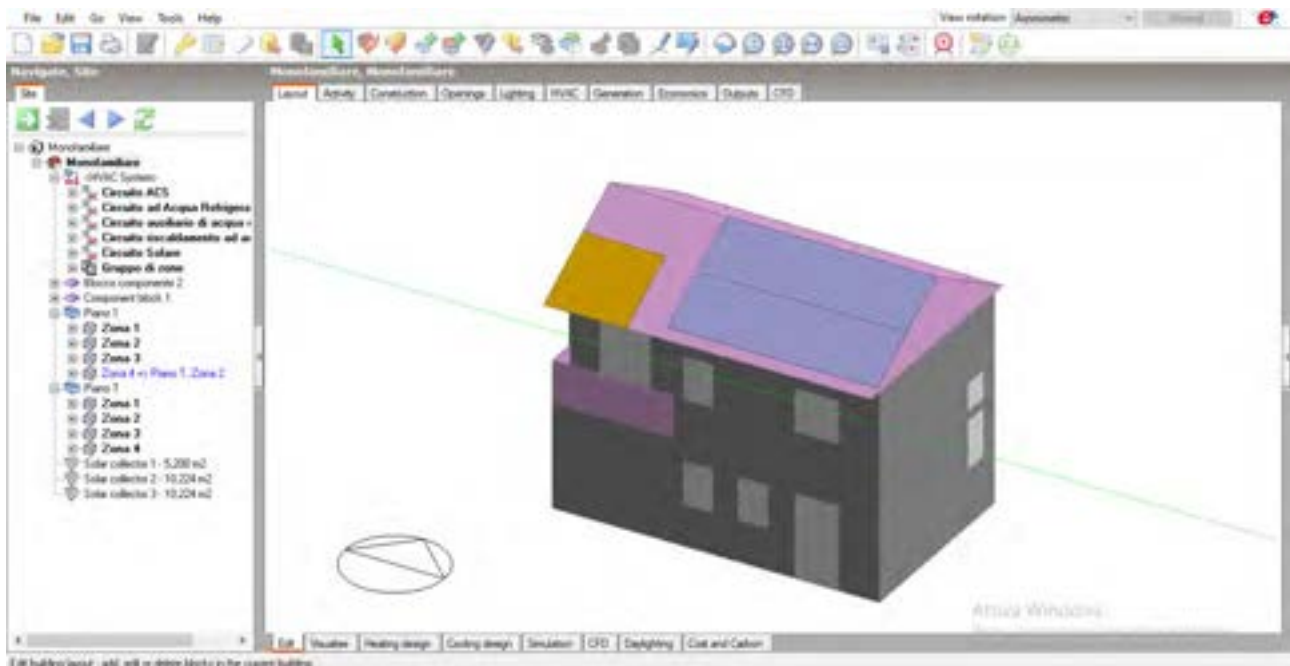


Figura 39. Modello edificio monofamiliare – configurazione 2

In Figura 40 e Figura 41, sono riportati i layout del piano terra e del piano primo, uguali per entrambe le configurazioni.

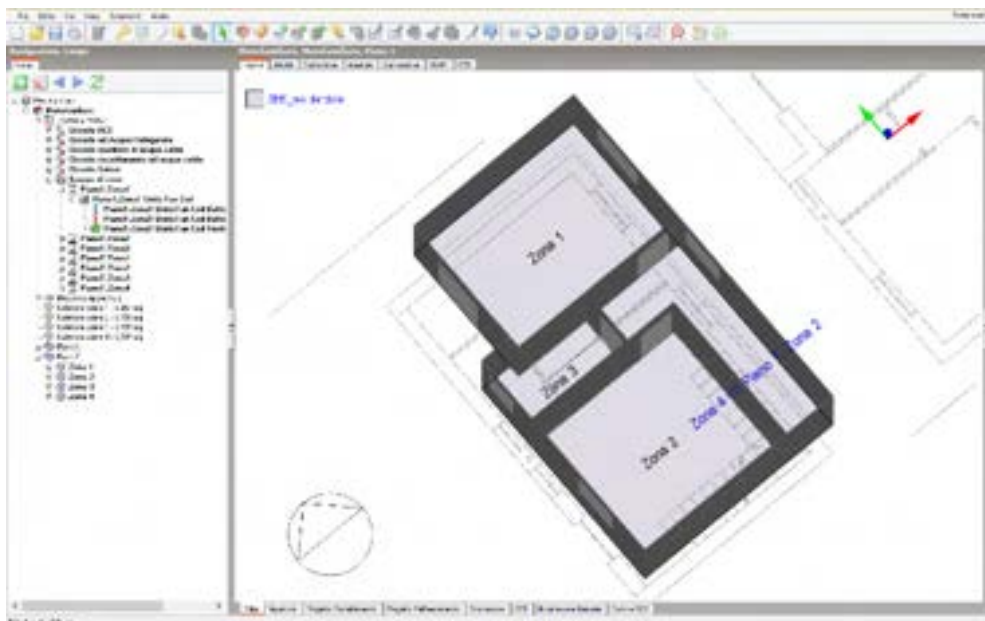


Figura 40. Layout piano terra

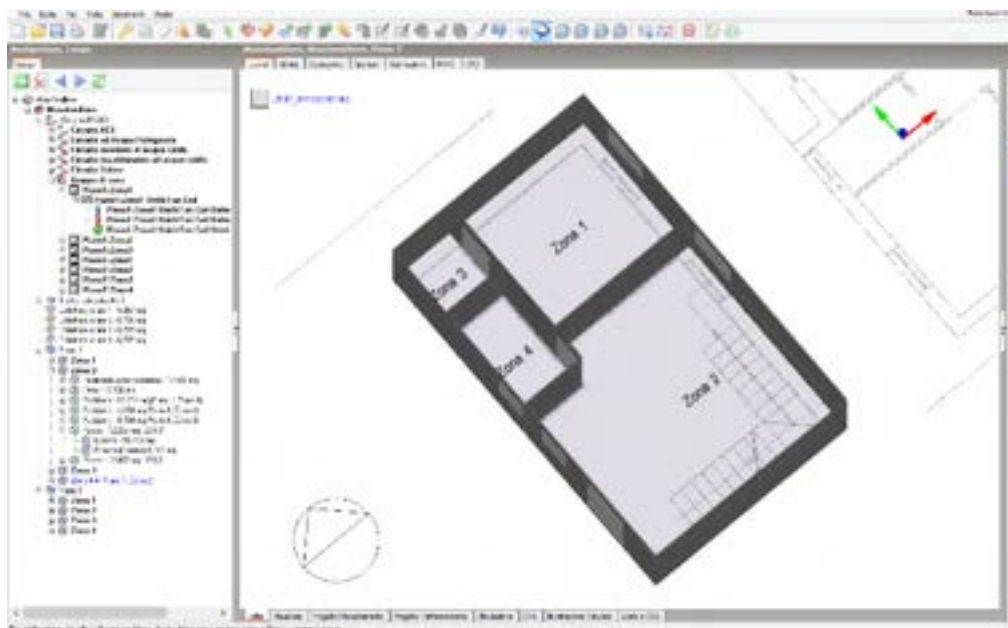


Figura 41. Layout piano primo

Tuttavia, questi modelli hanno esattamente la stessa geometria e uguali proprietà stazionarie dei sistemi di involucro e di impianto HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning). Per poter trarre delle considerazioni utili anche sui sistemi di ombreggiamento si è però scelto di dare un orientamento diverso ai due modelli. Completata la modellazione geometrica l'edificio è stato caratterizzato in termini di materiali e attività.

Nella scheda "Costruzione" sono stati definiti dei template, differenziando sia le due configurazioni scelte, la prima di edilizia più "tradizionale", l'altra che vede l'impiego di X-Lam, sia le stratigrafie per ciascuna zona climatica.

Di ogni componente di involucro infatti sono state verificate tutte le caratteristiche termo-fisiche dei materiali (Tabella 31) in maniera dettagliata e prendendo a riferimento schede tecniche di prodotti in commercio verificando anche il soddisfacimento dei requisiti di legge (D.M. 26.06.2015).

Tabella 31. Tabella riassuntiva con le caratteristiche di involucro relative alle diverse configurazioni analizzate nelle differenti zone climatiche e confrontate con le trasmittanze limite come da D.M. 26.06.2015

COD.	Zona climatica	Spessore totale	Spessore isolante	Ambiente confinante	U	Y _{ie}	φ	f	m	Ki	U _{lim}
	[-]	[m]	[m]	[-]	[W/m²K]	[W/m²K]	[h]	[-]	[kg/m²]	[kJ/m²K]	[W/m²K]
	A-B	0,37	0,03	Esterno	0,421	0,045	14,13	0,11	332	50,3	0,43
	C	0,39	0,05	Esterno	0,339	0,03	14,57	0,09	334	50,1	0,34
	D	0,41	0,07	Esterno	0,284	0,022	14,98	0,08	335	50,1	0,29
	E	0,43	0,09	Esterno	0,244	0,017	15,42	0,07	337	50	0,26
	F	0,44	0,1	Esterno	0,229	0,016	15,66	0,07	338	50	0,24
Chiusure verticali esterne - Configurazione 2											
	A-B	0,23	0,08	Esterno	0,305	0,084	10,26	0,276	86	15,1	0,43
	C	0,23	0,08	Esterno	0,305	0,084	10,26	0,276	86	15,1	0,34
	D	0,24	0,09	Esterno	0,284	0,072	10,85	0,254	88	15	0,29
	E	0,26	0,11	Esterno	0,249	0,053	12,07	0,211	91	15	0,26
	F	0,27	0,12	Esterno	0,235	0,045	12,69	0,191	92	14,9	0,24
Chiusura orizzontale intermedia tra appartamenti											
SI1	Tutte	0,4	0,04	Ambiente climatizzato	0,273	0,067	17,01	0,07	302	59	
SI2	Tutte	0,35	0,04	Ambiente climatizzato	0,326	0,04	14,86	0,121	193	59,3	
Chiusura orizzontale superiore CONFIGURAZIONE 1											
	A-B	0,49	0,06	Esterno	0,264	0,007	20,09	0,027	442	50,1	0,35
	C	0,49	0,06	Esterno	0,264	0,007	20,09	0,027	442	50,1	0,33
	D	0,51	0,08	Esterno	0,231	0,005	20,75	0,024	445	50,2	0,26
	E	0,52	0,10	Esterno	0,205	0,004	21,51	0,021	448	50,2	0,22
	F	0,54	0,12	Esterno	0,184	0,003	22,33	0,001	450	50,2	0,2
Chiusura orizzontale superiore CONFIGURAZIONE 2											
COP2	A-B	0,32	0,03	Esterno	0,341	0,049	12,71	0,144	155	31,1	0,35
COP2	C	0,33	0,04	Esterno	0,314	0,041	13,21	0,13	157	30,9	0,33
COP2	D	0,36	0,07	Esterno	0,254	0,0025	14,85	0,098	161	30,7	0,26
COP2	E	0,39	0,10	Esterno	0,214	0,016	16,67	0,073	165	30,6	0,22
COP2	F	0,41	0,12	Esterno	0,19	0,011	18,01	0,058	168	30,5	0,2
Chiusura orizzontale inferiore											
SCT	TUTTE	0,84	0,10	Terreno	0,231	0,024	15,83	0,104	246	51,4	

Le stratigrafie sono state modellate definendo le caratteristiche di ciascun materiale (scelto in base ai prodotti realmente reperibili in commercio), verificando le principali caratteristiche termo-fisiche, come è possibile vedere a titolo esemplificativo in Figura 42 e Figura 43.

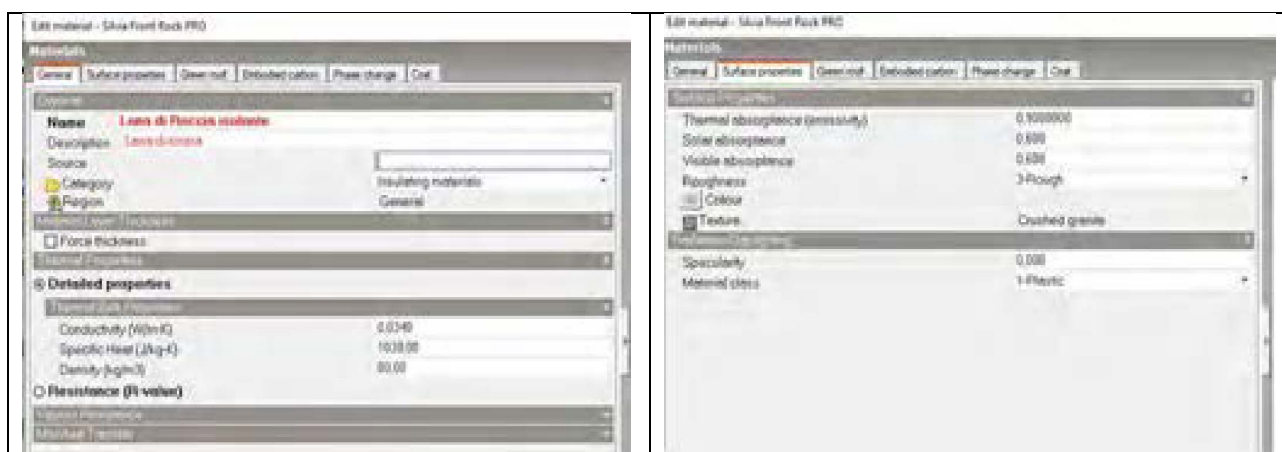


Figura 42. Definizione stratigrafia parete verticale opaca. Caratteristiche termo fisiche

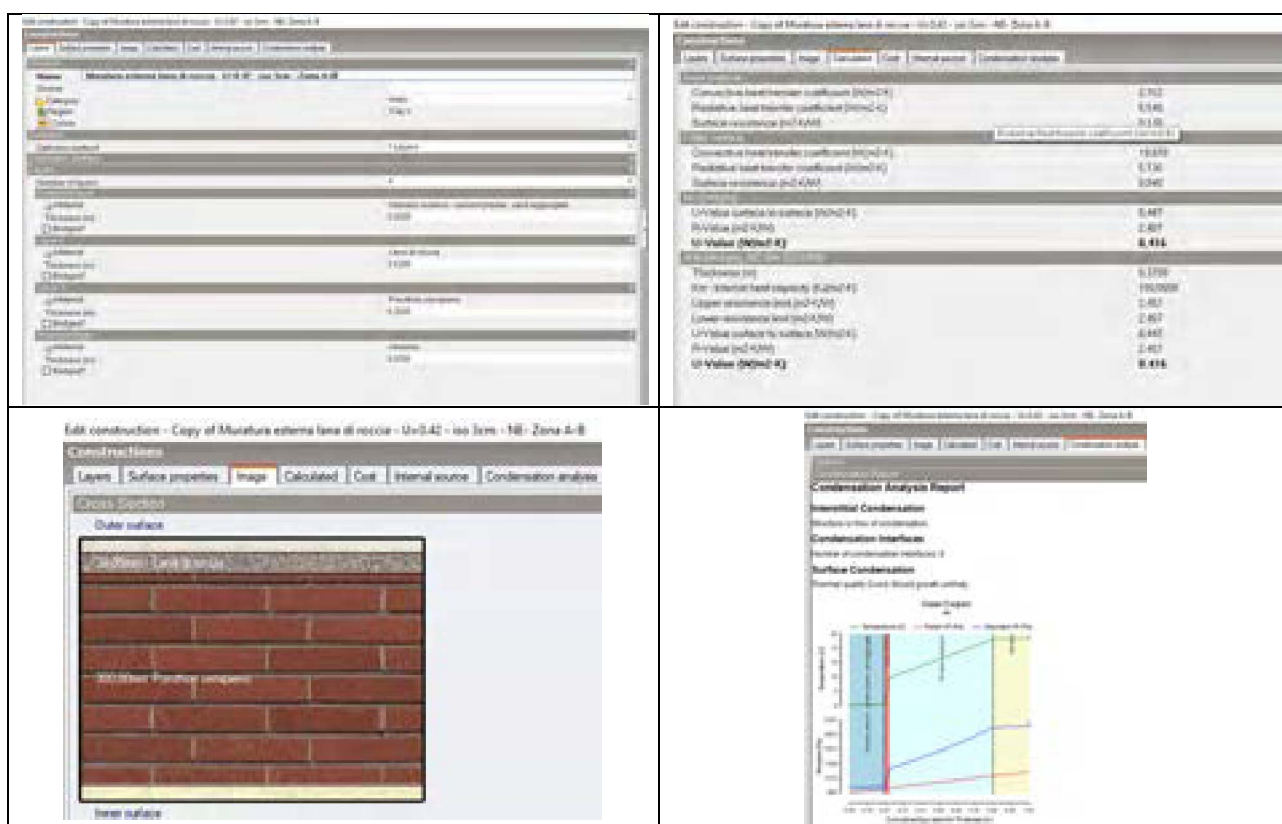


Figura 43. Esempio di definizione di un materiale isolante a) sue caratteristiche termo-fisiche, e b) analisi della condensa con diagramma di Glaser

Allo scopo di modellare un edificio eseguito “a regola d’arte”, la trasmittanza lineica dei ponti termici è stata fissata pari a $0,020 \text{ W/m}^2\text{K}$, valore notevolmente basso, ma attualmente plausibile in caso di involucro altamente efficiente e performante, in cui tutti i ponti termici siano stati opportunamente corretti con soluzioni progettuali ad hoc.

Anche per quanto riguarda l’involucro verticale trasparente sono state create delle aperture con infissi le cui caratteristiche riprendono alcuni modelli presenti sul mercato, avendo cura sempre di rispettare ampiamente i limiti della trasmittanza indicata dal decreto requisiti minimi, ed associando anche sistemi di oscuramento esterno con un programma di funzionamento “customizzato”.

A titolo di esempio si riporta in Figura 44 la definizione di un infisso per la zona climatica D con trasmittanza $U=1,8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.



Figura 44. Esempio di definizione infisso (in questo caso utilizzato in zona climatica D, U=1,8 W/m2K)

5.2.2 Profili di occupazione e ventilazione Naturale

È stato definito anche in questo caso un template, che potesse ben rappresentare il caso in oggetto (famiglia di 4 persone di cui 2 adulti e 2 bambini), all'interno del quale sono stati definiti i profili di occupazione, tasso metabolico, tasso di consumo di acqua calda sanitaria, tutti i parametri di controllo ambientale, come illustrato in Figura 45.

The screenshot shows the ENEC software interface for configuring a template. The sidebar on the left lists various categories: Template, Zone Areas and Volumes, Occupancy, Activity, Clothing, Heating, Cooling, Humidification, and Dehumidification. The main area displays the configuration for the 'Template' category, which is set to 'ZEB_residenziale'. The configuration includes parameters such as Zone multiplier (1), Occupancy density (0.9440), Activity (Seated quiet), Clothing schedule definition (1-Generic summer and winter clothing), Heating setpoint (20.8), Cooling setpoint (26.8), Humidification setpoint (50.0), and Dehumidification setpoint (60.0).

Figura 45. Esempio di template delle attività definito per l'alloggio monofamiliare

Al fine di ottenere una modellazione quanto più possibile verosimile è stato necessario porre particolare attenzione alla definizione dei profili di occupazione, di utilizzo e di controllo ambientale.

Dal momento che l'occupazione e l'utilizzo influenzano significativamente i risultati, è fondamentale ipotizzare comportamenti "realistici" degli utenti e di impiego dei sistemi impiantistici.

È stata ipotizzata una presenza massima del numero totale di occupanti per ore serali e notturne, mentre si è deciso di considerare durante il giorno una presenza minima, coerentemente con l'orario lavorativo o scolastico.

Coerentemente con l'occupazione, il profilo di utilizzo dell'acqua calda sanitaria prevede un consumo maggiore durante le prime ore della mattina e durante le ore del tardo pomeriggio/sera, momento di rientro degli abitanti alla propria residenza.

Relativamente al controllo ambientale, i profili di utilizzo sono ideati per garantire il comfort all’arrivo degli occupanti, quindi le ore di accensione spesso anticipano l’orario di rientro, fermo restando il rispetto, come nel caso delle ore di riscaldamento, dei limiti massimi definiti dalla normativa.

Si riportano di seguito (dalla Tabella 32 alla Tabella 35) delle schede sintetiche rappresentative delle assunzioni fatte.

Tabella 32. Esempio di settaggi per il profilo di Occupazione

Occupazione	Profilo Occupazione
Activity templates General Occupancy Other Gains DHW Environmental control Occupancy template Detailed occupancy template Occupancy density (people/m2) Number of people Latent fraction Metabolic profile Metabolic rate Metabolic factor (0.85 for women, 0.75 children) Clothing schedule Weekly profile On at Off at Days / week Schedule ZEB_residenza_Occupazione	Schedule:Compact, Dwell_Occ, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays, Until: 08:00, 1, Until: 16:00, 0.25, Until: 18:00, 0.5, Until: 24:00, 1, For: Weekends Holidays, Until: 08:00, 1, Until: 16:00, 0.5, Until: 18:00, 0.5, Until: 24:00, 0.5, For: SummerDesignDay WinterDesignDay AllOtherDays, Until: 08:00, 1, Until: 16:00, 0.25, Until: 18:00, 0.5, Until: 24:00, 1;
Profilo Occupazione	

Tabella 33. Esempio di settaggi per l'Acqua Calda Sanitaria

Acqua Calda Sanitaria	Profilo ACS
 The screenshot shows the 'Activity templates' window for 'ZEB_residenziale_ACS'. The 'On' checkbox is checked, and the consumption rate is set to 1.200. The 'Weekday profile' shows a red bar from 06:00 to 24:00. The 'Schedules' section shows a 'Schedule' for 'ZEB_residenziale_ACS'. Below the screenshot is a bar chart titled 'Profilo ACS' showing the consumption rate over a 24-hour period. The y-axis ranges from 0.00 to 1.00, and the x-axis shows time slots from 06:00 to 24:00. The consumption rate is 1.00 from 06:00 to 09:00, 0.50 from 09:00 to 16:00, and 0.50 from 16:00 to 24:00.	Schedule: Compact, Dwell_ACS, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays SummerDesignDay WinterDesignDay, Until: 06:00, 0, Until: 09:00, 1, Until: 11:00, 0, Until: 16:00, 0.5, Until: 18:00, 0, Until: 23:00, 0.5, Until: 24:00, 0, For: Weekends Holidays, Until: 06:00, 0, Until: 09:00, 1, Until: 11:00, 0, Until: 16:00, 0.5, Until: 18:00, 0, Until: 23:00, 0.5, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 24:00, 0;

Tabella 34. Esempio di settaggi per il Controllo Ambientale: Riscaldamento

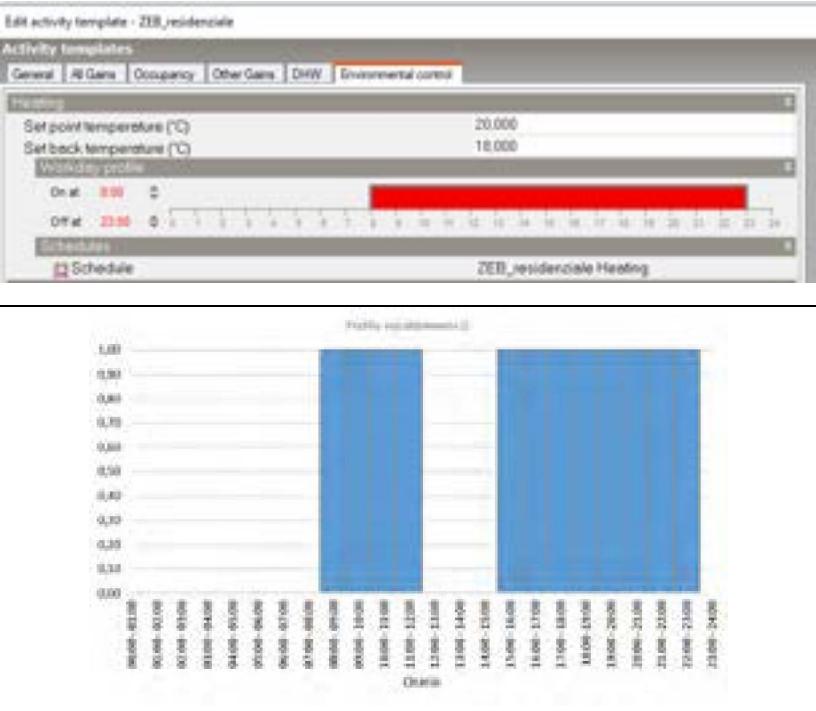
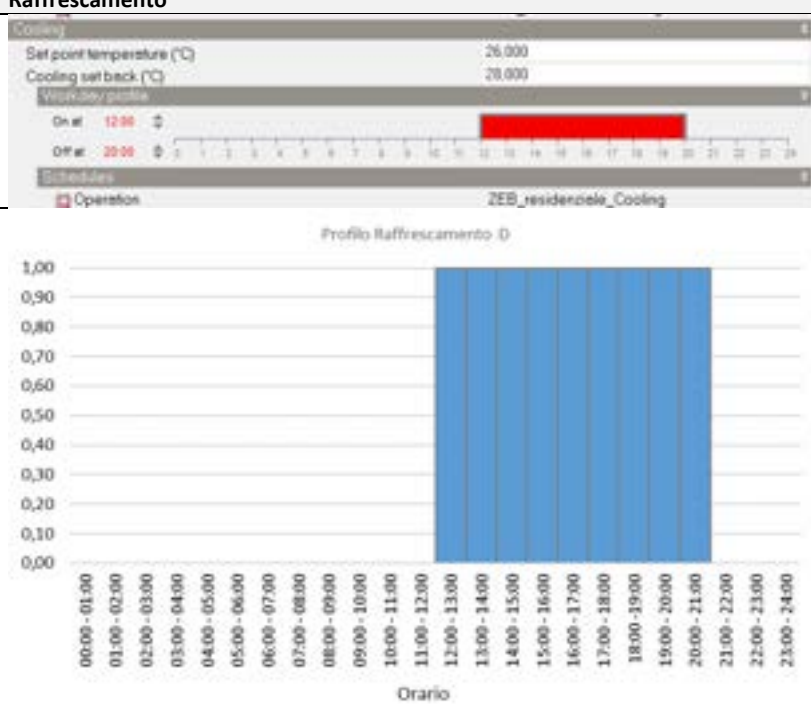
Controllo ambientale	
Riscaldamento	Profilo Riscaldamento
 The screenshot shows the 'Activity templates' window for 'ZEB_residenziale Heating'. The 'Heating' checkbox is checked, and the set point temperature is 20.000 and the set back temperature is 18.000. The 'Weekday profile' shows a red bar from 08:00 to 24:00. The 'Schedules' section shows a 'Schedule' for 'ZEB_residenziale Heating'. Below the screenshot is a bar chart titled 'Profilo riscaldamento (°C)' showing the temperature profile over a 24-hour period. The y-axis ranges from 0.00 to 1.00, and the x-axis shows time slots from 06:00 to 24:00. The temperature is 1.00 from 08:00 to 12:00, 0.50 from 12:00 to 16:00, and 0.50 from 16:00 to 24:00.	Schedule: Compact, Dwell_Heat, Temperature, Through: 31 Dec, For: Weekdays WinterDesignDay, Until: 8:00, 0, Until: 12:00, 1, Until: 16:00, 0, Until: 22:00, 1, Until: 24:00, 0, For: Weekends Holidays, Until: 8:00, 0, Until: 12:00, 1, Until: 16:00, 0, Until: 22:00, 1, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays SummerDesignDay, Until: 24:00, 0;

Tabella 35. Esempio di settaggi per il Controllo Ambientale Raffrescamento

Controllo ambientale	
Raffrescamento	Profilo Raffrescamento
	Schedule: Compact, Dwell_Cool, Temperature, Through: 31 Dec, For: Weekdays, Until: 12:00, 0, Until: 20:00, 1, Until: 24:00, 0, For: SummerDesignDay, Until: 12:00, 0, Until: 20:00, 1, Until: 24:00, 0, For: Weekends Holidays, Until: 12:00, 0, Until: 20:00, 1, Until: 24:00, 0, For: WinterDesignDay AllOtherDays, Until: 24:00, 0;

In un'ottica di risparmio energetico, pur mantenendo sempre gli standard di comfort indoor, in particolar modo nelle ore di occupazione, si ipotizza anche un ampio ricorso alla ventilazione naturale notturna e/o diurna.

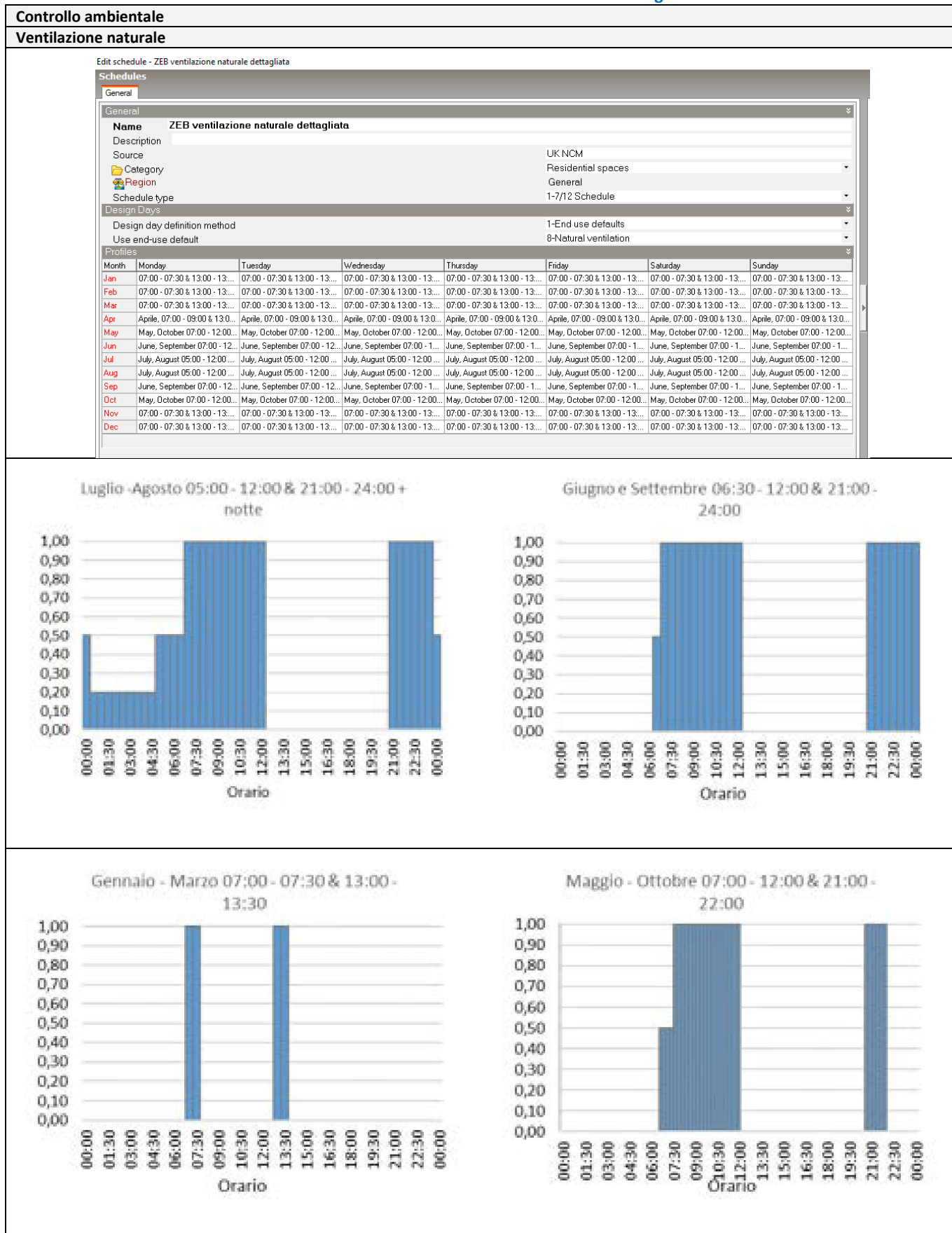
In particolare, durante il periodo estivo si è cercato di sfruttare le ore di frescura notturna (*free cooling*) per arginare i tipici problemi di surriscaldamento a cui molti edifici super isolati vanno incontro.

È facile immaginare come sia complesso regolare un sano ricorso alla ventilazione naturale, che nel periodo invernale è necessaria anche a garantire una buona qualità dell'aria interna, con la volontà di non sprecare energia spesa per ottenere un ambiente indoor confortevole.

Assunto che sono necessari in qualunque stagione ricambi d'aria più volte al giorno, con una definizione del programma di apertura specifico dettagliato per ogni giorno di ogni mese dell'anno è stato possibile ipotizzare il ricorso alla ventilazione naturale, in maniera molto accurata, cercando di trovare un giusto equilibrio-tra l'importanza di garantire un giusto ricambio d'aria e la necessità di preservare le condizioni di temperatura indoor realizzate con il ricorso alla climatizzazione invernale ed estiva.

Poiché si è assunto un comportamento virtuoso degli utenti all'interno dell'edificio ed un suo utilizzo ottimizzato, si è scelto di impostare il programma di ventilazione dettagliato così come riportato in Tabella 36 per condurre tutte le simulazioni.

Tabella 36. Ventilazione naturale – schedule dettagliato



5.2.3 Definizione dell'HVAC dettagliato

Per descrivere adeguatamente i sistemi ipotizzati è stato implementato per componenti il sistema HVAC dettagliato. La configurazione impiantistica prevede:

- Pompa di calore aria-acqua monoblocco per riscaldamento e raffrescamento, associata a terminali tipo ventilconvettori;
- Impianto per ACS con pompa di calore aria-acqua dedicata, serbatoio di accumulo e integrazione con impianto solare termico.

Il sistema HVAC rappresentato in Figura 46 è comune a tutte le zone climatiche; data l'impossibilità di rappresentare in un unico circuito una pompa di calore adibita sia al riscaldamento sia al raffrescamento è stato necessario modellarlo come due circuiti distinti con due generatori alternativi, ai quali si è associato un Energy Management System (EMS) per simulare un funzionamento alternato.

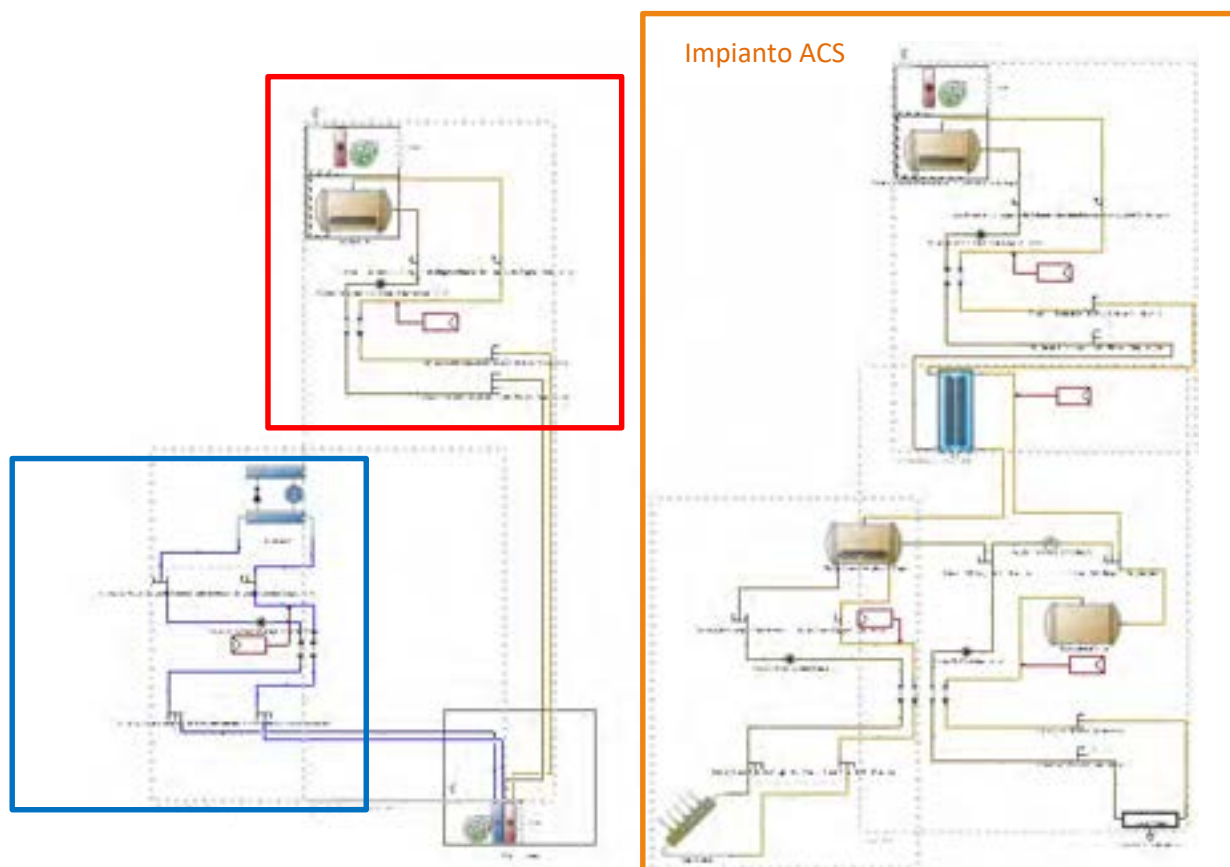


Figura 46. Layout dettagliato edificio monofamiliare

L'HVAC dettagliato consente una schematizzazione semplificata dell'impianto, i collegamenti non vengono dimensionati o progettati, il gruppo zona con i terminali di impianto rappresenta gli ambienti climatizzati. Per ciascun singolo componente (pompe di calore, accumuli, pannelli, zone) vengono inseriti dati e caratteristiche di input, come schematicamente riportato in Tabella 37.

Tabella 37. Caratteristiche della pompa di calore per riscaldamento e dettaglio dati dei singoli componenti

	Edit Water-to-water heat pump Water-to-water heat pump General Comments Form: Heating A/C HP ☒ Availability schedule: auto heating schedule Operating schedule ☒ Compressor setpoint temperature schedule: 45 Deadband temperature difference (deltaC): 1.00 Minimum start air temperature for compressor operation (°C): -15.00 Compressor location: 3-Outdoors Flow Rate Settings Condenser water flow rate (m³/s): Auto on start Evaporator air flow rate (m³/s): Auto on start Location Settings Start air configuration: 3-Outdoor air only Fan placement: 2-Draw-through Operating cycle settings On cycle parasitic electric load (W): 0.00 Off cycle parasitic electric load (W): 0.00 Parasitic heat rejection location: 2-Outdoors
	Air-to-air heat pump edit General Comments Form: Heating A/C HP with Heating Coil Rated heating capacity (W): 1470.00 Gross rated COP: 3.70 Rated service heat ratio: 0.000 Operating schedule Rated evaporator start air dry-bulb temperature (°C): 7.00 Rated evaporator start air wet-bulb temperature (°C): 6.00 Rated evaporator air flow rate (m³/s): Auto on start ☐ Evaporator fan power included in rated COP Location Settings Rated condenser start water temperature (°C): 45.00 Rated condenser water flow rate (m³/s): Auto on start ☒ Condenser pump power included in rated COP ☐ Condenser pump heat included in rated heating capacity and rated COP Condenser water pump power (W): 0.00 Fraction of condenser pump heat to water: 0.000 Operating cycle settings Exhaust air temperature rise for condenser: 1-Dry-bulb temperature ☒ Heating capacity function of temperature: Capacity modification T Set= 40° ☐ Heating capacity function of air flow fraction: COPIT Set= 40° ☒ Heating COP function of temperature: COPIT Set= 40° ☐ Heating COP function of air flow fraction: COPIT Set= 40° ☐ Heating COP function of water flow fraction: COPIT Set= 40° ☐ Heating COP function of water flow fraction: COPIT Set= 40° Parabolic heat rejection location: 2-Outdoors
	Water-to-air heat pump edit General Comments Form: Heating A/C HP with Heating Coil Type: 1-Air-to-water Total capacity (W): 2400.00 Operating schedule ☒ Availability schedule: auto heating schedule Rated water heating capacity (W): 1.00 Location Settings ☒ Setpoint temperature schedule: 45 Deadband temperature difference (deltaC): 1.00 Maximum temperature limit (°C): 45.00 Operating cycle settings Ambient temperature indicator: 1-Schedule ☒ Ambient temperature schedule: Water-to-air ambient temperature correction: 40° On cycle heat coefficient ambient temperature (W): 0.00 Off cycle heat coefficient ambient temperature (W): 0.00 ☐ Ambient heating allowed

Il software consente di modellare opportunamente la prestazione della pompa di calore, partendo dall'introduzione di dati nominali, ma associando delle curve di prestazione ad hoc, generate appositamente. Dai dati riportati in scheda tecnica, relativi alla prestazione in riscaldamento in funzione della temperatura dell'aria esterna, e della temperatura acqua uscita scambiatore (lato impianto) dai dati di prestazione a carico parziale, mediante apposito applicativo, sono state generate delle curve di prestazione del tipo:

- capacità in riscaldamento in funzione della temperatura;

- COP di riscaldamento in funzione della temperatura;
 - correlazione al carico parziale;
- riportate brevemente dalla Figura 47 alla Figura 49.

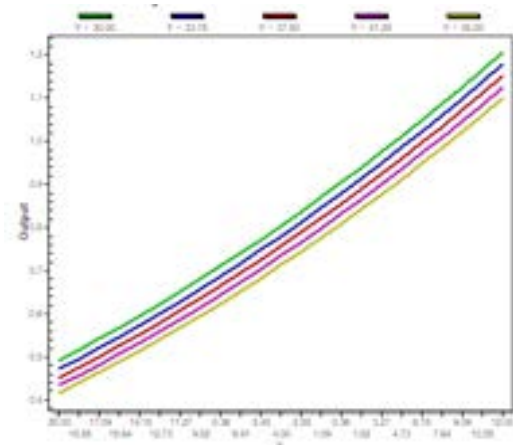
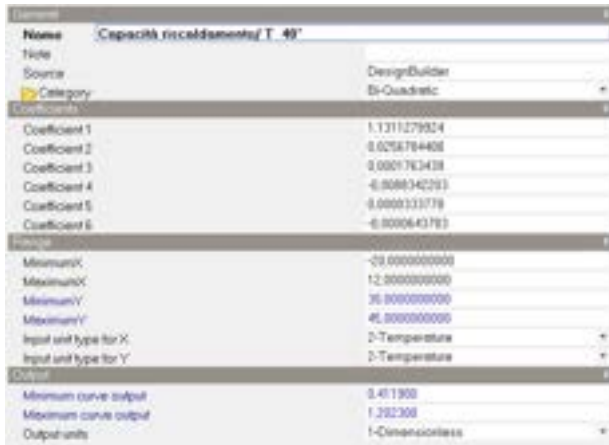


Figura 47. Coefficienti e andamento della curva della capacità in riscaldamento della pompa di calore in funzione delle temperature

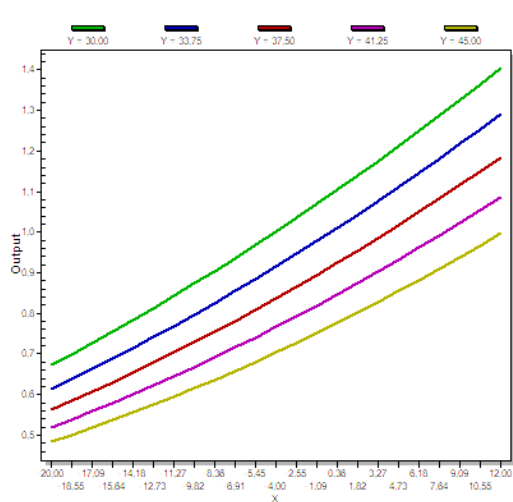


Figura 48. Coefficienti e andamento della curva di variazione del COP in funzione delle temperature

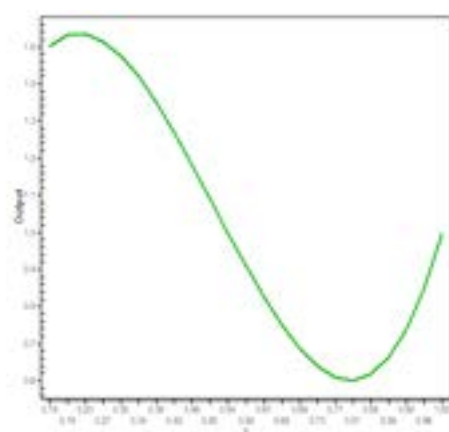
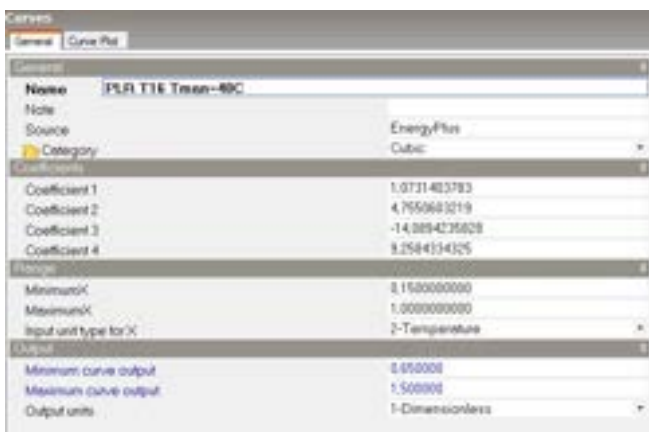


Figura 49. Coefficienti e andamento della curva di correlazione a carico parziale della pompa di calore.

La stessa logica utilizzata per l'implementazione del circuito di riscaldamento è stata seguita per impostare le caratteristiche del circuito di raffrescamento.

Di seguito (Figura 50) sono riportati i dati relativi alle caratteristiche implementate nelle singole componenti del modello della pompa di calore. Anche per essa si riportano di seguito le caratteristiche dell'intero circuito e dei singoli componenti.

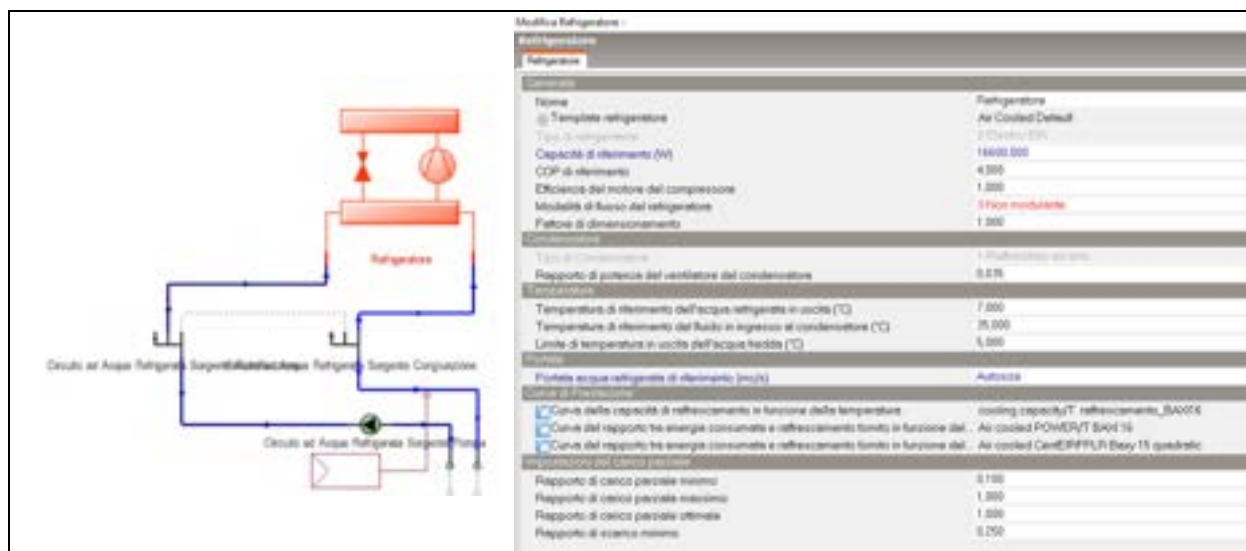


Figura 50. Caratteristiche della pompa di calore per raffrescamento.

Dai dati di riferimento, relativi alla prestazione in raffrescamento in funzione della temperatura dell'aria esterna, e della temperatura acqua uscita scambiatore (lato impianto) e ai dati di prestazione a carico parziale, sono state generate delle curve di prestazione del tipo:

- Capacità in raffrescamento in funzione della temperatura;
- Potenza di raffrescamento in funzione della temperatura;
- Correlazione al carico parziale;

di seguito brevemente rappresentate da Figura 51 a Figura 53.

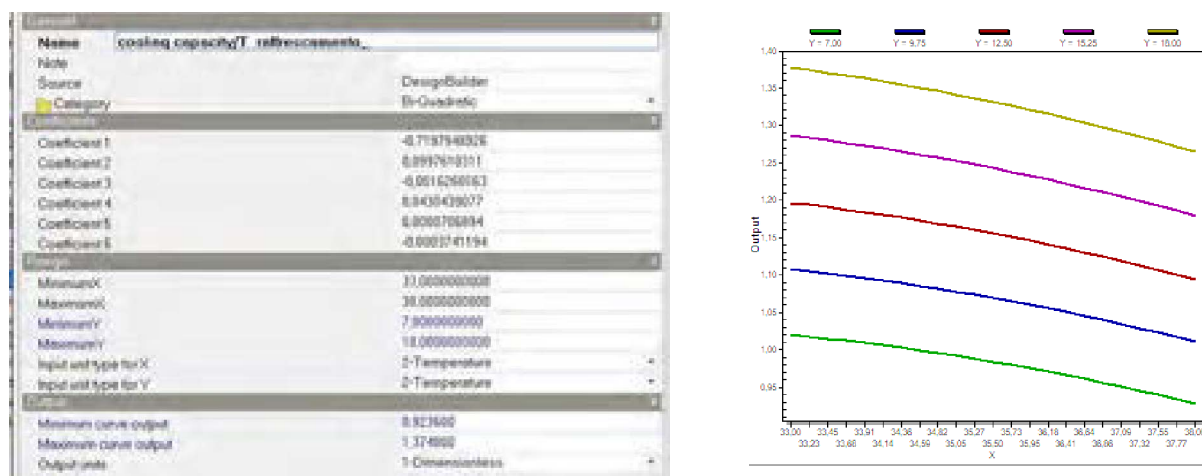


Figura 51. Coefficienti e andamento della curva della capacità in raffrescamento della pompa di calore in funzione delle temperature

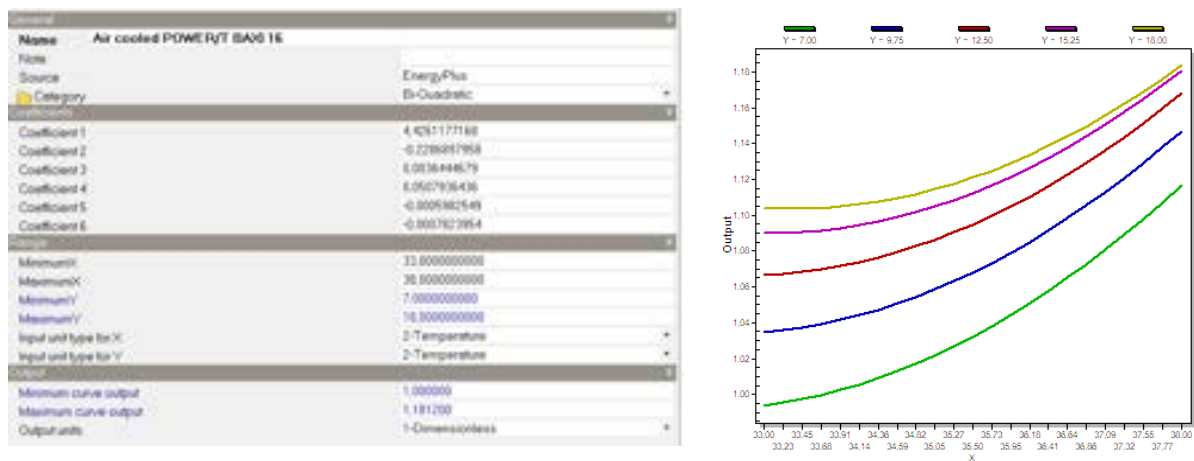


Figura 52. Coefficienti e andamento della curva di variazione della potenza di raffreddamento in funzione delle temperature

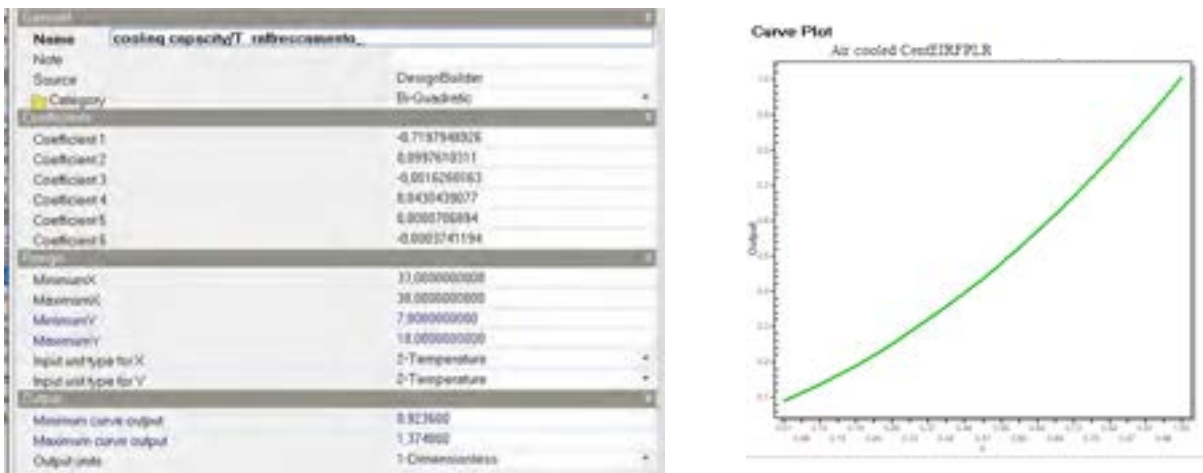


Figura 53. Coefficienti e andamento della curva di correlazione a carico parziale della pompa di calore

Relativamente alla produzione di acqua calda sanitaria, si è scelto di ipotizzare la presenza di una pompa di calore dedicata, con serbatoio di accumulo di 250 l (sufficiente a soddisfare il fabbisogno di una famiglia tipo di 4 persone) a supporto di un impianto solare termico in copertura, a tubi sottovuoto, dalle caratteristiche riportate Tabella 28 in previsione dei periodi nei quali la sola produzione da solare termico risulti insufficiente. Di seguito in Figura 54 il layout dell'impianto per la produzione di ACS.

Nelle tabelle a seguire invece sono riportati i dati di ciascun componente Tabella 38.

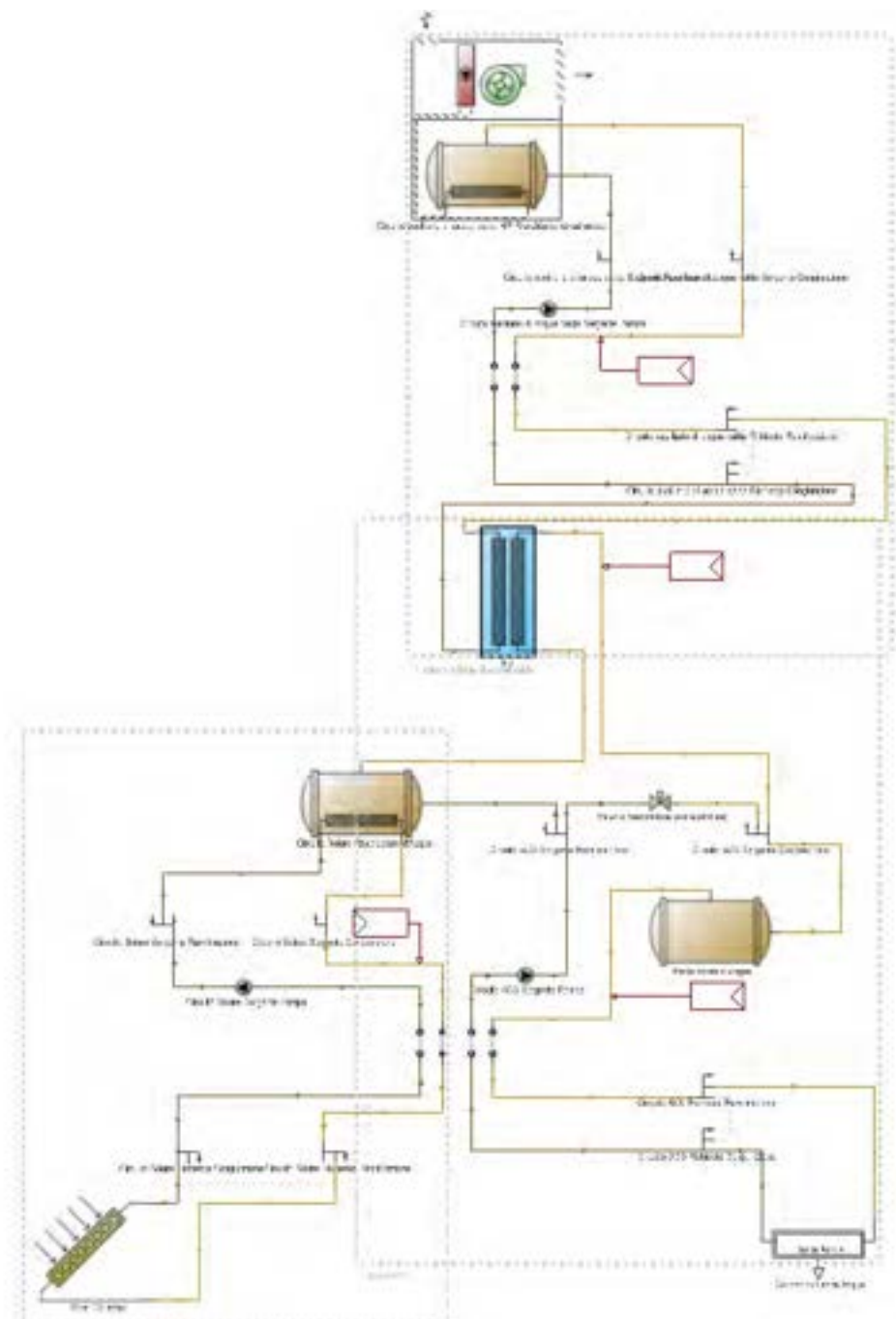


Figura 54. Layout del circuito ACS, con pompa di calore, e solare termico.

Tabella 38. Caratteristiche della pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria, e dettaglio dati dei singoli componenti

Water heater heat pump	
General	
Name	Circolo esistente di acqua calda HP Riscaldamento
Availability schedule	On 24/7
Compressor settings	
Compressor setpoint temperature schedule	20.0, Domestic hot water setpoint temperature
Deadband temperature difference (deltaC)	1.00
Minimum start air temperature for compressor operation (°C)	-12.00
Compressor location	3-Outdoors
Condenser settings	
Condenser water flow rate (m³/h)	Auto calculate
Evaporator air flow rate (m³/h)	Auto calculate
Water air settings	
Water air configuration	3-Outdoor air only
Fan placement	
Fan placement	2-Draw through
Electrical (Unit Settings)	
On cycle parasitic electric load (W)	0.00
Off cycle parasitic electric load (W)	0.00
Parasitic heat rejection location	3-Outdoors

Water heater heat pump	
General	
Rated heating capacity (W)	1900.00
Rated COP	3.40
Rated sensible heat ratio	0.750
Compressor settings	
Rated evaporator inlet air dry-bulb temperature (°C)	7.00
Rated evaporator inlet air wet-bulb temperature (°C)	6.00
Rated evaporator air flow rate (m³/h)	Auto calculate
Compressor fan power included in rated COP	
Condenser settings	
Rated condenser inlet water temperature (°C)	15.12
Rated condenser water flow rate (m³/h)	Auto calculate
Condenser pump power included in rated COP	
Condenser pump heat included in rated heating capacity and rated COP	
Condenser water pump power (W)	100.00
Pressure of condenser pump head to water	0.200
Water air settings	
Condenser heater capacity (W)	1.00 W
Maximum ambient temperature for condenser heater operation (°C)	5.00
Evaporator settings	
Evaporator air temperature type for control	1-Wetbulb temperature
Heating capacity function of temperature	
Heating capacity function of temperature curve	FOCAC High COPPT
Heating capacity function of air flow fraction	
Heating capacity function of water flow fraction	
Heating COP function of temperature	
Heating COP function of temperature curve	FOCAC High COPPT
Heating COP function of air flow fraction	
Heating COP function of water flow fraction	
Evaporator fan power included in rated COP	
Rated load electric compressor curve	FOCAC High COPPT

Water heater heat pump	
General	
Name	Circolo esistente di acqua calda HP Risc
Availability schedule	On 24/7
Compressor settings	
Compressor setpoint temperature schedule	20.0, Domestic hot water setpoint tempere
Deadband temperature difference (deltaC)	2.00
Minimum start air temperature for compressor operation (°C)	-10.00
Compressor location	3-Outdoors
Condenser settings	
Condenser water flow rate (m³/h)	Auto calculate
Evaporator air flow rate (m³/h)	Auto calculate
Water air settings	
Water air configuration	3-Outdoor air only
Fan placement	
Fan placement	2-Draw through
Electrical (Unit Settings)	
On cycle parasitic electric load (W)	0.00
Off cycle parasitic electric load (W)	0.00
Parasitic heat rejection location	2-Outdoors

Dai dati riportati nelle schede tecniche, come fatto in precedenza per il riscaldamento e per il raffrescamento sono state ricavate le curve di prestazione seguenti:

- Capacità di riscaldamento in funzione della temperatura;
- Potenza di riscaldamento in funzione della temperatura;
- Correlazione al carico parziale.

di seguito brevemente rappresentate da Figura 55 a Figura 57.

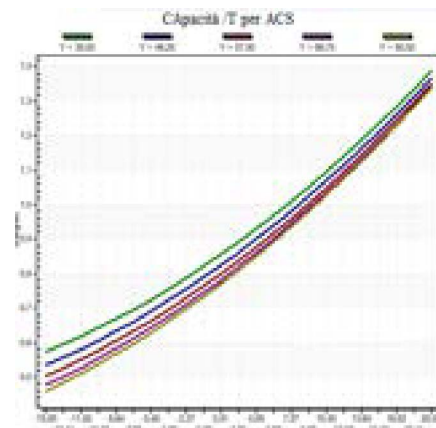
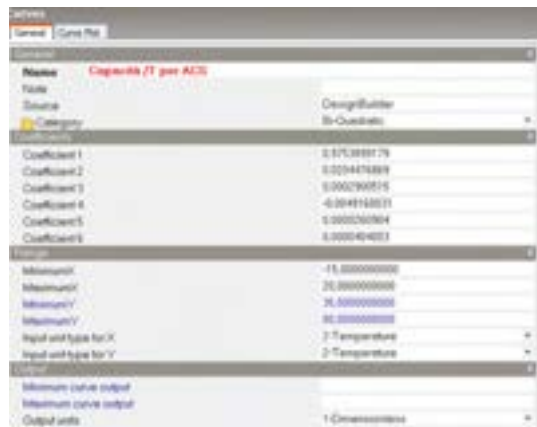


Figura 55. Coefficienti e andamento della curva della capacità della pompa di calore per acqua calda sanitaria in funzione delle temperature

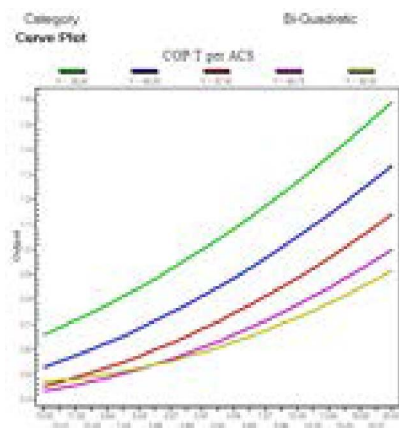
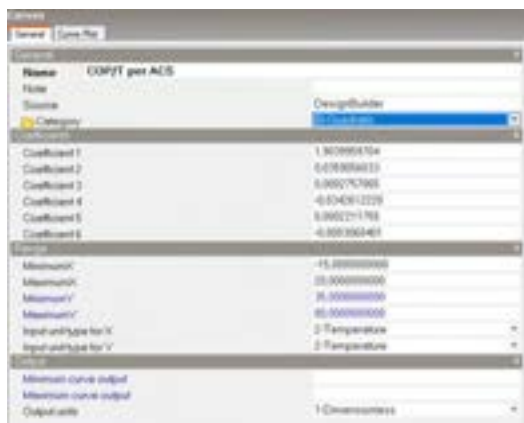


Figura 56. Coefficienti e andamento della curva di potenza in riscaldamento della pompa di calore per acqua calda sanitaria in funzione delle temperature

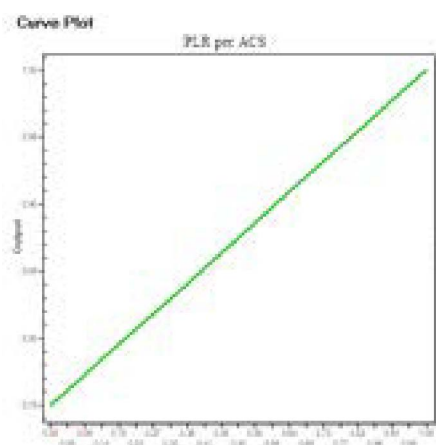


Figura 57. Coefficienti e andamento della curva di correlazione a carico parziale della pompa di calore per acqua calda sanitaria

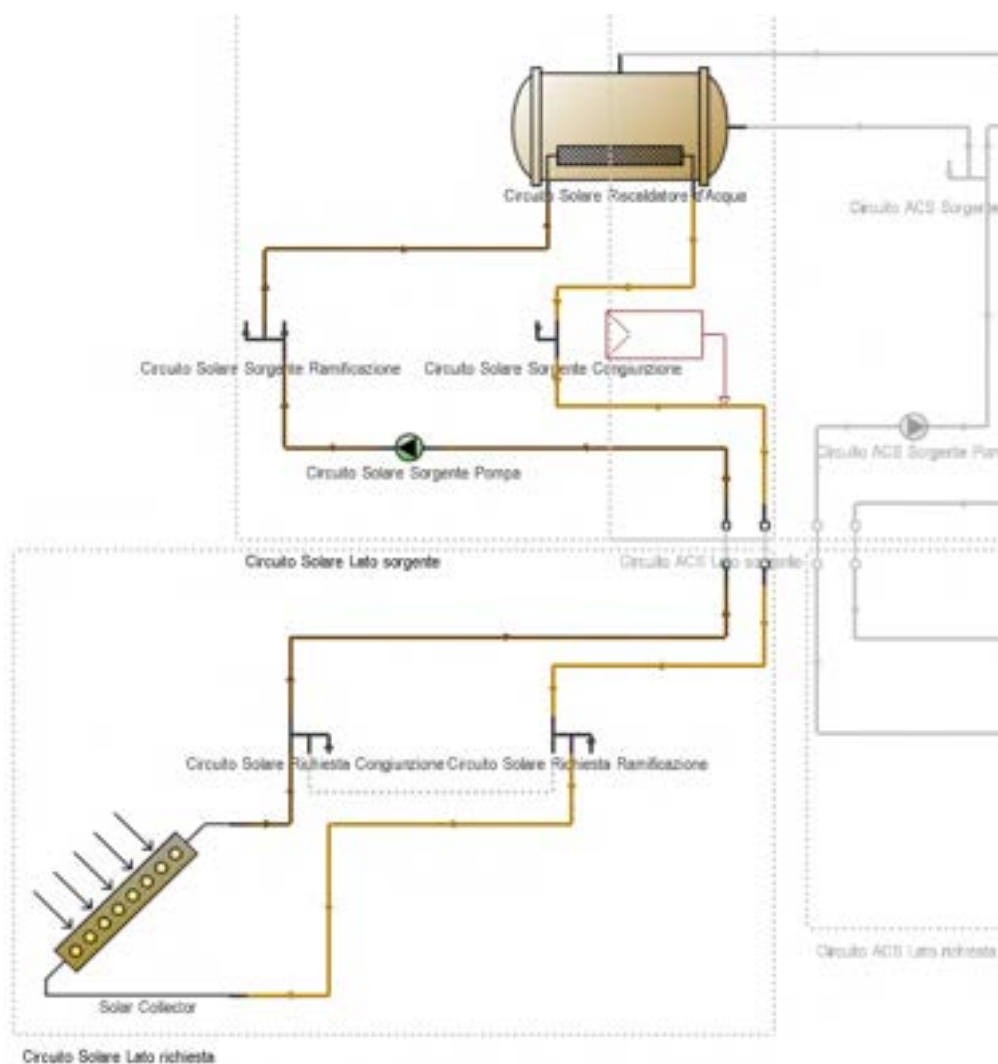


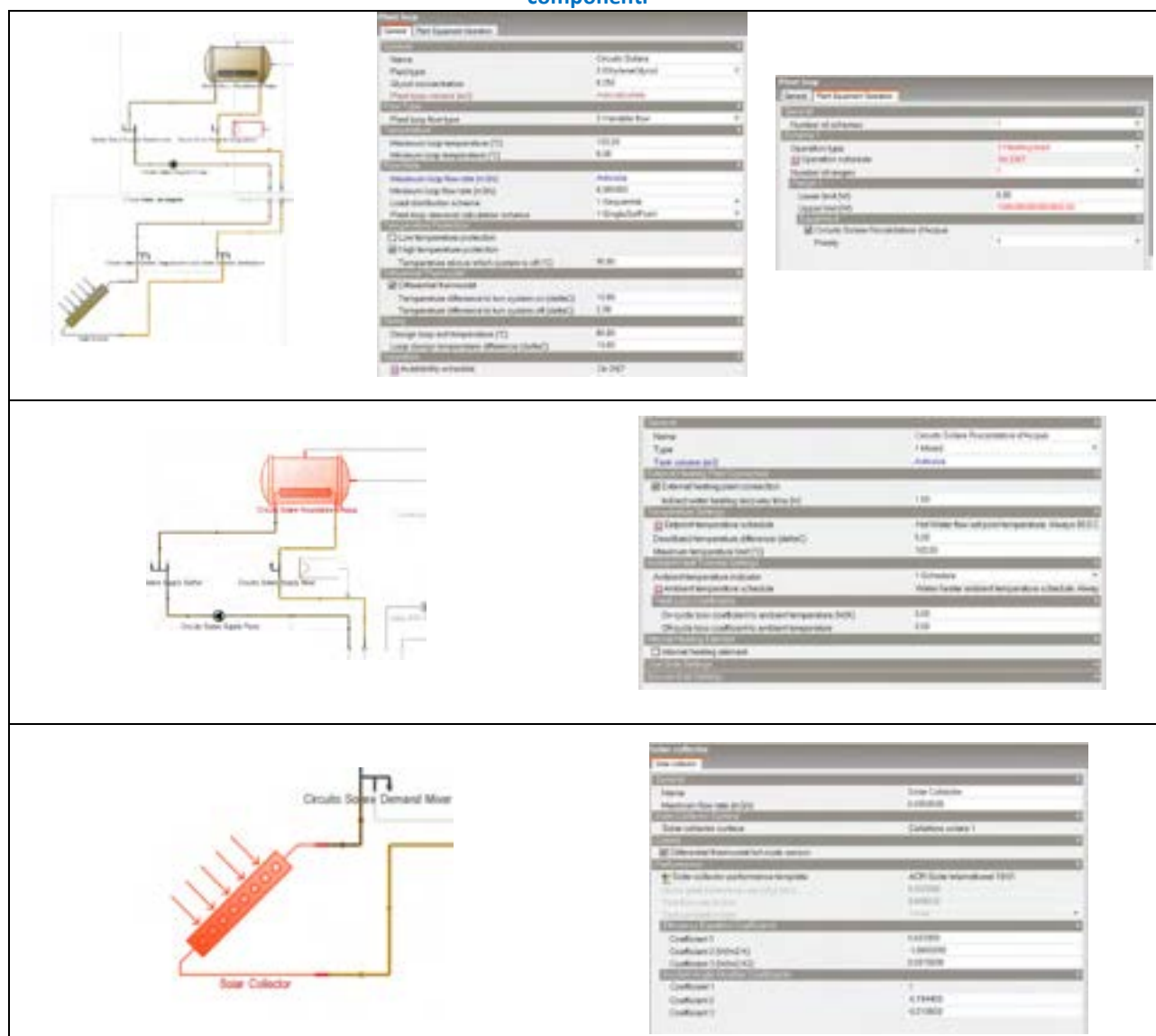
Figura 58. Layout circuito solare

Anche per il solare termico sono stati definiti dei settaggi, sebbene il programma consenta una customizzazione limitata di questo componente.

Da osservare che a valle del circuito solare il programma prevede l'introduzione di un accumulo virtuale, che ha solo finalità di calcolo (Figura 58).

Il settaggio delle caratteristiche di ciascun componente è riportato in Tabella 39.

Tabella 39. Caratteristiche del circuito solare per la produzione di acqua calda sanitaria e dettaglio dei singoli componenti



5.2.4 Definizione dell'impianto fotovoltaico

La produzione di corrente da fonte rinnovabile è un presupposto essenziale perché un edificio opportunamente progettato possa essere considerato un edificio ZEB o netZEB.

Nonostante il software non sia uno strumento apposito per la valutazione della produzione energetica da fonte rinnovabile, si è comunque schematizzato l'impiego di pannelli in copertura (piano o inclinata a seconda della configurazione) opportunamente orientati ed inclinati e scelti sulla base delle migliori prestazioni al momento disponibili sul mercato (Figura 59). Il programma consente anche di ipotizzare un sistema di accumulo.

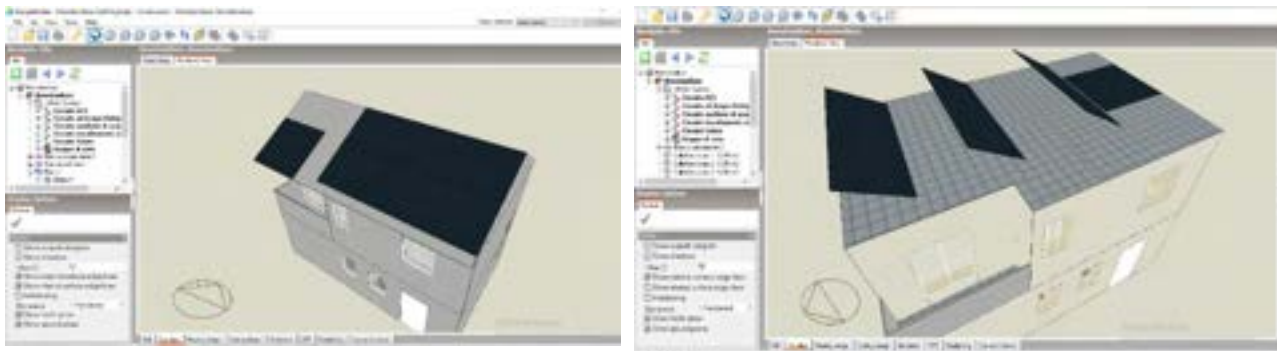


Figura 59. Layout disposizione pannelli fotovoltaici in copertura nelle due configurazioni

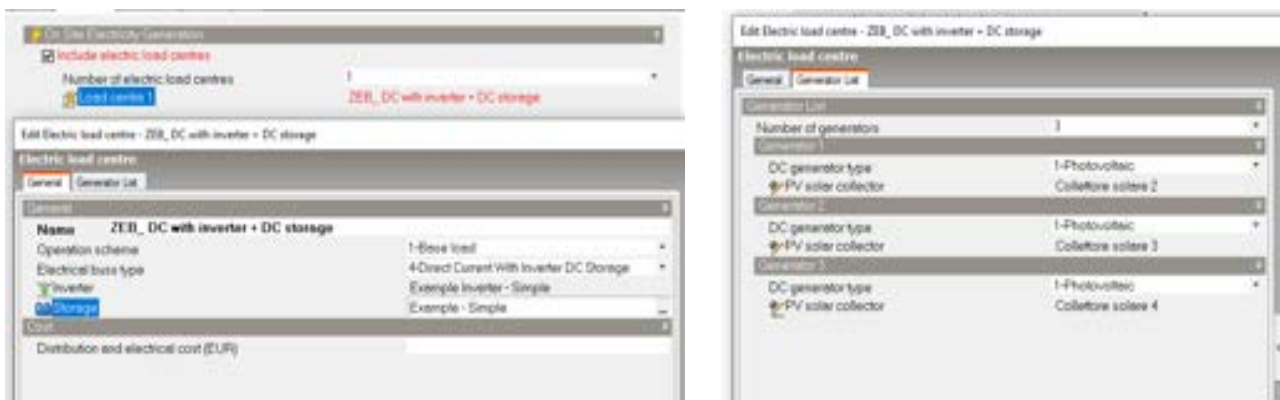


Figura 60. Settaggio caratteristiche dati input dei moduli fotovoltaici e dell'accumulo

Nella scheda “Generazione” ai pannelli fotovoltaici rappresentati sono state associate le caratteristiche scelte sulla base dei modelli realmente disponibili sul mercato come riportato in Tabella 30, ed è stato associato un sistema di accumulo.

Nella configurazione con tetto piano sono stati ipotizzati 12 pannelli di circa 21m² di superficie (tot 4,44 kW). Nella configurazione con tetto piano 2 file da 6 pannelli, per un totale di 12 pannelli e di circa 20m² di superficie (tot 4,44 kW).

5.3 Analisi degli output in dettaglio – Monofamiliare

Nei diversi momenti dello studio, sia in una fase decisionale/progettuale al fine di verificare la correttezza delle scelte operate nel modello implementato, sia in una fase di analisi in itinere per avere contezza di dati per singole zone o per analizzare i dati in intervalli temporali più o meno ristretti, sia nella fase conclusiva di studio dell'output per mantenere un controllo sui risultati aggregati, può essere utile verificare il comportamento di singole componenti di involucro o di impianto mediante un apposito applicativo che consente la selezione delle variabili di output più idonee ad indagare l'oggetto dello studio.

Per semplicità gli esempi di seguito riportati sono relativi alla simulazione del modello della configurazione 1, analizzato in zona climatica D, ma l'approccio presentato è stato seguito per entrambi i modelli in ciascuna zona climatica (per ulteriori approfondimenti in merito è possibile consultare l'Allegato 1, nel quale vengono presentati i singoli casi e i risultati essenziali).

È interessante ad esempio verificare, nell'ambito analisi del fabbisogno termico, inerenti dispersioni e apporti, la validità dell'adozione di un sistema di oscuramento esterno, confrontando la variazione di apporti interni attraverso le finestre, con e senza, o tra più sistemi distinti.

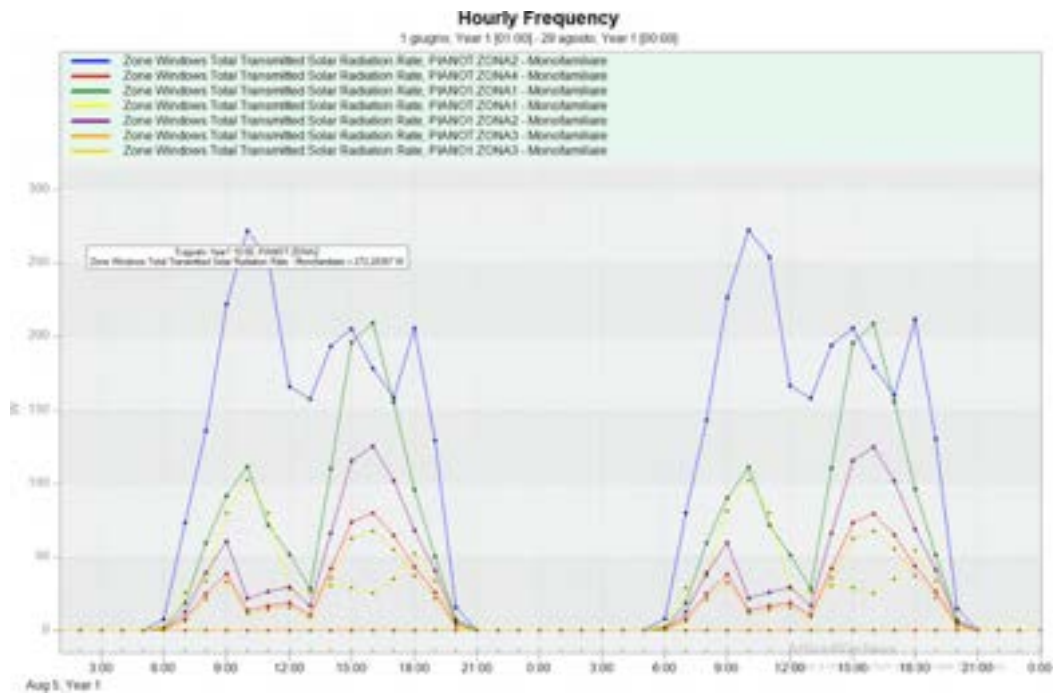


Figura 61. Radiazione solare trasmessa attraverso le finestre, nei giorni 5 e 6 Agosto, Roma, con l'utilizzo di un sistema di oscuramento esterno tipo brise-soleil, orientabile

In Figura 61 ad esempio è riportata, in riferimento alle giornate del 5 e del 6 agosto, la radiazione solare trasmessa attraverso le finestre, in ciascun ambiente, nel caso in cui è stato ipotizzato l'utilizzo di un sistema di oscuramento esterno orientabile, cui è stato associato un opportuno programma di funzionamento. In Figura 62 invece non è stato ipotizzato alcun sistema di oscuramento, e la radiazione trasmessa è di gran lunga superiore.

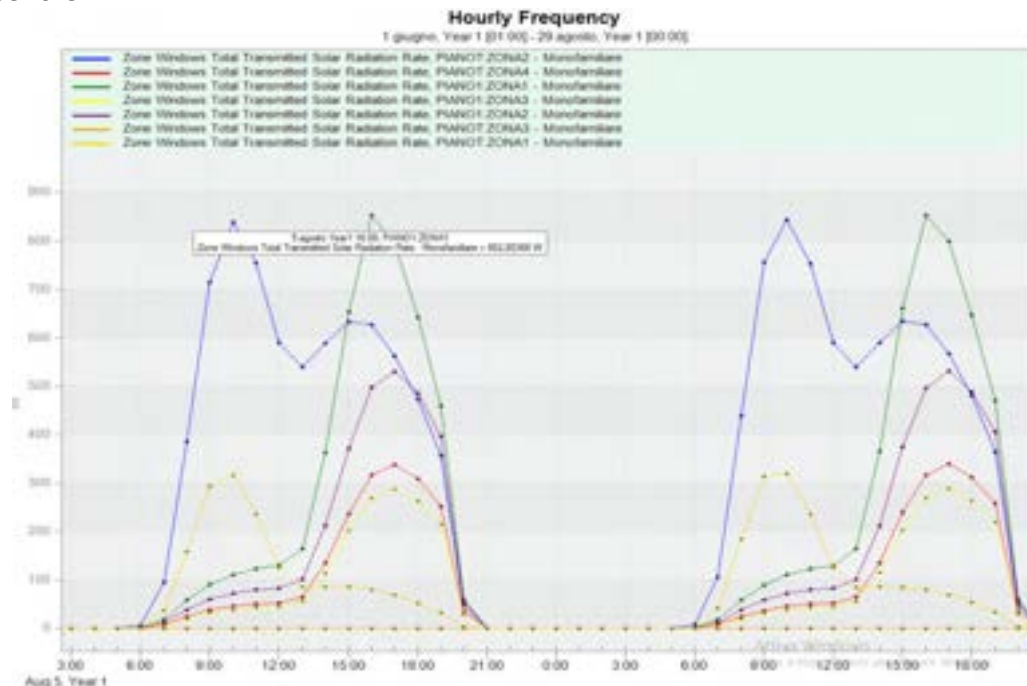


Figura 62. Apporti solari attraverso le finestre, nei giorni 5 e 6 agosto, Roma, senza l'utilizzo di un sistema di oscuramento esterno

È stato fondamentale verificare il corretto funzionamento degli impianti schematizzati, delle pompe di calore e dei programmi di funzionamento associati, su base giornaliera ed oraria. A titolo di esempio in Figura 63 è riportato il funzionamento, in un giorno invernale su base oraria, della pompa di calore per il riscaldamento, verificando anche la temperatura media dell'aria in ciascun ambiente ed il tasso di riscaldamento relativo ad ogni fancoil.

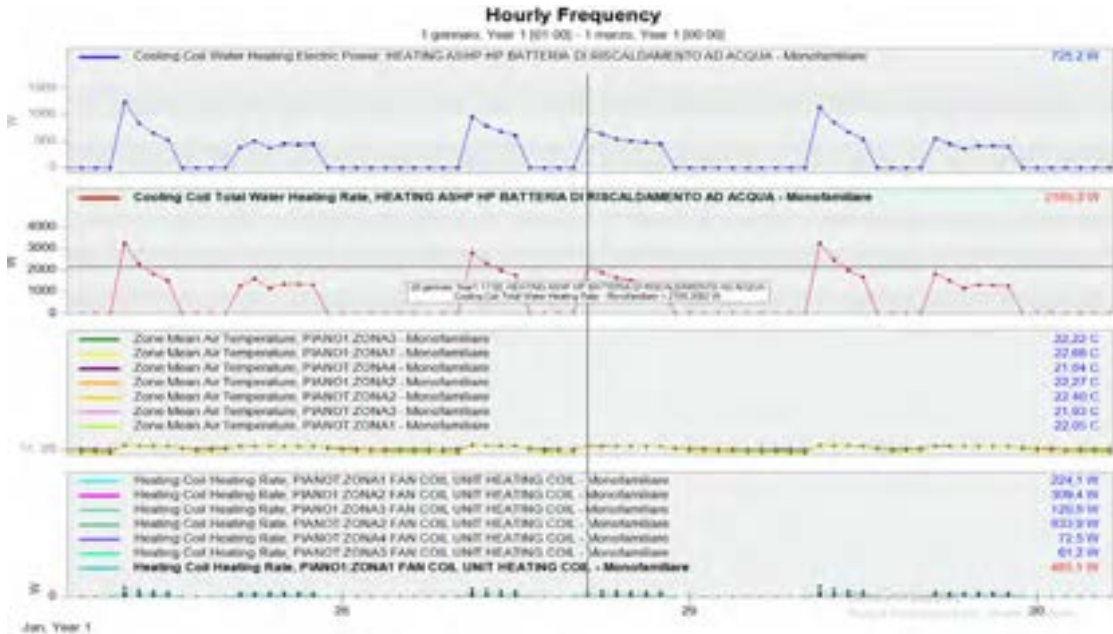


Figura 63. funzionamento della pompa di calore, la variazione della T media dell'aria in ciascun ambiente, tasso di riscaldamento in W di ciascun fancoil (uno per ogni ambiente)

Dal momento che le pompe di calore sono state caratterizzate mediante l'utilizzo delle curve di performance, (rappresentate da Figura 47 a Figura 49 per il riscaldamento) è utile verificare anche l'andamento delle variabili di output relative alle curve rappresentative della variazione di capacità di riscaldamento in funzione della temperatura, della variazione della potenza termica in funzione della temperatura e di correlazione a carico parziale. Le variabili analizzate con i grafici riportati in Figura 63 e Figura 64 consentono di avere un controllo, anche su base oraria del comportamento del modello impiantistico.

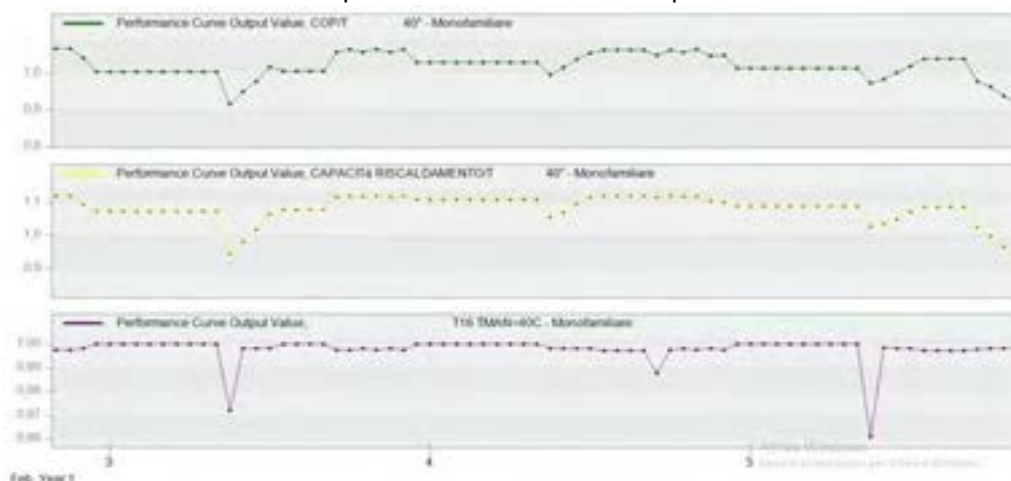


Figura 64. Andamento delle curve di performance per la pompa di calore in modalità riscaldamento (output)

A valle della verifica del corretto funzionamento dell'impianto di riscaldamento sono state verificate le condizioni di confort indoor nelle ore di occupazione dell'edificio e non. In Figura 65 è riportato per la residenza monofamiliare, configurazione 1, zona climatica D, la variazione di temperatura in ogni ambiente, che come si osserva dallo stralcio di grafico (rappresentativo delle giornate dal 22 Gennaio al 1 Febbraio)

raggiunge i 22°C all'accensione della pompa di calore e si attesta mediamente circa attorno ai 21°C nei vari ambienti dell'edificio (grafico in alto). Inoltre, sempre in Figura 65, nel grafico centrale sono rappresentate le relative ore di discomfort (quando l'alloggio è occupato), che, come si vede dalla linea retta sullo 0, sono nulle.

È possibile verificare, mediante la variabile *zone ventilation air change rate*, cosa succede quando durante l'inverno si effettuano dei ricambi d'aria, (nel caso della simulazione ciò corrisponde al programma di ventilazione naturale impostato e già presentato in Tabella 36) si osserva una riduzione nell'andamento delle temperature medie che tuttavia non scendono al disotto dei 18°C, nei singoli ambienti.

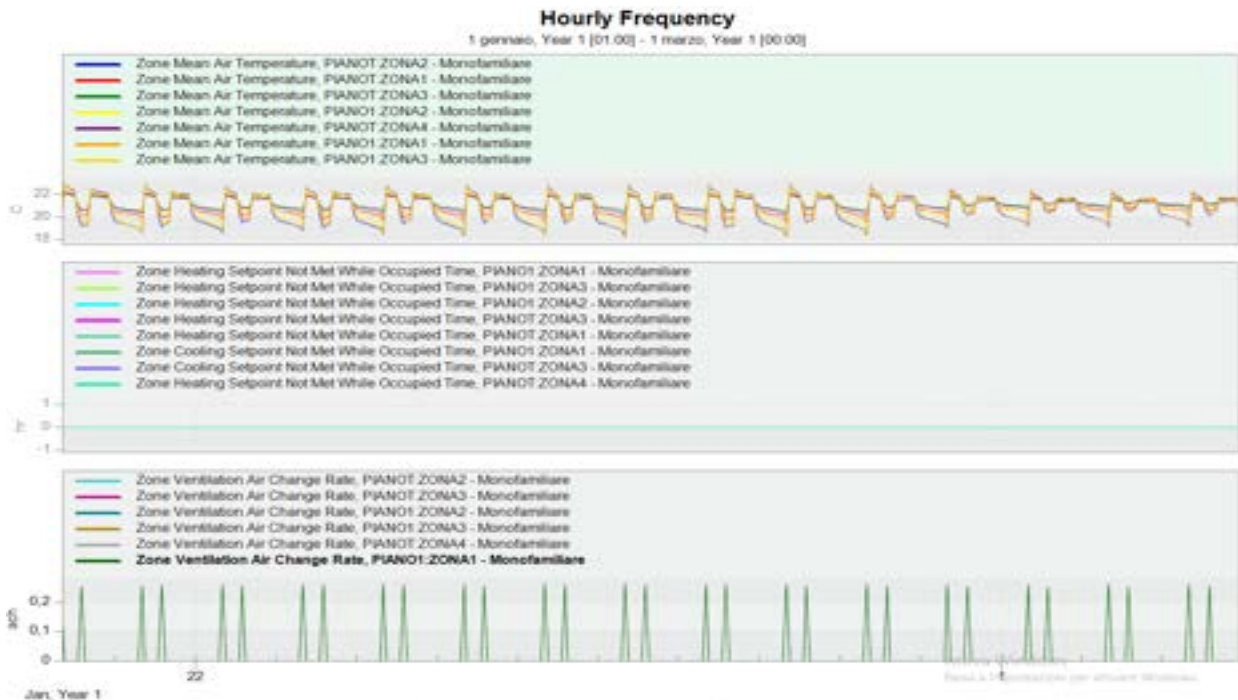


Figura 65. Verifica della temperatura media dell'aria nei singoli ambienti, delle ore di discomfort negli ambienti, e ventilazione naturale invernale

Dal grafico si osserva come non vi siano ore di discomfort nella fascia temporale di occupazione dell'edificio, il ricambio d'aria, programmato consente una temperatura interna non eccessivamente bassa, e si evidenzia inoltre un funzionamento corretto, come da aspettative, della pompa di calore con accensione e spegnimento coerenti con lo schedule programmato.

Analogamente, con un'opportuna scelta delle variabili di output, è possibile verificare anche il corretto funzionamento della pompa di calore per raffreddamento, controllando le temperature medie in ciascun ambiente, e le ore nelle quali non è verificato il set-point di raffreddamento.

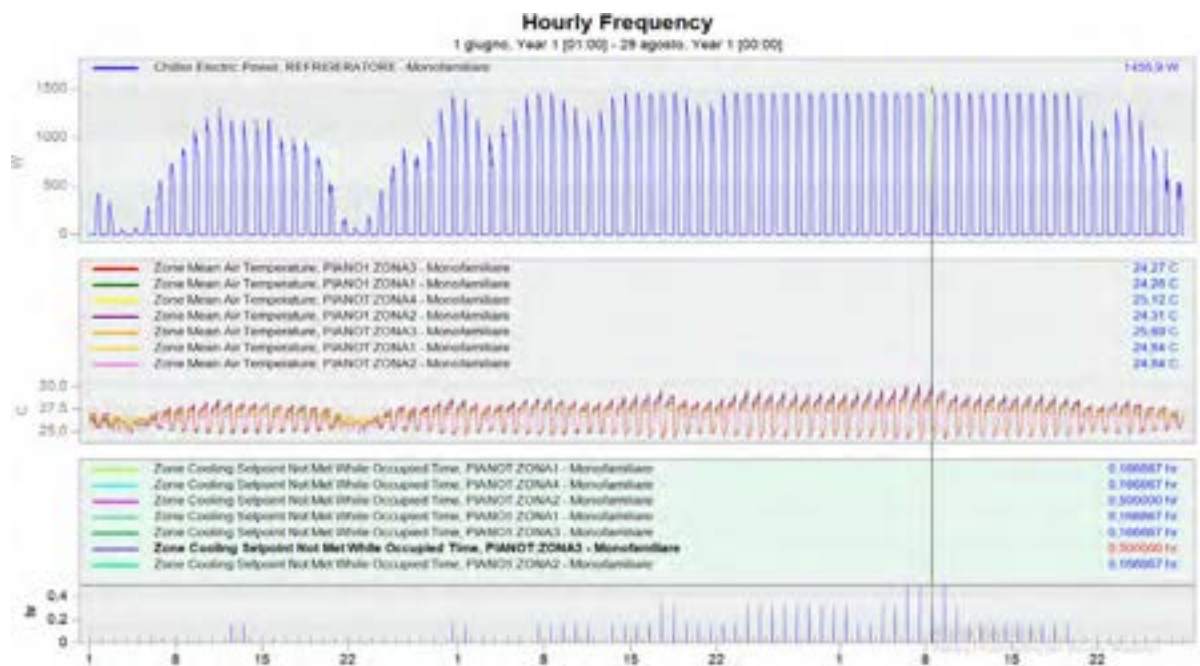


Figura 66. Funzionamento della pompa di calore nella stagione estiva, verifica della T media aria e delle ore di discomfort

In Figura 66 ad esempio nel primo grafico è rappresentata la variabile Chiller Electric Power, ovvero il consumo elettrico per il raffrescamento, sull'asse delle ascisse (per tutti i tre i grafici) sono riportate le ore, ciò ci consente di verificare l'accensione e lo spegnimento della pompa di calore per raffrescamento nelle ore individuate dal programma di funzionamento.

Nel secondo grafico sono rappresentate le temperature medie interne per ciascun ambiente, nel terzo sono diagrammate le frazioni di ore nelle quali il set-point di temperatura non è soddisfatto, quando è prevista contemporaneamente occupazione degli ambienti.

Da un'analisi dei dati per il modello in configurazione 1, in fascia climatica D, si osserva la presenza di qualche momento (frazioni di ora) in cui non è soddisfatto il set-point di temperatura.

Per meglio comprendere l'origine del mancato soddisfacimento del set-point di temperatura in estate è possibile verificare cosa succede contemporaneamente alla variabile *zone ventilation air change rate*, ovvero alla ventilazione naturale, anch'essa programmata con apposito schedule rappresentato in Tabella 36.

Come si evince da Figura 67, il mancato raggiungimento della temperatura di set-point che si verifica per una minima frazione di ore in alcune giornate a fine agosto è originato dalla necessità di effettuare un ricambio d'aria, che porta inevitabilmente la temperatura interna a salire leggermente.

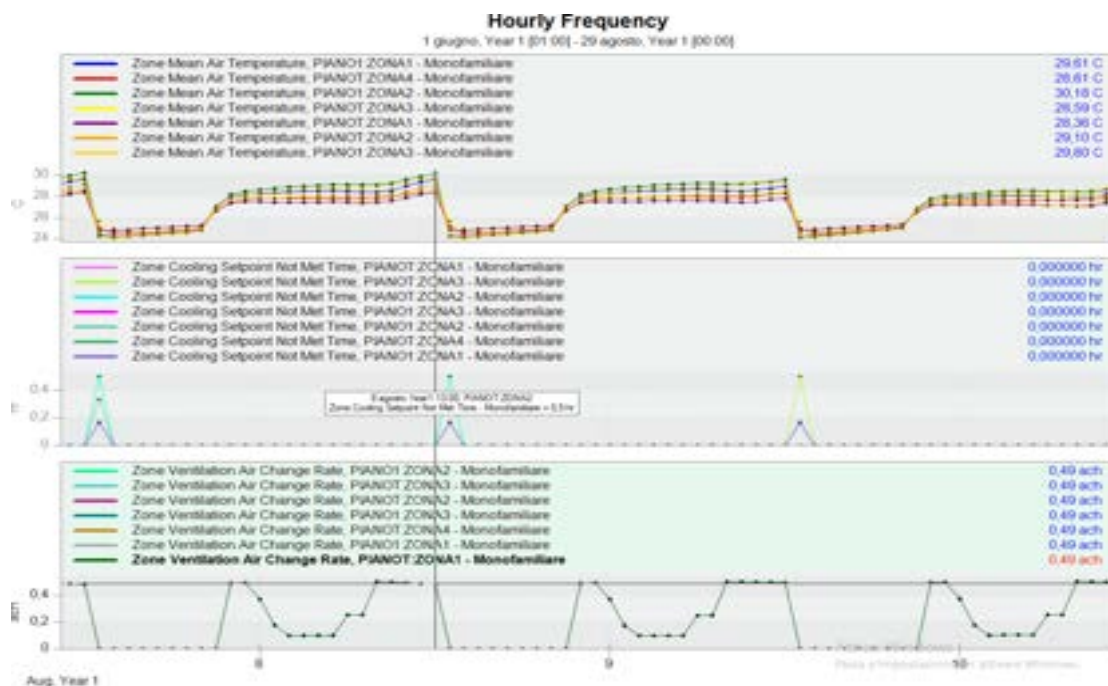


Figura 67. Verifica del mancato raggiungimento del set-point per raffrescamento in concomitanza con il ricambio d'aria

Un'altra verifica importante che può essere fatta è relativa alla produzione di ACS nel periodo estivo. Anche in questo caso è possibile monitorare le portate e le temperature in più punti o nodi dello schema di impianto, scelti strategicamente per verificarne il corretto funzionamento, ad esempio è utile verificare la temperatura dell'acqua nel nodo di uscita dal collettore solare, in modo da verificarne il funzionamento nelle varie stagioni, ed la temperatura di uscita dell'acqua nel nodo rappresentativo del punto di prelievo dell'acqua calda da parte dell'utente, dove la Temperatura attesa sarà di 55°C.

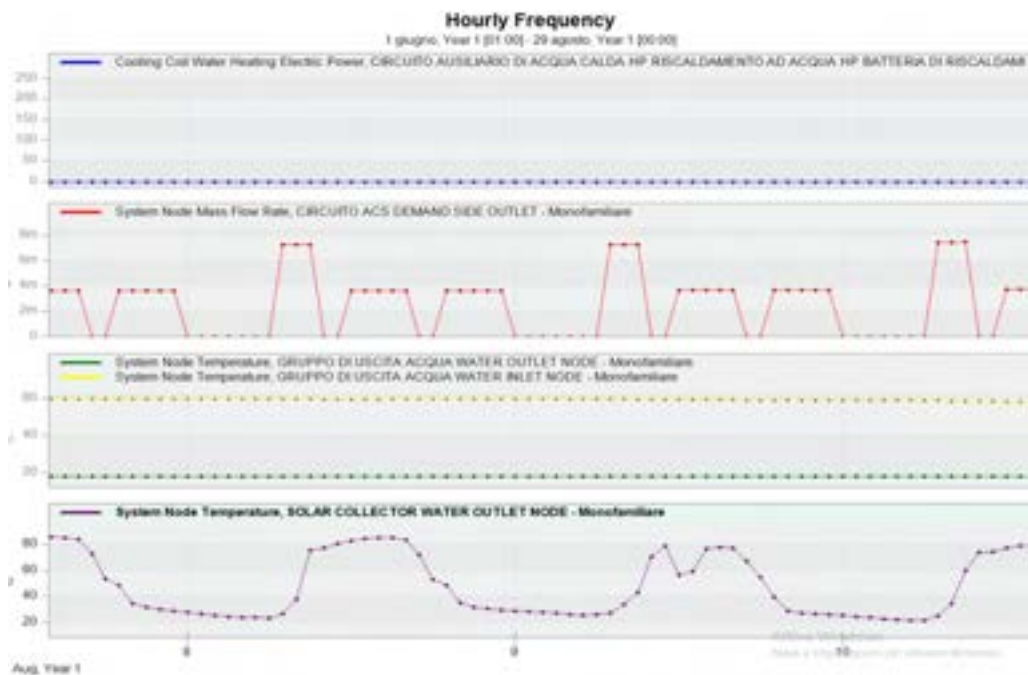


Figura 68. Verifica del funzionamento dell'impianto solare termico - estate

In Figura 68 è riportato uno stralcio relativo alla simulazione oraria estiva, nello specifico sull'asse delle ascisse sono riportati i giorni dall'8 al 10 agosto. Nel primo grafico la pompa di calore dedicata appare

evidentemente spenta, nel secondo grafico la portata di acqua risulta coerente con quanto ipotizzato con il programma di funzionamento dedicato (Tabella 33). Dal terzo grafico verificiamo anche che la temperatura dell'acqua in uscita è correttamente maggiore di 55°C (si miscelerà poi con la fredda). Pertanto è possibile dedurre che l'acqua calda sanitaria è riscaldata dall'impianto solare termico, la cui temperatura nel nodo in uscita varia, a seconda delle ore del giorno da, valori massimi di circa 85°C nelle ore pomeridiane, a valori minimi prossimi ai 20°C nelle ore notturne.

Ad ulteriore verifica di quanto sopra esposto è possibile quindi controllare anche la temperatura interna dell'accumulo dedicato all'acqua calda sanitaria, Figura 69.

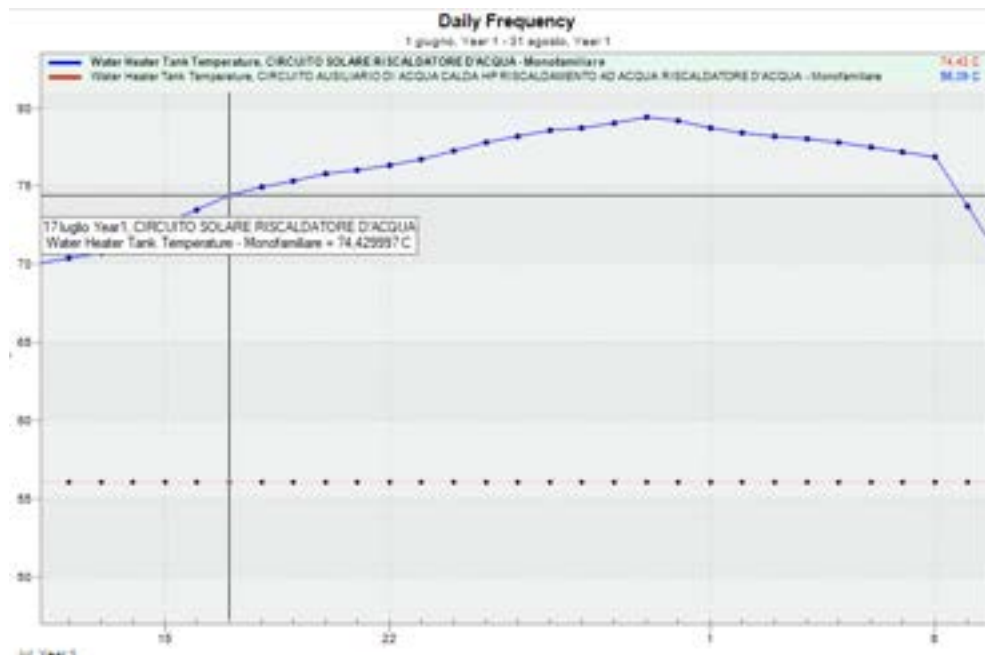


Figura 69. Temperature interne agli accumuli per ACS

È interessante fare un confronto con quanto accade invece nel periodo invernale, per il medesimo impianto, stessa configurazione 1 della residenza monofamiliare, stessa zona climatica D, Figura 70.

Dal confronto, con le giornate del 28, 29 e 30 gennaio, si osserva immediatamente che la pompa di calore dedicata all'acqua calda sanitaria appare funzionante, a differenza di quanto si osserva in Figura 68, le portate e la temperatura in uscita (sempre pari a 55°C come programmato) sono conformi alle aspettative, ma la pompa si attiva perché la temperatura verificata nel nodo in uscita al collettore solare risulta piuttosto bassa, non riuscendo a superare, nemmeno nelle ore più calde, i 30°C.

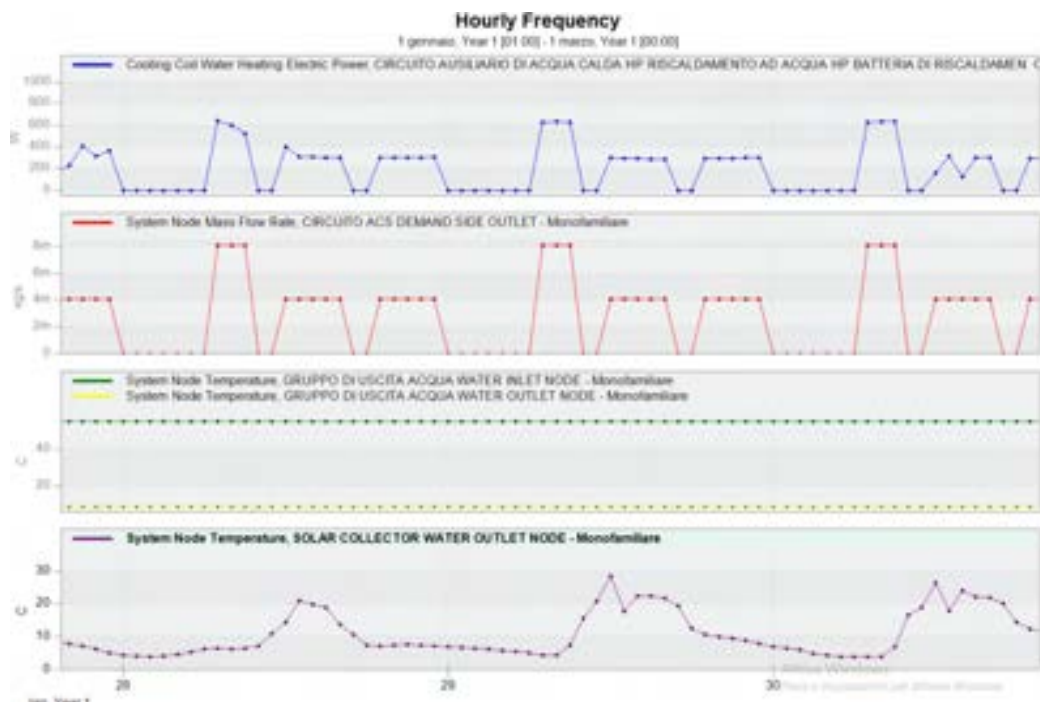


Figura 70. Verifica del funzionamento dell'impianto solare termico inverno

Anche relativamente alla produzione di energia elettrica generata dai pannelli ipotizzati in copertura, è possibile analizzare e confrontare la differenza di produzione di energia elettrica, in periodi di riferimento, ad esempio relativamente alla stagione invernale ed estiva, in Figura 71 è possibile confrontare rapidamente la produzione giornaliera nel mese di luglio e quella nel mese di gennaio.

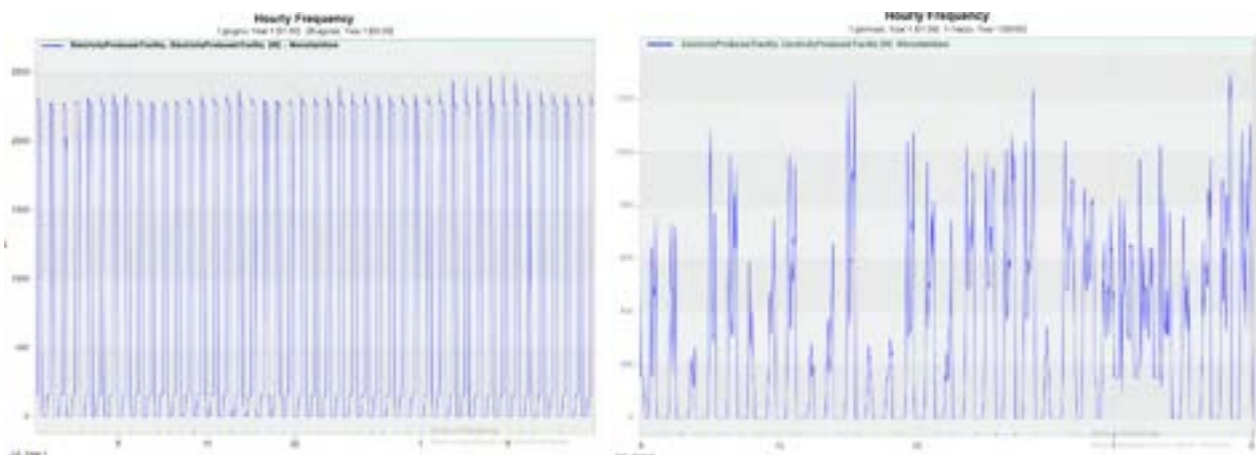


Figura 71. Confronto tra la produzione di energia elettrica, in simulazione estiva ed invernale per un periodo di riferimento in estate ed in inverno

6 Risultati energetici per l'edificio monofamiliare nelle diverse zone climatiche

Il comportamento termico di un sistema complesso, come nel caso del sistema edificio-impianto, è strettamente dipendente dalla variabilità delle condizioni ambientali al contorno. La direttiva 31/2010 dell'Unione europea [37] definisce la prestazione energetica come la quantità di energia, calcolata o misurata, necessaria per soddisfare il fabbisogno energetico connesso ad un uso normale dell'edificio, compresa, in particolare, l'energia utilizzata per il riscaldamento, il raffrescamento, la ventilazione e la produzione di acqua calda. Il carico termico di un edificio, o fabbisogno termico, in condizioni di progetto, viene calcolato effettuando un bilancio di energia termica nelle condizioni di progetto. Nei casi esaminati si è scelto di valutare il fabbisogno termico, invernale ed estivo, per le varie configurazioni, al netto delle voci relative all'illuminazione ed al consumo elettrico.

Nei paragrafi a seguire sono riportati i risultati delle simulazioni effettuate in termini di fabbisogni termici ed energetici per ogni servizio analizzato, ed alcune considerazioni derivate dal confronto con la produzione energetica da fonte rinnovabile.

6.1 Valutazione del fabbisogno termico

Sono state condotte delle simulazioni annuali, su base oraria, giornaliera e mensile, delle due configurazioni di involucro, in tutte le zone climatiche, al fine di valutare le dispersioni attraverso l'involucro (opaco e trasparente), gli apporti solari attraverso le finestre, l'effetto dell'occupazione e della ventilazione naturale. Per il periodo invernale è stato preso a riferimento il periodo definito dalla normativa per l'accensione degli impianti per ciascuna zona climatica. Per la valutazione del fabbisogno estivo invece in mancanza di riferimenti normativi, si è individuato il periodo di quattro mesi che va da giugno a settembre. Nei grafici riportati dalla Figura 72 alla Figura 81, sono riportate per ciascuna configurazione e per ciascuna zona climatica, le componenti che concorrono a determinare il fabbisogno, quindi dispersioni e apporti (nello specifico, perdite attraverso l'involucro opaco e trasparente, ventilazione, apporti interni dovuti all'occupazione e apporti solari), e infine in arancione il valore del fabbisogno invernale ed estivo.

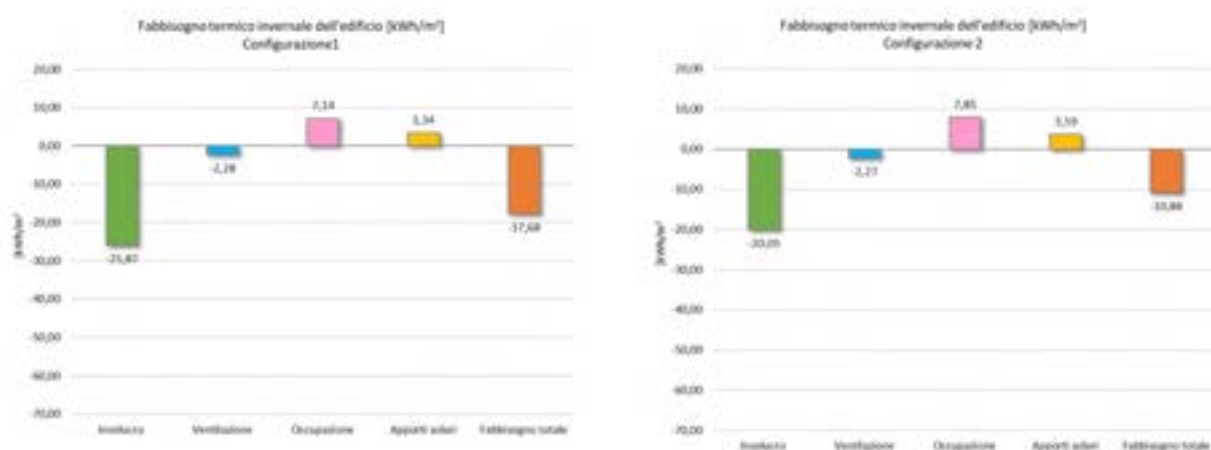


Figura 72. Edificio monofamiliare in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico invernale

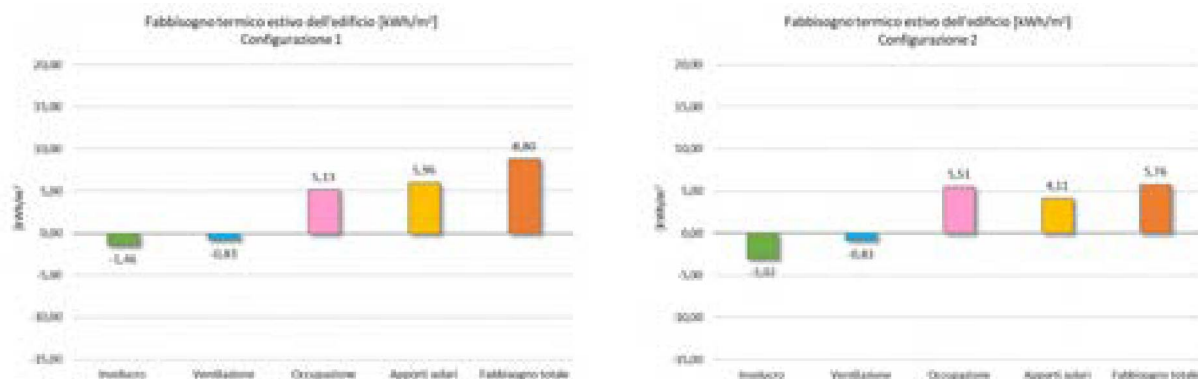


Figura 73. Edificio monofamiliare in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico estivo

L'analisi dei risultati delle simulazioni condotte sui due modelli ha mostrato in estrema sintesi le potenzialità connesse all'applicazione di alcune strategie, sia passive che attive, in termini di riduzione del fabbisogno di energia e di miglioramento del comfort termico.

Di interesse risulta l'efficacia della configurazione 2, una modalità costruttiva ancora molto poco diffusa in climi caldi e temperati, dove è fondamentale tenere sotto controllo fenomeni di surriscaldamento mediante una gestione ottimale delle fonti di irraggiamento solare, ed un'adeguata gestione degli apporti gratuiti di calore all'interno dell'edificio.

La presenza di adeguate schermature riduce drasticamente gli apporti solari estivi ed un controllo attivo in funzione della radiazione incidente ne massimizza l'efficienza stagionale, il diverso orientamento delle due configurazioni, infatti, ha evidenziato come il sistema di oscuramento esterno analizzato, tipo brise soleil, con lamelle orientabili scarsamente riflettenti, risulta di maggior efficacia per la configurazione 2.

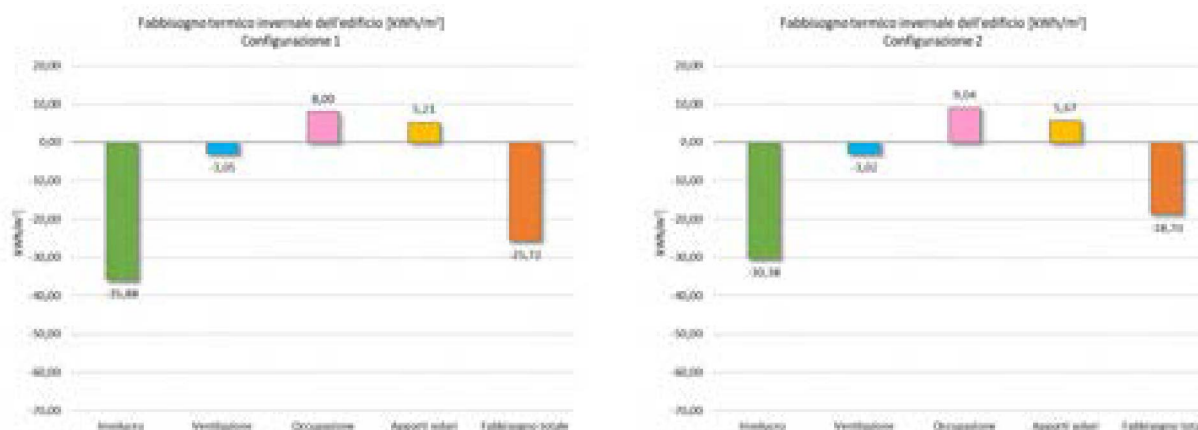


Figura 74. Edificio monofamiliare in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico invernale

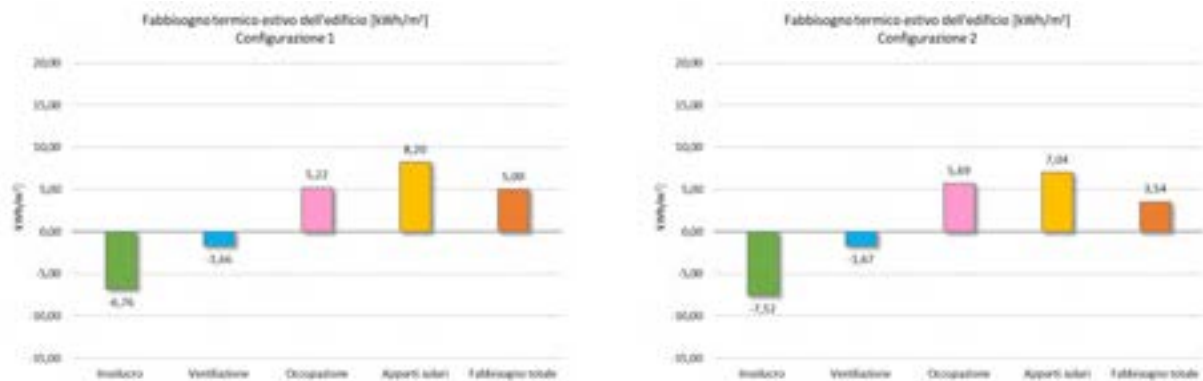


Figura 75. Edificio monofamiliare in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico estivo

La zona climatica C è quella nella quale si evidenziano minori differenze in termini di dispersione attraverso le due configurazioni di involucro, e, conseguentemente, in termini di fabbisogno totale, e fatto salvo il contributo dovuto agli apporti solari che, come si è detto, è variabile per la differenza di orientamento, le due soluzioni risultano pressoché alternative in particolar modo per quanto riguarda la performance estiva (Figura 75).

Nelle zone climatiche in cui si hanno temperature invernali via via più rigide la riduzione delle dispersioni attraverso l'involucro della configurazione 2 diventano più evidenti (Figura 76, Figura 78 e Figura 80).

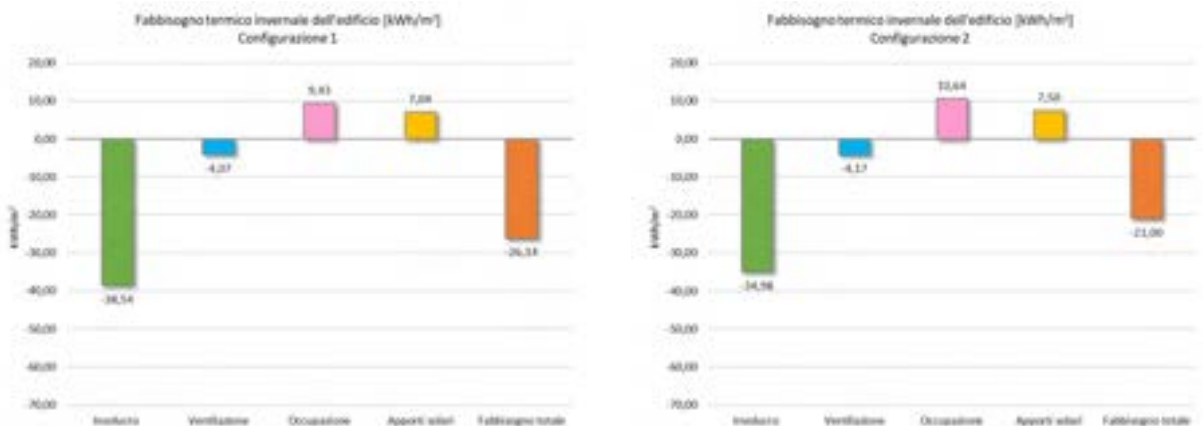


Figura 76. Edificio monofamiliare in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico invernale

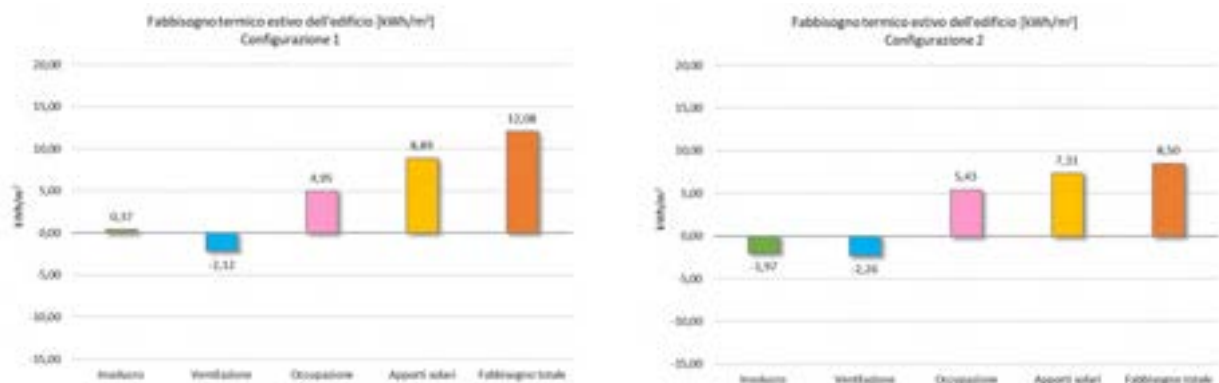


Figura 77. Edificio monofamiliare in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico estivo

Tuttavia, anche nella stagione estiva, in fascia climatica D, ad esempio si osserva una miglior prestazione della configurazione 2, il fabbisogno estivo per la configurazione 1 risulta circa 12 kWh/m², per la configurazione 2 invece scende a circa 8,5 kWh/m² (Figura 77).

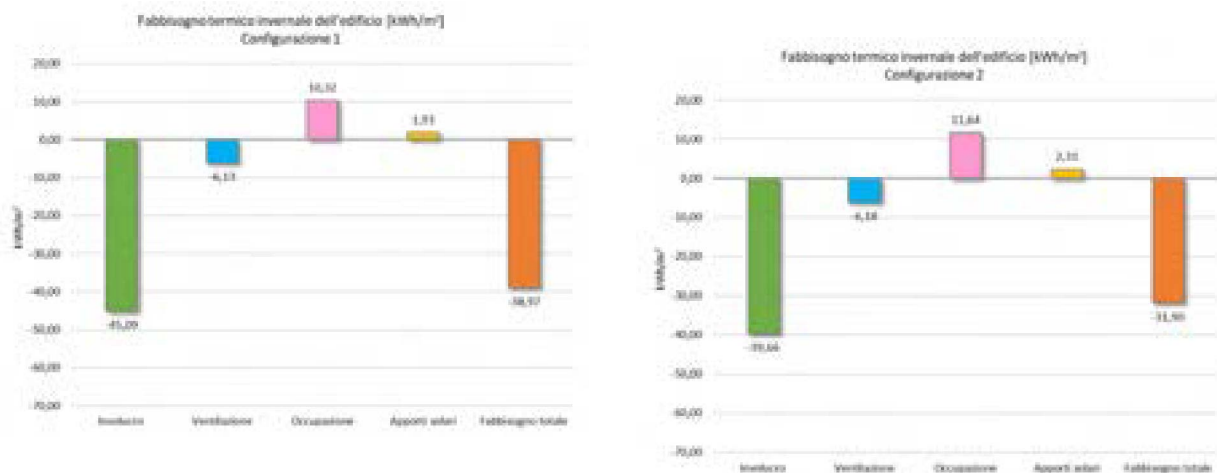


Figura 78. Edificio monofamiliare in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico invernale

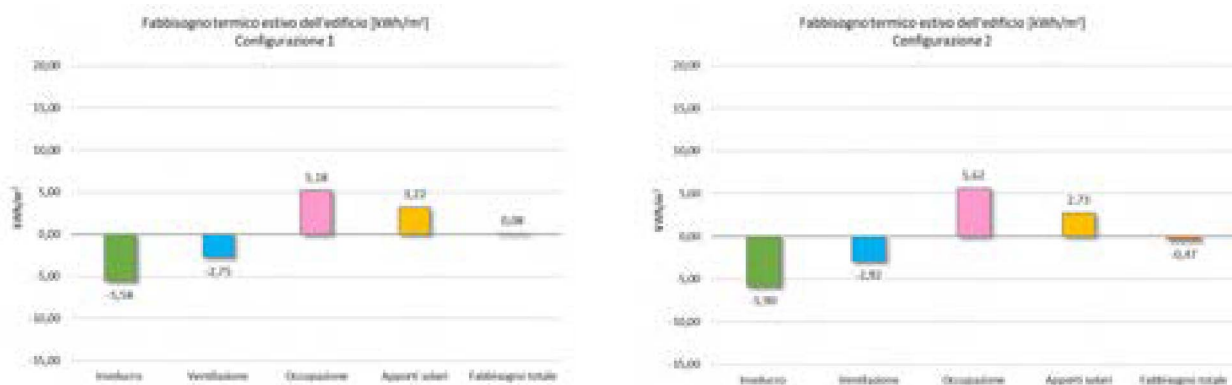


Figura 79. Edificio monofamiliare in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico estivo

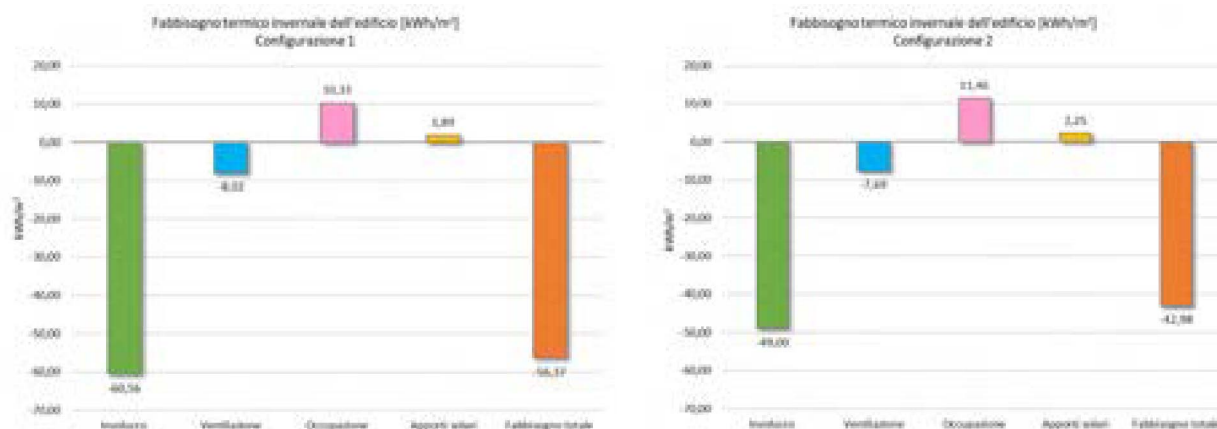


Figura 80. Edificio monofamiliare in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico invernale

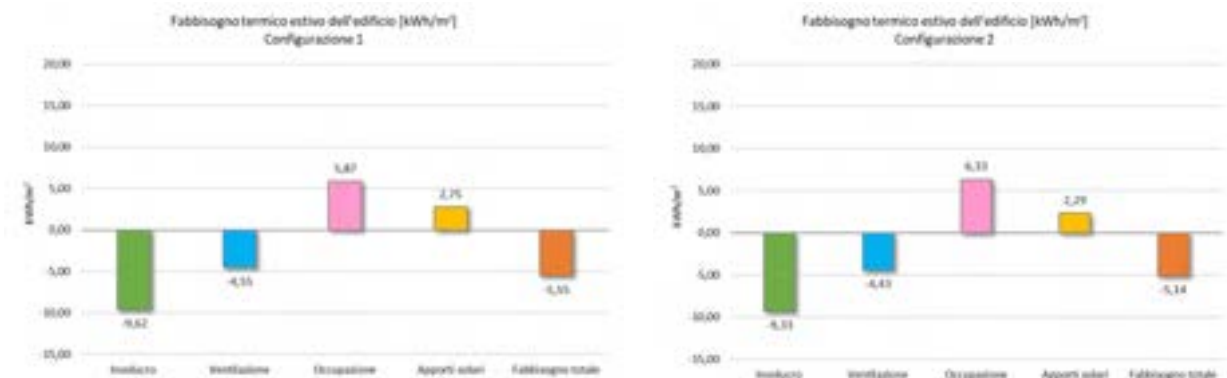


Figura 81. Edificio monofamiliare in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico estivo

La comprovata efficacia dell'adozione di elementi strutturali dotati di inerzia termica e l'impiego, nella stratificazione delle tamponature esterne, di materiali dotati di una maggiore densità e/o calore specifico (pannelli in legno tipo X-LAM, lana di legno e fibra di legno ad alta densità), già diffusi in queste zone climatiche in numerose realizzazioni anche energeticamente molto efficienti, possono rappresentare una conferma sulla bontà di una soluzione del tipo della configurazione 2.

Nonostante le due configurazioni presentassero le medesime caratteristiche geometriche (ad eccezione come si è detto dell'orientamento, e della copertura inclinata per la quale si è ipotizzato un sottotetto non occupato e quindi non riscaldato), e confrontabili proprietà stazionarie, i differenti materiali e le diverse tecnologie di involucro hanno portato a un comportamento dinamico che differisce per zona climatica e che ci consente di fare alcune osservazioni.

Nella Figura 82 di seguito è riportato il confronto su base mensile, suddiviso per zona climatica, del fabbisogno termico nelle due diverse configurazioni.

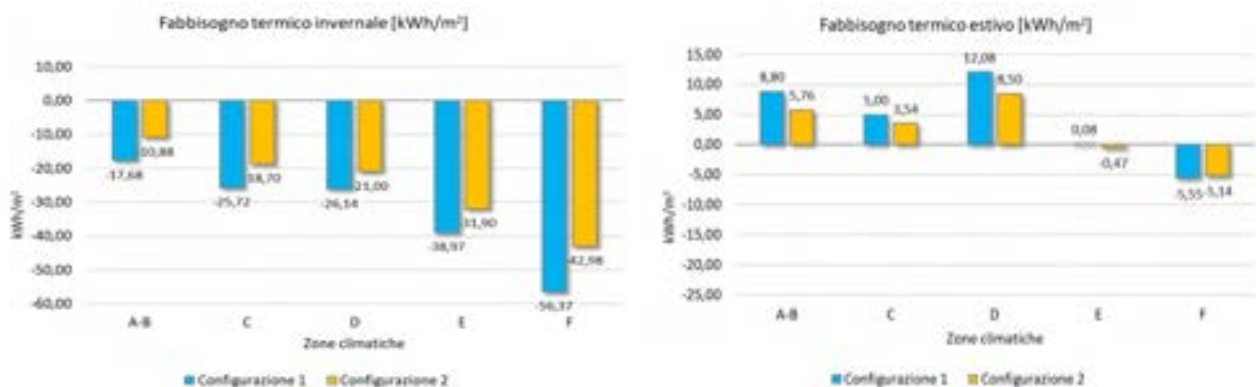


Figura 82. Edificio monofamiliare - confronto tra i fabbisogni termici invernali ed estivi nelle configurazioni 1 e 2, per ciascuna zona climatica

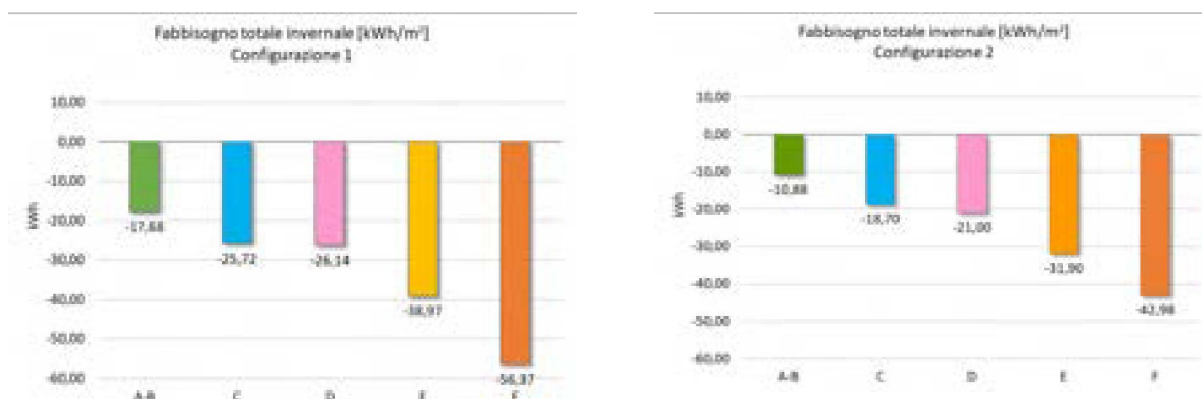


Figura 83. Edificio monofamiliare – Confronto fabbisogno totale invernale nelle 2 configurazioni per le 5 zone climatiche analizzate



Figura 84. Edificio monofamiliare – Confronto fabbisogno totale estivo nelle 2 configurazioni per le 5 zone climatiche analizzate

Nelle Figura 83 e Figura 84 è possibile confrontare rapidamente i fabbisogni invernali ed estivi, per ciascuna zona climatica; dall'osservazione dei dati si evince che la configurazione 2 appare una valida alternativa per la realizzazione di un edificio monofamiliare, in tutte le zone climatiche, anche in quelle più calde, sebbene attualmente non si registri ancora un'ampia diffusione. Sempre in clima caldo l'introduzione di un sistema di oscuramento studiato opportunamente appare essenziale per la riduzione degli apporti solari attraverso le finestre e per scongiurare, in associazione alla ventilazione naturale, l'effetto di surriscaldamento degli ambienti, facendo ricorso solo quando necessario al raffrescamento.

6.2 Valutazione dei fabbisogni energetici e produzione da fonti rinnovabili

Di seguito sono riportati i fabbisogni energetici per ogni servizio analizzato, riscaldamento, raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria, su base mensile e annuale, confrontando gli output per le configurazioni esaminate, nelle diverse zone climatiche.

6.2.1 Climatizzazione invernale

L'edificio si avvale di un sistema a pompa di calore per far fronte ai servizi di riscaldamento e una pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria.

L'analisi della performance di impianto consente di verificare l'andamento del Coefficient of Performance (COP) per ciascuna zona climatica e per ciascuna configurazione.

A titolo di esempio si riportano in Figura 85, Figura 86 e Figura 87 il confronto tra la variazione del COP, su base giornaliera in funzione della temperatura a bulbo secco esterna, per la configurazione 1 e 2 in zona climatica C, D ed E.

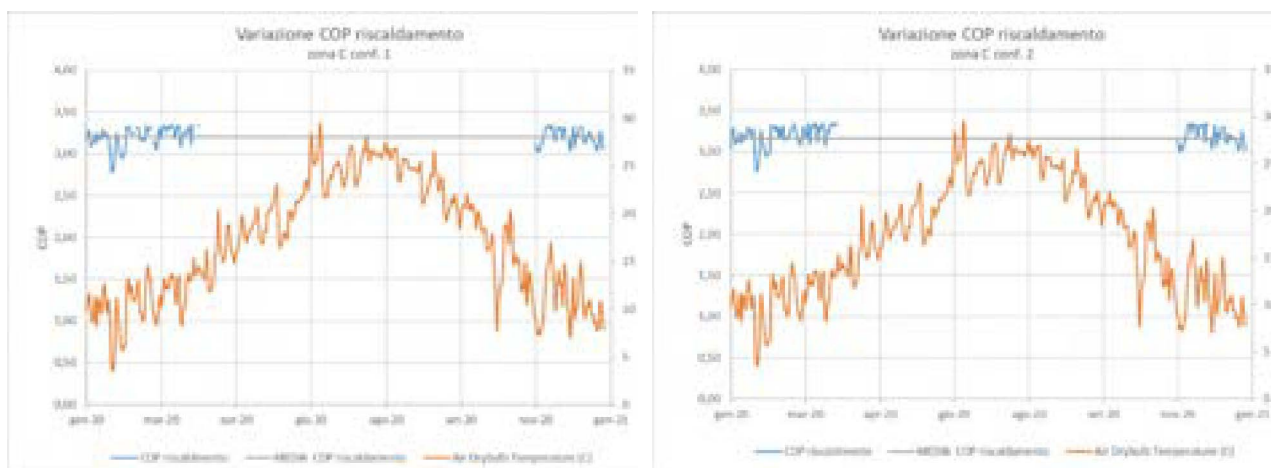


Figura 85. Andamento del COP della pompa di calore per riscaldamento zona climatica C

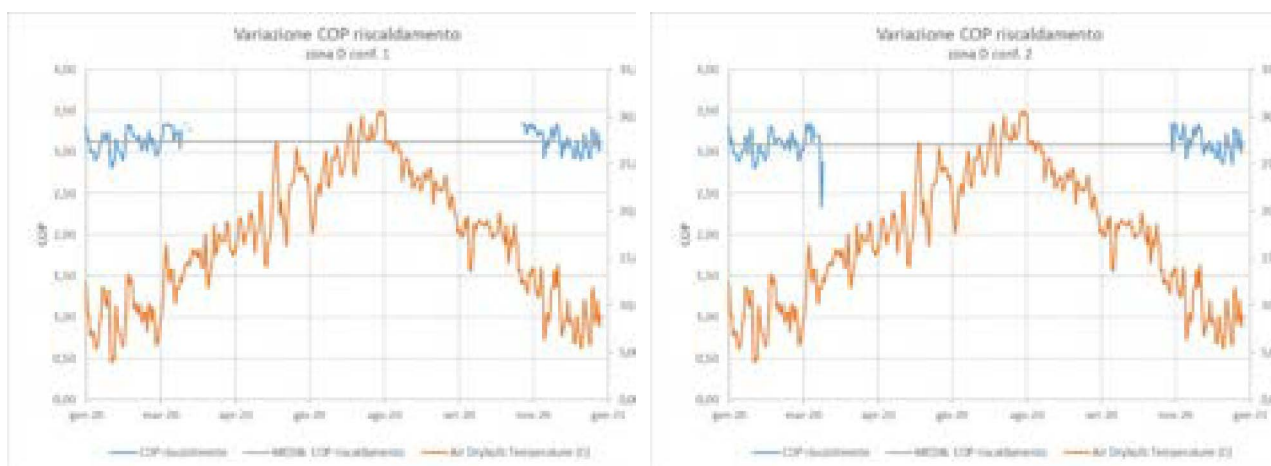


Figura 86. Andamento del COP della pompa di calore per riscaldamento zona climatica D

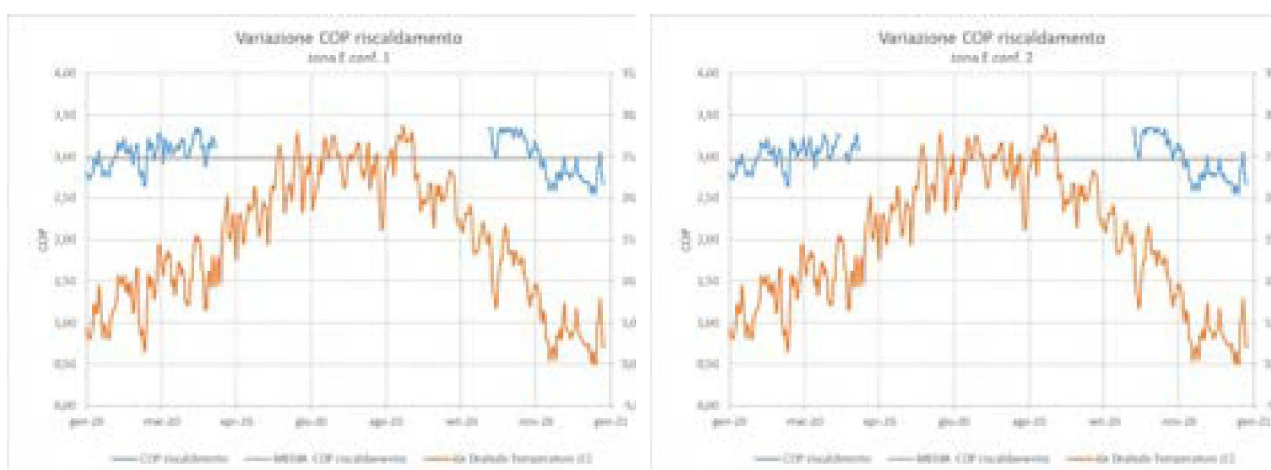


Figura 87. Andamento del COP della pompa di calore per riscaldamento zona climatica E

I valori di COP si attestano intorno a valori prossimi a 3. Ciò vuol dire che vengono forniti circa 3kWh di energia termica per il riscaldamento, a fronte di 1kWh di energia elettrica consumata, questa performance risulta leggermente calante in clima più freddo, in zona E ed F dove si registra un COP che mediamente si attesta leggermente sotto il 3.

Questo perché verosimilmente nelle zone E ed F nel periodo invernale è frequente avere temperature inferiori ai 7°C e percentuali di umidità superiori all'87%, dati in base ai quali si è ottenuto il COP nominale da prove di laboratorio.

Di seguito da Figura 88 a Figura 92 sono riportati i grafici relativi all'energia termica necessaria al riscaldamento ed all'energia elettrica fornita.

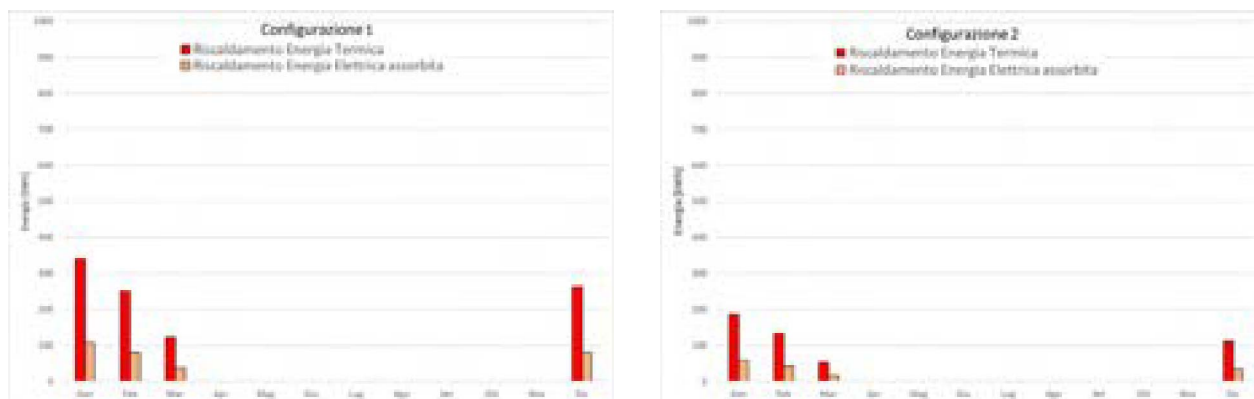


Figura 88. Edificio monofamiliare in zona climatica A-B – Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di riscaldamento

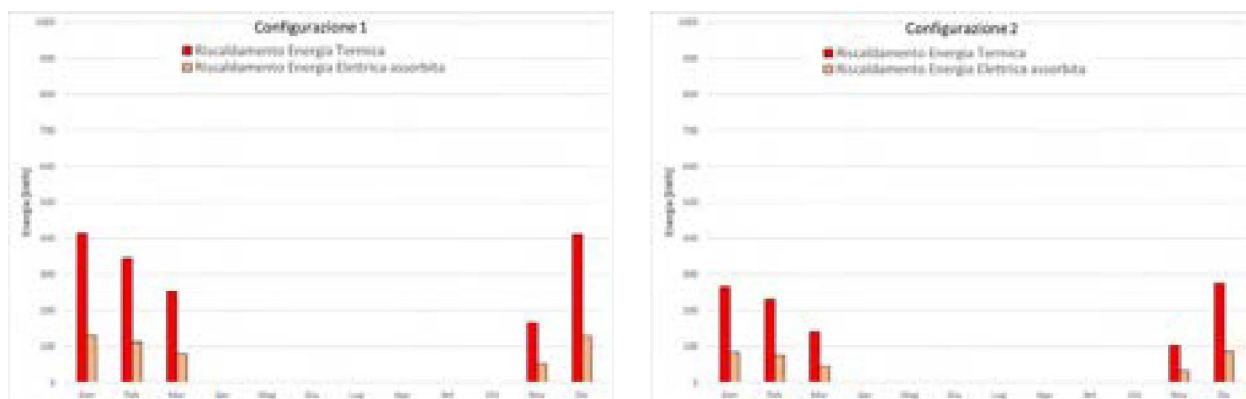


Figura 89. Edificio monofamiliare in zona climatica C– Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di riscaldamento

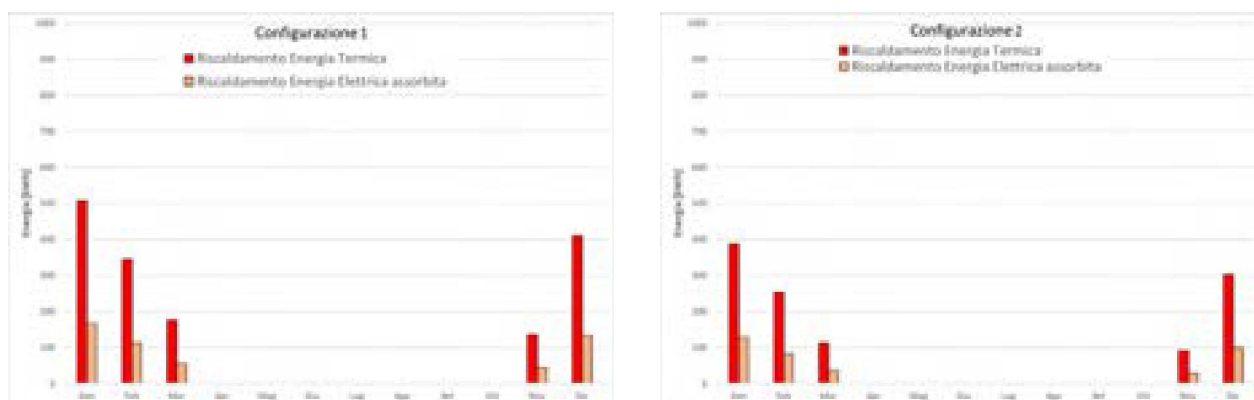


Figura 90. Edificio monofamiliare in zona climatica D– Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di riscaldamento

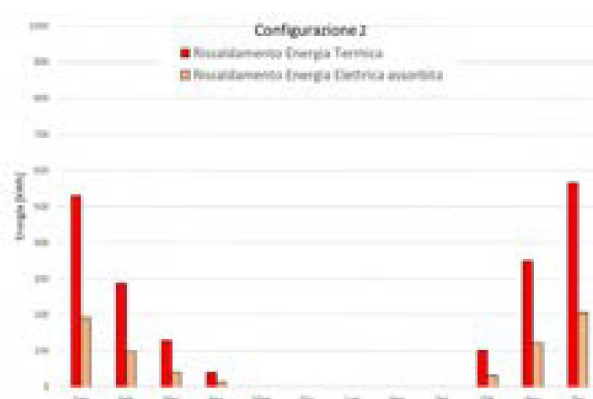
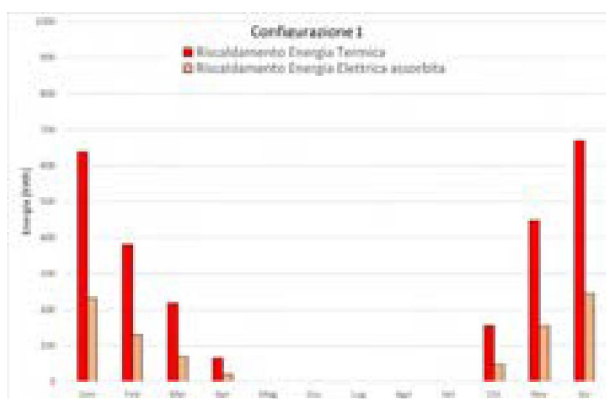


Figura 91. Edificio monofamiliare in zona climatica E– Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di riscaldamento

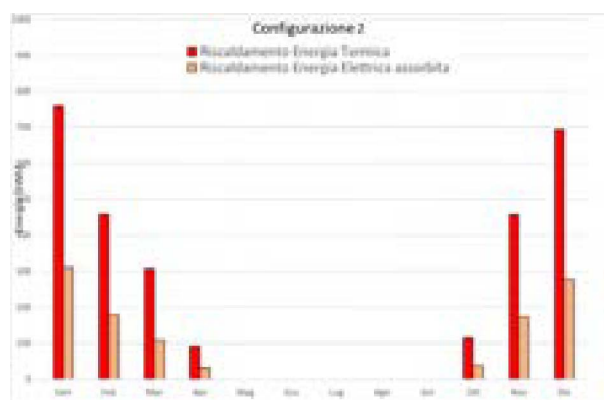
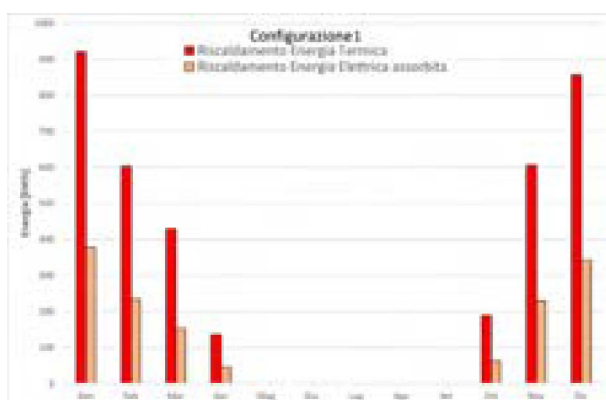


Figura 92. Edificio monofamiliare in zona climatica F – Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di riscaldamento

È facile osservare come la configurazione 2, prevedibilmente visti gli andamenti del fabbisogno termico, sia associata ad un minore fabbisogno di energia termica per il riscaldamento, praticamente in tutte le zone climatiche analizzate. Nelle tabelle Tabella 40 e Tabella 41 si riportano in dettaglio i risultati in termini di energia termica fornita per il riscaldamento ed energia elettrica assorbita per tutte le configurazioni e i mesi dell'anno.

Tabella 40. Energia termica mensile e annuale fornita per il riscaldamento nelle differenti configurazioni e zone climatiche

Mesi	Energia Termica [kWh]									
	1AB	1C	1D	1E	1F	2AB	2C	2D	2E	2F
Gen	342	415	508	639	922	186	266	387	530	760
Feb	252	345	345	381	603	134	230	252	287	459
Mar	123	253	176	218	430	54	142	112	129	307
Apr	0	0	0	66	136	0	0	0	40	91
Mag	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Giu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lug	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ago	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Set	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ott	0	0	0	155	190	0	0	0	101	116
Nov	0	166	136	447	606	0	103	91	350	458
Dic	263	412	410	670	856	112	274	302	565	695
Anno	979	1590	1575	2575	3742	486	1015	1144	2003	2885

Tabella 41. Energia elettrica mensile e annuale fornita per il riscaldamento nelle differenti configurazioni e zone climatiche

Mesi	Energia Elettrica kWh]									
	1AB	1C	1D	1E	1F	2AB	2C	2D	2E	2F
Gen	107	130	167	231	378	59	84	128	192	311
Feb	79	111	112	130	234	43	75	83	99	179
Mar	38	78	56	70	152	17	44	36	42	109
Apr	0	0	0	21	45	0	0	0	13	30
Mag	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Giu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lug	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ago	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Set	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ott	0	0	0	48	63	0	0	0	32	39
Nov	0	52	43	154	229	0	33	29	122	174
Dic	80	129	134	243	343	35	87	99	206	278
Anno	305	501	512	899	1443	153	322	375	706	1121

6.2.2 Climatizzazione estiva

Per quanto riguarda la climatizzazione estiva e in particolare la variazione dell'EER, in Figura 93 si evidenzia come il valore, nel mese di agosto, zona climatica D, su una valutazione giornaliera sia all'incirca pari a 3,9, un valore molto prossimo a quello nominale (4,0).

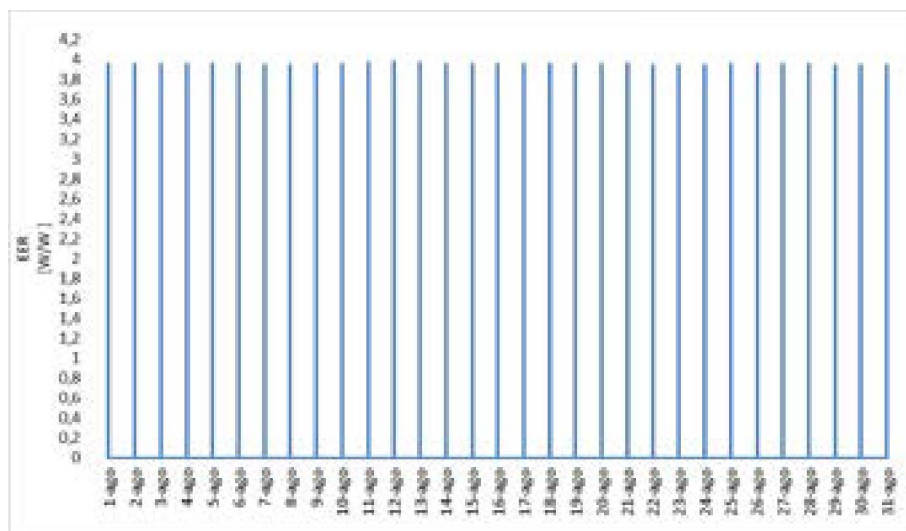


Figura 93. Andamento medio giornaliero dell'EER nel mese di agosto, zona climatica D configurazione1

Nelle immagini a seguire (da Figura 94, a Figura 98) sono riportati i valori dei fabbisogni energetici per il raffrescamento estivo. In mancanza di riferimenti normativi il periodo di riferimento è stato fissato convenzionalmente per tutte le zone climatiche, per i mesi di giugno, luglio agosto e settembre.

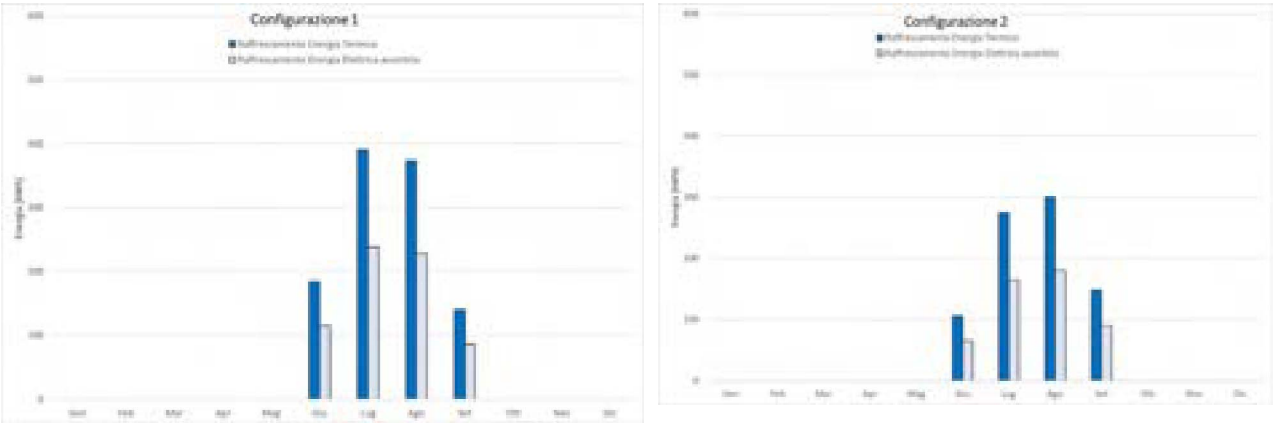


Figura 94. Edificio monofamiliare in zona climatica A-B – Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di raffrescamento

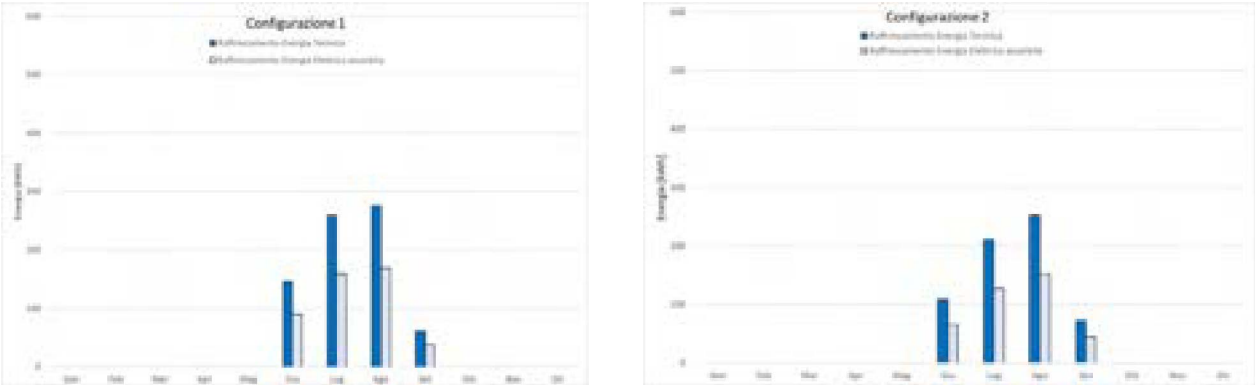


Figura 95. Edificio monofamiliare in zona climatica C – Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di raffrescamento

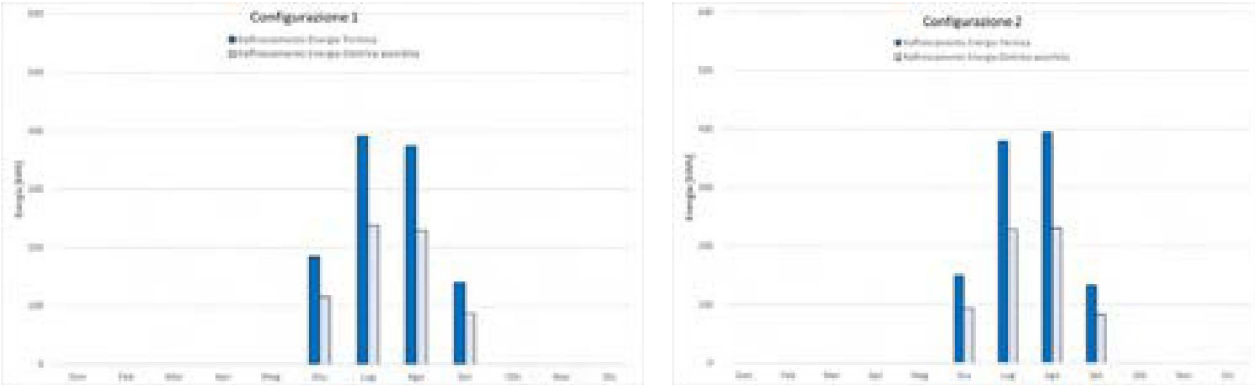


Figura 96. Edificio monofamiliare in zona climatica D – Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di raffrescamento

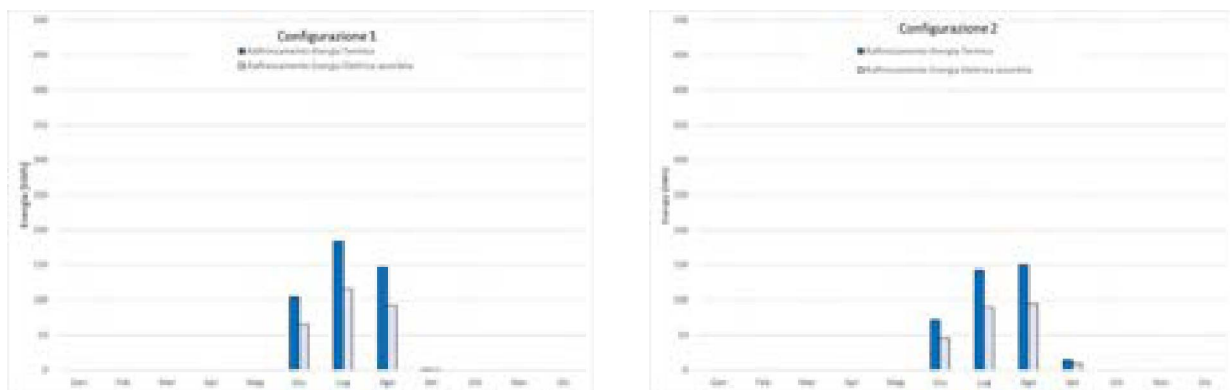


Figura 97. Edificio monofamiliare in zona climatica E – Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di raffrescamento

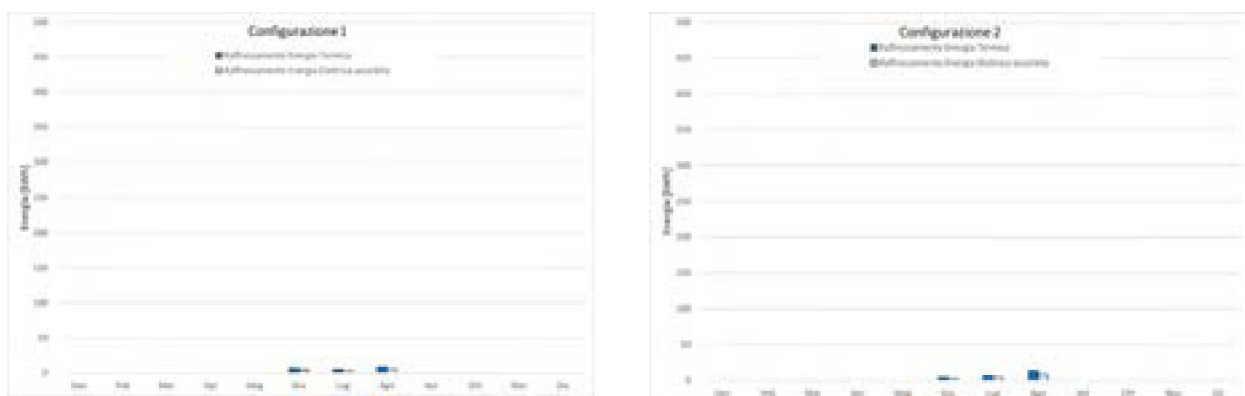


Figura 98. Edificio monofamiliare in zona climatica F – Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di raffrescamento

Si osserva come l'energia termica necessaria al raffrescamento sia massima nelle zone A-B (prevedibilmente) e nella zona D, raggiungendo quasi i 400 kWh nei mesi più critici (luglio e agosto), tuttavia è interessante notare come la configurazione 2 produca una riduzione di energia termica per il raffrescamento in zona A-B, cosa che invece non si registra in maniera così evidente in zona D, dove a netto di qualche differenza mensile, le configurazioni danno luogo ad un fabbisogno analogo.

Ovviamente in Figura 97 e Figura 98, essendo raffigurati i confronti tra le due configurazioni nelle zone climatiche E ed F dove il ricorso al raffrescamento è molto contenuto se non addirittura trascurabile (zona F) non si evidenziano sostanziali differenze tra le due configurazioni.

Nelle tabelle a seguire Tabella 42 e Tabella 43 sono riportati i kWh di energia termica ed elettrica rispettivamente, per le varie zone climatiche e per le due configurazioni.

Tabella 42. Energia termica mensile ed annuale per il raffrescamento nelle differenti configurazioni e zone climatiche

Mesi	Energia Termica [kWh]									
	1AB	1C	1D	1E	1F	2AB	2C	2D	2E	2F
Gen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Feb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Apr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mag	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Giu	185	146	238	104	6	109	65	150	71	4
Lug	391	259	490	184	5	210	165	378	142	6
Ago	374	275	471	147	8	252	180	394	150	13
Set	140	61	146	1	0	72	91	132	14	0
Ott	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nov	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dic	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Anno	1090	741	1345	435	19	643	502	1055	378	23

Tabella 43. Energia termica mensile ed annuale per il raffrescamento nelle differenti configurazioni e zone climatiche

Mesi	Energia Elettrica [kWh]									
	1AB	1C	1D	1E	1F	2AB	2C	2D	2E	2F
Gen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Feb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Apr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mag	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Giu	115	89	149	66	4	65	66	93	45	3
Lug	238	159	291	116	3	165	127	228	90	4
Ago	229	169	267	92	5	180	152	230	94	8
Set	87	38	91	1	0	91	45	83	9	0
Ott	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nov	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dic	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Anno	669	455	798	274	12	502	390	635	238	15

Si evidenzia come la configurazione 2 sia associata, a parità di condizioni, ad un minore fabbisogno di energia termica per il raffrescamento estivo.

6.2.3 Acqua calda sanitaria e produzione da solare termico

Considerazioni analoghe a quelle fatte per il COP della pompa di calore per riscaldamento possono essere condotte anche per la pompa di calore dedicata alla produzione di acqua calda sanitaria, dai grafici riportati in Figura 99 e Figura 100 si osserva anche lo spegnimento della pompa di calore nei mesi più caldi nei quali si ha una copertura totale (o quasi) del fabbisogno da parte del solare termico.

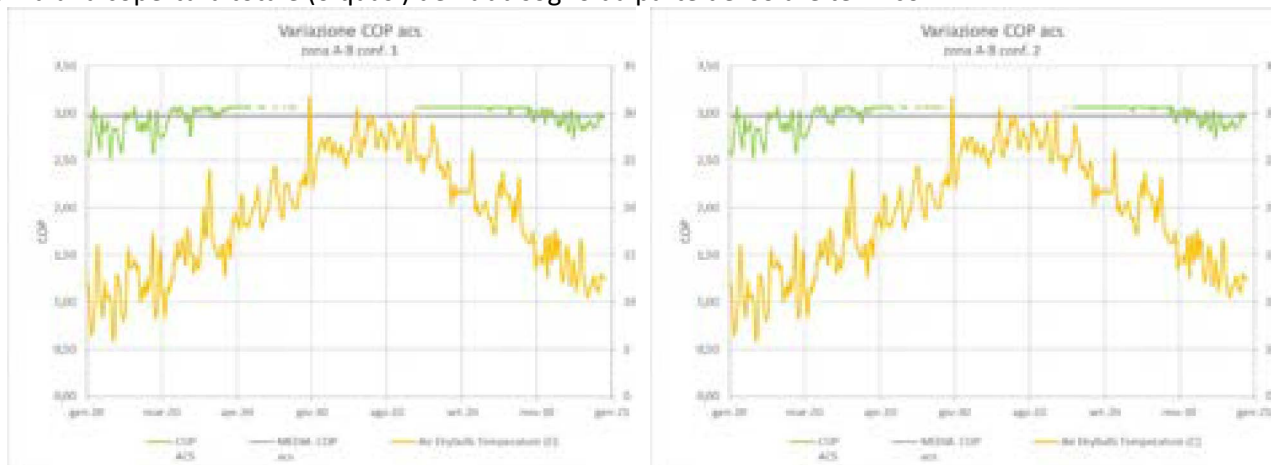


Figura 99. Andamento del COP della pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria - zona climatica A

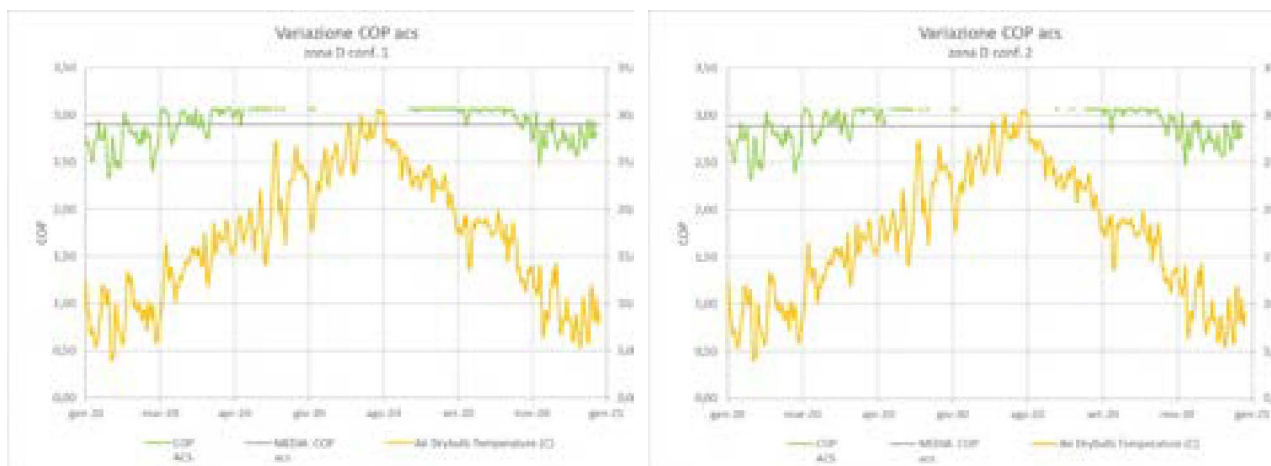


Figura 100. Andamento del COP della pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria - zona climatica D

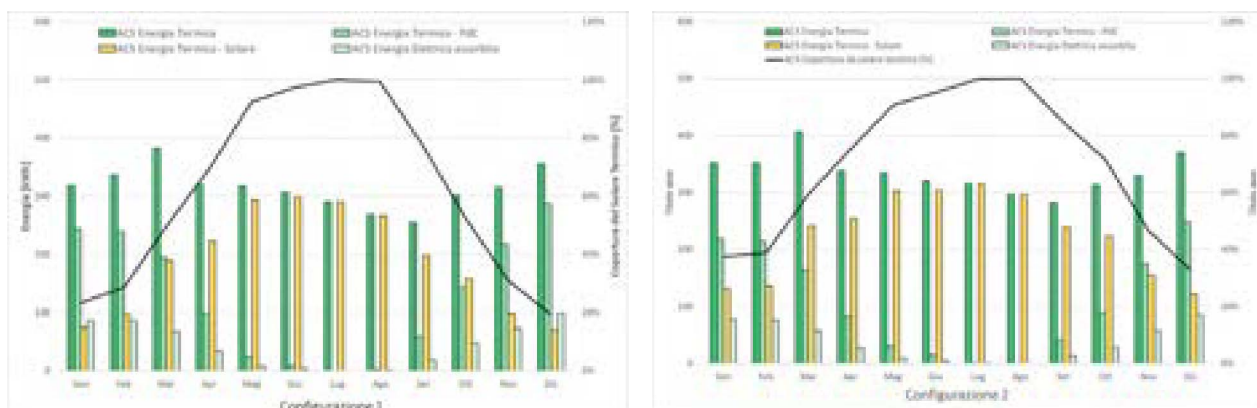


Figura 101. Monofamiliare in zona climatica A-B – Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno di energia termica ed elettrica per la pompa di calore dedicata all'ACS, % di copertura del solare termico

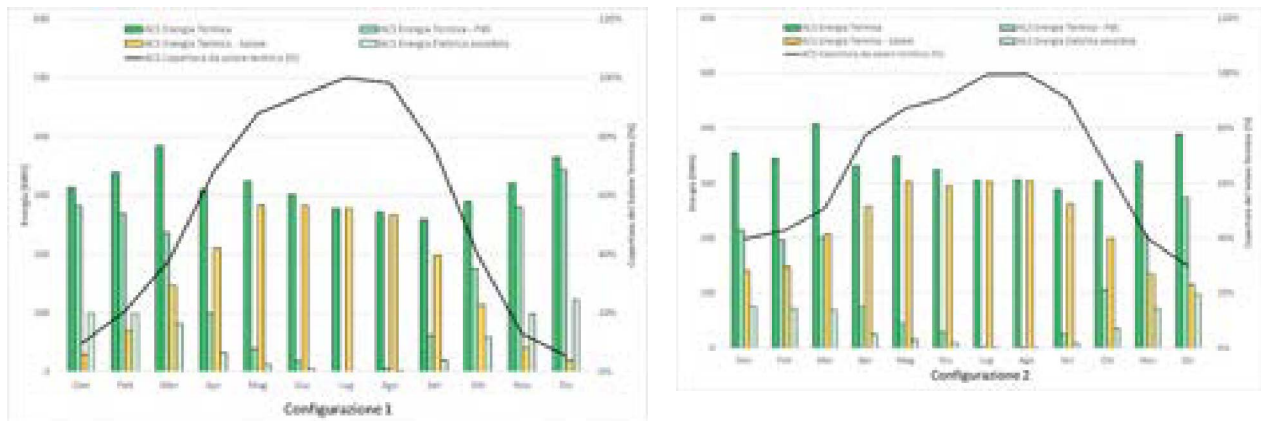


Figura 102. Monofamiliare in zona climatica C – Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno di energia termica ed elettrica per la pompa di calore dedicata all'ACS, % di copertura del solare termico

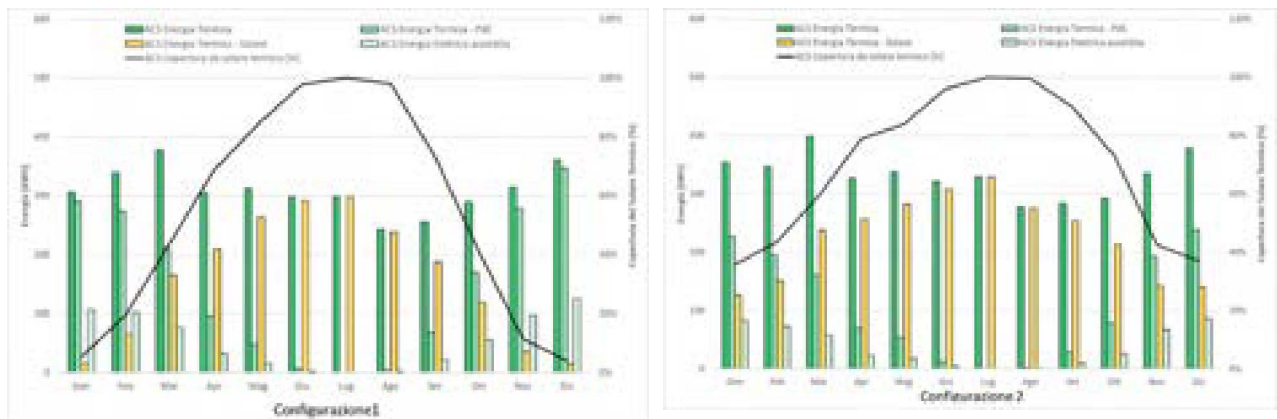


Figura 103. Monofamiliare in zona climatica D– Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno di energia termica ed elettrica per la pompa di calore dedicata all'ACS, % di copertura del solare termico

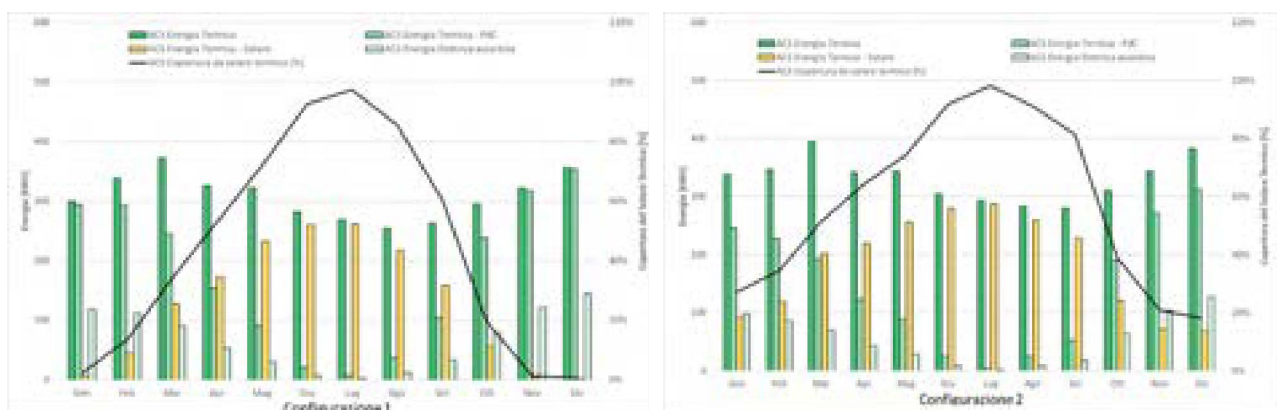


Figura 104. Monofamiliare in zona climatica E– Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno di energia termica ed elettrica per la pompa di calore dedicata all'ACS, % di copertura del solare termico

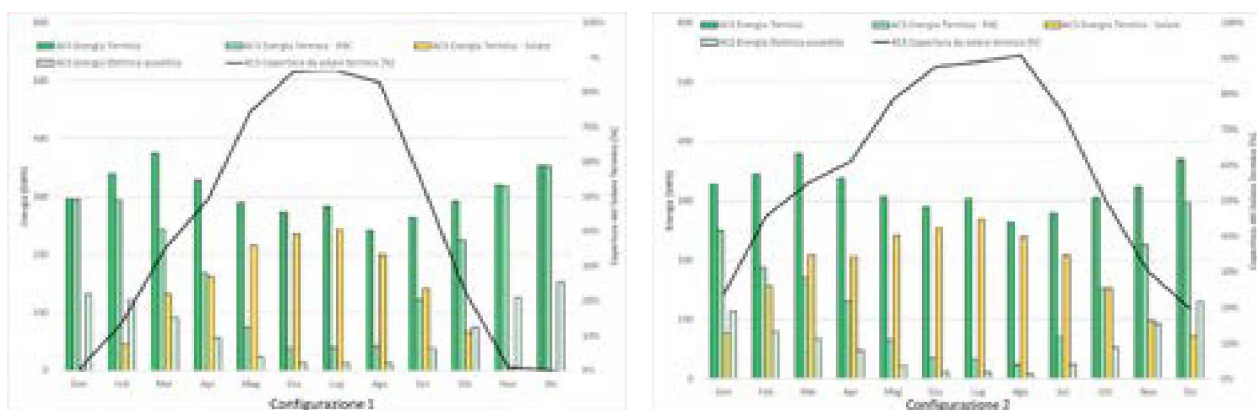


Figura 105. Monofamiliare in zona climatica F– Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno di energia termica ed elettrica per la pompa di calore dedicata all’ACS, % di copertura del solare termico

Dai grafici sopra riportati (da Figura 101, a Figura 105) relativamente alla produzione di acqua calda sanitaria, è facile osservare come, in tutte le zone climatiche analizzate prevedibilmente il solare termico sopprime completamente al fabbisogno solo nei mesi più caldi; il contributo di una pompa di calore dedicata, con un accumulo opportunamente dimensionato appare quindi necessario negli altri mesi. Si osserva inoltre che, nonostante sia stato selezionato un tipo di pannello solare che consente un’installazione sia in falda inclinata che in orizzontale su copertura piana (scelta necessaria per annullare l’ombra portata sui pannelli fotovoltaici, vista la ridotta superficie disponibile presente in copertura), la resa in configurazione 1 (in piano) risulta inferiore. Pertanto, laddove possibile è sempre preferibile dare una inclinazione ottimale al pannello.

Nella Tabella 44 e nella Tabella 45 di seguito, si riportano in dettaglio i risultati in termini di energia termica fornita sia dalla pompa di calore, sia dal solare termico per le due configurazioni e per le varie zone climatiche, nella Tabella 46 e nella Tabella 47 invece sono riportate l’energia termica complessiva e l’elettrica assorbita per la produzione di acqua calda sanitaria, per tutte le configurazioni e i mesi dell’anno.

Tabella 44. Energia fornita dalla pompa di calore, su base mensile ed annuale, per la produzione di acqua calda sanitaria nelle differenti configurazioni e zone climatiche

Mesi	Energia Termica per ACS da pdc [kWh]									
	1AB	1C	1D	1E	1F	2AB	2C	2D	2E	2F
Gen	244	283	290	293	295	219	214	227	246	250
Feb	240	269	273	293	293	215	197	196	227	187
Mar	193	237	213	245	244	165	200	161	192	170
Apr	99	99	96	154	167	83	75	69	122	132
Mag	24	39	49	90	74	31	44	55	88	66
Giu	8	18	7	21	38	16	29	13	25	36
Lug	0	0	0	7	39	1	2	0	5	33
Ago	2	5	5	37	42	0	1	1	25	24
Set	58	62	68	104	122	43	26	29	52	70
Ott	143	175	170	238	226	90	105	79	190	152
Nov	217	280	279	317	317	175	204	192	272	226
Dic	287	344	346	354	353	248	274	238	314	298
Anno	1514	1811	1796	2154	2210	1285	1373	1260	1758	1645

Tabella 45. Energia fornita dal solare termico, su base mensile ed annuale, per la produzione di acqua calda sanitaria nelle differenti configurazioni e zone climatiche

Energia Termica per ACS da solare termico [kWh]										
Mesi	1AB	1C	1D	1E	1F	2AB	2C	2D	2E	2F
Gen	74	30	16	6	1	132	140	126	91	77
Feb	96	71	66	45	46	136	147	151	120	157
Mar	189	146	165	127	131	242	207	237	202	208
Apr	222	211	209	173	161	255	256	258	219	206
Mag	293	284	264	232	216	304	303	282	255	241
Giu	299	283	292	260	235	304	295	308	279	253
Lug	291	278	298	261	243	315	303	329	288	269
Ago	266	266	239	218	200	297	304	276	259	239
Set	197	197	188	158	141	239	262	254	228	208
Ott	158	114	119	57	66	224	199	212	120	153
Nov	98	41	36	4	3	154	135	142	72	98
Dic	69	20	15	2	0	122	116	140	69	72
Anno	2252	1941	1906	1543	1443	2725	2668	2717	2202	2183

Tabella 46. Energia termico complessiva, su base mensile ed annuale, per la produzione di acqua calda sanitaria nelle differenti configurazioni e zone climatiche

Mesi	Energia Termica totale per ACS [kWh]									
	1AB	1C	1D	1E	1F	2AB	2C	2D	2E	2F
Gen	318	313	306	300	296	351	355	354	337	328
Feb	336	339	339	338	339	351	344	346	347	345
Mar	382	383	377	372	374	407	408	398	394	379
Apr	321	310	305	326	328	338	332	327	341	338
Mag	317	323	313	322	290	335	347	337	344	307
Giu	307	301	299	281	273	320	324	321	304	289
Lug	291	278	298	268	283	316	305	329	293	303
Ago	268	271	243	254	241	297	305	277	284	264
Set	255	259	256	262	263	282	288	283	280	278
Ott	301	289	289	295	292	313	304	291	310	305
Nov	315	322	315	322	320	330	339	335	344	324
Dic	356	364	361	357	353	370	390	378	383	370
Anno	3766	3752	3702	3697	3653	4010	4041	3977	3960	3828

Tabella 47. Energia elettrica mensile ed annuale, per la produzione di acqua calda sanitaria nelle differenti configurazioni e zone climatiche

Mesi	Energia Elettrica per ACS [kWh]									
	1AB	1C	1D	1E	1F	2AB	2C	2D	2E	2F
Gen	86	100	106	118	132	77	75	83	99	113
Feb	85	98	102	111	121	76	71	73	86	80
Mar	67	81	75	89	91	57	69	57	70	67
Apr	33	33	32	53	57	27	25	23	42	48
Mag	8	13	16	30	23	10	14	18	29	22
Giu	3	6	2	7	12	5	9	4	8	12
Lug	0	0	0	2	12	0	1	0	2	11
Ago	1	2	2	12	13	0	0	0	8	8
Set	19	20	22	34	38	14	8	10	17	24
Ott	47	58	56	80	74	29	35	26	64	53
Nov	72	98	97	121	124	58	71	67	103	92
Dic	99	122	126	144	152	86	97	86	127	131
Anno	518	630	637	801	849	441	477	448	656	661

In Tabella 48 sono riportate le percentuali di fabbisogno di energia termica per la produzione di acqua calda sanitaria coperta dal solare termico, nelle differenti configurazione e zone climatiche, nei mesi di giugno, luglio ed agosto, nelle zone A-B, C e D si ha una copertura pari o molto prossima al 100%, con accensione della pompa di calore a supporto, nulla o assolutamente trascurabile, sia in una configurazione che nell'altra.

Tabella 48. Percentuali di copertura da solare termico del fabbisogno termico per la produzione di acqua calda sanitaria nelle differenti configurazioni e zone climatiche

Copertura Solare Termico										
Mesi	1AB	1C	1D	1E	1F	2AB	2C	2D	2E	2F
Gen	23%	10%	5%	2%	0%	38%	40%	36%	27%	24%
Feb	29%	21%	19%	13%	14%	39%	43%	44%	34%	46%
Mar	49%	38%	44%	34%	35%	59%	51%	60%	51%	55%
Apr	69%	68%	68%	53%	49%	75%	77%	79%	64%	61%
Mag	92%	88%	84%	72%	74%	91%	87%	84%	74%	79%
Giu	97%	94%	98%	93%	86%	95%	91%	96%	92%	88%
Lug	100%	100%	100%	97%	86%	100%	99%	100%	98%	89%
Ago	99%	98%	98%	86%	83%	100%	100%	100%	91%	91%
Set	77%	76%	73%	60%	54%	85%	91%	90%	81%	75%
Ott	52%	39%	41%	19%	23%	71%	65%	73%	39%	50%
Nov	31%	13%	11%	1%	1%	47%	40%	43%	21%	30%
Dic	19%	5%	4%	1%	0%	33%	30%	37%	18%	20%
Anno	62%	54%	54%	44%	42%	69%	68%	70%	58%	59%

6.2.4 Produzione da fotovoltaico

Per quanto concerne invece la produzione di energia elettrica mediante i pannelli fotovoltaici descritti in Tabella 30 posti in copertura, da un'analisi della produzione si evince che su base annuale, nelle zone climatiche A-B, C e D in entrambe le configurazioni è possibile coprire il 100% del fabbisogno di energia elettrica (Figura 106, Figura 107 e Figura 108), in molti casi con una sovrapproduzione anche elevata. Mentre per alcuni mesi dell'anno (tipicamente gennaio, febbraio e novembre e dicembre), la percentuale minima rilevata è riscontrata in zona F, nella configurazione 1 ed è pari al 58%.

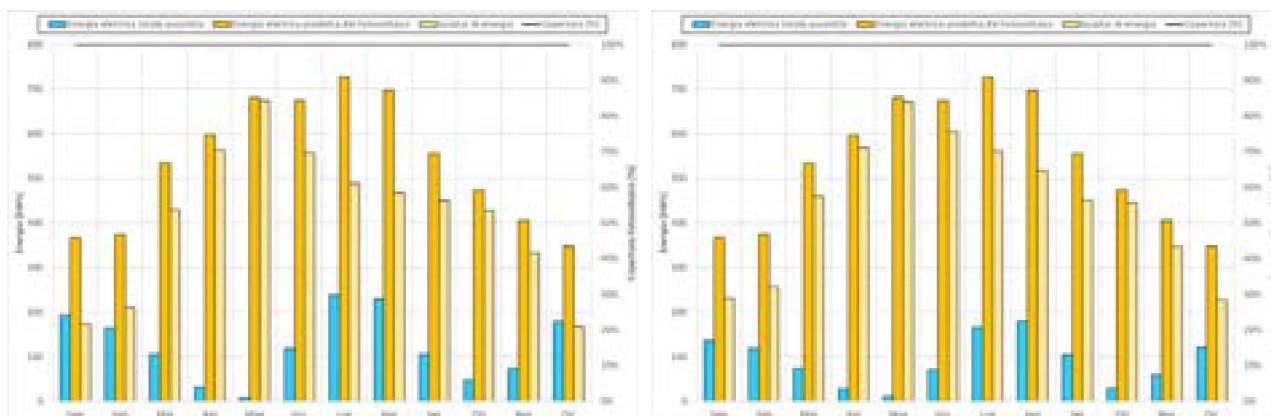


Figura 106. Edificio monofamiliare in zona climatica A-B –produzione di energia rinnovabile da fotovoltaico in copertura

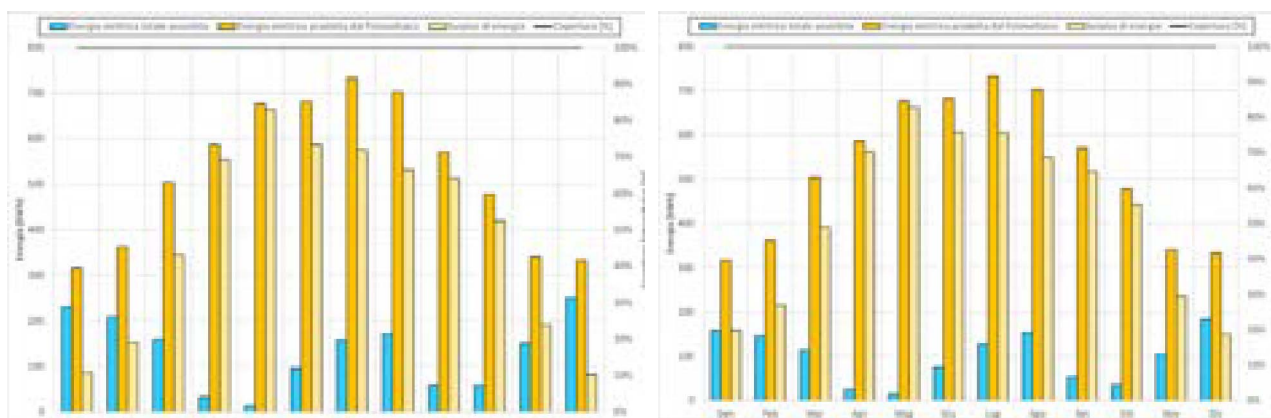


Figura 107. Edificio monofamiliare in zona climatica C –produzione di energia rinnovabile da fotovoltaico in copertura

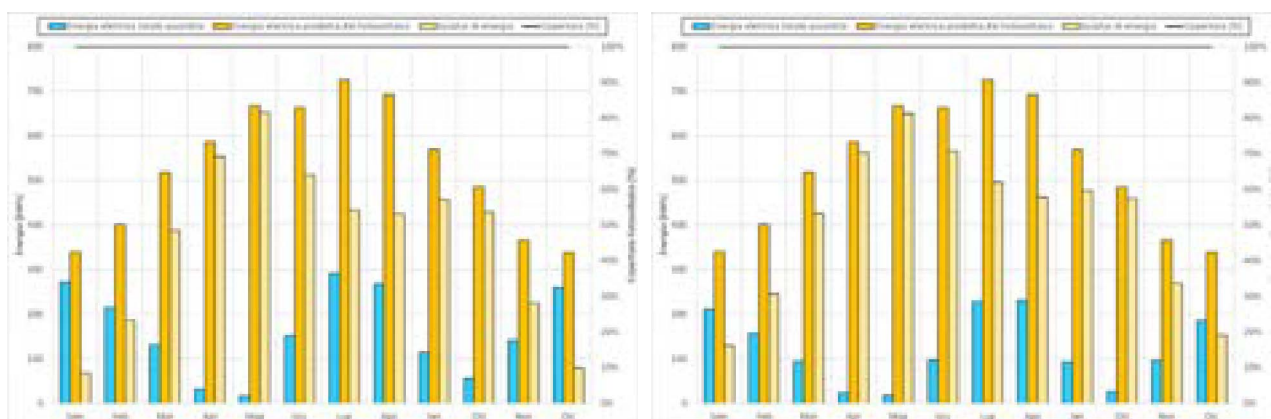


Figura 108. Edificio monofamiliare in zona climatica D – produzione di energia rinnovabile da fotovoltaico in copertura

In zona climatica D, (Figura 108) l'energia elettrica totale assorbita è minima nelle stagioni intermedie, più miti, e conseguentemente anche il surplus di energia prodotta è massimo, riducendosi poi considerevolmente nei mesi più caldi per il necessario ricorso al raffrescamento.

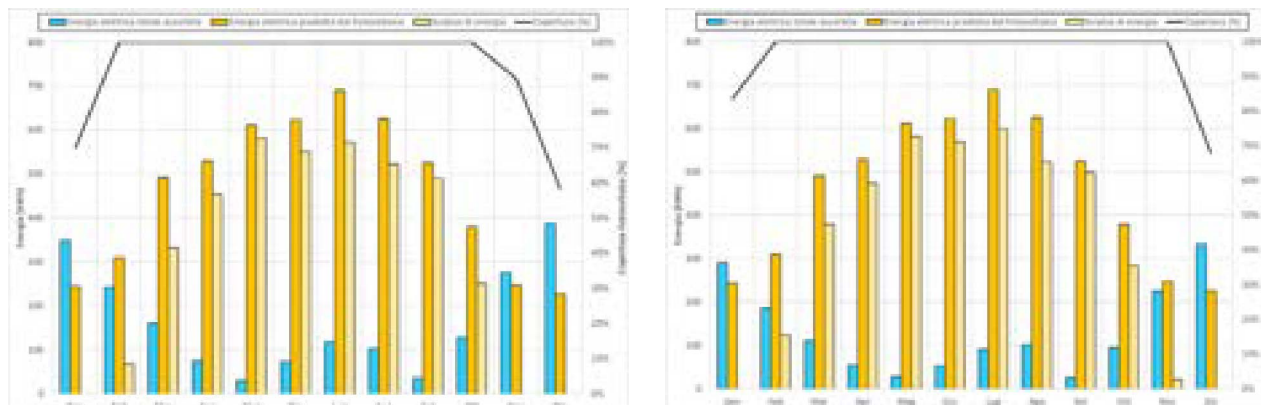


Figura 109. Edificio monofamiliare in zona climatica E – produzione di energia rinnovabile da fotovoltaico in copertura

In zona climatica E (Figura 109) ed in zona climatica F (Figura 110), l'energia elettrica totale assorbita nei mesi invernali (novembre dicembre e gennaio in zona E, anche febbraio in zona F) dovuta in massima parte al funzionamento della pompa di calore per riscaldamento, è superiore alla produzione del fotovoltaico.

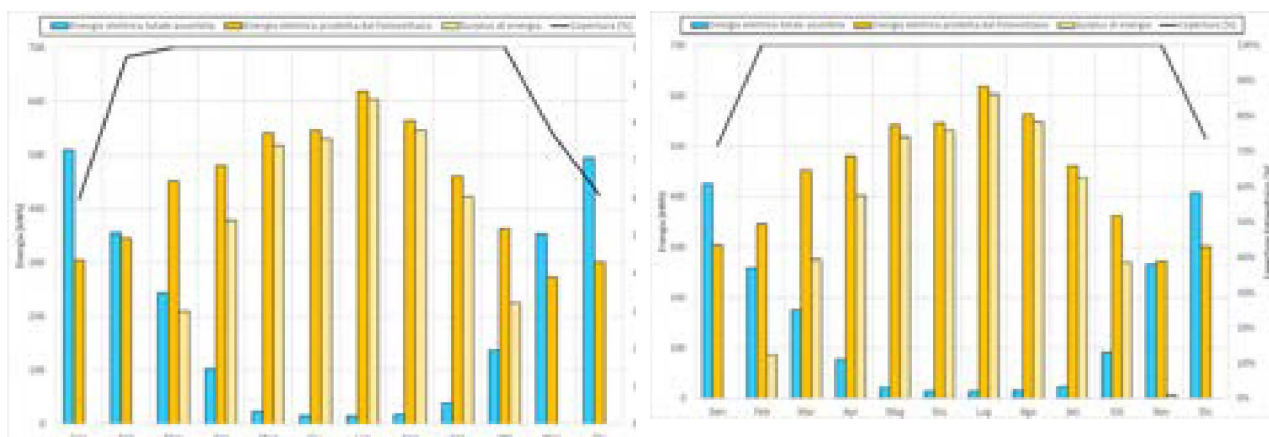


Figura 110. Edificio monofamiliare in zona climatica F – produzione di energia rinnovabile da fotovoltaico in copertura

In Tabella 49 sono riportate le percentuali di copertura del fabbisogno di energia elettrica nelle differenti configurazioni e zone climatiche.

Tabella 49. Percentuali di copertura fabbisogno di energia nelle differenti configurazioni e zone climatiche

Mesi	% Copertura Fotovoltaico									
	1AB	1C	1D	1E	1F	2AB	2C	2D	2E	2F
Gen	>150%	138%	125%	70%	60%	>150%	>150%	>150%	84%	72%
Feb	>150%	>150%	>150%	128%	97%	>150%	>150%	>150%	>150%	134%
Mar	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%
Apr	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%
Mag	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%
Giu	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%
Lug	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%
Ago	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%
Set	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%
Ott	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%	>150%
Nov	>150%	>150%	>150%	90%	77%	>150%	>150%	>150%	109%	102%
Dic	>150%	132%	130%	58%	61%	>150%	>150%	>150%	68%	74%

6.2.5 Sintesi dei fabbisogni complessivi e della copertura da fonti rinnovabili

Si riportano, per una lettura più immediata i grafici, complessivi di tutti i fabbisogni per ogni configurazione, divisi per zone climatiche.

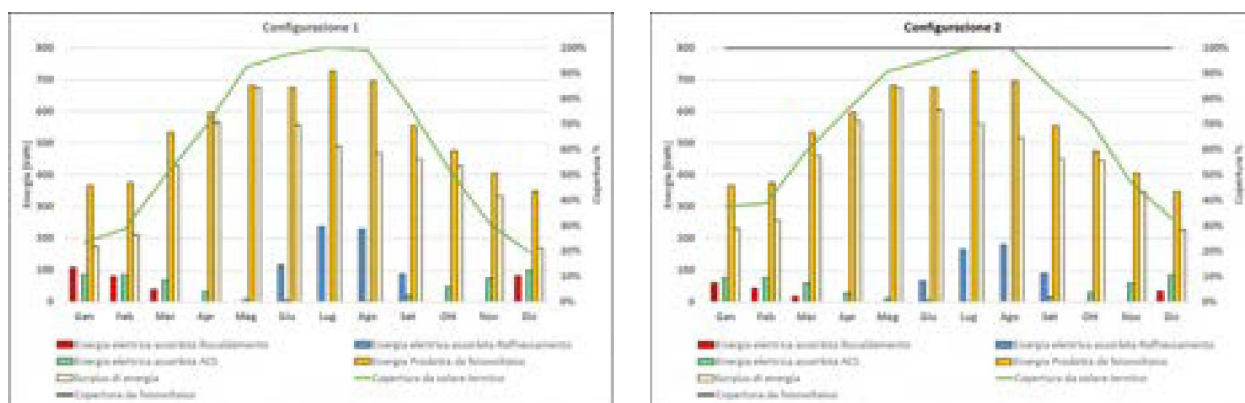


Figura 111. Edificio monofamiliare in zona climatica A - B – grafico riepilogativo di confronto, configurazione 1 e 2

In zona climatica A-B si osserva, per entrambe le configurazioni, che la componente di energia elettrica assorbita per il raffrescamento estivo è la voce di maggior rilievo, e diventa fondamentale quindi in questi casi avere in fase progettuale la massima attenzione alla performance dell'edificio nel periodo estivo. Un approccio *climate responsive*, con l'obiettivo di ridurre al massimo il fabbisogno di energia in estate attraverso l'impiego di accorgimenti progettuali e il ricorso a tecniche di edilizia bioclimatica, è il presupposto essenziale per raggiungere l'obiettivo ZEB. Grazie al ricorso al solare termico, l'energia elettrica assorbita per la produzione di acqua calda sanitaria ha un'incidenza relativa, e limitata ai mesi invernali nei quali è necessario al ricorso alla pompa di calore, per una percentuale variabile mensilmente.

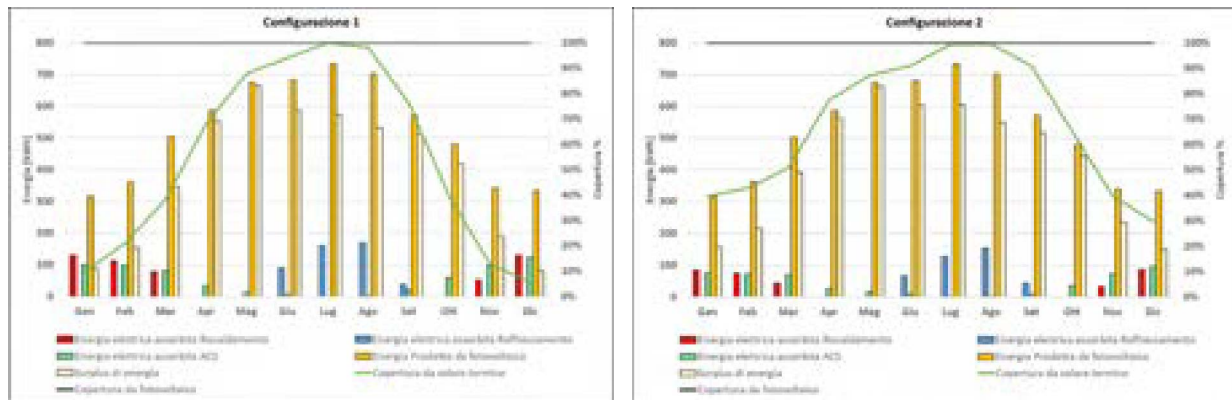


Figura 112. Edificio monofamiliare in zona climatica C – grafico riepilogativo di confronto, configurazione 1 e 2

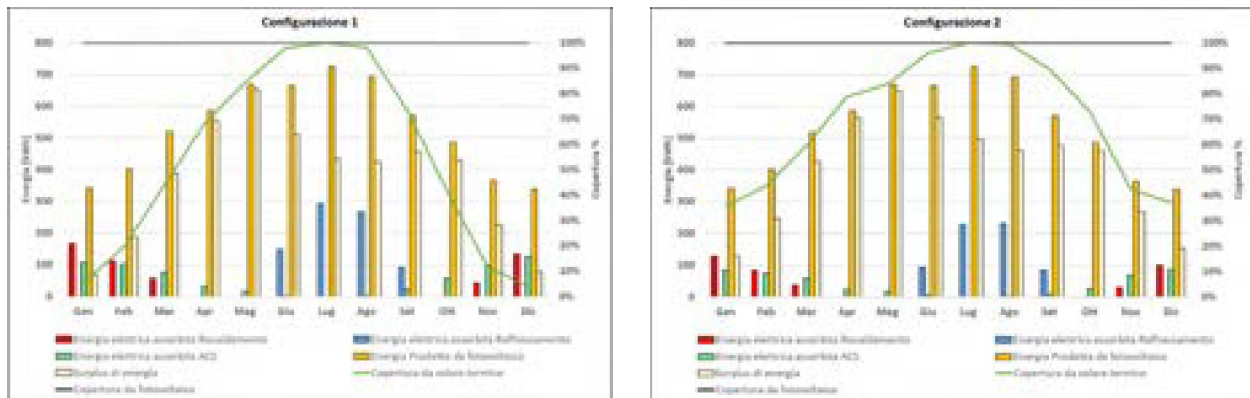


Figura 113. Edificio monofamiliare in zona climatica D – grafico riepilogativo di confronto, configurazione 1 e 2

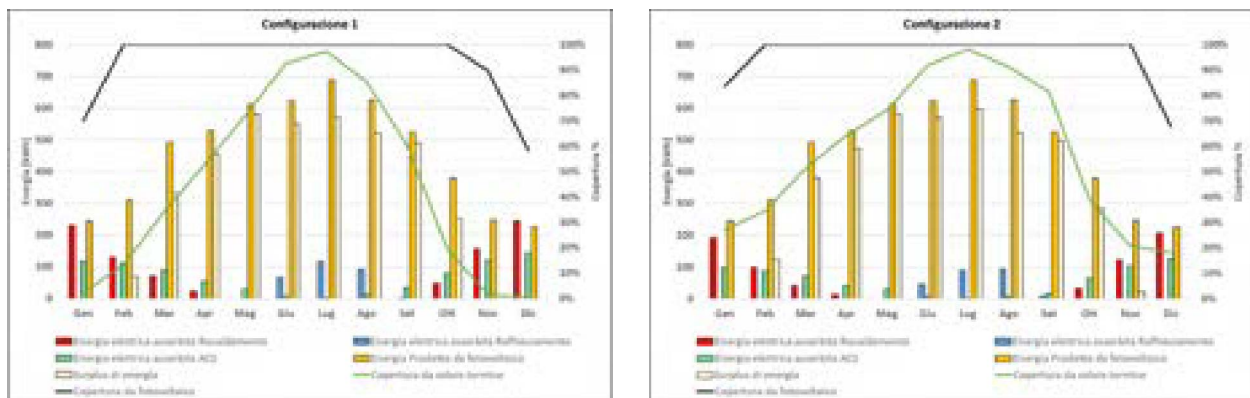


Figura 114. Edificio monofamiliare in zona climatica E – grafico riepilogativo di confronto, configurazione 1 e 2

In zona climatica E (Figura 114) ed in zona climatica F (Figura 115) è il ricorso al riscaldamento il maggior responsabile dell'assorbimento elettrico, nei mesi invernali nei quali appunto la produzione da fotovoltaico è minima, ciò impone una riflessione sui sistemi di accumulo stagionali o eventualmente su una ipotesi di scambio in rete.

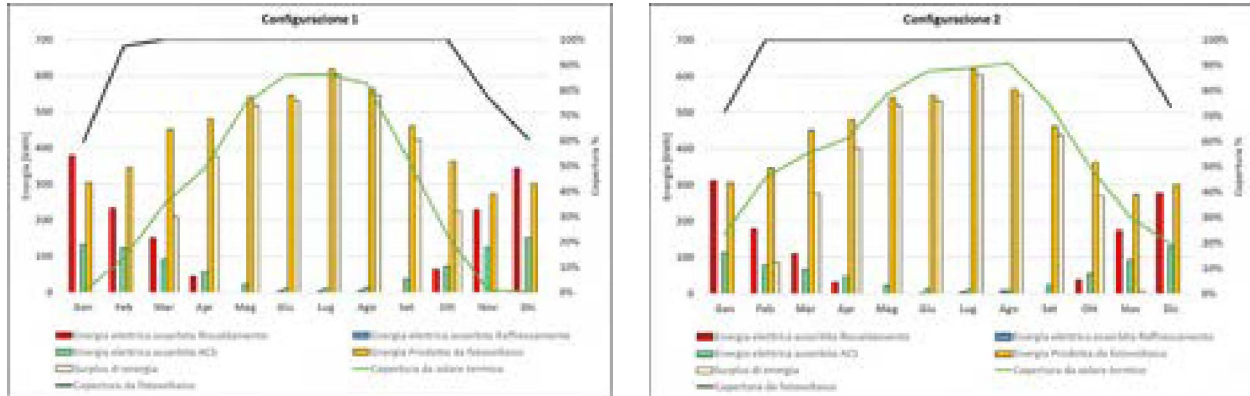


Figura 115. Edificio monofamiliare in zona climatica F – grafico riepilogativo di confronto, configurazione 1 e 2

7 Scelta del modello di edificio-tipo plurifamiliare

Il modello di edificio plurifamiliare utilizzato per questo studio è derivato da una serie di analisi effettuate per renderlo quanto più vicino all'attuale mercato immobiliare di nuova costruzione e non un puro esercizio teorico. L'obiettivo è stato quello di ottenere un edificio altamente performante con un "fabbisogno energetico pari a zero o comunque minimo totalmente assolto da fonti energetiche rinnovabili, secondo quella che è la definizione adottata per gli ZEB o netZEB nella prima annualità" [1,2,3]. A tal fine tutto il lavoro preliminare di scelta delle caratteristiche del modello ha comportato una serie di analisi sotto tutti gli aspetti, costruttivi, impiantistici, bioclimatici, di profili di utilizzo, che concorrono a creare il complesso sistema edificio-impianto, al fine di porre in essere il risultato di un'ottimizzazione di strategie passive, attive e produzione di energia da fonti rinnovabili.

7.1 *Ipotesi di definizione delle due configurazioni di edificio tipo plurifamiliare e delle relative tecnologie costruttive e impiantistiche applicate - caratteristiche generali*

La fase di definizione delle due configurazioni analizzate ha posto fin da subito dei problemi intrinseci di non poca rilevanza: da un lato il poter inserire tutto ciò che si riteneva opportuno per conseguire l'obiettivo proposto ha dato estrema libertà decisionale; dall'altro, tuttavia, il non aver alcun vincolo di "progettazione" ha portato obbligatoriamente ad una serie inevitabile di scelte ben definite ed esclusive, oltre che a delle relative semplificazioni.

Il modello proposto è il risultato di uno sforzo concettuale che cerca di tenere insieme tutti gli aspetti essenziali, senza tralasciare però la possibilità di definire un edificio realmente fattibile e che possa essere comunque preso a riferimento per alcune considerazioni a livello energetico ed economico estensibili in una visione più ampia.

7.1.1 *Caratteristiche generali geometriche e dimensionali*

A seguito delle analisi di ricognizione effettuate nel capitolo 3, come modello di edificio tipo plurifamiliare è stato scelto un fabbricato a sviluppo lineare di 5 piani con 13 unità abitative. Gli appartamenti sono distribuiti in numero di due o tre per piano e sono di dimensioni comprese tra i 50 e gli 85 m², fino a raggiungere i 113 m² massimi (Figura 116).

La scelta di variare la taglia dei singoli appartamenti e definire tre tipologie di distribuzione funzionale deriva dalla convinzione di tener conto delle analisi statistiche elaborate nei paragrafi precedenti sulla diffusione, sui tagli dimensionali e sull'estrema variabilità del parco edilizio e delle possibilità progettuali e costruttive (si veda il cap. 3 e il par. 3.1.2).

Ciò, da un lato, ha comportato una maggiore complessità del modello stesso, dall'altro, tuttavia, ha permesso di effettuare, in fase di modellazione e di analisi dei risultati, delle considerazioni più estese e diversificate.

La decisione di utilizzare, quindi, una forma rettangolare semplice e, nello stesso tempo, tagli dimensionali differenti di alloggi è finalizzata ad ottenere un caso di studio il più generalizzabile possibile in modo da avere un confronto plausibile con le tipologie edilizie attualmente presenti maggiormente sul mercato. L'immobile è dotato di vano scala di servizio ai vari piani e ascensore¹. A piano terra sono, inoltre, collocati i vani tecnici per l'alloggio dei sistemi impiantistici.

¹ Non sono oggetto di studio gli aspetti sismici e rivenienti dalla normativa antincendio, in quanto la ricerca si focalizza su aspetti energetici ed economici. Si precisa, tuttavia, che la configurazione adottata assolve in linea di massima alle prescrizioni rivenienti dalle norme, ma in caso si vogliano approfondire gli aspetti in questione è necessaria una progettazione adeguata di tutto il sistema edificio-impianto.



Figura 116. Pianta dei differenti piani e relative distribuzioni funzionali

Le tabelle di seguito (Tabella 50 e Tabella 51) riportano in sintesi le caratteristiche dimensionali e geometriche più significative dell'edificio e degli alloggi. Questi ultimi presentano superfici e un numero di occupanti variabile per lo più da 2 a 4. Unica eccezione è fatta per i due appartamenti al piano attico, che presentano tagli dimensionali più grandi e un numero di occupanti maggiore, per ampliare la casistica di riferimento, sebbene i trend di mercato evidenzino nuclei familiari sempre più ristretti.

Tabella 50. Caratteristiche dimensionali dell'edificio plurifamiliare

Caratteristiche	
Superficie totale lorda a piano (m ²)	300
Sup. netta a piano escluso vano scala/ascensore (m ²)	228
N. piani	5
N. totale alloggi	13
N. alloggi per piano	2 (piano terra e piano attico) 3 (altri piani)
Altezza netta interpiano (m)	3
N. occupanti totali	45
Superficie vetrata/Superficie facciata (%)	
SUD	15 %
EST	5 %
NORD	7 %
OVEST	7 %

Tabella 51. Caratteristiche e distribuzione delle diverse tipologie di alloggio

Alloggi	Collocazione	N. alloggi nell'edificio	Superficie netta [m ²]	N. occupanti
ALLOGGIO A	Piano Terra – Piani 1,2,3	4	90	4
ALLOGGIO A'	Piano Terra – Piani 1,2,3	4	76	3
ALLOGGIO B	Piani 1,2,3	3	58	2
ALLOGGIO C	Piano Attico	1	113	5
ALLOGGIO C'	Piano Attico	1	113	6

Per quanto riguarda l'orientamento dell'edificio, nell'idea di operare con un modello che non subisca i vincoli dettati dal contesto urbano (dove generalmente gli edifici plurifamiliari sorgono), né da condizioni particolari (es. orografiche, storiche, forma dei lotti, ecc.) e collocato in un clima temperato quale è quello italiano, l'edificio si sviluppa seguendo la direzione Est-Ovest, ossia con le facciate principali a Sud e a Nord. Il guadagno termico durante la stagione invernale è, quindi, ottimale a Sud, mentre a Nord la radiazione solare è ridotta e tale facciata risulta più esposta alle dispersioni termiche attraverso l'involucro. In estate, invece, la facciata a Sud riceve un irraggiamento diretto inferiore rispetto a quelle a Est e Ovest, in quanto il sole a mezzogiorno ha una posizione più alta e l'inclinazione dei raggi solari tende alla perpendicolarità rispetto alla superficie terrestre.

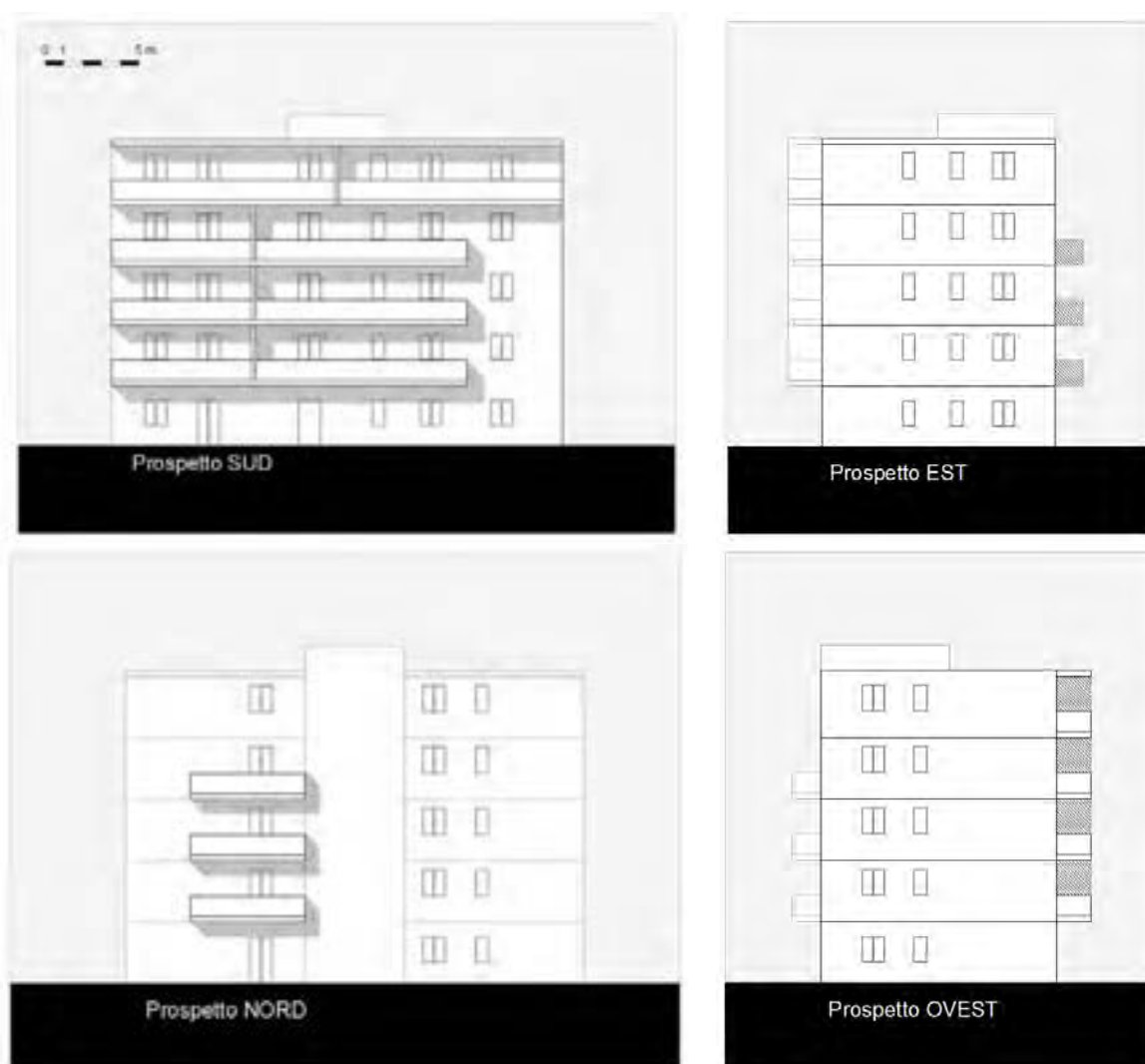


Figura 117. Prospetti dell'edificio plurifamiliare con copertura piana

I sistemi di ombreggiamento fissi, quali logge e balconi (visibili nei prospetti in Figura 117) sono stati progettati sia tenendo conto dell'esposizione solare e calcolando le profondità di aggetto a seconda dell'inclinazione solare (Figura 118), sia in base alla distribuzione interna ipotizzata, ponendo al servizio degli ambienti della zona giorno le logge più ampie.

Sistemi di schermatura ulteriori (dinamici e dotati di sistemi di controllo e di tipo adattivo a seconda delle temperature e dell'inclinazione dei raggi solari) sono previsti su tutte le aperture con particolare attenzione alle facciate Sud, Est e Ovest.

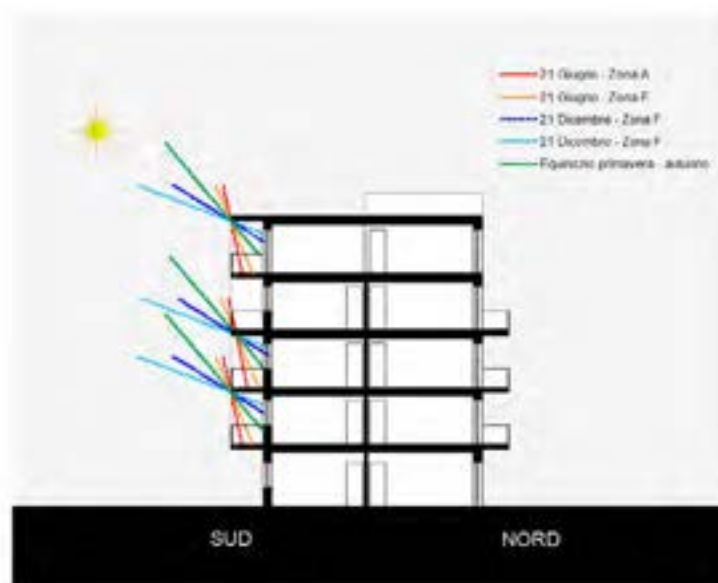


Figura 118. Studio qualitativo degli ombreggiamenti sulla facciata a Sud per le diverse zone climatiche

7.1.2 Tecnologie costruttive di involucro

Per quanto riguarda l'involucro edilizio, la sua definizione ha tenuto conto dei requisiti minimi che ogni componente deve assolvere per il soddisfacimento degli standard normativi attuali rispetto all'edificio di riferimento.

La scelta di basarsi su tali limiti è utile in quanto aiuta a capire se allo stato attuale si riescono a raggiungere standard elevati in direzione ZEB. Si tratta, infatti, di livelli già abbastanza sfidanti in termini di prestazioni e fattibilità tecniche ed economiche che richiedono una progettazione integrata di tutte le altre tecnologie utilizzate, in una visione completa e a tutto tondo del sistema edificio-impianto.

L'edificio tipo scelto ha una struttura in cemento armato a travi e pilastri con pareti verticali che fungono da tamponamenti ad elevato isolamento.

I solai di interpiano sono realizzati in latero-cemento, con uno strato di isolante termoacustico.

I ponti termici sono stati ritenuti minimizzati in modo da garantire l'elevata prestazione dell'involucro riducendo al minimo le dispersioni termiche per trasmissione che altrimenti inciderebbero di molto sulla prestazione energetica, data l'alta resistenza termica dell'involucro stesso (considerazioni valide soprattutto in regime invernale). Risultano critici i punti di discontinuità relativi alle zone di interferenza tra tamponamenti interni e solette interpiano ed elementi di aggetto e in prossimità dei pilastri. Per tale motivo, si ipotizza che l'edificio sia dotato di sistemi innovativi per la riduzione di ponti termici, che isolano termicamente gli aggetti, garantendo la continuità dell'isolamento. Allo stesso modo si è ipotizzato che i serramenti siano completamente inseriti nello strato isolante degli elementi esterni, con il conseguente risultato di una bassa trasmittanza lineica e l'esclusione del rischio di muffa e condensa [38].

Gli infissi sono stati scelti con telaio in PVC multicamera e a doppio o triplo vetro (a seconda delle località climatiche), in posizione intermedia rispetto allo spessore murario. Ad essi sono associati sistemi di schermatura avanzati dinamici che variano a seconda della radiazione solare diretta e diffusa, in un sistema adattivo volto all'ottimizzazione del guadagno solare in inverno e alla protezione in estate.

Sono state, quindi, analizzate due differenti configurazioni che si distinguono per materiali e tecnologie utilizzate (Tabella 52).

Tabella 52. Componenti di involucro per il modello di edificio tipo plurifamiliare. Gli spessori variano a seconda della zona climatica analizzata.

PLURIFAMILIARE 1	
Codice struttura	Descrizione
Involucro opaco - Pareti verticali esterne per il modello di edificio tipo	
PVE1	Parete in blocco di laterizio alveolato + isolamento esterno a cappotto in lana di roccia
Involucro opaco - Solaio interpiano	
SI1	Solaio in latero-cemento con isolante termico e acustico
Involucro opaco - Solaio contro-terra	
SCT	Fondazione a travi rovesce in c.a. e vespaio aerato con isolante in EPS e impermeabilizzazione
Involucro opaco - Solaio di copertura	
COP3	Copertura piana in latero-cemento + isolamento in lana di roccia
Involucro trasparente - Serramenti	
VD1	PVC e Doppio Vetro (zone A, B, C, D)
VT1	PVC e Triplo Vetro (E e F)
PLURIFAMILIARE 2	
Codice struttura	Descrizione
Involucro opaco - Pareti verticali esterne per il modello di edificio tipo	
PVE3	Parete in blocco di CCA (Calcestruzzo Cellulare Aerato) + rivestimento esterno in EPS sui pilastri
Involucro opaco - Solaio interpiano	
SI1	Solaio in latero-cemento con strato di isolante termico e acustico
Involucro opaco - Solaio contro-terra	
SCT	Fondazione a travi rovesce in c.a. e vespaio aerato con isolante in EPS e impermeabilizzazione
Chiusure orizzontali esterne di copertura	
COP4	Copertura inclinata in latero-cemento + isolamento in EPS
Involucro trasparente - Serramenti	
VD1	PVC e Doppio Vetro (zone A, B, C, D)
VT1	PVC e Triplo Vetro (E e F)

La prima configurazione è più tradizionale e vede l'utilizzo di laterizio e isolamento in lana di roccia. Essa rappresenta sicuramente una delle soluzioni più diffuse nel settore delle nuove costruzioni in quanto garantisce un'elevata efficienza energetica e, allo stesso tempo, risulta più conveniente dal punto di vista economico rispetto a soluzioni che prevedono la facciata ventilata o l'impiego di isolanti più innovativi come l'aerogel. Il laterizio ha infatti, grazie alla buona massa superficiale e agli ottimi valori di traspirabilità e durabilità, un buon comportamento sia in inverno che in estate, anche grazie alle ottime caratteristiche termiche. Affiancato all'isolamento esterno a cappotto in lana di roccia, dotato di bassa resistenza al vapore, riesce a garantire, quindi, elevate prestazioni in termini energetici, al di sotto dei valori di trasmittanza dettati da normativa.

La seconda configurazione analizzata prevede, invece, l'utilizzo nelle chiusure verticali esterne di blocchi di cemento cellulare aerato autoclavato (CCAA), che si posa, come il laterizio classico, con giunti di malta sottili per non comprometterne le proprietà isolanti. Esso ha trasmittanze basse e valori di sfasamento buoni (spesso maggiori a 9 ore), senza necessità di aggiungere ulteriore isolamento, il che rende la tecnologia estremamente competitiva anche in termini di costi. Il tutto consente, quindi, di realizzare murature di tamponamento su strutture intelaiate con prestazioni termiche assimilabili a quelle dei classici materiali isolanti e valori di conducibilità comprese tra 0,07 e 0,08 W/mK. A questo si aggiungono le caratteristiche di

leggerezza e riciclabilità al 100%. La tecnologia è interessante, infine, per i larghi impieghi che trova nelle costruzioni edilizie.

Per il solaio di copertura sono state valutate due tipologie: tetto piano nella prima configurazione e a falde nella seconda, in quanto la prima tecnologia è generalmente più utilizzata nei territori con climi più caldi (zone climatiche A, B, e C), mentre la seconda è sicuramente più idonea a climi più rigidi. Entrambe le configurazioni sono state comunque simulate ed analizzate in tutte le zone climatiche, variando lo spessore di isolamento (Tabella 53).

Per quanto riguarda il solaio controterra è stata scelta una tipologia performante con vespaio aerato isolato, valida per tutte le zone climatiche di trasmittanza U pari a 0,23 W/m²K.

Tabella 53. Valutazione degli spessori di isolante per ciascuna zona climatica, per entrambe le configurazioni di edificio plurifamiliare

Prima configurazione di involucro (PLURIFAMILIARE 1)						
<i>Tipo di chiusura</i>	<i>Tecnologia scelta</i>	<i>Spessori di isolante per zona climatica</i>				
		A-B	C	D	E	F
Orizzontale di copertura	COP3	7	7	8	10	12
Verticale esterna	PVE1	3	5	7	8	10
<i>Tipologia di vetri per zona climatica</i>						
Infissi	Taglio termico	VD1	VD1	VD1	VT1	VT1
Seconda configurazione di involucro (PLURIFAMILIARE 2)						
<i>Tipo di chiusura</i>	<i>Tecnologia scelta</i>	<i>Spessori di isolante e del blocco di CCAA</i>				
		A-B	C	D	E	F
Orizzontale di copertura	COP4	6	8	10	12	14
Verticale	PVE3 ²	24	30	40	45	50
<i>Tipologia di vetri per zona climatica</i>						
Infissi	Taglio termico	VD1	VD1	VD1	VT1	VT1

La scelta di rendere più generalizzabili possibile i casi studio analizzati ha, infine, prediletto il criterio di mantenersi più vicini agli standard normativi nella prima configurazione e invece adottare pacchetti più performanti e caratterizzati da valori molto più bassi di trasmittanza nella seconda configurazione, in modo da avere una casistica più ampia e interessante per le valutazioni in merito all'obiettivo ZEB o netZEB.

Di seguito si riportano i pacchetti stratigrafici selezionati per le due configurazioni di involucro analizzate (da Tabella 54 a Tabella 56).

² Nel caso della Parete verticale PVE3 il blocco di calcestruzzo cellulare aerato ha già buone caratteristiche di isolamento e non necessita di isolante aggiuntivo. Si indica pertanto lo spessore del blocco stesso come indicazione di variazione.

Tabella 54. Tabella riassuntiva delle caratteristiche termo-fisiche, dei componenti di involucro per la configurazione 1 – edificio plurifamiliare

CONFIGURAZIONE PLURIFAMILIARE 1						
PVE1	Chiusura verticale esterna: Parete in blocco di laterizio porizzato + isolamento esterno in lana di roccia					
	Descrizione degli strati	Spessore (s) [m]	Conduttività termica (λ) [W/mK]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m ³]	Resistenza termica [m ² K/W]
1	Intonaco esterno	0,02	0,72	840	1860	
2	Lana di roccia	Spessore variabile	0,034	1030	80	
3	Laterizio porizzato rettificato	0,30	0,23	1000	800	
4	Intonaco interno	0,02	0,9	1000	1800	
SI3	Chiusura orizzontale intermedia tra appartamenti: solaio in latero-cemento con strato di isolante termico e acustico					
	Descrizione degli strati	Spessore (s) [m]	Conduttività termica (λ) [W/mK]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m ³]	Resistenza termica [m ² K/W]
1	Pavimentazione in piastrelle	0,02	0,84	800	1900	
2	Malta sottofondo	0,015	1	1000	1800	
3	Massetto autolivellante	0,06	0,34	1000	270	
4	Isolante in EPS	0,04	0,036	1030	140	
5	Massetto cementizio	0,06	0,34	1000	270	
6	Solaio latero-cemento	0,30	0,46	840	220	1,58
7	Intonaco interno	0,015	0,90	1000	1800	
COP3	Chiusura orizzontale superiore: Copertura piana isolata					
	Descrizione degli strati	Spessore (s) [m]	Conduttività termica (λ) [W/mK]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m ³]	Resistenza termica [m ² K/W]
1	Pavimentazione per esterni	0,03	1	800	2000	
2	Malta sottofondo	0,025	1	1000	1800	
3	Impermeabilizzante	0,01	0,23	1000	1100	
4	Lana di roccia	Varia a seconda della zona climatica	0,036	1030	140	
5	Barriera al vapore	0,002	0,17	840	662	
6	Massetto delle pendenze	0,05	0,41	1200	840	
7	Solaio latero-cemento	0,3	0,46	840	220	1,58
8	Intonaco interno	0,015	0,90	1000	1800	

Tabella 55. Tabella riassuntiva delle caratteristiche termo-fisiche, dei componenti di involucro per la configurazione 2 – edificio plurifamiliare

CONFIGURAZIONE PLURIFAMILIARE 2						
PVE3	Chiusura verticale esterna: Parete in blocco di Calcestruzzo aerato autoclavato + isolamento esterno in lana di roccia					
	Descrizione degli strati	Spessore (s) [m]	Conduttività termica (λ) [W/mK]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m ³]	Resistenza termica [m ² K/W]
1	Intonaco esterno	0,02	0,72	840	1860	
2	Blocco di CAA	Varia a seconda della zona climatica	0,08	1000	300	
3	Intonaco interno	0,02	0,72	840	1860	
SI3	Chiusura orizzontale intermedia tra appartamenti: solaio in latero-cemento con strato di isolante termico e acustico					
	Descrizione degli strati	Spessore (s) [m]	Conduttività termica (λ) [W/mK]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m ³]	Resistenza termica [m ² K/W]
1	Pavimentazione in piastrelle	0,02	0,84	800	1900	
2	Malta sottofondo	0,015	1	1000	1800	
3	Massetto autolivellante	0,06	0,34	1000	270	
4	Isolante in EPS	0,04	0,036	1030	140	
5	Massetto cementizio	0,06	0,34	1000	270	
6	Solaio latero-cemento	0,30	0,46	840	220	1,58
7	Intonaco interno	0,015	0,90	1000	1800	
COP4	Chiusura orizzontale superiore: Copertura inclinata ventilata					
	Descrizione degli strati	Spessore (s) [m]	Conduttività termica (λ) [W/mK]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m ³]	Resistenza termica [m ² K/W]
1	Manto di tegole e coppi	0,02	0,84	800	1900	
2	Intercapedine ventilata	0,05				0,18
3	Impermeabilizzazione	0,002	0,23	1000	1100	
4	EPS con grafite	Varia a seconda della zona climatica	0,035	1400	25	
5	Barriera al vapore	0,01	0,17	840	662	
6	Massetto	0,05	0,41	1200	840	
7	Solaio latero-cemento	0,2				1,58
8	Intonaco interno	0,015	0,90	1000	1800	

Tabella 56 Tabella riassuntiva delle caratteristiche termo-fisiche del solaio su vespaio aerato comune ad entrambe le configurazioni – edificio plurifamiliare

SCT	Chiusura orizzontale di base: Solaio controterra con vespaio					
	Descrizione degli strati	Spessore (s) [m]	Conduttività termica (λ) [W/mK]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m ³]	Resistenza termica [m ² K/W]
1	Pavimentazione	0,03	1	800	2000	
2	Malta sottofondo	0,02	1	1000	1800	
3	Massetto autolivellante	0,05	0,34	1000	270	
4	Isolante in EPS	0,10	0,037	1200	12	
5	Caldana in calcestruzzo	0,14	0,34	1000	270	
6	Vespaio	0,35				0,23
7	Magrone	0,15	0,34	1000	270	

Di ciascun componente di involucro sono state definite, in maniera dettagliata, tutte le caratteristiche termo-fisiche dei materiali e in particolare spessore, conducibilità, calore specifico, densità, resistenza alla diffusione del vapore, proprietà delle superfici in termini di assorbanza, prendendo a riferimento schede tecniche di prodotti esistenti e realmente utilizzati in edilizia.

Per quanto riguarda invece le aperture, queste sono state definite in base ad alcune caratteristiche di infissi presenti sul mercato, selezionando tipologie in PVC a doppio vetro e triplo vetro con trasmittanza che rispetta i valori limite del Decreto Requisiti Minimi nelle varie zone [32].

Tabella 57. Tabella riassuntiva delle caratteristiche degli infissi nelle due configurazioni analizzate, per ciascuna zona climatica – Edificio plurifamiliare

Zona climatica	Vetro	Spessore strati	Gas intercapedine	Materiale telaio	U_w [W/m ² K]	$U_{w,lim 2021}$ [W/m ² K]
A e B	Doppio vetro ad alta prestazione	4-12-4	Argon	PVC - profilo vuoto	1,85	3
C	Doppio vetro ad alta prestazione	4-12-4	Argon	PVC - profilo vuoto	1,8	2,2
D	Doppio vetro ad alta prestazione	4-12-4	Argon	PVC - profilo vuoto	1,8	1,8
E	Triplo vetro ad alta prestazione	4-12-4-12-4	Argon	PVC - profilo vuoto	0,9	1,4
F	Triplo vetro ad alta prestazione	4-12-4-12-4	Argon	PVC - profilo vuoto	0,9	1,1

7.1.3 Tecnologie impiantistiche

Come si annunciava già nel report della prima annualità [1], la scelta delle tipologie impiantistiche da effettuare in ottica Zero Energy Building presuppone la predilezione di impianti “all-electric” anche se ad oggi essi pongono non pochi problemi soprattutto in condizioni climatiche più avverse. L’obiettivo, tuttavia, è quello di evitare in ogni modo l’utilizzo di fonti da combustibili fossili e ciò ha determinato la scelta dell’ipotesi di seguito descritta in dettaglio e che è stata comune ad entrambe le configurazioni di involucro (Tabella 58).

Tabella 58. Schematizzazione generale dell’ipotesi adottata di configurazioni impiantistiche per il modello di edificio tipo plurifamiliare

Configurazione impiantistica adottata
Climatizzazione
3 Pompe di calore aria-acqua in serie per il riscaldamento e il raffrescamento
Presenza di accumuli a servizio del sistema di climatizzazione
Terminali a ventilconvettori
Acqua calda sanitaria
1 Pompa di calore aria-acqua
3 Accumuli per ACS da 1000 l ciascuno (a servizio delle pdc e del solare termico)
Fonti rinnovabili
Pannelli fotovoltaici installati in copertura
Pannelli solari termici per acqua calda sanitaria

Si è deciso di implementare sistemi centralizzati sia per la climatizzazione, sia per l’acqua calda sanitaria. Ciò risulta conveniente in quanto l’edificio è ottimizzato dal punto di vista dell’involucro e dell’integrazione dei sistemi di produzione di energia da fonti rinnovabili. Gli impianti centralizzati risultano generalmente più economici in quanto si riesce a risparmiare parte dei costi di gestione, gli ingombri degli accumuli richiesti soprattutto per l’acqua calda sanitaria sono inferiori, si risparmia sulla manutenzione di tutti i generatori necessari in impianti autonomi e sono necessari spazi più compatti e deputati all’alloggio di tali sistemi. All’interno degli alloggi sono, in ogni caso, previsti sistemi di gestione autonoma e indipendente attraverso l’installazione di cronotermostati ambiente.

A risultato di queste riflessioni, si è deciso, quindi, di prevedere un sistema di climatizzazione invernale ed estiva centralizzato grazie all’utilizzo di una centrale termo-frigorifera con pompe di calore aria-acqua in serie monoblocco inverter ad alta potenza, deputate sia al riscaldamento sia al raffrescamento, a servizio di terminali del tipo a ventilconvettori. La scelta è ricaduta su tale tipologia poiché non pongono problemi di condensa estiva, che invece possono presentarsi nel caso di pannelli radianti. Sebbene tale tecnologia sia ancora poco diffusa negli edifici a destinazione d’uso residenziale in Italia, negli ultimi anni molti casi evidenziano un nuovo interesse per gli stessi, anche determinata dalla facilità di installazione. Inoltre, essi permettono ai fini di questo studio di verificare l’efficienza dei sistemi impiantistici che richiedono una temperatura di mandata più elevata e, pertanto, si tratta di una condizione intermedia tra i pannelli radianti e i radiatori.

L’adozione di pompe di calore in serie consente di sfruttarne il lavoro a pieno carico o comunque a carico parziale soddisfacente, soprattutto in ottica di utilizzo in edifici altamente performanti dal punto di vista dell’involucro. È dimostrato, infatti, che a carichi più bassi, le pompe di calore perdono in efficienza e i rendimenti stagionali sia estivi che invernali si abbassano notevolmente fino a determinare, in pratica, un utilizzo parziale e poco performante della macchina stessa.

Le potenze delle pompe di calore sono state scelte valutando i fabbisogni termici nelle differenti zone climatiche e calcolando la potenza necessaria in riscaldamento e raffrescamento per gli edifici modellati (Tabella 59).

Per semplicità di modellazione e sempre al fine di garantire flessibilità nell’analisi, sono state scelte tre pompe di calore con caratteristiche che in alcune condizioni possono risultare leggermente sovrastimate, ma consentono di effettuare confronti utili all’obiettivo del report.

Per tutti gli alloggi si è fissata una temperatura di setpoint pari a 20 °C in inverno e 26 °C in estate con 2 °C di tolleranza.

Tabella 59. Descrizione e parametri significativi del sistema di generazione per la climatizzazione estiva e invernale adottato nell'edificio plurifamiliare

Climatizzazione invernale ed estiva		
Generazione	3 Pompe di calore aria-acqua per riscaldamento e raffrescamento in serie	
	Caratteristiche in riscaldamento	
	Temperatura di set-point in inverno	20°C
	Capacità nominale (aria esterna b.s. + 7 °C / b.u. + 6°C, acqua 35 - 30 °C)	14,5 kW (x 3p.d.c.)
	Potenza assorbita	3,5 kW (x 3p.d.c.)
	COP nominale (aria esterna b.s. + 7 °C / b.u. + 6°C, acqua 35 - 30 °C)	4,1
	Capacità nominale*	14 kW (x 3p.d.c.)
	(aria esterna b.s. + 7 °C / b.u. + 6°C, acqua 45 - 40 °C)	
	Potenza assorbita*	4,36 kW (x 3p.d.c.)
	(aria esterna b.s. + 7 °C / b.u. + 6°C, acqua 45 - 40 °C)	
	COP nominale*	3,21
	(aria esterna b.s. + 7 °C / b.u. + 6°C, acqua 45 - 40 °C)	
	Mandata acqua ventilconvettori	45°C
	Ritorno acqua in pompa di calore	40°C
	$\Delta T_{\text{Mandata-Ritorno}}$	5°C
	Caratteristiche in raffrescamento	
	Temperatura di set-point in estate	26°C
	Capacità nominale (aria esterna b.s. + 35 °C / b.u. +24 °C, acqua 18 - 23 °C)	16 kW (x 3p.d.c.)
	Potenza assorbita (aria esterna b.s. + 35 °C / b.u. +24 °C, acqua 18 - 23 °C)	4,2 kW
	EER nominale (aria esterna b.s. + 35 °C / b.u. +24 °C, acqua 18 - 23 °C)	3,81
	Capacità nominale*	13 kW (x 3p.d.c.)
	(aria esterna b.s. + 35 °C, acqua 7 - 12 °C)	
	Potenza assorbita*	4,47 kW
	(aria esterna b.s. + 35 °C, acqua 7 - 12 °C)	
	EER nominale*	2,91
	(aria esterna b.s. + 35 °C, acqua 7 - 12 °C)	
	Mandata acqua ventilconvettori	7°C
	Ritorno acqua in pompa di calore	12°C
	$\Delta T_{\text{Mandata-Ritorno}}$	5°C
Emissione Ventilconvettori	Alimentazione elettrica V/Ph/Hz	230±10V/1/50
	Portata d'aria	560 m³/h
	Caratteristiche in riscaldamento	
	Potenza	3,3 kW
	Portata d'acqua	0,57 m³/h
	Caratteristiche in raffrescamento	
	Potenza	2,97 kW
	Portata d'acqua	0,52 m³/h

*Condizioni considerate ai fini del calcolo per la definizione delle pompe di calore

A servizio delle pompe sono stati anche ipotizzati sistemi di accumulo termico per riscaldamento e acqua refrigerata, dimensionati in modo tale da poter compensare i picchi richiesti e diminuire la taglia delle pompe di calore da installare. I sistemi di regolazione attivano le pompe di calore in funzione della temperatura

esterna, attraverso l'utilizzo di sonde e sensori che controllano temperatura, umidità relativa, pressione e Indoor Air Quality (IAQ). L'impianto è dotato di un sistema di controllo e gestione.

Per quanto riguarda l'acqua calda sanitaria è stato previsto, invece, un sistema a pompa di calore dedicata integrato con solare termico e serbatoio di accumulo a doppio serpentino riscaldato dalla pompa di calore nella parte superiore e dal solare termico nella parte inferiore.

Per un dimensionamento di massima è stato stimato un fabbisogno di acqua calda sanitaria di circa 70 l/persona, ottenendo così un indice di consumo espresso in l/m²giorno, utile alla definizione del sistema in sede di modellazione (Tabella 60). Il fabbisogno totale dell'edificio, considerato il numero di occupanti pari a 45 persone, ammonta a circa 3220 l di acqua.

Tabella 60. Stima degli indici di consumo giornalieri di acqua calda sanitaria rapportati alla superficie dei singoli alloggi

Alloggi	Superficie utile [m ²]	Consumo ACS [l]	Tasso di consumo [l/m ² giorno]
Alloggio A	90	280	3,11
Alloggio A'	76	220	2,89
Alloggio B	58	160	2,76
Alloggio C	113	340	3,01
Alloggio C'	113	400	3,54

Per soddisfare il fabbisogno di acqua calda sanitaria e nello stesso tempo garantire la produzione integrata da fonti rinnovabili, si è prevista l'installazione dei collettori solari. In un calcolo di massima, si è pensato di installare 21 collettori solari a tubi sottovuoto (Tabella 61) con una superficie captante di circa 36 m² e una superficie lorda di circa 57 m² e tre serbatoi di accumulo da 1000 litri ciascuno. I collettori sono di elevata efficienza secondo il principio "heatpipe", con spegnimento automatico in funzione della temperatura.

Tabella 61. Caratteristiche del collettore solare ipotizzato nell'edificio plurifamiliare

Pannello solare termico	
N. tubi	9
Superficie lorda	2,7 m ²
Superficie di assorbimento	1,6 m ²
Superficie di apertura	1,7 m ²
Distanza tra i collettori	44 mm
Rendimento ottico riferito alla superficie di assorbimento	76,7 %

I collettori sono pensati inclinati di un angolo di 30° rispetto al piano orizzontale nella prima configurazione con copertura piana, inclinazione che consente di avere una resa soddisfacente, e conforme nella seconda configurazione all'inclinazione della copertura a falda prevista (Figura 119). Inoltre, si è previsto un opportuno distanziamento per evitare il più possibile problemi di ombreggiamento. Per entrambe le configurazioni dell'edificio plurifamiliare, l'orientamento dell'edificio è stato fissato secondo l'asse Est-Ovest, in modo tale da garantire l'esposizione del lato più lungo a Sud. In tal modo l'installazione dei pannelli fotovoltaici in copertura pone minori problemi di ombreggiamento e risulta ottimizzata sulla copertura piana e ancor più sul tetto a falde. Tale scelta è coerente con l'obiettivo di ottenere la massima produzione di energia da fonti rinnovabili e quindi raggiungere lo status di edifici Zero Energy.

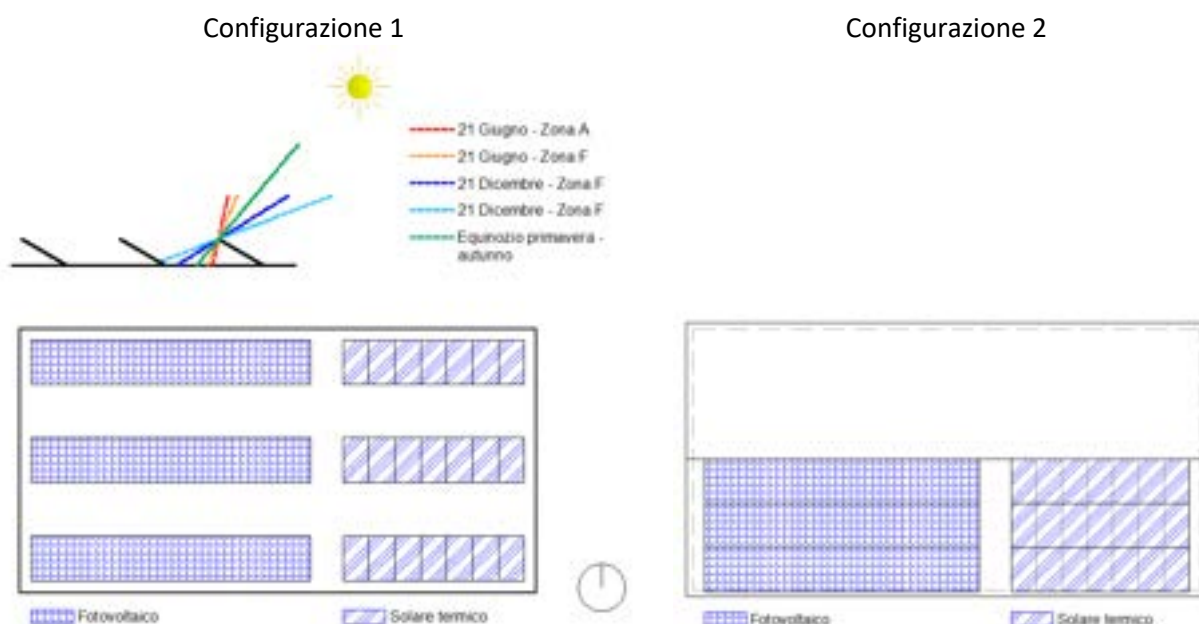


Figura 119. Studio qualitativo degli ombreggiamenti tra pannelli per la copertura piana e disposizione dei collettori solari e dei pannelli nel modello plurifamiliare per entrambe le configurazioni

Per sopperire all'eventuale mancanza di produzione di ACS da parte del solare termico soprattutto in inverno, si è prevista, ad integrazione, una pompa di calore aria-acqua, le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 62. Considerando come ipotesi di progetto almeno una copertura del 65-70% e un fattore di contemporaneità pari a 0,65, si è ipotizzata una potenza installata totale pari a 90kW e 3 accumuli di 1 m³ ciascuno.

Tabella 62. Caratteristiche della pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria – edificio plurifamiliare

Pompa di calore per acqua calda sanitaria		
Capacità termica nominale	90	kW
Potenza assorbita	24	kW
COP nominale	3,7	
Temperatura min/max aria	-7/42	°C
Temperatura max acqua solo pompa di calore	62	°C
Capacità nominale accumulo	1 x 3	m ³

Per quanto riguarda l'impianto fotovoltaico, si stima che il consumo medio di una famiglia ammonta almeno a 3000 kWh l'anno di energia elettrica con le normali utenze [39]. Per produrli con pannelli fotovoltaici servono circa 25 m² di superficie su un classico tetto con la giusta inclinazione. La massima superficie occupabile e disponibile in copertura sul modello plurifamiliare per il fotovoltaico (Figura 119) equivale a circa 94 m² (52 pannelli), mentre è previsto un angolo di inclinazione per i pannelli pari a 30° rivolti a Sud, uniformemente a quanto descritto per i collettori solari.

I pannelli fotovoltaici servono ad ottenere la produzione necessaria per il funzionamento delle pompe di calore, dei ventilatori e di tutti i componenti impiantistici ausiliari necessari. Essi vanno dimensionati opportunamente a seconda dell'area disponibile e del fabbisogno stesso da soddisfare.

Nella Tabella 63 si riportano le caratteristiche adottate per i pannelli fotovoltaici, presupponendo di utilizzare sistemi estremamente avanzati dal punto di vista tecnologico, data la poca disponibilità di superficie libera su cui è possibile installarli.

Tabella 63. Caratteristiche dei pannelli fotovoltaici adottati nel modello di edificio plurifamiliare

Pannello fotovoltaico	
Tipo	Monocristallino
Dimensioni	1,69 x 1,05 m
Superficie	1,76 m ²
Potenza nominale	
Condizioni di prova standard (irradianza 1000 W/m ² , AM 1,5, 25 °C)	370 W
Efficienza	20,09 %
Superficie utilizzata	93,6 m ²
Potenza di picco totale	19,24 kW

Nella condizione ideale l'approccio è quello di fornire tutta l'energia richiesta attraverso fonti rinnovabili in loco (come già illustrato in [1]), prevedendo tuttavia per l'edificio plurifamiliare l'attacco alla rete per sopperire alle fasi di picco imprevedibili o tecnicamente non assolvibili data l'estrema variabilità intrinseca nella natura delle fonti rinnovabili stesse.

Per il calcolo energetico ai fini residenziali si è deciso di non tenere conto delle tecnologie di movimentazione delle persone (come si riscontra anche nell'attuale normativa in vigore). Tuttavia, in linea teorica sono state ipotizzate tecnologie avanzate, quali l'installazione di ascensore MRL (Machine Room Less), privo del locale macchinari e totalmente all'interno del vano corsa, caratterizzato da un ottimo rendimento, ridotta potenza installata e corrente assorbita con conseguente risparmio energetico.

Inoltre, sono ipotizzate per il sistema di illuminazione delle parti comuni tecnologie a LED, che consentono un risparmio energetico notevole e sistemi BACS di controllo dotati di sensori e di tutti gli accorgimenti domotici necessari per la gestione e l'automazione dell'edificio stesso.

7.2 La costruzione dei modelli di edificio plurifamiliare per le simulazioni in regime dinamico

La costruzione dei modelli per le analisi in regime dinamico con motore di calcolo *EnergyPlus* è stata effettuata rispettando tutte le scelte descritte, differenziando i parametri termo-fisici a seconda delle configurazioni selezionate e delle differenti zone climatiche, al fine di ottenere risultati attendibili e veritieri per capire se l'obiettivo ZEB è effettivamente perseguibile in tutte le località analizzate.

7.2.1 Geometria e involucro opaco e trasparente

La prima fase di costruzione del modello ha riguardato la definizione della geometria e dei blocchi componenti per la rappresentazione di logge e balconi finalizzati all'ombreggiamento, in un grado di dettaglio tale da restituire in maniera fedele i casi studio analizzati.

Per le due configurazioni di edificio plurifamiliare (Figura 120 e Figura 121) si è scelto di modellare i singoli piani con le partizioni di divisione sia tra i singoli alloggi confinanti tra loro sia tra unità abitative e vano scala, considerandone l'esposizione verso ambiente non riscaldato (Figura 122). Inoltre, sono stati modellati i balconi per considerare l'effetto ombreggiamento.

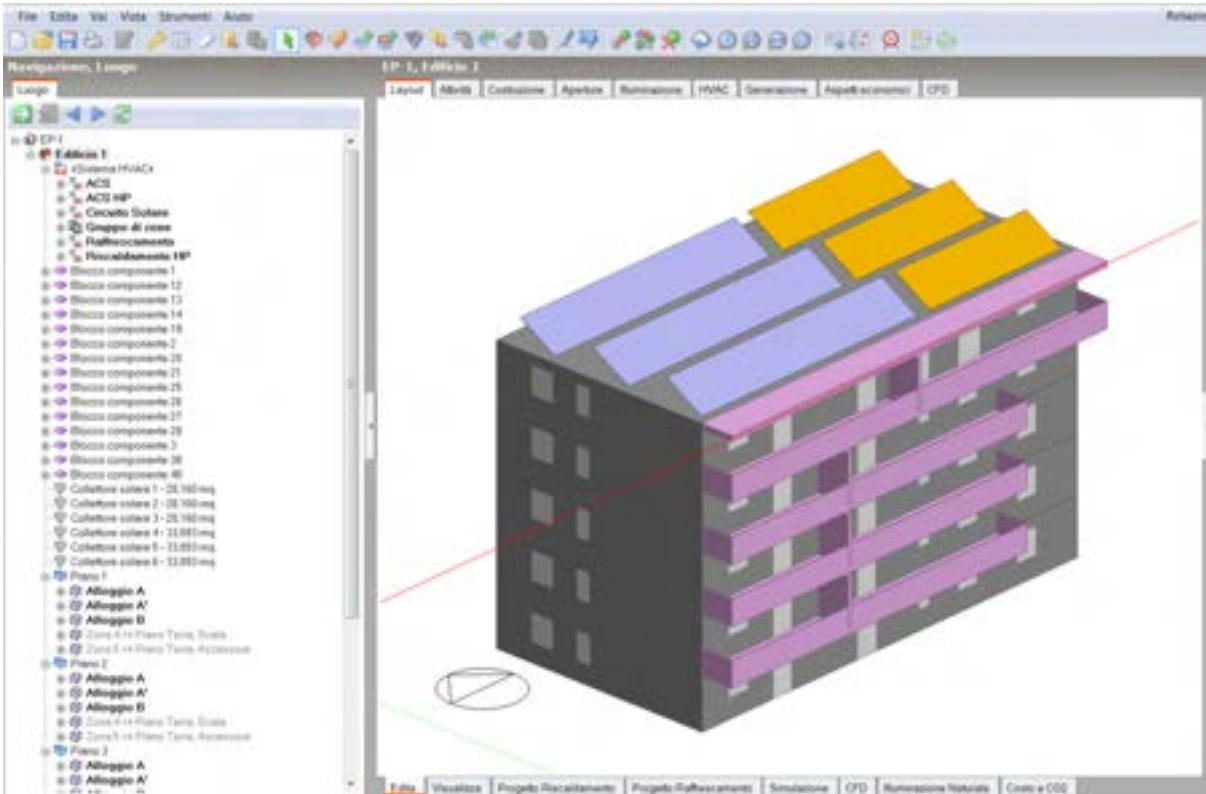


Figura 120. Modello edificio plurifamiliare – configurazione 1

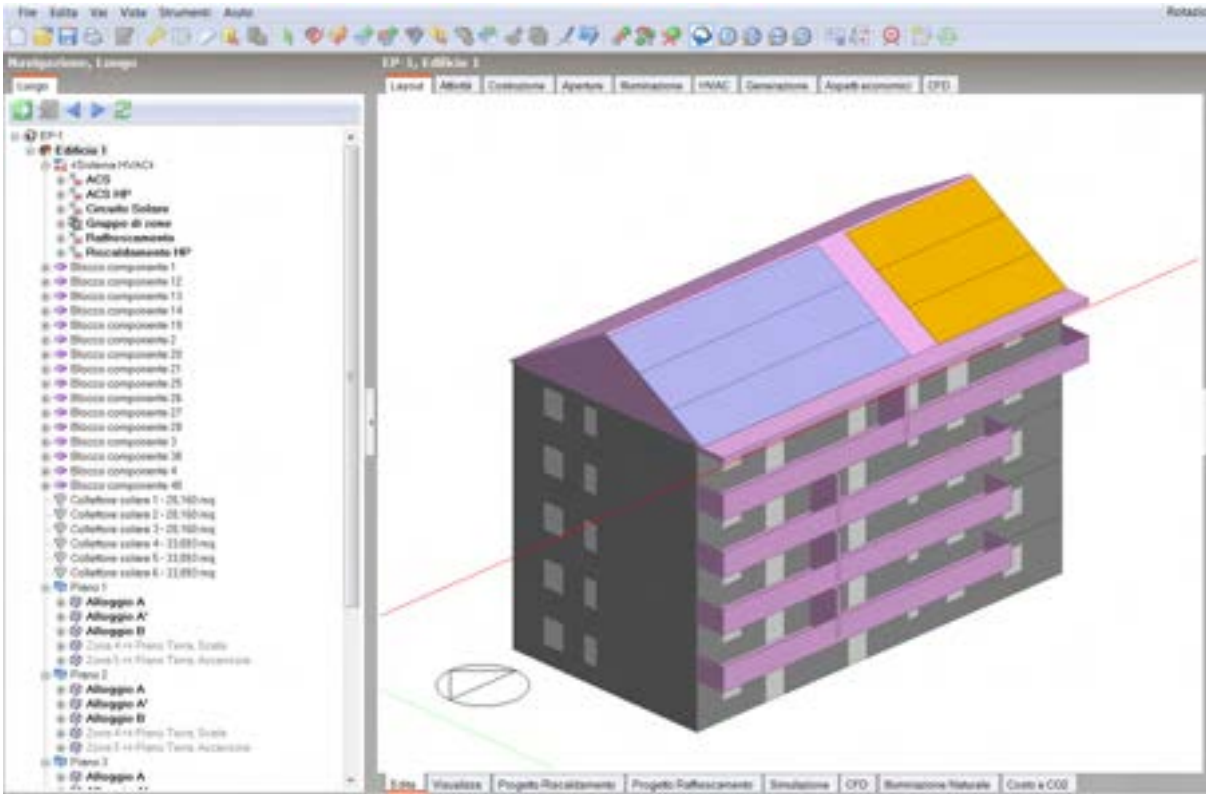


Figura 121. Modello edificio plurifamiliare – configurazione 2

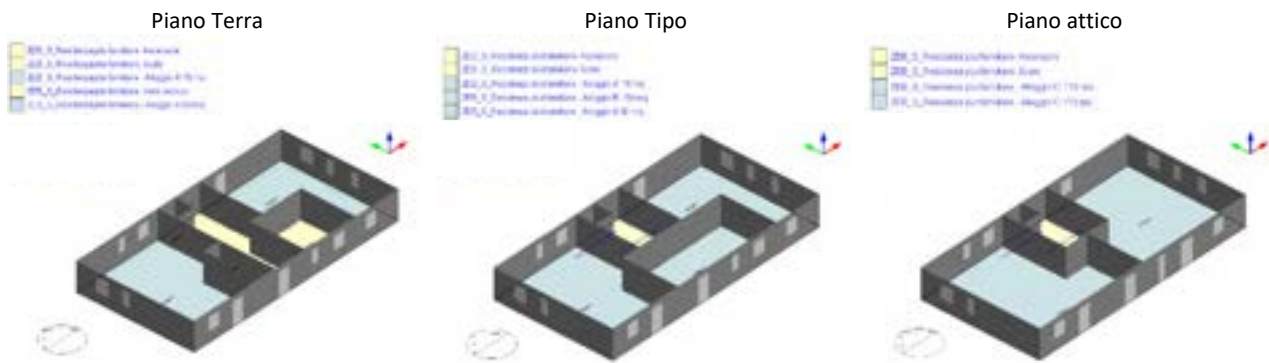


Figura 122. Layout piano terra, piano tipo e attico dell'edificio plurifamiliare

Per entrambe le configurazioni scelte, illustrate nel par. 7.1, sono state, inoltre, definite tutte le componenti di involucro attraverso la creazione di *template di costruzione* personalizzati per configurazione e per ogni zona climatica. Di ogni componente di involucro sono state, quindi, inserite, in modo dettagliato, le stratigrafie, come precedentemente illustrate da Tabella 54 a Tabella 57, par. 7.1. Di ciascun componente di involucro sono state definite, in maniera dettagliata, tutte le caratteristiche termo-fisiche dei materiali e, in particolare, spessore, conducibilità, calore specifico, densità, resistenza alla diffusione del vapore, proprietà delle superfici in termini di assorbanza (Tabella 64 e Tabella 65).

Tabella 64. Esempio di definizione delle caratteristiche termo-fisiche dei materiali (nel caso specifico dettaglio del materiale isolante in lana di roccia – configurazione 1)

Proprietà termo-fisiche del materiale	Proprietà della superficie
Materiali Nome: JTB 50 Pirella GBC PIR Descrizione: Lami di roccia Pirella GBC Fonte: catalogo Pirella GBC Building solutions Categoria: Materiali da costruzione Regione: General Spessore Strato di Materiale: 0.1000 Spessore forza: 0.1000 Proprietà Termiche Proprietà dettagliate Proprietà termo-fisiche del materiale Conducibilità (W/m-K): 0.0340 Calore specifico (kJ/kg-K): 1000.00 Densità (kg/m³): 150.00 Resistenza (hPa·m/W) Condizione resistenza alla diffusione del vapore: 1.0000 Condizione di resistenza alla diffusione del vapore: 1.0000	Materiali Nome: JTB 50 Pirella GBC PIR Descrizione: Lami di roccia Pirella GBC Fonte: catalogo Pirella GBC Building solutions Categoria: Materiali da costruzione Regione: General Spessore Strato di Materiale: 0.1000 Spessore forza: 0.1000 Proprietà Termiche Proprietà dettagliate Proprietà termo-fisiche del materiale Conducibilità (W/m-K): 0.0340 Calore specifico (kJ/kg-K): 1000.00 Densità (kg/m³): 150.00 Resistenza (hPa·m/W) Condizione resistenza alla diffusione del vapore: 1.0000 Condizione di resistenza alla diffusione del vapore: 1.0000

Tabella 65. Esempio di definizione delle caratteristiche termo-fisiche dei materiali (nel caso specifico dettaglio del blocco di calcestruzzo aerato autoclavato – configurazione 2)

Proprietà termo-fisiche del materiale	Proprietà della superficie
Materiali Nome: Blocco in calcestruzzo aerato autoclavato Descrizione: Blocco in calcestruzzo aerato autoclavato Fonte: catalogo Baci spa Building solutions Categoria: Materiali e blocchi da costruzione Regione: General Spessore Strato di Materiale: 0.1000 Spessore forza: 0.1000 Proprietà Termiche Proprietà dettagliate Proprietà termo-fisiche del materiale Conducibilità (W/m-K): 0.0800 Calore specifico (kJ/kg-K): 1000.00	Materiali Nome: Blocco in calcestruzzo aerato autoclavato Descrizione: Blocco in calcestruzzo aerato autoclavato Fonte: catalogo Baci spa Building solutions Categoria: Materiali e blocchi da costruzione Regione: General Spessore Strato di Materiale: 0.1000 Spessore forza: 0.1000 Proprietà Termiche Proprietà dettagliate Proprietà termo-fisiche del materiale Conducibilità (W/m-K): 0.0800 Calore specifico (kJ/kg-K): 1000.00

Il *template* di costruzione per l'intero edificio ha visto, quindi, la definizione di pareti verticali, coperture, pavimenti, solai interpiano e tutte le caratteristiche di involucro necessarie per ogni zona climatica e ogni località analizzata. Ogni componente di involucro opaco è stato, quindi, costruito con la definizione in dettaglio di tutte le stratigrafie, adattate di volta in volta ai contesti climatici, al fine di rispettare le trasmittanze minime di legge. È stato, inoltre, verificato che in ognuno dei componenti non si abbiano fenomeni di condensa interstiziale (Tabella 66 e Tabella 67).

Tabella 66. Esempio di definizione di un elemento di involucro (nel caso specifico dettaglio di parete verticale esterna implementata per la zona climatica D – Roma – configurazione 1)

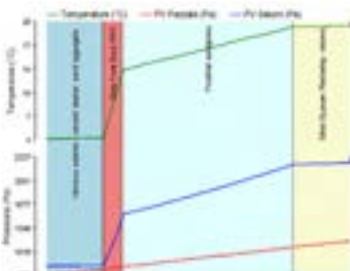
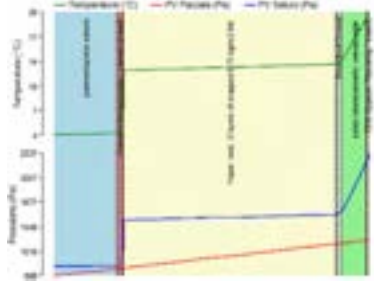
Stratigrafia	Immagine						
Modifica costruzione - Muratura esterna lana di roccia - U=0.28 - iso 7cm - NE - zona D Costruzione Strat. Proprietà della superficie Immagine Calcolato Costo Sorgente interna Analisi di condensa Nome Muratura esterna lana di roccia - U=0.28 - iso 7cm - NE - zona D Fonte Categoria Regione ITALIA Costo Metodo di definizione 1-Layers Superficie interna Numero di strati 4 Strato più esterno Materiali Intonaco esterno - cement plaster, sand aggregate Spessore [m] [in] 0.0200 ☐ Stato termicamente eterogeneo? (UNI EN 6946) Strato 2 Materiali JCB Pearl Foss. PRO Spessore [m] [in] 0.0700 ☐ Stato termicamente eterogeneo? (UNI EN 6946) Strato 3 Materiali Poroflon semplice Spessore [m] [in] 0.0000 ☐ Stato termicamente eterogeneo? (UNI EN 6946) Strato più interno Materiali JCB Gypsum Plastering - interno Spessore [m] [in] 0.0200 ☐ Stato termicamente eterogeneo? (UNI EN 6946)	Immagine Superficie esterna  Superficie interna						
Calcoli	Diagramma di Glaser						
Modifica costruzione - Muratura esterna lana di roccia - U=0.28 - iso 7cm - NE - zona D Costruzione Strat. Proprietà della superficie Immagine Calcolato Costo Sorgente interna Analisi di condensa Superficie più interna Coefficiente convettivo di scambio di calore (W/mq-K) 2.152 Coefficiente radiativo di scambio di calore (W/mq-K) 5.540 Resistenza di superficie (mq-K/W) 0.130 Superficie più esterna Coefficiente convettivo di scambio di calore (W/mq-K) 19.870 Coefficiente radiativo di scambio di calore (W/mq-K) 5.130 Resistenza di superficie (mq-K/W) 0.040 nessuno strato termicamente eterogeneo Valore-U da superficie a superficie (W/mq-K) 0.293 Valore-R (mq-K/W) 3.583 Valore-U (W/mq-K) 0.279 Con strato termicamente eterogeneo (BS EN ISO 6946) Spessore muro [m] 0.4100 Cm - Capacità Termica interna (KJ/mq-K) 100.0000 Limite di resistenza superiore (mq-K/W) 3.583 Limite di resistenza inferiore (mq-K/W) 3.583 Valore-U da superficie a superficie (W/mq-K) 0.293 Valore-R (mq-K/W) 3.583 Valore-U (W/mq-K) 0.279	Diagramma di Glaser  Analisi di condensa mese più critico <table> <tr> <td>Condensazione interstiziale</td><td>Assente</td></tr> <tr> <td>N. interfacce di condensazione</td><td>0</td></tr> <tr> <td>Condensazione superficiale</td><td>Qualità termica Buona. Improbabile formazione muffe</td></tr> </table>	Condensazione interstiziale	Assente	N. interfacce di condensazione	0	Condensazione superficiale	Qualità termica Buona. Improbabile formazione muffe
Condensazione interstiziale	Assente						
N. interfacce di condensazione	0						
Condensazione superficiale	Qualità termica Buona. Improbabile formazione muffe						

Tabella 67. Esempio di definizione di un elemento di involucro (nel caso specifico dettaglio di chiusura opaca orizzontale di copertura implementata per la zona climatica D – Roma – configurazione 1)

Stratigrafia	Immagine						
Nome ZEB_S_Tetto Piano lana di roccia 8cm U=0.230 zona D Fonte Categoria Tetti Regione ITALY Colore Stratigrafia Metodo di definizione 1-Layers Costituzioni di calcolo Strati Numero di strati 7 Strato più esterno Materiali Siva pavimentazione esterni Spessore (m) (m) 0.0500 Strato termicamente eterogeneo? (UNI EN 6946) Strato 2 Materiali Cementplastermortar - cement screed Spessore (m) (m) 0.0250 Strato termicamente eterogeneo? (UNI EN 6946) Strato 3 Materiali Siva Durock FRD Spessore (m) (m) 0.0600 Strato termicamente eterogeneo? (UNI EN 6946) Strato 4 Materiali Vapor-seal, 2 layers of mopped 0.75 kg/m² N Spessore (non usato nei calcoli termici) (m) 0.0020 Strato 5 Materiali Floor/Floor Screed Spessore (m) (m) 0.0500 Strato termicamente eterogeneo? (UNI EN 6946) Strato 6 Materiali soletto laterocemento wiewerberger Spessore (non usato nei calcoli termici) (m) 0.3000 Strato più interno Materiali Siva Gypsum Plastering - interno Spessore (m) (m) 0.0150	 Superficie esterna Superficie interna						
Calcoli	Diagramma di Glaser						
Modifica costruzione - ZEB_S_Tetto Piano lana di roccia 8cm U=0.230 zona D Costruzione Strati Proprietà della superficie Immagine Calcolo Costi Sorgente esterna Analisi di condensa Superficie più esterna Coefficiente convettivo di scambio di calore (W/mq-K) 4.450 Coefficiente radiativo di scambio di calore (W/mq-K) 5.540 Resistenza di superficie (mq-K/W) 0.100 Superficie più interna Coefficiente convettivo di scambio di calore (W/mq-K) 19.870 Coefficiente radiativo di scambio di calore (W/mq-K) 5.130 Resistenza di superficie (mq-K/W) 0.040 Resistenza strati termicamente eterogeneo Valore-U da superficie a superficie (W/mq-K) 0.238 Valore-R (mq-K/W) 4.339 Valore-U (W/mq-K) 0.230 Confronto R-massima fu. eterogenea (EN EN 10213-46) Spessore muro (m) 0.5020 Om - Capacità Termica interna (KJ/mq-K) 27.0000 Limite di resistenza superiore (mq-K/W) 4.339 Limite di resistenza inferiore (mq-K/W) 4.339 Valore-U da superficie a superficie (W/mq-K) 0.238 Valore-R (mq-K/W) 4.339 Valore-U (W/mq-K) 0.230	 Analisi di condensa mese più critico <table> <tr> <td>Condensazione interstiziale</td><td>Assente</td></tr> <tr> <td>N. interfacce di condensazione</td><td>0</td></tr> <tr> <td>Condensazione superficiale</td><td>Qualità termica Buona. Improbabile formazione muffe</td></tr> </table>	Condensazione interstiziale	Assente	N. interfacce di condensazione	0	Condensazione superficiale	Qualità termica Buona. Improbabile formazione muffe
Condensazione interstiziale	Assente						
N. interfacce di condensazione	0						
Condensazione superficiale	Qualità termica Buona. Improbabile formazione muffe						

Per i ponti termici, la trasmittanza lineica è stata fissata a 0,02 W/mK, valore notevolmente basso, ma attualmente raggiungibile nelle progettazioni a regola d'arte per un involucro altamente efficiente e performante, in cui tutti i ponti termici sono corretti con soluzioni ad hoc [38].

Gli spessori degli isolanti delle chiusure verticali e delle chiusure orizzontali di copertura sono stati variati a seconda delle zone climatiche e delle tecnologie adottate, verificando le trasmittanze proprio per il rispetto dei requisiti minimi già citati (Tabella 15).

Tabella 68. Tabella riassuntiva con le caratteristiche di involucro relative alle diverse configurazioni analizzate nelle differenti zone climatiche e confrontate con le trasmittanze limite come da D.M. 26.06.2015

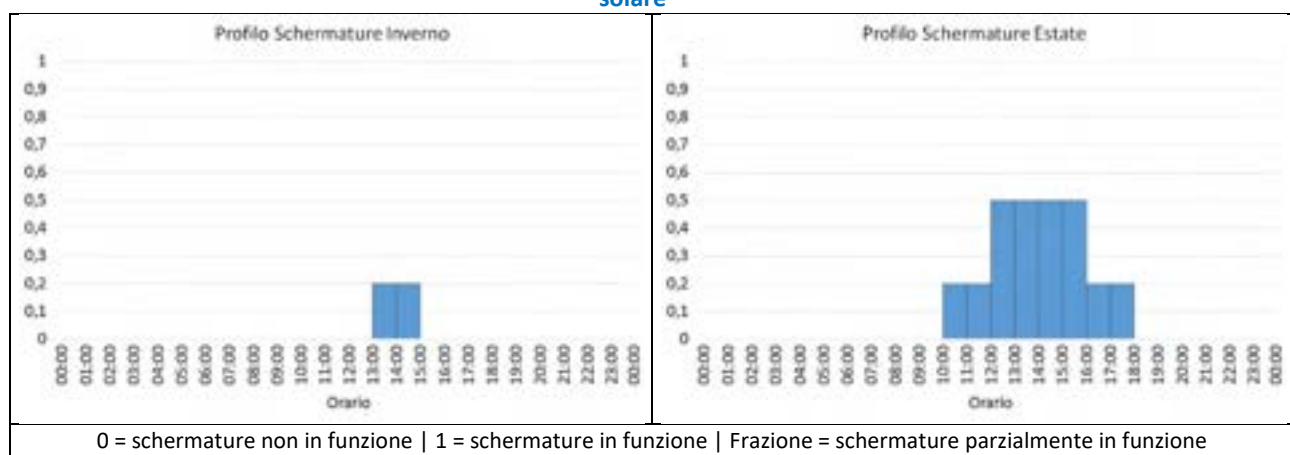
COD.	Zona climatica	Spessore totale [m]	Spessore isolamento	Ambiente confinante	U [W/m ² K]	Yie [W/m ² K]	φ [h]	f	m [kg/m ²]	Ki [kJ/m ² K]	U _{limite} [W/m ² K]
Chiusure verticali esterne – Configurazione 1											
PVE1	A-B	0,37	0,03	Esterno	0,416	0,037	14,77	0,089	316	48,2	0,43
PVE1	C	0,39	0,05	Esterno	0,334	0,024	15,21	0,073	317	48,1	0,34
PVE1	D	0,41	0,07	Esterno	0,279	0,018	15,62	0,064	319	48,1	0,29
PVE1	E	0,42	0,08	Esterno	0,258	0,016	15,84	0,061	320	48,1	0,26
PVE1	F	0,44	0,10	Esterno	0,224	0,013	16,32	0,057	321	48	0,24
Chiusure verticali esterne – Configurazione 2³											
PVE3	A-B	0,28	0,24	Esterno	0,281	0,09	10,45	0,354	146	38,2	0,43
PVE3	C	0,34	0,30	Esterno	0,252	0,06	12,57	0,238	164	37,7	0,34
PVE3	D	0,44	0,40	Esterno	0,192	0,019	17,03	0,097	194	37,1	0,29
PVE3	E	0,49	0,45	Esterno	0,171	0,010	19,26	0,061	209	37,2	0,26
PVE3	F	0,54	0,50	Esterno	0,155	0,006	21,49	0,037	224	37,2	0,24
Chiusura orizzontale intermedia tra appartamenti											
SI3	Tutte	0,49	0,04	Ambiente climatizzato	0,410	0,181	9,02	0,425	196	57,2	0,8
Chiusura orizzontale superiore – Configurazione 1											
COP3	A-B	0,49	0,07	Esterno	0,254	0,026	14,02	0,104	251	66,8	0,35
COP3	C	0,49	0,07	Esterno	0,254	0,026	14,02	0,104	251	66,8	0,33
COP3	D	0,50	0,08	Esterno	0,237	0,023	14,37	0,097	252	67	0,26
COP3	E	0,52	0,10	Esterno	0,209	0,018	15,12	0,086	255	67,3	0,22
COP3	F	0,54	0,12	Esterno	0,188	0,014	15,93	0,076	258	67,4	0,20
Chiusura orizzontale superiore – Configurazione 2											
COP4	A-B	0,38	0,06	Esterno	0,261	0,021	14,39	0,082	251	30,3	0,35
COP4	C	0,40	0,08	Esterno	0,227	0,017	14,63	0,074	251	30,5	0,33
COP4	D	0,42	0,10	Esterno	0,201	0,014	14,88	0,069	252	30,7	0,26
COP4	E	0,44	0,12	Esterno	0,180	0,012	15,15	0,065	252	31	0,22
COP4	F	0,46	0,14	Esterno	0,164	0,010	15,44	0,062	253	31,2	0,2
Chiusura orizzontale inferiore											
SCT	TUTTE	0,84	0,10	Terreno	0,231	0,024	15,83	0,104	246	51,4	

³ Nel caso della Parete verticale PVE3 il blocco di calcestruzzo cellulare aerato ha già buone caratteristiche di isolamento e non necessita di isolante aggiuntivo. Si indica pertanto lo spessore del blocco stesso come indicazione di variazione.

Infine, coerentemente con quanto scelto in precedenza (par. 7.1.2), sono stati implementati i profili di aperture definendo le tipologie a doppio e triplo vetro a seconda delle condizioni climatiche.

La necessità di contrastare il surriscaldamento degli ambienti durante l'estate e ridurre il fabbisogno energetico di raffrescamento ha determinato la scelta di un sistema di schermature solari integrate alle aperture con sistema di controllo della radiazione solare e un profilo di funzionamento ad esso subordinato, differenziato per l'estate e per l'inverno e calibrato in base alle ore di maggiore radiazione solare (Tabella 69). Tali profili sono il risultato di una serie di valutazioni e simulazioni "prova" che hanno evidenziato quanto la definizione di aperture e schermature rivestano una funzione determinante nei risultati energetici, determinando anche output estremamente diversificati. Il profilo è stato definito pensando ad un utilizzo standard quanto più plausibile da parte delle famiglie. Inoltre, la tipologia di controllo adottata consente di differenziarne l'utilizzo a seconda delle facciate su cui le schermature sono previste (facciata Sud, Est e Ovest).

Tabella 69. Profilo di funzionamento delle schermature applicate alle aperture con controllo della radiazione solare



7.2.2 Profili di occupazione e ventilazione naturale

Per le cinque tipologie di alloggio sono stati considerati i dati di occupazione con i relativi profili, i tassi di consumo di acqua calda sanitaria e tutti i parametri di controllo ambientale richiesti (Figura 123), al fine di definire i dati di input descrittivi del *Template Attività* riguardanti tutti gli alloggi dell'edificio (che differiscono per densità di persone a m² e tasso di consumo di acqua calda sanitaria, come già descritto nel par. 7.1.1).

Templates attività	
Template	ZEB_S_Residenza plurifamiliare - Alloggio A 90
Settore	Residential spaces
Moltiplicatore zona	1
☒ Includi zona nei calcoli termici	
☒ Includi zona nei calcoli di illuminazione naturale di Radiance	
Superficie a Pavimento Totale Edificio	
Occupazione	
Densità (persone/mq)	0.0440
Programma	ZEB_S_occupazione-9-12
Tasso metabolico	
Attività	Seated quiet
Fattore (Uomini=1.00, Donne=0.85, Bambini=0.75)	0.90
Tasso di generazione di CO2 (m3/s-W)	0.0000000382
Vestiti	
Clothing schedule definition	1-Generic summer and winter clothing
Vestiti invernali (clo)	1.00
Vestiti estivi (clo)	0.50
Mean Radiant Temperature Calculation	
Calculation type	1-Zone averaged
Setpoint di concentrazione di contaminante generico (ppm)	
Vacanze	
ACS	
Tasso di consumo (l/mq giorno)	3.110
Controllo Ambientale	
Setpoint di Riscaldamento	
Riscaldamento (°C)	20.0
Temp. di attenuazione in Riscaldamento (°C)	18.0
Setpoint di Raffrescamento	
Raffrescamento (°C)	26.0
Temp. Di attenuazione in Raffrescamento (°C)	28.0
Setpoint PMV di Comfort di Riscaldamento	
Setpoint PMV	-0.500
Setback PMV	-1.500
Setpoint PMV di Comfort di Raffrescamento	
Setpoint PMV	0.100
Setback PMV	1.000
Controllo Umidità	
Setpoint umidificazione RH (%)	10.0
Setpoint deumidificazione RH (%)	90.0
Setpoint di Ventilazione	
Aria minima di rinnovo	
Aria di rinnovo (l/s-persona)	11.000
Vent Mecc per superficie (l/s-mq)	0.500
Setpoint CO2/Contaminante	
Illuminazione	
Computers	
☐ On	
Dispositivi d'Ufficio	
☐ On	
Varie	
☐ On	
Preparazione cibi	
Macchinari aggiuntivi	

Figura 123. Esempio di template delle attività definito per i singoli alloggi dell'edificio plurifamiliare (in questo caso riferito all'alloggio A)

Particolare attenzione è stata posta nella scelta dei profili di occupazione, utilizzo di acqua calda sanitaria e controllo ambientale (da Tabella 70 a Tabella 74), i quali sono stati ispirati ai comportamenti realistici delle famiglie e ad un utilizzo veritiero dei sistemi impiantistici.

Ognuno di questi profili influenza significativamente i risultati finali delle simulazioni, pertanto è strettamente necessario valutarli a seconda delle destinazioni d'uso e della tipologia edilizia analizzata.

È stata, quindi, effettuata un'analisi di sensibilità che ha condotto all'adozione dei profili così come riportati. In dettaglio, i profili di occupazione adottati per gli alloggi si riferiscono a nuclei familiari standard e variano soltanto per il numero di occupanti e la densità abitativa, parametri dipendenti dal taglio dimensionale degli alloggi (come descritto in precedenza in Tabella 51, par. 7.1.1). A titolo esemplificativo, si riporta in Tabella 70 il caso specifico dell'alloggio A di 4 persone, con marito, moglie e bambini in età scolare. Ad ogni modo, per ogni alloggio è stata ipotizzata una presenza del numero totale di occupanti per le ultime ore della giornata e tutta la notte, mentre durante il giorno si è ipotizzata una presenza minima, in orario lavorativo o scolastico.

Tabella 70. Esempio di settaggi per il profilo di Occupazione

Occupazione	Profilo di Occupazione
Default sull'occupazione ⚙️ Cancella le modifiche al programma EMS Densità (persone/mq) 0.0440 Number of people 4.00 Frazione latente 0.5000 Calore metabolico Tasso metabolico Seated quiet Fattore metabolico (0.85 per le donne, 0.75 bambini) 0.90 Clothing schedule Default clothing schedule (Northern hemis Profilo giorni lavorativi On alle 16:00 Off alle 8:00 Giorni/Settimana 5 Programmi Programma ZEB_S_occupazione-9-12	Schedule: Compact, Dwell_Occ, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays, Until: 8:00, 1, Until: 16:00, 0.2, Until: 18:00, 0.5, Until: 24:00, 1, For: Weekends Holidays, Until: 8:00, 1, Until: 16:00, 0.5, Until: 18:00, 0.5, Until: 24:00, 0.5, For: WinterDesignDay SummerDesignDay AllOtherDays, Until: 8:00, 1, Until: 16:00, 0.2, Until: 18:00, 0.5, Until: 24:00, 1;
Profilo Occupazione  0 = assenza di occupanti 1 = presenza del n. massimo di occupanti	

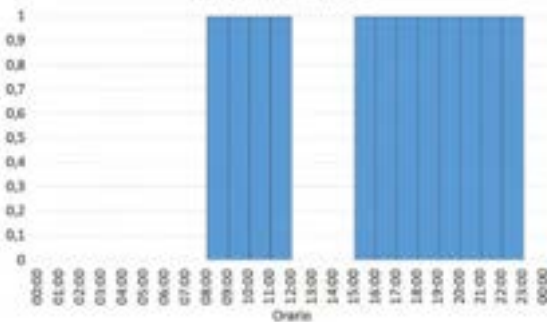
Per quanto riguarda i profili di utilizzo per l'acqua calda sanitaria, è stato previsto un consumo maggiore durante le prime ore della mattina e durante le ore del tardo pomeriggio/sera, coerentemente con il rientro degli abitanti alla propria abitazione (Tabella 71). Il profilo di utilizzo è stato assunto per tutti gli alloggi, variando il tasso di consumo, calcolato sul numero di abitanti per appartamento.

Tabella 71. Esempio di settaggi per l’Acqua Calda Sanitaria (Alloggio A)

Acqua Calda Sanitaria	Profilo ACS
ACS On Tasso di consumo (l/mq giorno) 3.110 Profilo giorno lavorativo ON alle 16:00 OFF alle 23:00 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 Programmi Programma ZEB_S_ACS Profilo ACS	Schedule:Compact, Dwell_ACS, Temperature, Through: 31 Dec, For: Weekdays SummerDesignDay WinterDesignDay, Until: 06:00, 0, Until: 08:00, 1, Until: 11:00, 0, Until: 16:00, 0.5, Until: 18:00, 0, Until: 22:00, 0.5, Until: 24:00, 0, For: Weekends Holidays, Until: 06:00, 0, Until: 08:00, 1, Until: 11:00, 0, Until: 16:00, 0.5, Until: 18:00, 0, Until: 22:00, 0.5, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 06:00, 0, Until: 08:00, 1, Until: 11:00, 0, Until: 16:00, 0.5, Until: 18:00, 0, Until: 22:00, 0.5, Until: 24:00, 0;

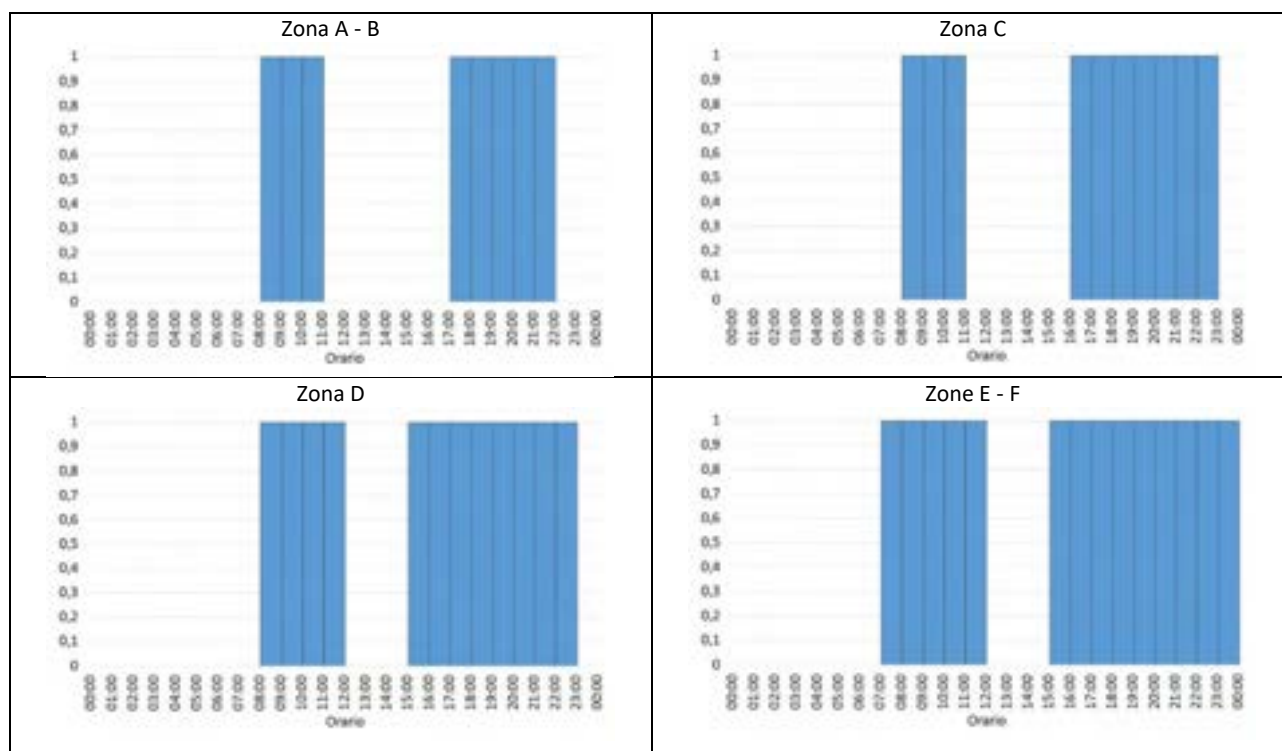
Per il controllo ambientale, sono stati impostati i setpoint di temperatura e le temperature di attenuazione sia per il riscaldamento (Tabella 72) che per il raffrescamento (Tabella 74).

Tabella 72. Esempio di settaggi per il Controllo Ambientale: Riscaldamento (zona climatica D)

Controllo ambientale	
Riscaldamento	Profilo Riscaldamento
Riscaldamento Setpoint di temperatura (°C) 20.000 Temperatura durante attenuazione (°C) 18.000 Profilo giorno lavorativo: ON alle 13.55 OFF alle 23.00 Programmi Programma ZEB_S_Heating aggiornato 07-12	Schedule: Compact, Dwell_Heat, Temperature, Through: 31 Dec, For: WinterDesignDay Weekdays Weekends, Until: 08:00, 0, Until: 12:00, 1, Until: 15:00, 0, Until: 23:00, 1, Until: 24:00, 0, For: Holidays, Until: 08:00, 0, Until: 12:00, 1, Until: 15:00, 0, Until: 23:00, 1, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays SummerDesignDay, Until: 24:00, 0;
Profilo Riscaldamento D 	

Per il riscaldamento, si è ipotizzato un funzionamento ripartito durante la giornata in due fasce orarie, mattutina e pomeridiana ipotizzando che possano essere presenti all'interno dell'edificio persone anziane o che non lavorano. È stato, inoltre, ipotizzato un numero di ore di riscaldamento coerente con quello massimo definito da normativa (Tabella 17; Tabella 73).

Tabella 73. Differenti profili di riscaldamento adottati a seconda delle zone climatiche



In raffrescamento, invece, è stata prevista l'accensione della pompa di calore nelle ore pomeridiane, durante le quali gli abitanti frequentano maggiormente le loro residenze e che sono sicuramente più calde (Tabella 72).

Tabella 74. Esempio di settaggi per il Controllo Ambientale: Raffrescamento

Controllo ambientale	
Raffrescamento	Profilo Raffrescamento
Raffrescamento Setpoint di temperatura (°C) 26.000 Temp. Di attenuazione in Raffrescamento (°C) 28.000 Profilo giorno lavorativo ON alle 12:00 OFF alle 20:00 Programmi ZEB_S_Cooling-Aggornato	Schedule:Compact, Dwell_Cool, Temperature, Through: 31 Dec, For: Weekdays SummerDesignDay, Until: 12:00, 0, Until: 20:00, 1, Until: 24:00, 0, For: Weekends, Until: 12:00, 0, Until: 20:00, 1, Until: 24:00, 0, For: Holidays, Until: 12:00, 0, Until: 20:00, 1, Until: 24:00, 0, For: WinterDesignDay AllOtherDays, Until: 24:00, 0;
Funzionamento	

Si è, inoltre, ipotizzato che, in un utilizzo ottimale degli alloggi, si faccia largo uso della ventilazione naturale notturna durante il periodo estivo di modo da ottenere il cosiddetto *free cooling* e sfruttare le ore più fresche della notte, evitando i tipici problemi di surriscaldamento a cui molti edifici super isolati vanno incontro. La modalità di inserimento dei profili di utilizzo e dei programmi di funzionamento influenza notevolmente il risultato delle simulazioni. L’esempio della ventilazione naturale è uno dei più significativi. In un primo momento si era ipotizzato un programma “compatto” che garantisse d’estate una buona ventilazione notturna (Tabella 75); d’inverno, invece, era stato aggiunto un programma di funzionamento ulteriore che consentiva di ipotizzare un’apertura delle finestre per tre ore esclusivamente durante la mattina per favorire il ricambio d’aria, fissato a 0,5 vol/h. Durante le stagioni intermedie, era stato fissato un limite di temperatura esterna minima pari a 22 °C, al di sotto della quale non era prevista l’apertura delle finestre, in modo da non raffreddare troppo l’ambiente e non dover ricorrere all’accensione dell’impianto di riscaldamento.

Tabella 75. Primo esempio di settaggi per il Controllo Ambientale: Ventilazione naturale – schedule compatto

Controllo ambientale	
Ventilazione naturale	Profilo di ventilazione
Ventilazione naturale ☒ On Metodo di definizione aria esterna 1-By zone Aria esterna (vol/h) 0.500 Funzionamento Programma ZEB_S_Ventilazione aggiornato 7/12 Limiti della temperatura esterna ☒ Controllo della temperatura esterna minima Definizione della temperatura minima 2-Da programma Programma della temperatura minima 09-12 - Min Outdoor temp for Nat Vent ☐ Controllo della temperatura esterna massima	Schedule: Compact, Dwell_Vent, Temperature, Through: 31 Dec, For: WinterDesignDay Weekdays Weekends, Until: 06:00, 0, Until: 09:00, 1, Until: 24:00, 0, For: Holidays, Until: 09:00, 0, Until: 12:00, 1, Until: 15:00, 0, Until: 22:00, 1, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays SummerDesignDay, Until: 06:00, 0,5, Until: 09:00, 1, Until: 21:00, 0, Until: 24:00, 0,5;
	Controllo della temperatura esterna minima Schedule: Compact, On, Any Number, Through: 12/31, For: AllDays, Until: 06:00, 22, Until: 08:00, -100, Until: 24:00, 22 ;

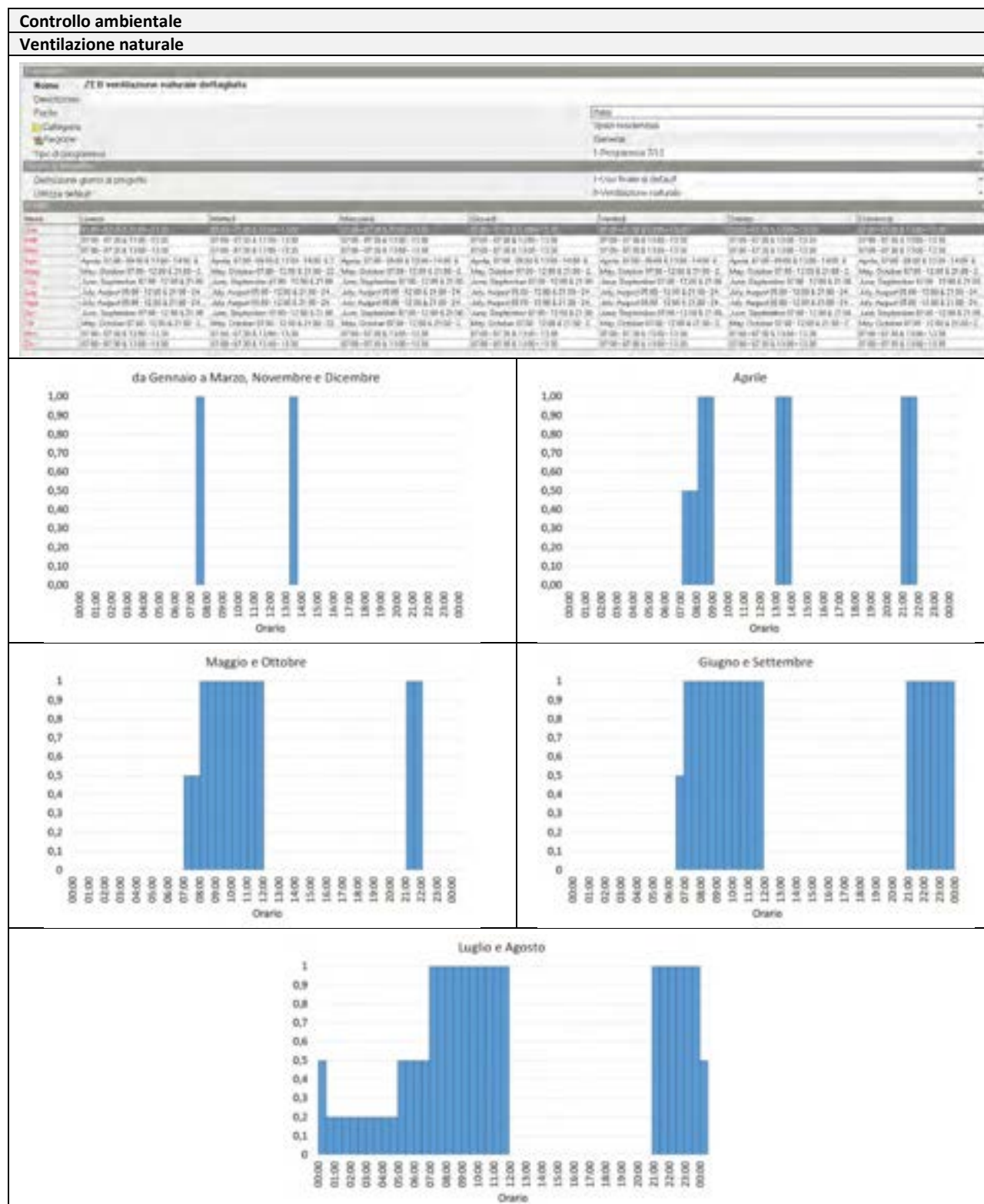
Ci si è resi conto, tuttavia, che tale settaggio andava ad influire notevolmente sui calcoli della potenza estiva in riscaldamento e raffrescamento, determinando un aumento notevole della potenza necessaria in riscaldamento (per esempio, in zona climatica D, era necessaria una potenza di progetto pari a 40 kW), in quanto le tre ore di apertura durante la mattina determinavano un crollo della temperatura interna degli alloggi e una profonda situazione di discomfort degli occupanti.

Per tale motivo, si è deciso di implementare un programma di ventilazione naturale dettagliato, mese per mese, calibrato sulle necessità mensili e stagionali, diminuendo le ore di ventilazione naturale invernali e distribuendo l'apertura delle finestre nell'arco della giornata. In tal modo, il fabbisogno di riscaldamento decresce notevolmente (si ottiene, per esempio, una potenza di progetto pari circa a 27 kW in zona climatica D).

Poiché si è ipotizzato un comportamento virtuoso degli utenti all'interno dell'edificio ed un suo utilizzo ottimizzato, si è, quindi, scelto, infine, di impostare il programma di ventilazione dettagliato, riportato in Tabella 76 per condurre tutte le simulazioni. Ad esso è stata associata la condizione per la quale se la temperatura esterna minima è inferiore ai 22°C, le finestre vengono mantenute chiuse in modo da non abbassare di troppo la temperatura esterna, escludendo tuttavia le prime ore del mattino, in cui viene sempre garantito un ricambio d'aria per la salubrità degli ambienti.

Valutazioni simili a quelle condotte per i profili di ventilazione naturale valgono anche per tutti gli altri programmi, che sono stati impostati ad hoc per il caso studiato e in modo tale da non avere sovrapposizioni o incongruenze (per esempio, è stato evitato l'uso contemporaneo e sovrapposto di ventilazione naturale e sistemi impiantistici, che inficerebbe la prestazione energetica dell'edificio stesso).

Tabella 76. Secondo esempio di settaggi per il Controllo Ambientale: Ventilazione naturale – schedule dettagliato



7.2.3 Definizione dell'HVAC dettagliato

Il modello è stato implementato con la definizione di un sistema HVAC dettagliato al fine di descrivere adeguatamente i sistemi ipotizzati nel par.7.1.3.

L'HVAC costruito (Figura 124) rappresenta, quindi, una configurazione impiantistica che prevede:

- Impianto per riscaldamento e raffrescamento con pompe di calore aria-acqua, associate a terminali tipo ventilconvettori;
- Impianto per acqua calda sanitaria con pompa di calore aria-acqua dedicata integrato con solare termico e serbatoio di accumulo.

Per rappresentare il sistema, sono stati ipotizzati due circuiti distinti per il riscaldamento ed il raffrescamento con tre pompe di calore aria-acqua ciascuno, a servizio di terminali di tipo fancoil. L'adozione di due circuiti distinti è una semplificazione dovuta all'impossibilità di rappresentare in un unico circuito una pompa di calore adibita sia al riscaldamento sia al raffrescamento.

Entrambi i circuiti sono composti, quindi, da tre generatori collegati in serie, ai quali è stata assegnata una priorità di funzionamento progressiva, a seconda della richiesta. Essi sono collegati ai ventilconvettori di ogni ambiente e sottoposti a controllo attraverso un "setpoint manager" che verifica la temperatura nei nodi critici del sistema (per esempio in uscita dai generatori stessi). Si tenga presente che la Figura 124 è una semplice schematizzazione del sistema implementato, ma non è rappresentativa dei collegamenti e delle tubazioni di impianto, di cui non è richiesto il dimensionamento in dettaglio. Inoltre, il fancoil in figura in realtà è definito come "gruppo di zona". Ad esso afferiscono tutti i terminali dei singoli alloggi.

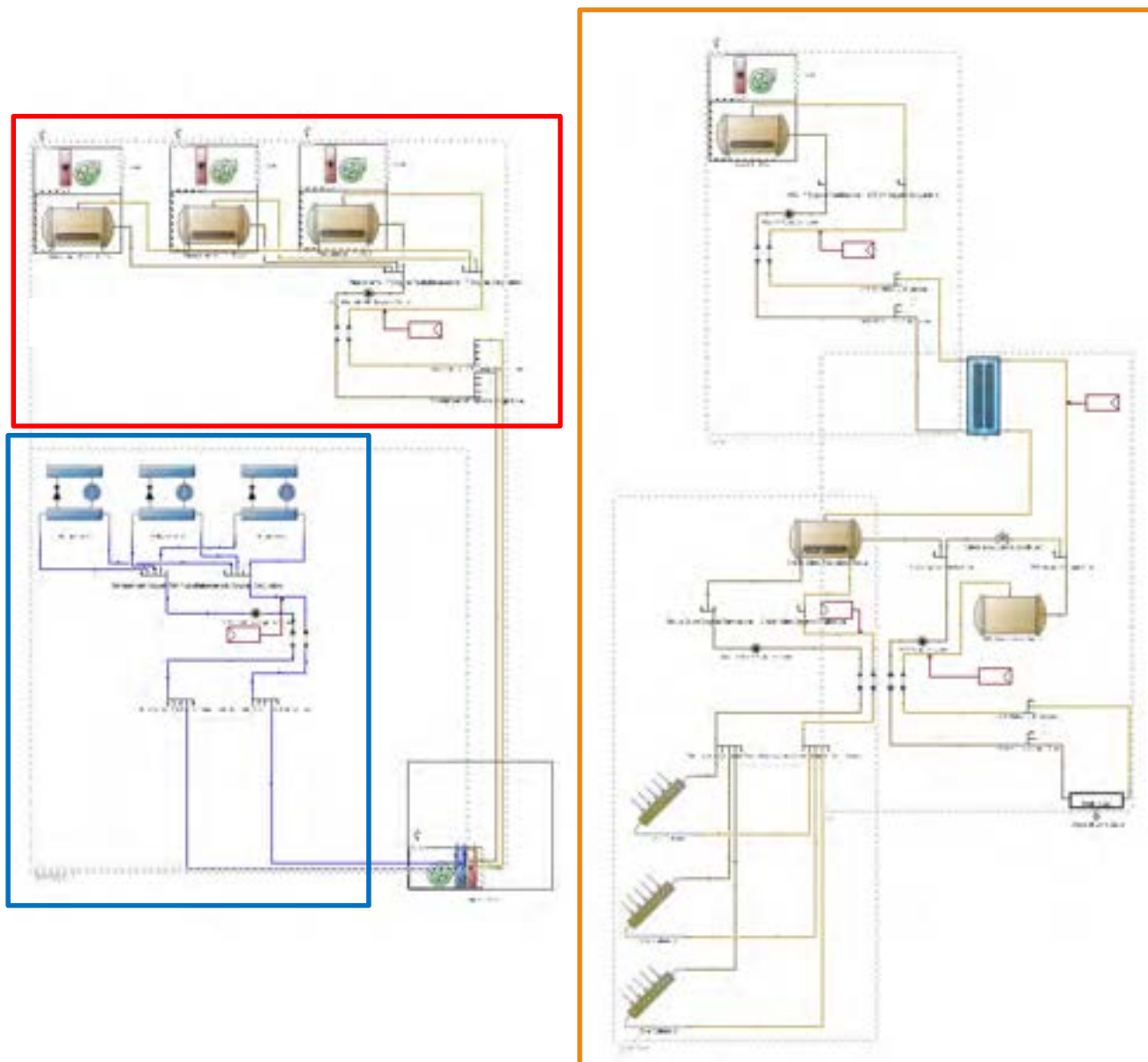


Figura 124. Layout dettagliato del sistema impiantistico per l'edificio plurifamiliare

Dai calcoli di progetto per il riscaldamento e il raffrescamento eseguiti in regime semi-stazionario per ogni zona climatica (Figura 125, Figura 126 e Tabella 77) è stato possibile ipotizzare una potenza totale da installare in riscaldamento e in raffrescamento, idonea per tutte le configurazioni studiate per ogni località. Per i calcoli delle potenze di progetto sono stati utilizzati dei coefficienti maggiorativi di sicurezza pari a 1,25.

Regime Stazionario		Riepilogo									
Blocco	Zona	Temperatura	Perdite di Ca	Potenza di P	Potenza di P...	Glazing...	Wall G...	Floor G...	Roof a...	Ventilat...	Infiltrati...
- Edificio 1 Capacità Totale di Riscaldamento di Progetto = 26,930 (kW)											
- Piano 1 Capacità Totale di Riscaldamento di Progetto = 5,210 (kW)											
Piano 1	Alloggio B	19,49	0,96	1,20	20,3956	-0,159	-0,174	0,000	-0,002	-0,537	-0,075
Piano 1	Alloggio A	19,29	1,72	2,15	23,3056	-0,298	-0,432	0,003	-0,005	-0,843	-0,118
Piano 1	Alloggio A'	19,31	1,49	1,86	23,6845	-0,245	-0,399	0,003	-0,004	-0,718	-0,100
- Piano 2 Capacità Totale di Riscaldamento di Progetto = 5,210 (kW)											
Piano 2	Alloggio A	19,29	1,72	2,15	23,3203	-0,299	-0,432	0,005	-0,006	-0,844	-0,118
Piano 2	Alloggio B	19,48	0,96	1,20	20,4173	-0,159	-0,174	0,002	-0,003	-0,537	-0,075
Piano 2	Alloggio A'	19,31	1,49	1,86	23,6939	-0,246	-0,399	0,004	-0,005	-0,718	-0,101
- Piano 3 Capacità Totale di Riscaldamento di Progetto = 5,280 (kW)											
Piano 3	Alloggio B	19,46	0,98	1,22	20,8329	-0,160	-0,173	0,004	-0,025	-0,538	-0,075
Piano 3	Alloggio A	19,27	1,74	2,18	23,6217	-0,300	-0,431	0,007	-0,029	-0,845	-0,118
Piano 3	Alloggio A'	19,29	1,51	1,88	24,0090	-0,246	-0,398	0,006	-0,025	-0,719	-0,101
- Piano Attico Capacità Totale di Riscaldamento di Progetto = 6,680 (kW)											
Piano Attico	Alloggio C'	18,96	2,67	3,33	28,6782	-0,351	-0,489	0,040	-0,607	-1,066	-0,149
Piano Attico	Alloggio C	18,95	2,68	3,35	28,8768	-0,370	-0,484	0,039	-0,605	-1,063	-0,149
- Piano Terra Capacità Totale di Riscaldamento di Progetto = 4,550 (kW)											
Piano Terra	Alloggio A'	19,27	1,69	2,11	26,9330	-0,261	-0,400	-0,019	-0,002	-0,864	-0,121
Piano Terra	Alloggio A	19,25	1,95	2,44	26,4857	-0,313	-0,433	-0,021	-0,003	-1,015	-0,142

Figura 125. Esempio di calcolo della potenza di progetto necessaria in riscaldamento (Zona D)

Zona	Blocco	Potenza di Progetto (kW)	Portata di Progetto (mc/s)	Carico di Raffrescamento...	Sensibile (kW)
- Edificio 1					
Alloggio A	Piano Terra	1,39	0,047	1,21	0,68
Alloggio A'	Piano Terra	1,95	0,068	1,69	0,99
Alloggio C'	Piano Attico	3,61	0,155	3,13	2,29
Alloggio C	Piano Attico	3,10	0,108	2,70	1,57
Alloggio B	Piano 3	1,20	0,042	1,05	0,61
Alloggio A	Piano 3	2,22	0,076	1,93	1,12
Alloggio A'	Piano 3	2,29	0,099	1,99	1,47
Alloggio A	Piano 2	2,17	0,075	1,89	1,09
Alloggio B	Piano 2	1,13	0,039	0,99	0,57
Alloggio A'	Piano 2	2,27	0,098	1,97	1,45
Alloggio B	Piano 1	1,12	0,039	0,98	0,56
Alloggio A	Piano 1	2,08	0,071	1,81	1,04
Alloggio A'	Piano 1	2,30	0,081	2,00	1,18
Totali	-	26,84	0,998	23,34	14,62

Figura 126. Esempio di calcolo della potenza di progetto necessaria in raffrescamento (Zona D)

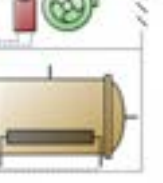
Tabella 77. Potenze di progetto in riscaldamento e raffrescamento per le differenti configurazioni nelle varie zone climatiche

Configurazioni	Potenza di progetto in riscaldamento [kW]	Potenza di progetto in raffrescamento [kW]
1AB	20	39,05
1C	26,99	36,82
1D	26,93	26,84
1E	34,98	26,09
1F	32	25,32
2AB	18,56	39,03
2C	25,02	37,3
2D	24,76	25,57
2E	31,7	25,56
2F	29,2	24,79

In base a tali dati, sono state scelte le caratteristiche delle pompe di calore da installare in serie, così come descritte in Tabella 59 par. 7.1.3. In tal modo, è stato possibile implementare tutte le opportune caratteristiche dei generatori per riscaldamento/raffrescamento, con tutti i parametri e le relative curve prestazionali.

I parametri impostati per il circuito di riscaldamento sono riportati di seguito (Tabella 78). Da notare come siano stati considerati i dati nominali misurati per condizioni di temperatura esterna dell'aria a bulbo secco pari a 7 °C, temperatura esterna dell'aria a bulbo umido pari a 6 °C e temperatura dell'acqua pari a 45-40 °C come riportati precedentemente in Tabella 59. Per il riscaldamento è stato, quindi, impostata una capacità nominale pari a 14 kW, un COP nominale pari a 3,21, in quanto la pompa di calore è a servizio di terminali a ventilconvettori.

Tabella 78 Caratteristiche della pompa di calore per riscaldamento, e dettaglio dati dei singoli componenti



Riscaldamento d'acqua a pompa di calore

Generale	
Generale	
Nome	Riscaldamento HP - FDC
Programma di disponibilità	atbp_heating_schedule
Impostazioni del compressore	
Programma della temperatura di setpoint del compressore	45
Differenza di temperatura della banda morta (deltaC)	1.00
Temperatura minima di ingresso per il funzionamento del compressore	-10.00
Posizione del compressore	3-Esterno
Impostazioni della portata	
Portata d'acqua al condensatore (m³/h)	Autocalcolata
Portata d'acqua all'evaporatore (m³/h)	Autocalcolata
Impostazioni dell'aria in ingresso	
Configurazione dell'aria in ingresso	3-Solo aria esterna
Impostazioni del ventilatore	
Posizionamento del ventilatore	2-Aspirante
Impostazione del carico parassita	
On cycle parasitic electric load (W)	0.00
Off cycle parasitic electric load (W)	0.00
Posizione del rigetto di calore del carico parassita	2-Esterno



Riscaldamento d'acqua a pompa di calore

Generale	
Generale	
Capacità nominale di riscaldamento (kW)	Proiezione basata sull'efficienza COP e sulla temperatura ambiente di design
COP nominale	3.214
Supporto nominale del calore sensibile	0.0000
Condizioni di riferimento	
Temperatura nominale di tutto l'anno di ingresso all'evaporatore (°C)	1.00
Temperatura nominale di tutto l'anno di ingresso all'evaporatore (°C)	4.00
Portata nominale dell'acqua all'evaporatore (m³/h)	0.000
Condizioni di riferimento	
Temperatura nominale di ingresso dell'acqua nel condensatore (°C)	41.00
Portata nominale dell'acqua nel condensatore (m³/h)	0.000
Capacità della pompa del condensatore inclusa nel COP	
Calore dissipato dalla pompa del condensatore incluso nella potenza di riscaldamento nominale a setpoint	
Portata della pompa dell'acqua del condensatore (m³/h)	760.00
Posizione di calore della pompa del condensatore rilasciato all'acqua	4-Interno
Capacità di riscaldamento	
Capacità di riscaldamento (kW)	100.00
Temperatura ambiente dell'edificio per le operazioni del riscaldamento del carico (°C)	0.00
Impostazioni di riferimento	
Temperatura di riferimento della temperatura ambiente	1-Temperatura di tutto l'anno
Capacità di riscaldamento in funzione della temperatura	250 - Capacità riscaldamento di capacità in funzione della temperatura
Capacità di riscaldamento in funzione della portata d'acqua	
Capacità di riscaldamento in funzione della portata d'aria	
COP di riscaldamento in funzione della temperatura	250 - Capacità riscaldamento in funzione della temperatura
COP di riscaldamento in funzione della portata d'acqua	
COP di riscaldamento in funzione della portata d'aria	
Carico di riferimento	
Carico di riferimento al ciclo partiale	250 - Carico riscaldamento ciclo partiale



Riscaldamento d'acqua a pompa di calore

Riscaldamento d'acqua a pompa di calore	
Generale	
Capacità nominale di riscaldamento (kW)	Proiezione basata sull'efficienza COP e sulla temperatura ambiente di design
COP nominale	3.214
Supporto nominale del calore sensibile	0.0000
Condizioni di riferimento	
Temperatura nominale di tutto l'anno di ingresso all'evaporatore (°C)	1.00
Temperatura nominale di tutto l'anno di ingresso all'evaporatore (°C)	4.00
Portata nominale dell'acqua all'evaporatore (m³/h)	0.000
Condizioni di riferimento	
Temperatura nominale di ingresso dell'acqua nel condensatore (°C)	41.00
Portata nominale dell'acqua nel condensatore (m³/h)	0.000
Capacità della pompa del condensatore inclusa nel COP	
Calore dissipato dalla pompa del condensatore incluso nella potenza di riscaldamento nominale a setpoint	
Portata della pompa dell'acqua del condensatore (m³/h)	760.00
Posizione di calore della pompa del condensatore rilasciato all'acqua	4-Interno
Capacità di riscaldamento	
Capacità di riscaldamento (kW)	100.00
Temperatura ambiente dell'edificio per le operazioni del riscaldamento del carico (°C)	0.00
Impostazioni di riferimento	
Temperatura di riferimento della temperatura ambiente	1-Temperatura di tutto l'anno
Capacità di riscaldamento in funzione della temperatura	250 - Capacità riscaldamento di capacità in funzione della temperatura
Capacità di riscaldamento in funzione della portata d'acqua	
Capacità di riscaldamento in funzione della portata d'aria	
COP di riscaldamento in funzione della temperatura	250 - Capacità riscaldamento in funzione della temperatura
COP di riscaldamento in funzione della portata d'acqua	
COP di riscaldamento in funzione della portata d'aria	
Carico di riferimento	
Carico di riferimento al ciclo partiale	250 - Carico riscaldamento ciclo partiale

Nel definire le caratteristiche delle pompe di calore, a partire da dati nominali plausibili rivenienti dallo studio di schede tecniche di pompe di calore presenti sul mercato, sono state costruite le curve prestazionali per ciascun generatore del tipo:

- capacità in riscaldamento in funzione della temperatura (Figura 127);
- COP di riscaldamento in funzione della temperatura (Figura 128);
- correlazione al carico parziale (Figura 129).

La prima delle curve citate (Figura 127) è stata scelta di tipo biquadratico e parametrizza la variazione della capacità totale di riscaldamento in funzione della temperatura a bulbo umido che entra nel condensatore e della temperatura a bulbo secco dell'aria che entra nell'evaporatore. I valori di output forniti dalla curva vengono moltiplicati per la capacità termica totale in modo da ottenere il valore della capacità termica per le specifiche condizioni di temperatura simulate [40].

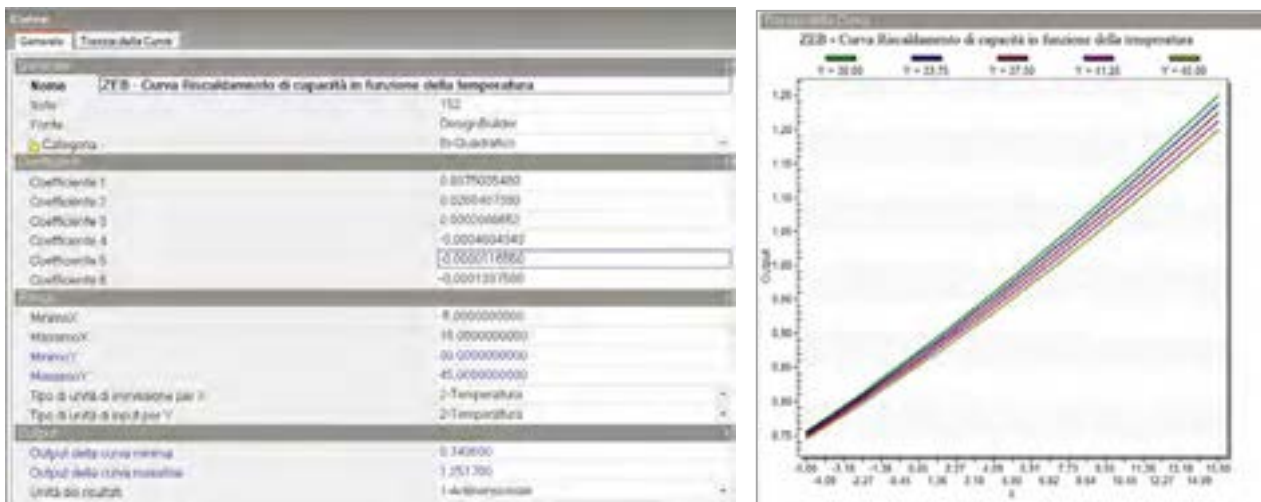


Figura 127. Coefficienti e andamento della curva della capacità in riscaldamento delle pompe di calore in funzione delle temperature – edificio plurifamiliare

La seconda curva (Figura 128), anch'essa biquadratica, parametrizza, invece, il COP in funzione della temperatura a bulbo umido che entra nel condensatore e della temperatura a bulbo secco dell'aria che entra nell'evaporatore. I valori di output ottenuti vengono moltiplicati per il COP nominale così da ottenere il valore del COP per le condizioni di temperatura operativa [40].

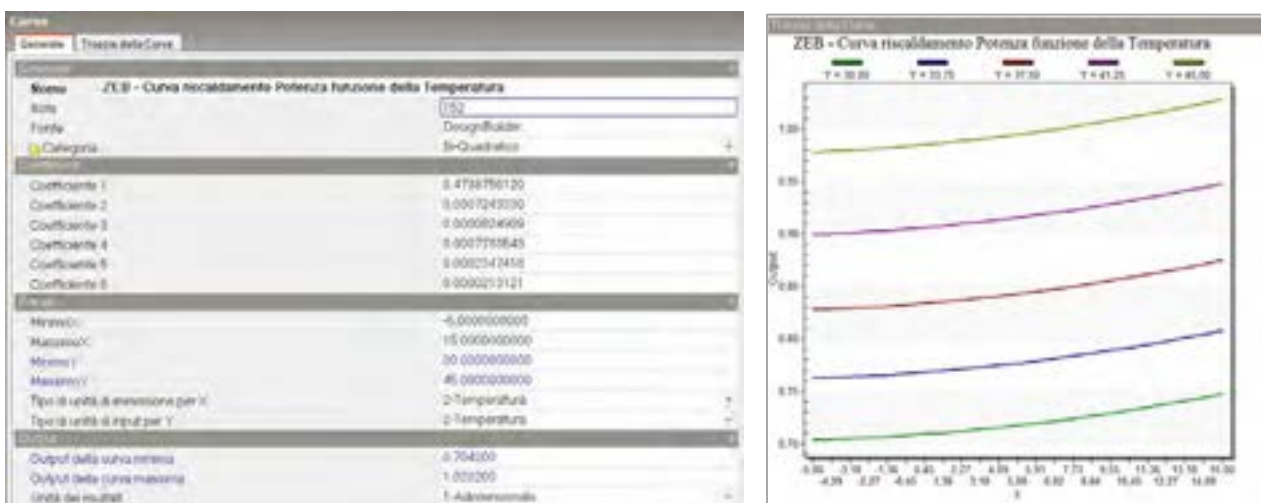


Figura 128. Coefficienti e andamento della curva della variazione della potenza di riscaldamento in funzione delle temperature

Infine, la curva di correlazione al carico parziale (Figura 129), di tipo cubico, parametrizza la variazione dell'energia elettrica assorbita dalla pompa di calore in funzione del rapporto di carico parziale (Part Load Ratio o PLR) [40].



Figura 129. Coefficienti e andamento della curva di correlazione a carico parziale

Per ogni curva sono stati calcolati i coefficienti caratteristici, ispirandosi a possibili valori di capacità termica, potenza e COP di pompe di calore esistenti e idonee al caso di studio, e ne è stato in tal modo ottenuto l'andamento, definendone la tipologia (biquadratica o cubica).

La stessa logica è stata seguita per impostare le caratteristiche del circuito di raffreddamento come riportate in Figura 130. In questo caso è stata impostata una capacità di riferimento frigorifera pari a 13 kW con EER pari a 2,91.



Figura 130. Caratteristiche del refrigeratore

Anche in questo caso sono state definite le curve di prestazione:

- capacità in raffreddamento in funzione della temperatura (Figura 131);
- potenza di raffreddamento in funzione della temperatura (Figura 132);
- correlazione al carico parziale (Figura 133).

La prima curva (Figura 131), di tipo biquadratica, parametrizza la variazione della capacità totale di raffreddamento in funzione della temperatura a bulbo umido dell'acqua in uscita e della temperatura dell'aria che entra nel condensatore. I valori di output forniti dalla curva vengono moltiplicati per la capacità

frigorifera totale in modo da ottenere il valore della capacità frigorifera per le specifiche condizioni di temperatura operante [40].

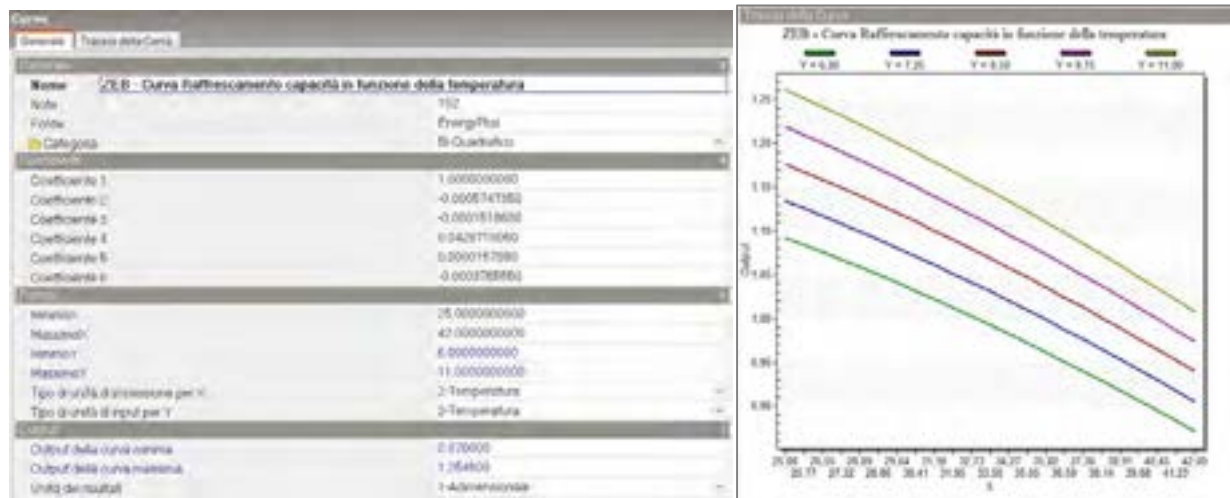


Figura 131. Coefficienti e curva della capacità in raffreddamento in funzione delle temperature caratteristica della pdc in raffreddamento

La seconda curva (Figura 132), anch'essa biquadratica, parametrizza, invece, l'Energy Input Ratio (EIR) in funzione della temperatura a bulbo umido dell'acqua in uscita e della temperatura dell'aria che entra nel condensatore. I valori di output ottenuti vengono moltiplicati per l'EIR (che non è altro che l'inverso dell'EER) così da ottenere il valore dell'EIR per le specifiche condizioni di temperatura operativa simulate [40].

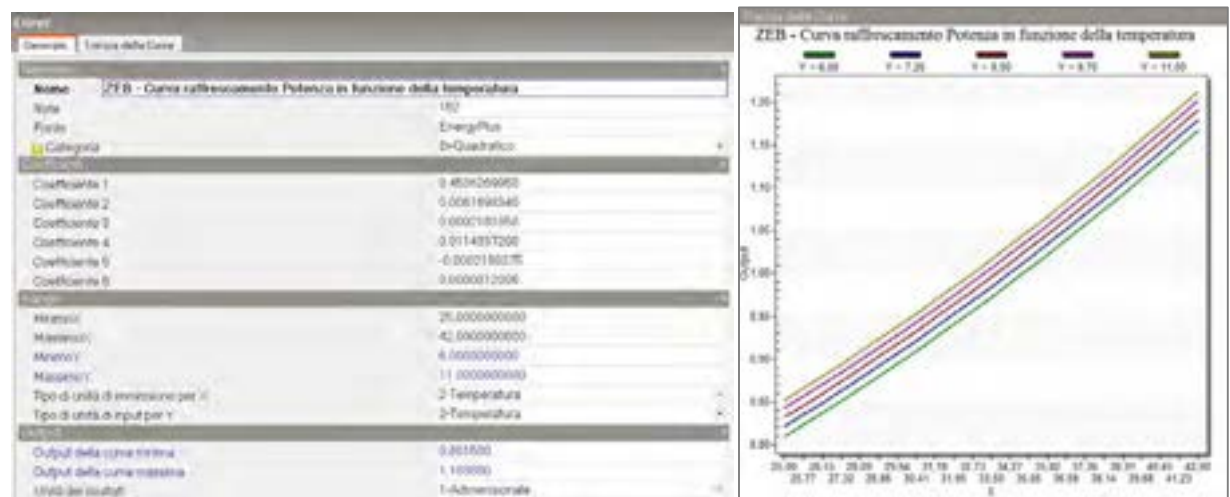


Figura 132. Coefficienti e curva della potenza in raffreddamento in funzione delle temperature caratteristica della pdc in raffreddamento

Infine, la curva di correlazione al carico parziale (Figura 133), di tipo quadratico, parametrizza la variazione dell'EIR in funzione del rapporto di carico parziale (PLR). L'EIR nominale (inverso dell'EER) viene moltiplicato per l'EIR alle condizioni di temperatura operante per ottenere l'EIR "effettivo" per il determinato timestep di simulazione [40].

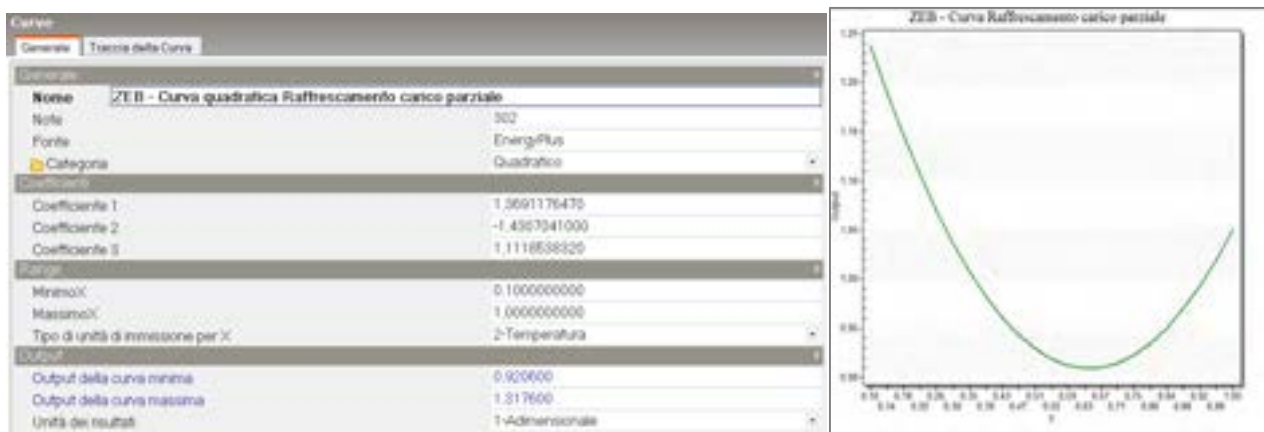


Figura 133. Coefficienti e curva di correlazione al carico parziale caratteristica della pdc in raffreddamento

Per evitare che il sistema di raffreddamento si attivi contemporaneamente a quello di riscaldamento, è stato anche implementato un codice di Energy Management System (EMS) all'interno del software che fa prevalere il sistema di riscaldamento nei giorni di condizioni climatiche intermedie, in cui ci potrebbe essere necessità di entrambi i sistemi, condizione questa che si verifica soprattutto durante la primavera e l'autunno) (Tabella 79).

Tabella 79. Codice EMS implementato per evitare la contemporaneità di funzionamento dei sistemi di riscaldamento e raffreddamento

```
EnergyManagementSystem:Actuator,
  ashp_cs,
  ASHP_COOLING_SCHEDULE,
  Schedule:Compact,
  Schedule Value;

EnergyManagementSystem:Actuator,
  ashp_hs,
  ASHP_HEATING_SCHEDULE,
  Schedule:Compact,
  Schedule Value;

EnergyManagementSystem:Sensor,
  ccwhpe, !#Cooling_Coil_Water_Heating_Electric_Power,
  Riscaldamento HP - PDC HP Batteria di Riscaldamento ad acqua,
  Cooling Coil Water Heating Electric Power;

EnergyManagementSystem:ProgramCallingManager,
  ashp_schedule_manager,
  BeginTimestepBeforePredictor,
  ashp_manager;

EnergyManagementSystem:Program,
  ashp_manager,
  set ashp_cs=1,
  set ashp_hs=1,
  IF (ccwhpe > 0),
    Set ashp_cs = 0 ,
  ENDIF;

Output:Variable, ASHP_COOLING_SCHEDULE, Schedule Value, Timestep;
Output:Variable, ASHP_HEATING_SCHEDULE, Schedule Value, Timestep;
```

Per quanto riguarda l'impianto dedicato alla produzione di acqua calda sanitaria, esso presenta una pompa di calore dedicata e l'integrazione con il solare termico. L'impianto viene schematizzato in Figura 134. Si è previsto, quindi, un sistema di accumuli collegato da un lato ai collettori solari e dall'altro alla pompa di calore

dedicata, che sopprime la produzione di acqua calda sanitaria in caso di inefficienza del solare termico dovuta, ad esempio, alla variabilità stagionale della fonte rinnovabile. In tal modo, si garantisce una produzione continua durante l'anno. La pompa di calore entra in funzione quando il solare termico, rappresentato in forma schematica dai collettori solari collegati all'accumulo dedicato, non riesce a soddisfare la richiesta da parte dell'utenza. Il sistema è, anche in questo caso, dotato di "controllori" di temperatura che ne verificano il corretto funzionamento e le differenze di temperatura fra le differenti sezioni di impianto.

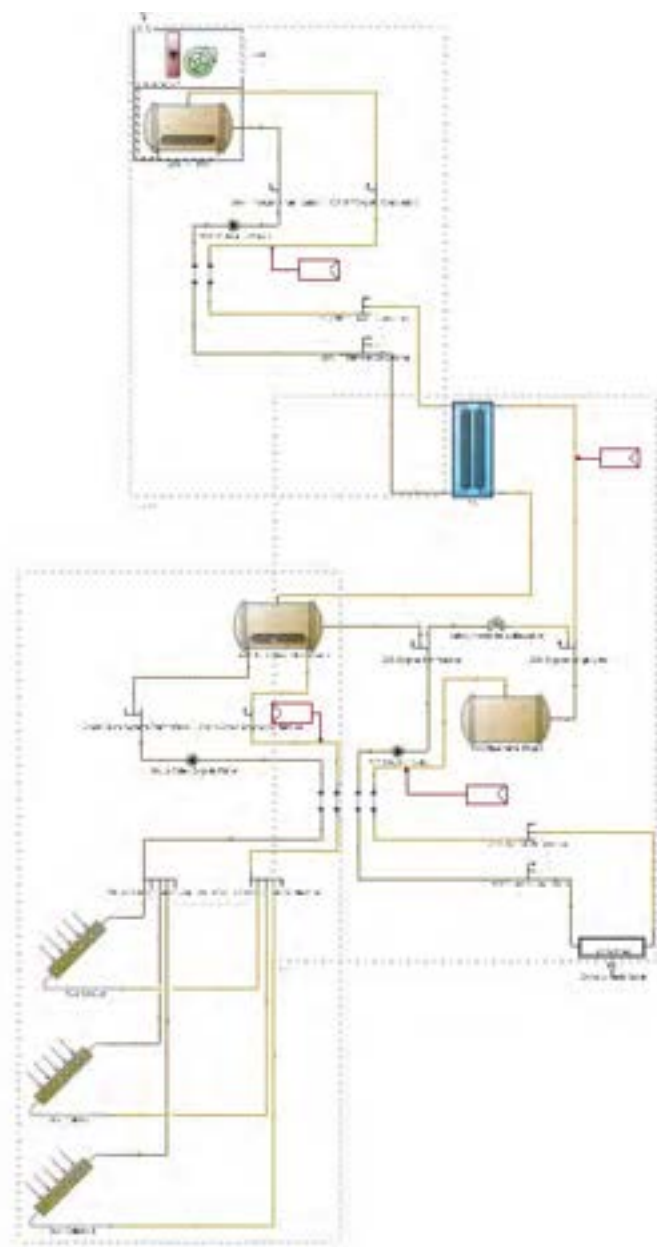
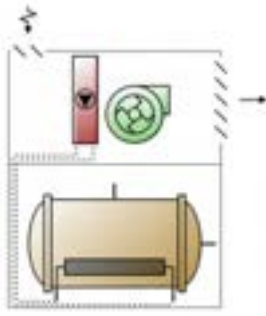
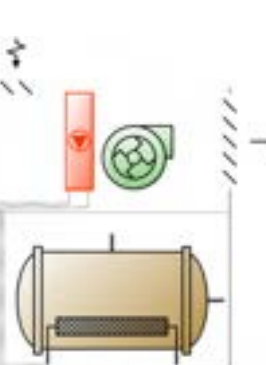
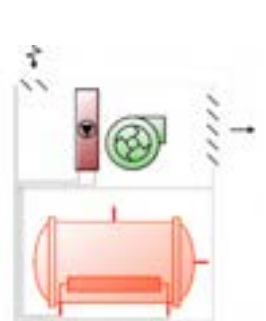


Figura 134. Layout del circuito per la produzione di acqua calda sanitaria, con pompa di calore, solare termico e accumuli, implementato nell'edificio plurifamiliare

La pompa di calore, di cui si riportano i settaggi dettagliati in Tabella 80, presenta una capacità termica nominale di 90 kW ed è stata modellata seguendo i parametri già definiti in Tabella 62, par. 7.1.3.

Tabella 80. Caratteristiche della pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria, e dettaglio dati dei singoli componenti

	Caratteristiche generali della pompa di calore <table border="1"> <tr><td colspan="2">Generali</td></tr> <tr><td>Modello</td><td>ACS HP - PDC</td></tr> <tr><td>Programma di regolazione</td><td>On/Off</td></tr> <tr><td colspan="2">Programma della temperatura di setpoint del compressore</td></tr> <tr><td>Differenza di temperatura della banda morta (deltaC)</td><td>2.00 Domestic hot water setpoint temperature Always 55.0</td></tr> <tr><td>Temperatura minima di ingresso per il funzionamento del compressore (°C)</td><td>10.00</td></tr> <tr><td>Pressione del compressore</td><td>2.00bar</td></tr> <tr><td colspan="2">Riscaldamento dell'acqua</td></tr> <tr><td>Portata d'acqua di riscaldamento (l/min)</td><td>Automatico</td></tr> <tr><td>Portata d'acqua di riscaldamento (m³/h)</td><td>Automatico</td></tr> <tr><td colspan="2">Riscaldamento dell'acqua di ritorno</td></tr> <tr><td>Configurazione dell'acqua di ritorno</td><td>3-Flow, anti-logging</td></tr> <tr><td colspan="2">Riscaldamento dell'acqua di ritorno</td></tr> <tr><td>Pressione di ritorno del ventilatore</td><td>2.00bar</td></tr> <tr><td colspan="2">Riscaldamento dell'acqua di ritorno</td></tr> <tr><td>On cycle pump: electric power (W)</td><td>1.00</td></tr> <tr><td>On cycle pump: electric power (W)</td><td>1.00</td></tr> <tr><td>Pressione di ritorno del ventilatore del ciclo di ritorno</td><td>2.00bar</td></tr> </table>	Generali		Modello	ACS HP - PDC	Programma di regolazione	On/Off	Programma della temperatura di setpoint del compressore		Differenza di temperatura della banda morta (deltaC)	2.00 Domestic hot water setpoint temperature Always 55.0	Temperatura minima di ingresso per il funzionamento del compressore (°C)	10.00	Pressione del compressore	2.00bar	Riscaldamento dell'acqua		Portata d'acqua di riscaldamento (l/min)	Automatico	Portata d'acqua di riscaldamento (m³/h)	Automatico	Riscaldamento dell'acqua di ritorno		Configurazione dell'acqua di ritorno	3-Flow, anti-logging	Riscaldamento dell'acqua di ritorno		Pressione di ritorno del ventilatore	2.00bar	Riscaldamento dell'acqua di ritorno		On cycle pump: electric power (W)	1.00	On cycle pump: electric power (W)	1.00	Pressione di ritorno del ventilatore del ciclo di ritorno	2.00bar										
Generali																																															
Modello	ACS HP - PDC																																														
Programma di regolazione	On/Off																																														
Programma della temperatura di setpoint del compressore																																															
Differenza di temperatura della banda morta (deltaC)	2.00 Domestic hot water setpoint temperature Always 55.0																																														
Temperatura minima di ingresso per il funzionamento del compressore (°C)	10.00																																														
Pressione del compressore	2.00bar																																														
Riscaldamento dell'acqua																																															
Portata d'acqua di riscaldamento (l/min)	Automatico																																														
Portata d'acqua di riscaldamento (m³/h)	Automatico																																														
Riscaldamento dell'acqua di ritorno																																															
Configurazione dell'acqua di ritorno	3-Flow, anti-logging																																														
Riscaldamento dell'acqua di ritorno																																															
Pressione di ritorno del ventilatore	2.00bar																																														
Riscaldamento dell'acqua di ritorno																																															
On cycle pump: electric power (W)	1.00																																														
On cycle pump: electric power (W)	1.00																																														
Pressione di ritorno del ventilatore del ciclo di ritorno	2.00bar																																														
	Caratteristiche generali della pompa di calore <table border="1"> <tr><td colspan="2">Generali</td></tr> <tr><td>Modello</td><td>ACS HP - PDC</td></tr> <tr><td>Capacità nominale di riscaldamento (kW)</td><td>90000.00</td></tr> <tr><td>COP nominale</td><td>5.700</td></tr> <tr><td>Stagione nominale del calore sensibile</td><td>0.000</td></tr> <tr><td colspan="2">Riscaldamento dell'acqua</td></tr> <tr><td>Temperatura nominale di ingresso dell'acqua di riscaldamento (°C)</td><td>7.00</td></tr> <tr><td>Temperatura nominale di uscita dell'acqua di riscaldamento (°C)</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Portata nominale dell'acqua di riscaldamento (m³/h)</td><td>1.100</td></tr> <tr><td colspan="2">Riscaldamento dell'acqua</td></tr> <tr><td>Temperatura nominale di ingresso dell'acqua nel condensatore (°C)</td><td>55.72</td></tr> <tr><td>Portata nominale dell'acqua nel condensatore (m³/h)</td><td>0.004</td></tr> <tr><td colspan="2">Riscaldamento dell'acqua</td></tr> <tr><td>Capacità di riscaldamento in funzione della temperatura</td><td>2.00 - ACS Curve della capacità in funzione della temper</td></tr> <tr><td>Capacità di riscaldamento in funzione della portata d'acqua</td><td>2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper</td></tr> <tr><td>COP di riscaldamento in funzione della temperatura</td><td>2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper</td></tr> <tr><td>COP di riscaldamento in funzione della portata d'acqua</td><td>2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper</td></tr> <tr><td>COP di riscaldamento in funzione della portata d'acqua</td><td>2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper</td></tr> <tr><td colspan="2">Riscaldamento dell'acqua</td></tr> <tr><td>Capacità di riscaldamento in funzione della temperatura</td><td>2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper</td></tr> <tr><td>Capacità di riscaldamento in funzione della portata d'acqua</td><td>2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper</td></tr> <tr><td>COP di riscaldamento in funzione della temperatura</td><td>2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper</td></tr> <tr><td>COP di riscaldamento in funzione della portata d'acqua</td><td>2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper</td></tr> </table>	Generali		Modello	ACS HP - PDC	Capacità nominale di riscaldamento (kW)	90000.00	COP nominale	5.700	Stagione nominale del calore sensibile	0.000	Riscaldamento dell'acqua		Temperatura nominale di ingresso dell'acqua di riscaldamento (°C)	7.00	Temperatura nominale di uscita dell'acqua di riscaldamento (°C)	0.00	Portata nominale dell'acqua di riscaldamento (m³/h)	1.100	Riscaldamento dell'acqua		Temperatura nominale di ingresso dell'acqua nel condensatore (°C)	55.72	Portata nominale dell'acqua nel condensatore (m³/h)	0.004	Riscaldamento dell'acqua		Capacità di riscaldamento in funzione della temperatura	2.00 - ACS Curve della capacità in funzione della temper	Capacità di riscaldamento in funzione della portata d'acqua	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper	COP di riscaldamento in funzione della temperatura	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper	COP di riscaldamento in funzione della portata d'acqua	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper	COP di riscaldamento in funzione della portata d'acqua	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper	Riscaldamento dell'acqua		Capacità di riscaldamento in funzione della temperatura	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper	Capacità di riscaldamento in funzione della portata d'acqua	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper	COP di riscaldamento in funzione della temperatura	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper	COP di riscaldamento in funzione della portata d'acqua	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper
Generali																																															
Modello	ACS HP - PDC																																														
Capacità nominale di riscaldamento (kW)	90000.00																																														
COP nominale	5.700																																														
Stagione nominale del calore sensibile	0.000																																														
Riscaldamento dell'acqua																																															
Temperatura nominale di ingresso dell'acqua di riscaldamento (°C)	7.00																																														
Temperatura nominale di uscita dell'acqua di riscaldamento (°C)	0.00																																														
Portata nominale dell'acqua di riscaldamento (m³/h)	1.100																																														
Riscaldamento dell'acqua																																															
Temperatura nominale di ingresso dell'acqua nel condensatore (°C)	55.72																																														
Portata nominale dell'acqua nel condensatore (m³/h)	0.004																																														
Riscaldamento dell'acqua																																															
Capacità di riscaldamento in funzione della temperatura	2.00 - ACS Curve della capacità in funzione della temper																																														
Capacità di riscaldamento in funzione della portata d'acqua	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper																																														
COP di riscaldamento in funzione della temperatura	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper																																														
COP di riscaldamento in funzione della portata d'acqua	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper																																														
COP di riscaldamento in funzione della portata d'acqua	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper																																														
Riscaldamento dell'acqua																																															
Capacità di riscaldamento in funzione della temperatura	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper																																														
Capacità di riscaldamento in funzione della portata d'acqua	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper																																														
COP di riscaldamento in funzione della temperatura	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper																																														
COP di riscaldamento in funzione della portata d'acqua	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper																																														
	Caratteristiche generali della pompa di calore <table border="1"> <tr><td colspan="2">Generali</td></tr> <tr><td>Modello</td><td>ACS HP - PDC</td></tr> <tr><td>Capacità nominale di riscaldamento (kW)</td><td>90000.00</td></tr> <tr><td>COP nominale</td><td>5.700</td></tr> <tr><td>Stagione nominale del calore sensibile</td><td>0.000</td></tr> <tr><td colspan="2">Riscaldamento dell'acqua</td></tr> <tr><td>Temperatura nominale di ingresso dell'acqua di riscaldamento (°C)</td><td>7.00</td></tr> <tr><td>Temperatura nominale di uscita dell'acqua di riscaldamento (°C)</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Portata nominale dell'acqua di riscaldamento (m³/h)</td><td>1.100</td></tr> <tr><td colspan="2">Riscaldamento dell'acqua</td></tr> <tr><td>Capacità di riscaldamento in funzione della temperatura</td><td>2.00 - ACS Curve della capacità in funzione della temper</td></tr> <tr><td>Capacità di riscaldamento in funzione della portata d'acqua</td><td>2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper</td></tr> <tr><td>COP di riscaldamento in funzione della temperatura</td><td>2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper</td></tr> <tr><td>COP di riscaldamento in funzione della portata d'acqua</td><td>2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper</td></tr> <tr><td>COP di riscaldamento in funzione della portata d'acqua</td><td>2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper</td></tr> <tr><td colspan="2">Riscaldamento dell'acqua</td></tr> <tr><td>Capacità di riscaldamento in funzione della temperatura</td><td>2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper</td></tr> <tr><td>Capacità di riscaldamento in funzione della portata d'acqua</td><td>2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper</td></tr> <tr><td>COP di riscaldamento in funzione della temperatura</td><td>2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper</td></tr> <tr><td>COP di riscaldamento in funzione della portata d'acqua</td><td>2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper</td></tr> </table>	Generali		Modello	ACS HP - PDC	Capacità nominale di riscaldamento (kW)	90000.00	COP nominale	5.700	Stagione nominale del calore sensibile	0.000	Riscaldamento dell'acqua		Temperatura nominale di ingresso dell'acqua di riscaldamento (°C)	7.00	Temperatura nominale di uscita dell'acqua di riscaldamento (°C)	0.00	Portata nominale dell'acqua di riscaldamento (m³/h)	1.100	Riscaldamento dell'acqua		Capacità di riscaldamento in funzione della temperatura	2.00 - ACS Curve della capacità in funzione della temper	Capacità di riscaldamento in funzione della portata d'acqua	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper	COP di riscaldamento in funzione della temperatura	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper	COP di riscaldamento in funzione della portata d'acqua	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper	COP di riscaldamento in funzione della portata d'acqua	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper	Riscaldamento dell'acqua		Capacità di riscaldamento in funzione della temperatura	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper	Capacità di riscaldamento in funzione della portata d'acqua	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper	COP di riscaldamento in funzione della temperatura	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper	COP di riscaldamento in funzione della portata d'acqua	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper						
Generali																																															
Modello	ACS HP - PDC																																														
Capacità nominale di riscaldamento (kW)	90000.00																																														
COP nominale	5.700																																														
Stagione nominale del calore sensibile	0.000																																														
Riscaldamento dell'acqua																																															
Temperatura nominale di ingresso dell'acqua di riscaldamento (°C)	7.00																																														
Temperatura nominale di uscita dell'acqua di riscaldamento (°C)	0.00																																														
Portata nominale dell'acqua di riscaldamento (m³/h)	1.100																																														
Riscaldamento dell'acqua																																															
Capacità di riscaldamento in funzione della temperatura	2.00 - ACS Curve della capacità in funzione della temper																																														
Capacità di riscaldamento in funzione della portata d'acqua	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper																																														
COP di riscaldamento in funzione della temperatura	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper																																														
COP di riscaldamento in funzione della portata d'acqua	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper																																														
COP di riscaldamento in funzione della portata d'acqua	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper																																														
Riscaldamento dell'acqua																																															
Capacità di riscaldamento in funzione della temperatura	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper																																														
Capacità di riscaldamento in funzione della portata d'acqua	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper																																														
COP di riscaldamento in funzione della temperatura	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper																																														
COP di riscaldamento in funzione della portata d'acqua	2.00 - ACS Curve della portata in funzione della temper																																														

Anche nel caso della pompa di calore per acqua calda sanitaria sono state definite le curve caratteristiche di prestazione di:

- capacità in riscaldamento in funzione della temperatura (Figura 135);
- COP di riscaldamento in funzione della temperatura (Figura 136);
- correlazione al carico parziale (Figura 137),

come fatto in precedenza per il sistema di riscaldamento e di raffrescamento.

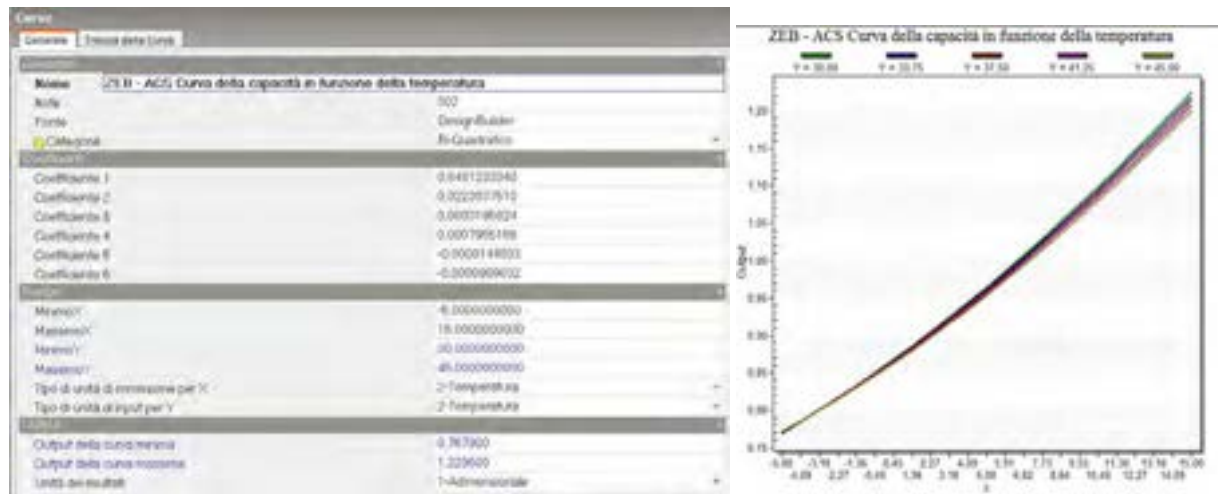


Figura 135. Coefficienti e andamento della curva della capacità in funzione delle temperature caratteristica della pompa di calore per acqua calda sanitaria

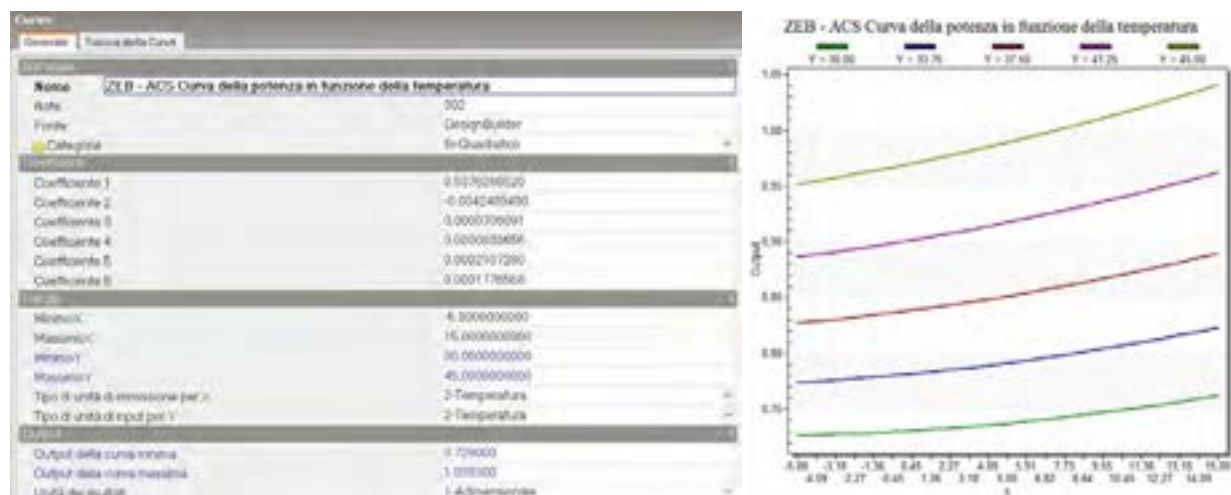


Figura 136. Coefficienti e andamento della curva del COP in funzione delle temperature caratteristica della pompa di calore per acqua calda sanitaria

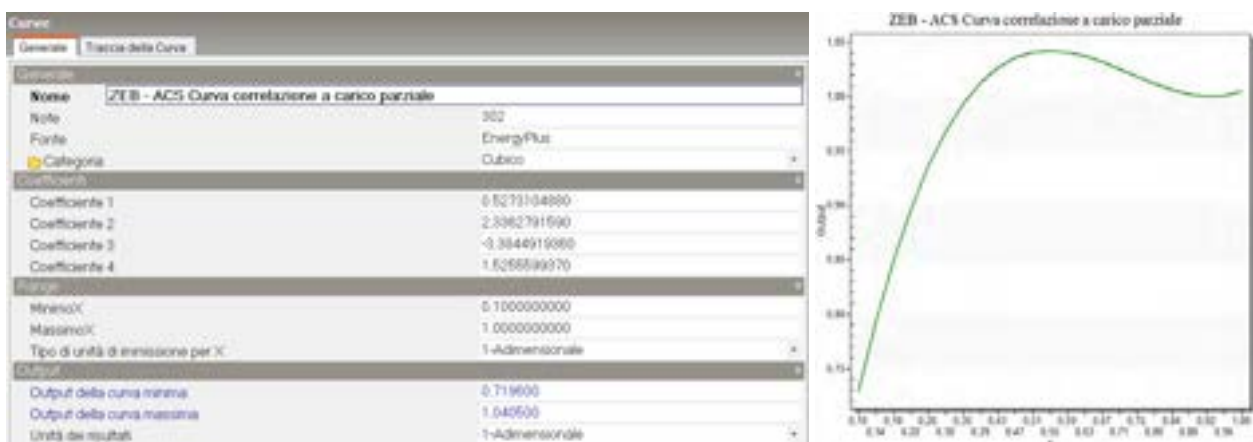


Figura 137. Coefficienti e andamento della curva di correlazione al carico parziale caratteristica della pompa di calore per acqua calda sanitaria

Anche per il solare termico sono stati implementati gli appositi settaggi per ciascun componente del sistema impiantistico e ciascun collettore solare (Tabella 81)

Tabella 81. Caratteristiche del circuito solare per la produzione di acqua calda sanitaria e dettaglio dei singoli componenti

	Circuito idronico Generale Nome: Circuito Solare Tipo di fluido: 2-Glicole Etilenico Concentrazione di glicole: 0.050 Volume del circuito idronico (mc): Autocalcolato Tipo di Flusso: Tipo di flusso del circuito idronico: 2-Portata variabile Temperatura: Massima temperatura del circuito (°C): 100.00 Minima temperatura del circuito (°C): 0.00 Portata: Massima portata del circuito (mc/s): Autosize Minima portata del circuito (mc/s): 0.000000 Schema di ripartizione del carico: 1-Sequenziale Schema di calcolo del circuito idronico di Distribuzione: 1-Unico Punto Di Regolazione Protezione Temperatura: ☐ Protezione temperatura bassa ☒ Protezione temperatura alta Temperatura sopra la quale il sistema è off (°C): 90.00 Termostato differenziale: ☒ Termostato differenziale Differenza di temperatura per attivare il sistema (deltaC): 10.00 Differenza di temperatura per disattivare il sistema (deltaC): 2.00 Differenza minima: Temperatura di mandata di progetto del circuito (°C): 80.00 Differenza di temperatura di progetto del circuito (deltaC): 10.00 Funzionamento: ☒ Programma di disponibilità: On 24/7
	Recupero del calore (dimensionamento) Generale Nome: Circuito Solare Recupero del Calore Tipo: 1-fluido Volume del circuito (mc): Autocalcolato ☒ Collegamento all'impianto di riscaldamento esistente Tempo indotto di recupero del riscaldamento dell'acqua (s): 1.00 ☒ Programma della temperatura di setpoint Differenza di temperatura alla banda morta (deltaC): 6.00 Limite di temperatura massima (°C): 100.00 ☒ Programma di temperatura di riferimento Indicatore di temperatura ambiente: 1-Programmato ☒ Programma della temperatura ambiente Costante di feedback (s): 1.00 Coefficiente di perdita quando acceso alla temperatura ambiente (mK): 1.00 Coefficiente di perdita quando spento alla temperatura ambiente: 1.00 ☒ Elementi interni di recupero calore
	Collettori Nome: Solar Collector 1 Portata massima (mc/s): 0.0000500 Superficie del Collettore Solare: Superficie del collettore solare: Collettore solare 2 Controllo: ☐ Sensore termostato differenziale del nodo caldo Ripartizione: ☒ Template prestazioni collettore solare: ACR Solar International 10-01 Area lorda (solare con cornice in alluminio) (mq): 0.902500 Portata test (mc/s): 0.000002 Tipo di circolazione test: 1-Attivo Coefficients equation del rendimento: Coefficiente 1: 0.603000 Coefficiente 2 (W/mq.K): -3.8665000 Coefficiente 3 (W/m2.K2): 0.0015000 Coefficients di Correzione Angolo d'incidenza: Coefficiente 1: 1 Coefficiente 2: -0.194400

7.2.4 Definizione dell'impianto fotovoltaico

Per quanto riguarda l'impianto fotovoltaico, esso riveste una notevole importanza nel perseguire l'obiettivo ZEB o netZEB. La sua determinazione nell'edificio plurifamiliare pone soprattutto il problema dello spazio di installazione disponibile, generalmente limitato alla copertura, il che comporta una certa difficoltà nel raggiungere una producibilità annua tale da sopperire all'intero fabbisogno. Il tutto è ancor più complesso se si pensa alla valutazione del fabbisogno secondo un periodo di riferimento mensile.

Per la definizione dell'impianto fotovoltaico si è pensato ad una soluzione con i pannelli fotovoltaici esclusivamente in copertura (Figura 138), definendo un sistema dotato di accumulo con efficienza energetica nominale pari al 70% e inverter con efficienza al 95%.

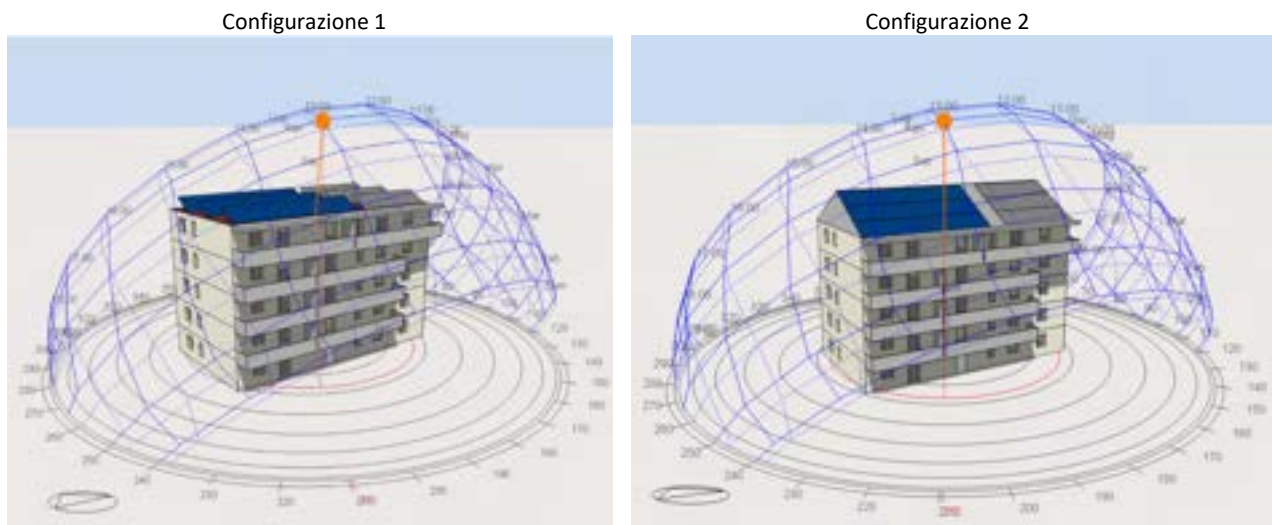


Figura 138. Rappresentazione dei pannelli fotovoltaici (in blu) posti in copertura nelle due configurazioni di edificio plurifamiliare e diagramma solare e ombreggiamento relativo ad un giorno tipico di agosto (ore 13:00, 3 Agosto, zona climatica D)

Nella scheda "Generazione" (Figura 139) sono stati definiti i pannelli fotovoltaici rappresentati in copertura, associando le caratteristiche precedentemente descritte (Tabella 63, par. 7.1.3) e ispirate a modelli realmente disponibili sul mercato, collegandoli ad un sistema di accumulo. La superficie dedicata in entrambe le configurazioni è di circa 94 m² con una potenza di picco totale pari a 19,24 kW.



Figura 139. Settaggi relativi ai dati di input dei moduli fotovoltaici e dell'accumulo

7.3 *Analisi degli output di simulazione in dettaglio – Edificio Plurifamiliare*

Per “testare” il funzionamento del modello costruito e tutti i parametri implementati, lo studio si è svolto in maniera iterativa e ciò ha portato ad una serie di simulazioni intermedie e analisi di dettaglio per comprendere il comportamento degli edifici e verificare che tutte le informazioni inserite fossero corrette. Ciò è stato fatto sia in fase decisionale/progettuale per appurare la correttezza di tutte le scelte fatte, sia in fase di analisi finale per un controllo maggiore su tutti i risultati forniti successivamente in dati aggregati (come illustrato in seguito nel cap. 8).

L’analisi di dettaglio ha riguardato singole zone o l’edificio nella sua totalità e periodi temporali differenti (dalle settimane tipiche e di progetto estive e invernali, alle intere stagioni di riscaldamento e raffrescamento), in modo da ottenere un quadro chiaro ed esaustivo del comportamento del sistema edificio-impianto.

A titolo esemplificativo si analizzeranno, in questa sede, le considerazioni svolte per il modello di edificio plurifamiliare configurazione 1 in zona climatica D, attraverso dei grafici utili a verificare se le condizioni impostate impiantistiche e ambientali siano o meno rispettate durante le ore di occupazione dell’edificio. Inoltre, è stato studiato il funzionamento di schedule e profili impostati oltre al corretto funzionamento dei vari sistemi impiantistici. Tali controlli, di cui si forniscono soltanto degli spunti, sono stati comunque eseguiti per tutti i modelli di edificio plurifamiliare implementati nelle differenti zone climatiche e per le due diverse configurazioni (per ulteriori approfondimenti in merito è possibile consultare l’Allegato 1, nel quale vengono presentati i singoli casi e i risultati essenziali conseguiti).

A livello di involucro, sono state studiate le singole componenti del fabbisogno termico, dispersioni attraverso l’involucro, ventilazione naturale, apporti interni e apporti solari.

Per quanto riguarda questi ultimi, è stata studiata la variazione degli apporti attraverso le finestre, fortemente condizionata dal sistema di schermature e di oscuramento adottato, che incide notevolmente sul bilancio termico dell’edificio. Tale variazione è profondamente influenzata dall’esposizione degli alloggi stessi e dalla scelta di massimizzare gli apporti solari durante l’inverno (Figura 140) e minimizzarli in estate (Figura 141).

In Figura 140, in dettaglio, è riportato l’andamento dei guadagni termici attraverso le aperture durante due giorni tipici invernali degli alloggi più significativi, ovvero gli alloggi A e A’ a piano terra, tutti gli alloggi del secondo piano, ossia quello posto in posizione intermedia, e gli alloggi C e C’ del piano attico.

Si può notare come gli alloggi C e C’ siano quelli con i maggiori guadagni termici, in quanto posti al piano più alto. Gli altri alloggi risentono, invece, dei balconi presenti, mentre i sistemi di ombreggiamento integrati alle finestre hanno un funzionamento ridotto al minimo durante i mesi invernali, coerentemente con quanto impostato in sede di definizione del modello.

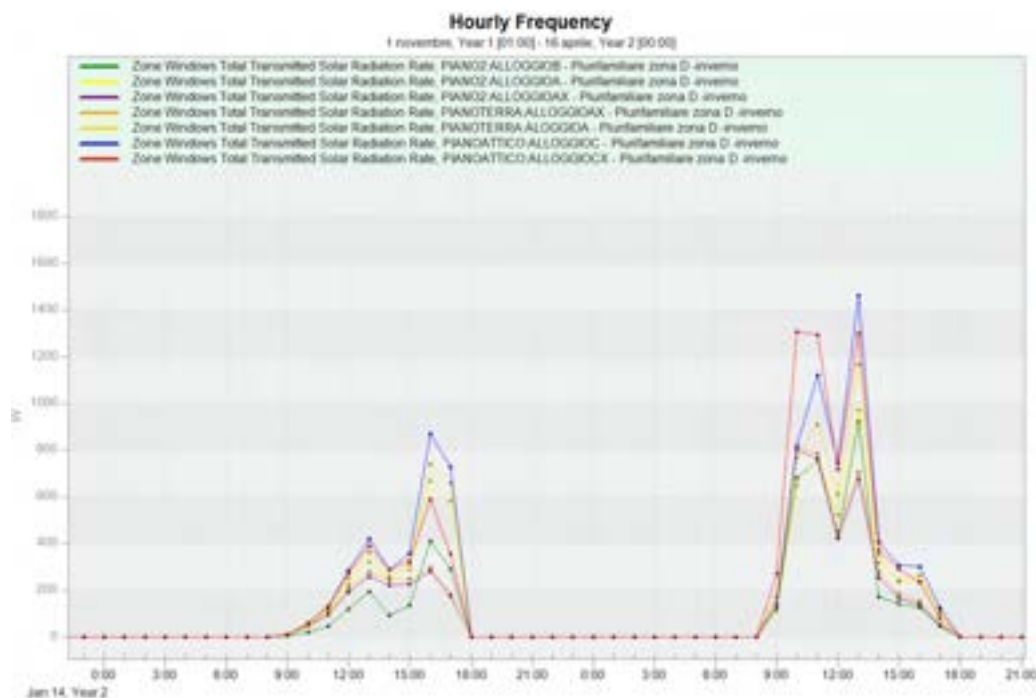


Figura 140. Apporti solari attraverso le finestre degli alloggi più significativi, nei giorni 14 e 15 Gennaio, con la limitazione al minimo dei sistemi di schermatura, dotati di sistema di controllo della radiazione diretta e diffusa (modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D)

In (Figura 141), gli apporti solari, registrati in due giorni tipici estivi, risultano minimi in quanto è stato ottimizzato l'utilizzo delle schermature integrate nelle finestre, aidate dalla presenza di aggetti che favoriscono l'ombreggiamento. Ciò è di fondamentale importanza per contenere i fabbisogni di raffrescamento durante i periodi più caldi. Ovviamente l'entità degli apporti è influenzata dalle superfici vetrate e dall'esposizione dei vari alloggi e non soltanto dalla loro localizzazione nei differenti piani dell'edificio. Inoltre, gli apporti solari subiscono dei picchi nelle prime ore della mattina e all'imbrunire, quando l'inclinazione dei raggi solari è più bassa e quindi la radiazione penetra maggiormente all'interno degli ambienti.

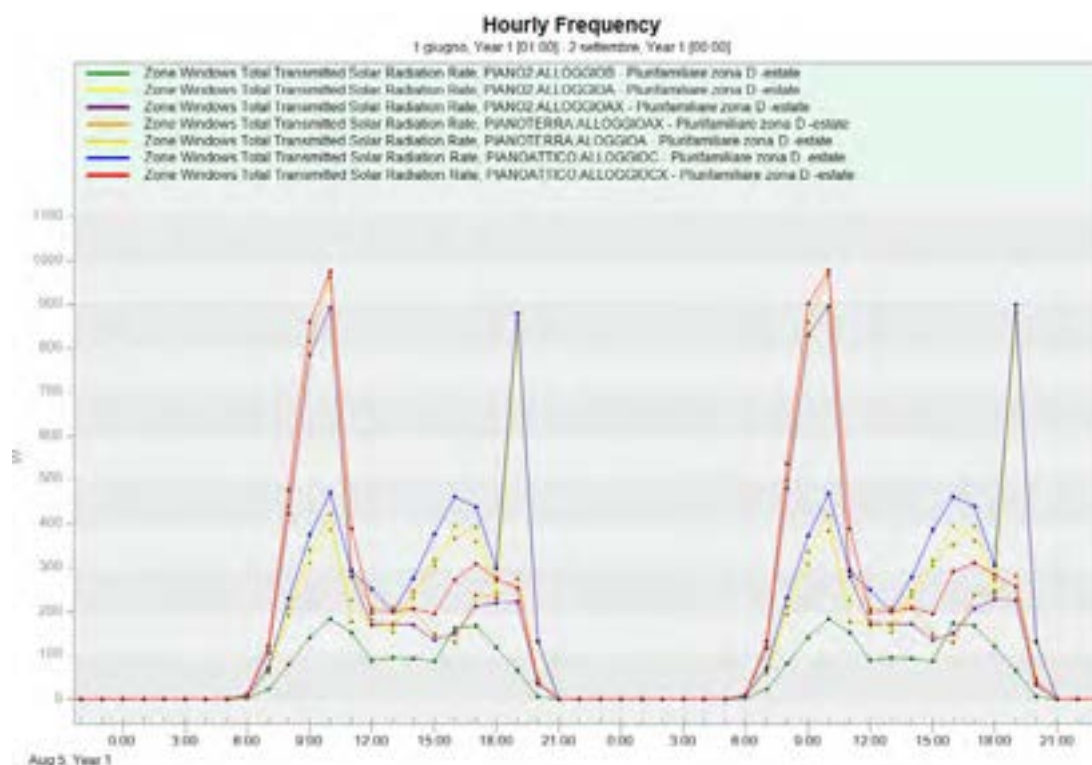


Figura 141. Apporti solari attraverso le finestre degli alloggi più significativi, nei giorni 5 e 6 Agosto, con l'utilizzo di un sistema di oscuramento esterno tipo brise soleil, orientabile con controllo della radiazione solare (modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D)

In Figura 142 è riportata, nel primo grafico, la variazione oraria di temperatura in ogni alloggio considerato (grafico in alto) durante la settimana di progetto invernale (11-19 gennaio). La distribuzione di temperatura è influenzata dall'orientamento dei singoli alloggi e dalla loro esposizione verso l'ambiente esterno (soprattutto al piano terra e al piano attico), in cui si registrano maggiori dispersioni da parte dell'involucro. Si nota come il profilo di ventilazione naturale impostato, analizzato mediante la variabile *zone ventilation air change rate* (grafico in basso, Figura 142), influisca sulle temperature interne, provocandone un abbassamento quando viene garantito il ricambio d'aria. Si ricorda che la ventilazione naturale non si attiva per temperature inferiori a 22 °C, tranne che durante la mattina quando viene comunque garantito il ricambio d'aria.

Non si registra, tuttavia, la presenza di ore di discomfort⁴ durante le ore di occupazione (grafico centrale): la temperatura decresce, infatti, durante le ore di apertura, ma si mantiene al di sopra dei 18 °C e in ogni caso all'interno dei limiti accettabili delle condizioni di comfort.

⁴ Le ore di discomfort vengono calcolate dal software riferendosi ai limiti definiti dal metodo ASHRAE Standard 55 [40 e 41]. Per una valutazione dettagliata del comfort secondo normativa italiana (non oggetto di questo studio) si dovrebbe far riferimento alla norma UNI EN ISO 7730, "Ergonomia degli ambienti termici. Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale".

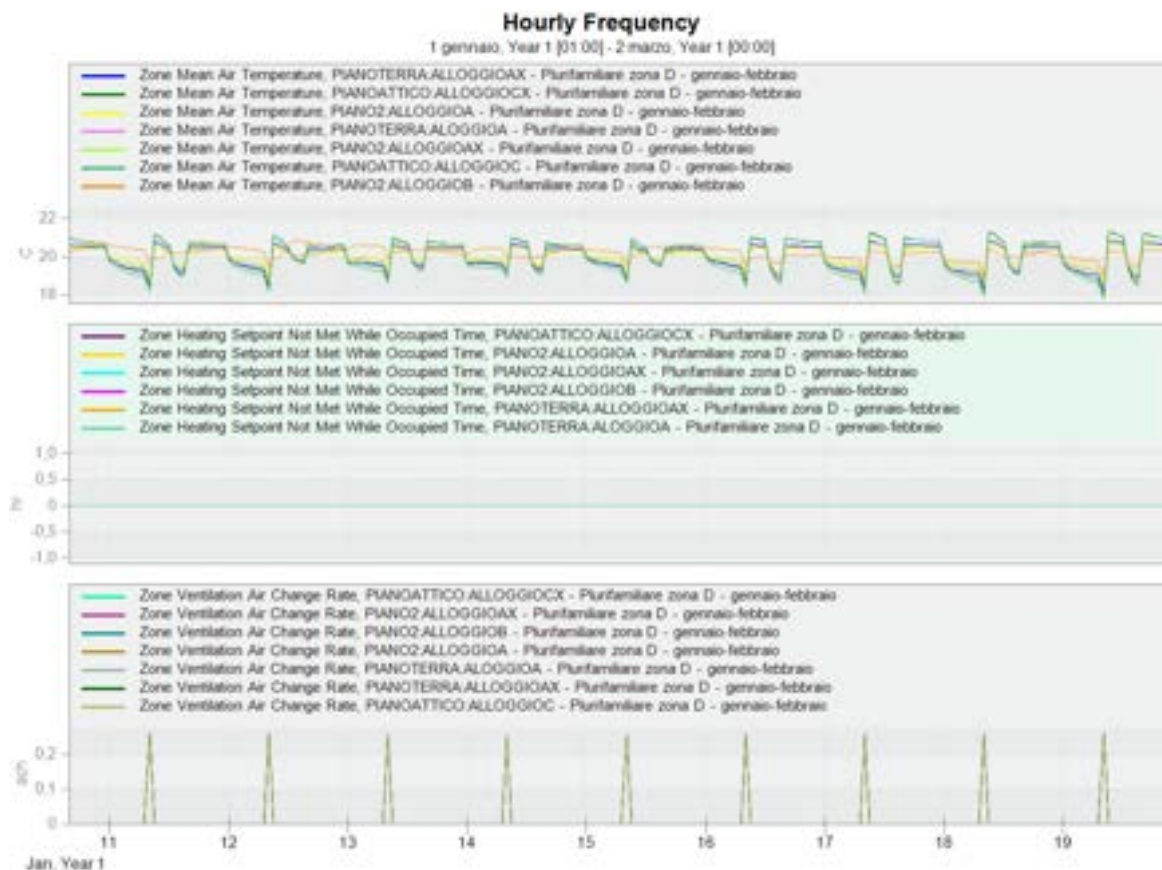


Figura 142. Grafico della temperatura media dell'aria negli alloggi più significativi, delle ore di discomfort e del funzionamento della ventilazione naturale invernale impostato (modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D – settimana invernale di progetto)

Tali considerazioni vanno di pari passo con alcune riflessioni in merito al funzionamento del sistema di climatizzazione invernale. L'analisi della performance della pompa di calore in riscaldamento consente di verificarne il corretto funzionamento e la sua coerenza con lo schedule programmato e con la variazione di temperatura in ogni alloggio.

Dal terzo grafico in Figura 143, in aggiunta alle considerazioni precedenti, si evidenzia come la pompa di calore cui è stata assegnata la priorità lavori con dei picchi di energia assorbita in accensione ed assolve alla sua funzione durante tutto il periodo di utilizzo, coerentemente con il profilo giornaliero impostato. Le altre due pompe si attivano soltanto in caso di bisogno per riportare la temperatura ai 20°C di progetto, coerentemente con quanto impostato nel profilo di utilizzo del sistema di riscaldamento.

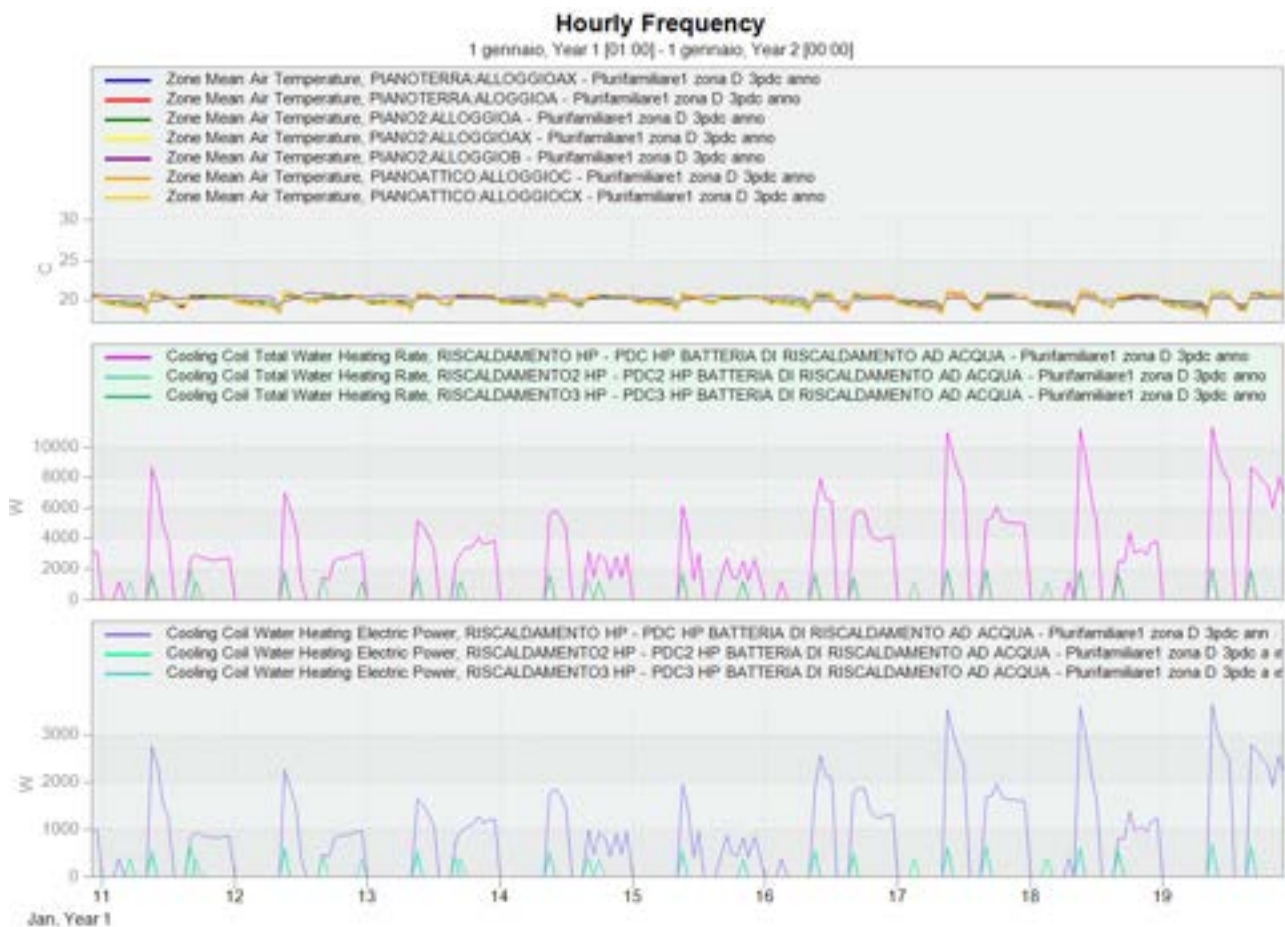


Figura 143. Variazione della temperatura media dell'aria in ciascun ambiente e funzionamento delle pompe di calore in riscaldamento in termini di energia e potenza (modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D – settimana invernale di progetto)

Inoltre, è stato possibile controllare che le pompe di calore rispettino le curve di prestazione precedentemente definite (variazione di capacità di riscaldamento in funzione della temperatura, variazione del COP in funzione della temperatura e di correlazione a carico parziale), ricavando l'andamento dei coefficienti implementati nelle curve stesse. Come si nota, la prima pompa di calore, nel caso in Figura 144, riesce a lavorare ad un carico maggiore del 50% coerentemente con il profilo di riscaldamento impostato, come si evince dalla variabile *Performance Curve Input Variable 1 Value*, e ciò rende la pompa di calore stessa altamente efficiente, in quanto il COP in riscaldamento resta generalmente performante con percentuali di carico parziali comprese tra il 40 e il 100%. Se si confrontano i valori di COP ottenuti in fase di simulazione ad una certa temperatura esterna di riferimento con i dati nominali e conoscendo la percentuale di carico parziale a cui la pompa lavora, si può agevolmente verificare che il valore di COP della pompa simulata corrisponda a quello nominale (Figura 145).

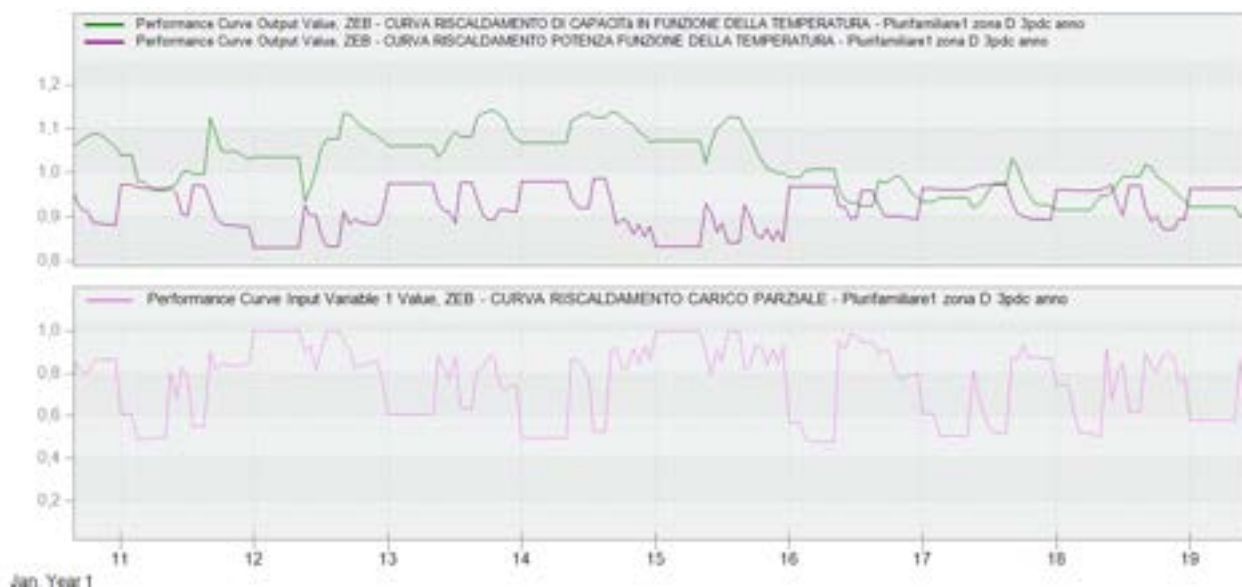


Figura 144. Andamento delle curve di performance per la pompa di calore in modalità riscaldamento (modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D – settimana invernale di progetto).

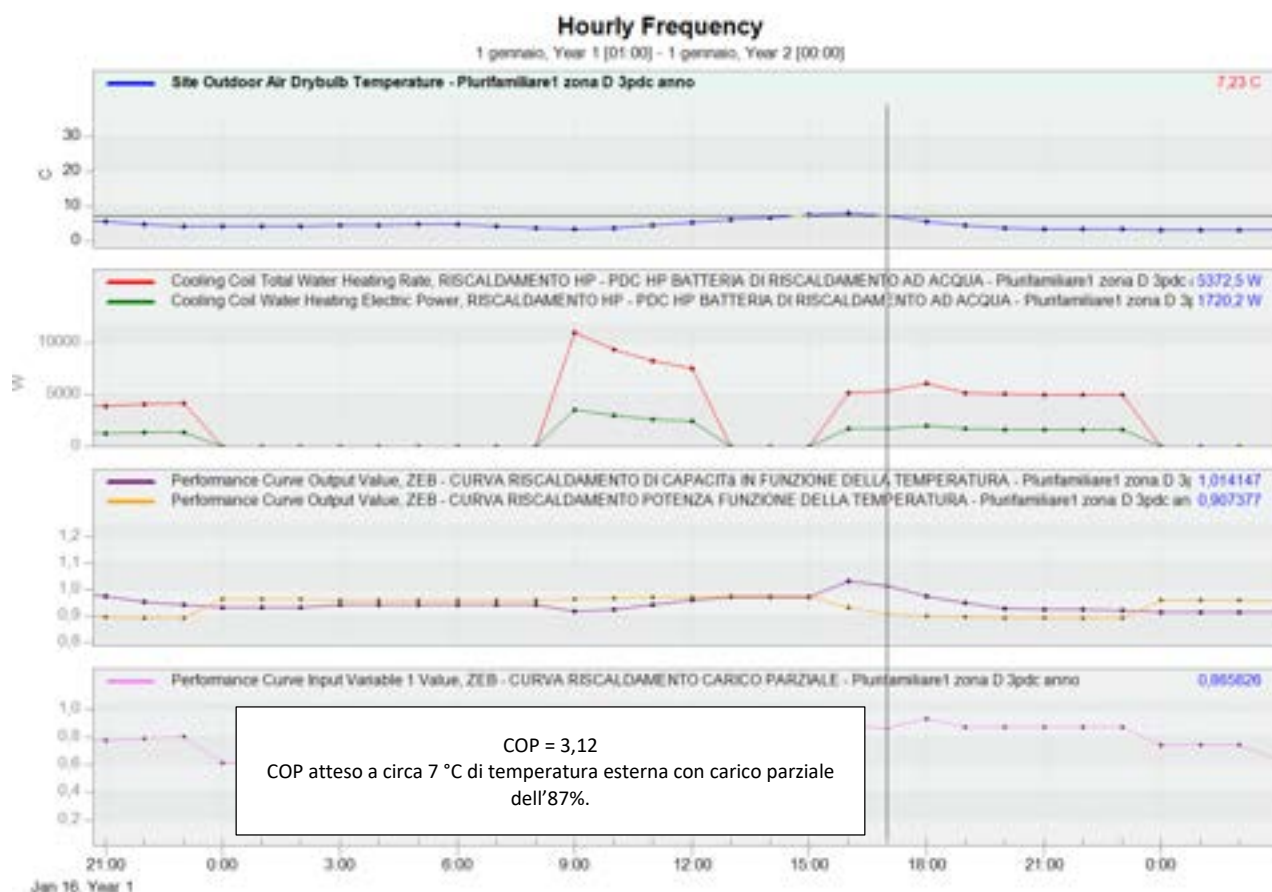


Figura 145. Esempio di verifica del COP della macchina in un giorno invernale tipico

A questo proposito si riporta a titolo di esempio un'elaborazione dell'andamento del COP delle tre pompe di calore implementate per il riscaldamento durante il mese di gennaio (Figura 146).

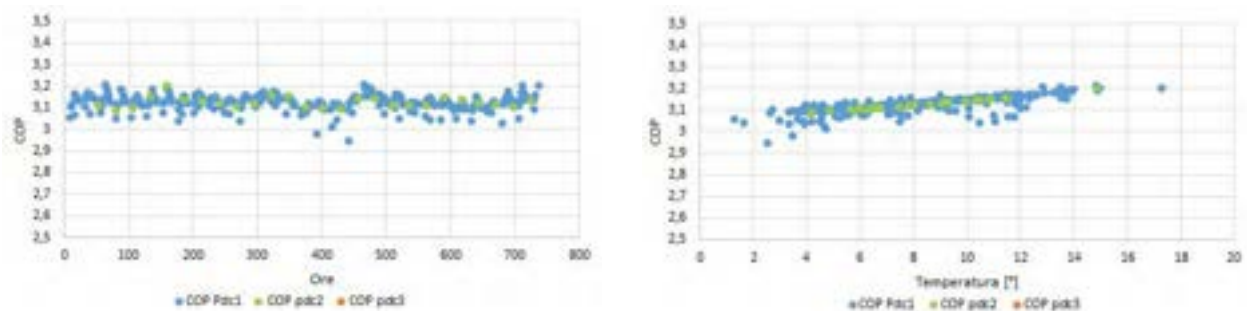


Figura 146. Andamento del COP delle pompe di calore implementate in funzione della temperatura e delle ore durante il mese di gennaio (modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D)

Coerentemente con le curve implementate si nota come il COP della macchina sia più basso man mano che la temperatura esterna si riduce; inoltre, esso varia nel tempo mantenendosi in un range compreso tra 3 e 3,2. Si nota anche che non tutte le pompe di calore lavorano insieme e a pieno regime (si tenga conto che il generatore 1 è stato impostato con priorità rispetto agli altri).

Analogamente, in Figura 147, si è analizzato e verificato il funzionamento della pompa di calore per il raffrescamento, mettendolo in relazione con le temperature medie in ciascun alloggio (*zone mean air temperature*) e le ore nelle quali non è verificato il set-point di raffrescamento durante le ore di occupazione (*zone cooling setpoint not met while occupied time*). Tale condizione si verifica per una minima frazione di ore nelle settimane più calde. La situazione diventa più critica nei giorni più caldi dell'anno, ma risulta comunque accettabile. Le ore di discomfort sono per lo più dovute al fatto che il sistema di raffrescamento si attiva coerentemente con il profilo di utilizzo e non in base all'andamento delle temperature interne. Si è preferito, infatti, assumere un profilo realistico di utilizzo, limitato a determinate ore nell'arco della giornata. Il risultato è stato comunque ritenuto valido in quanto la temperatura interna (*zone mean air temperature*) si mantiene all'incirca nei 2°C di tolleranza e di attenuazione impostati per i set-point di temperatura in raffrescamento ($26\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$). Inoltre, le ore di discomfort coincidono con le prime ore della mattina, quando il profilo di occupazione è impostato circa al 20% e soltanto per una media di ore non superiore all'unità nel corso della giornata. Dalla variabile *chiller evaporator cooling energy*, si può notare come i primi due generatori forniscano la maggior parte dell'energia di raffrescamento necessaria nei giorni più caldi, mentre il terzo generatore sopprime al restante fabbisogno.

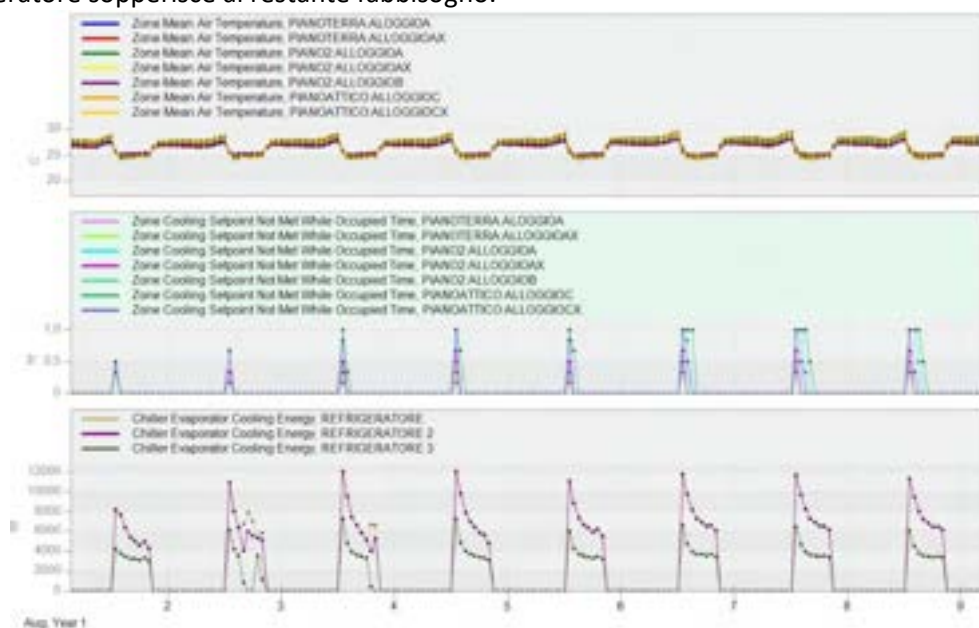


Figura 147. Funzionamento della pompa di calore nella stagione estiva, verifica della temperatura media dell'aria e delle ore di discomfort (modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D – settimane estive di progetto)

Infine, si nota come, durante le giornate più calde dell'anno, le ore di discomfort si verificano al termine del periodo settato per il ricambio d'aria mattutino e poco prima dell'accensione della pompa stessa (Figura 148).



Figura 148. Verifica dell'andamento delle temperature medie dell'aria, delle eventuali ore di discomfort e della coincidenza con il profilo di ventilazione negli alloggi più significativi durante la settimana estiva di progetto (modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D)

Anche nel caso del sistema di raffrescamento, è possibile fare delle considerazioni sulla performance della pompa di calore. Come si vede dal grafico in Figura 149, l'EER delle tre pompe varia notevolmente nel corso della giornata, di pari passo con la variabilità delle condizioni esterne e del fabbisogno di raffrescamento. I generatori 1 e 2 sono sicuramente i più performanti, raggiungendo un valore di EER medio di 2,7 (rispetto al valore nominale di 2,9), mentre il generatore n. 3, che sopperisce soltanto ad una piccolissima parte del fabbisogno in raffrescamento fornisce una prestazione al di sotto di quella standard. Si tenga conto che tale criticità è dovuta all'aver previsto una potenza totale installata in raffrescamento derivante da calcolo in regime semi-stazionario e pertanto sovradimensionata se valutata in regime dinamico.

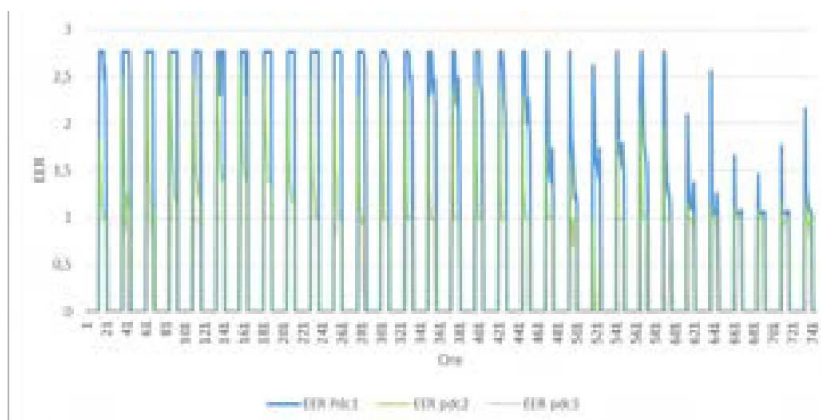


Figura 149. Andamento degli EER delle tre pompe di calore per il mese di agosto (modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D)

Per quanto riguarda il sistema di produzione di acqua calda sanitaria, sono state verificate portate e temperature in più punti o nodi strategici dello schema di impianto, sia durante il periodo estivo che durante quello invernale.

In Figura 150 si nota il corretto funzionamento del circuito per la produzione dell'acqua calda sanitaria durante due delle settimane estive più calde. Il primo grafico, con l'andamento orario della variabile *water heating electric power*, indica chiaramente che la pompa di calore dedicata alla produzione di ACS è spenta, in quanto il solare termico sopperisce alla richiesta. Nel secondo grafico, l'andamento della portata al gruppo di uscita risulta coerente con la richiesta programmata sull'apposito schedule, ulteriore conferma del corretto funzionamento. Dal terzo grafico, è possibile verificare che la temperatura dell'acqua in uscita è correttamente pari a 55 °C e si andrà successivamente a miscelare con l'acqua fredda al momento dell'erogazione.

Pertanto, è possibile dedurre che l'impianto solare termico funziona correttamente e la temperatura del nodo in uscita dai collettori solari varia, a seconda delle ore del giorno, da valori massimi di circa 100 °C nelle ore diurne a valori minimi prossimi ai 20 °C nelle ore notturne.



Figura 150. Verifica del funzionamento dell'impianto solare termico – estate (modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D – 1-15 Agosto)

Ad ulteriore verifica di quanto detto si vede come la temperatura dell'accumulo dedicato all'acqua calda sanitaria si attesti esso stesso attorno ai 58°C (Figura 151).

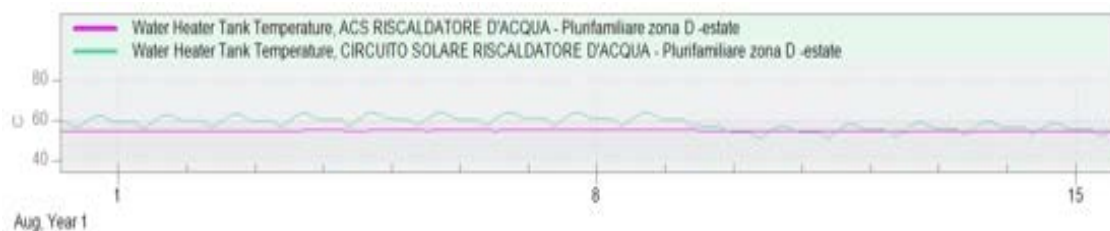


Figura 151. Temperature interne agli accumuli per ACS (modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D – 1-15 Agosto)

La situazione cambia, invece, durante il periodo invernale. In questo caso, la pompa di calore è necessaria e ed entra in funzione (grafico in alto in Figura 152), in quanto il solare termico non riesce a garantire la produzione necessaria di acqua calda sanitaria. Le portate e la temperatura in uscita, sempre pari a 55°C come programmata, sono quindi garantite dal generatore, mentre la temperatura in uscita dai collettori solari non riesce a superare temperature di 50 °C se non in pochissimi giorni e per un breve periodo di tempo, condizione non sufficiente a riscaldare l'accumulo (grafico in basso in Figura 152).

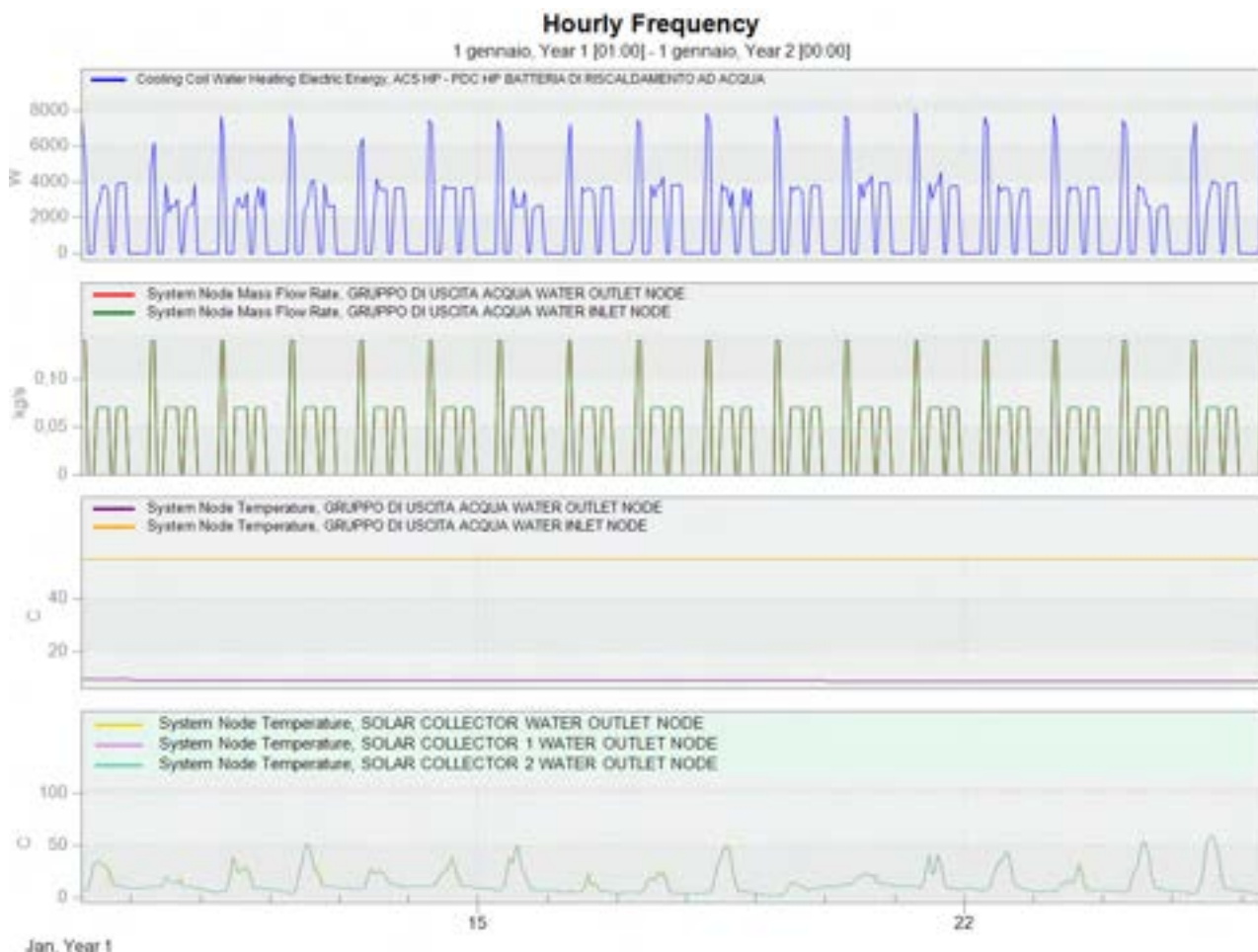


Figura 152. Verifica del funzionamento dell'impianto solare termico – inverno (modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D – 1-15 Gennaio)

Infine, per quanto riguarda la produzione di energia elettrica da fotovoltaico, si riscontra una differenza sostanziale negli andamenti estivo e invernale in termini di continuità di produzione e producibilità dell'impianto espressa in Watt, coerentemente con l'andamento stagionale della radiazione solare (Figura 153).

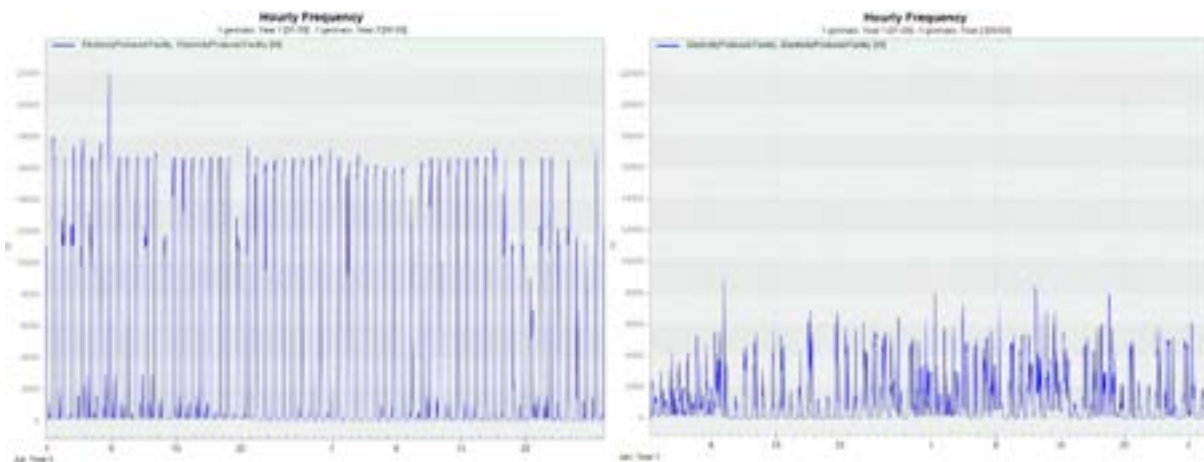


Figura 153. Confronto tra la produzione di energia elettrica, in simulazione estiva (mesi di luglio e agosto) ed invernale (mesi di gennaio e febbraio) - modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D

8 Risultati energetici per l'edificio plurifamiliare nelle diverse zone climatiche

A seguito delle analisi in dettaglio degli output rivenienti da simulazione, è stato possibile ricavare i risultati in forma aggregata riguardanti i fabbisogni termici degli edifici, i fabbisogni energetici e alcune considerazioni sull'efficienza degli impianti implementati. Ciò ha consentito di effettuare dei confronti interessanti dei comportamenti e delle prestazioni ottenute dalle due differenti configurazioni analizzate nelle diverse zone climatiche. Obiettivo sostanziale di tutte le analisi è stata, quindi, la determinazione della prestazione energetica dell'edificio e la verifica del raggiungimento dell'obiettivo ZEB, sia su base mensile che su base annuale, durante le stagioni considerate di riscaldamento e raffrescamento.

8.1 Valutazione del fabbisogno termico

Il primo passo verso la determinazione della prestazione energetica dell'edificio e la verifica dell'obiettivo ZEB è sicuramente la valutazione e l'analisi dei fabbisogni termici di involucro, che determinerà di conseguenza il consumo energetico dell'edificio.

La lettura critica e la rielaborazione degli output ottenuti in simulazione per tutti i modelli ha consentito di valutare l'incidenza di tutti i contributi suddivisi per macro categorie (involucro, ventilazione, apporti solari e occupazione) sul bilancio globale dell'edificio in esame, andandone a determinare il comportamento nelle varie zone climatiche sia durante l'inverno che durante l'estate.

I bilanci termici invernali sono stati ricavati nel periodo di riferimento come definito per norma e variabile zona per zona (Tabella 17, par. 4.3), mentre i bilanci termici estivi, in mancanza di una normativa specifica di riferimento, sono stati calcolati per un periodo unico per tutte le zone climatiche da inizio giugno a fine settembre.

L'analisi dei risultati ottenuti ha permesso di effettuare delle considerazioni di confronto tra le differenti configurazioni adottate e le diverse località scelte per le simulazioni. Inoltre, è stato possibile calcolare il bilancio normalizzato per superficie utile, al fine di ottenere dati più fruibili sulle dispersioni e sugli apporti termici valutati.

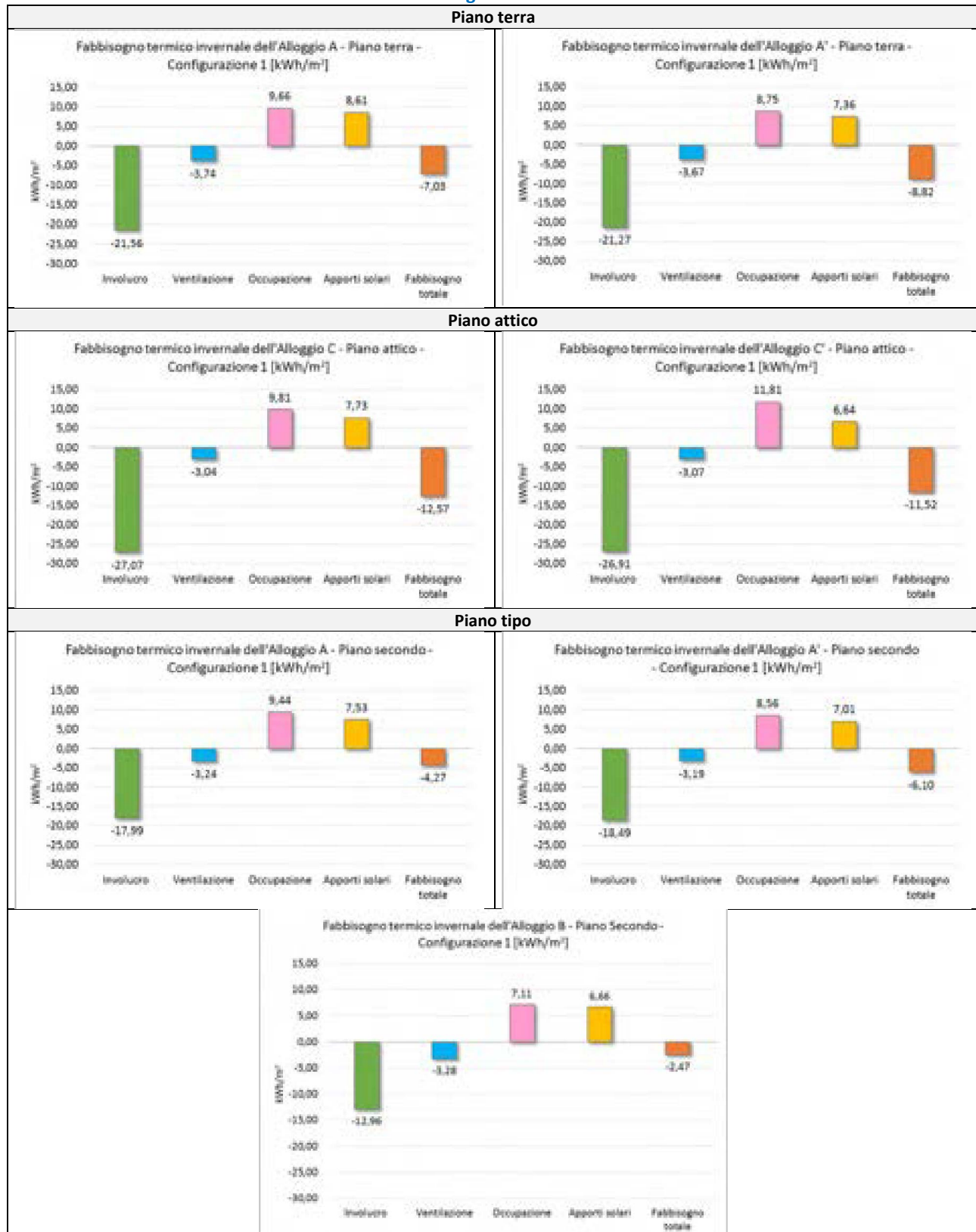
Si precisa che i valori negativi indicano il flusso di calore uscente, quelli positivi il flusso di calore entrante nell'edificio.

Prima di presentare i risultati aggregati dell'edificio relativi alle diverse configurazioni nelle differenti zone climatiche e per i periodi di riscaldamento e di raffrescamento analizzati, è doveroso precisare che i vari alloggi all'interno dell'edificio plurifamiliare, se analizzati singolarmente, differiscono notevolmente riguardo ai fabbisogni termici. Ciò è dovuto alle differenti esposizioni e localizzazioni degli appartamenti nell'edificio stesso. A titolo esemplificativo di quanto detto, si riportano i fabbisogni termici totali relativi al periodo di

riscaldamento e raffrescamento degli alloggi significativi per la zona climatica D – configurazione 1 (Tabella 82 e Tabella 83).

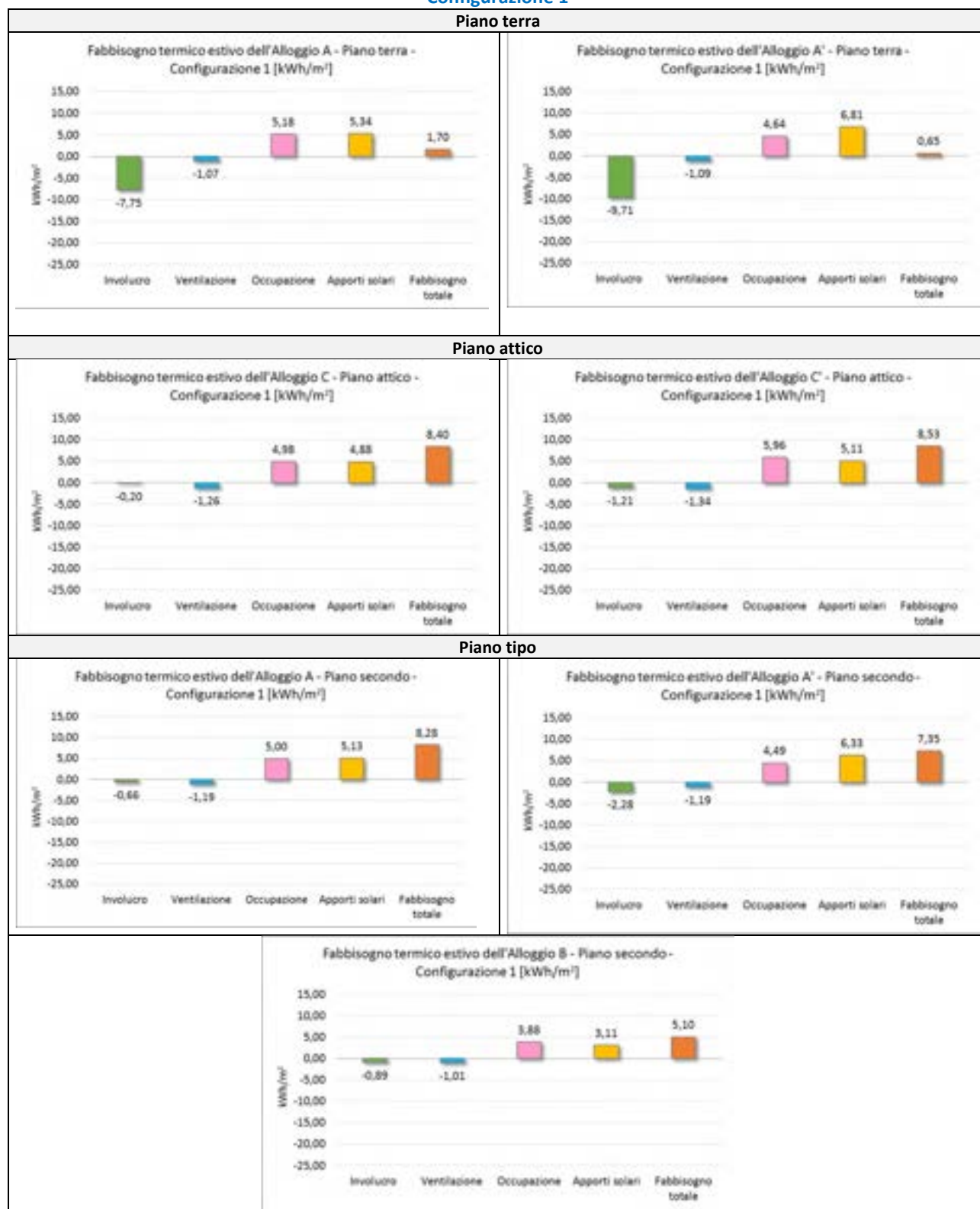
I fabbisogni invernali degli alloggi a piano terra e in copertura risultano maggiori rispetto a quelli degli alloggi collocati nei piani intermedi (Tabella 82).

Tabella 82. Fabbisogni termici invernali di differenti alloggi dell'edificio plurifamiliare in zona climatica D - Configurazione 1



Ciò è principalmente dovuto alla maggiore superficie disperdente verso l'esterno e all'esposizione solare differente per ciascun alloggio. Gli alloggi ai piani intermedi, invece, sfruttano la loro posizione centrale tra ambienti riscaldati al piano inferiore e superiore: significativo è il caso dell'alloggio B che presenta un fabbisogno termico invernale minimo in quanto, oltre ad essere posto in un piano intermedio, risulta essere anche l'alloggio più piccolo e totalmente esposto a Sud.

Tabella 83. Fabbisogni termici estivi di differenti alloggi dell'edificio plurifamiliare in zona climatica D - Configurazione 1



La situazione si ribalta in estate (Tabella 83). Gli alloggi più favorevoli sono quelli presenti a piano terra, che sfruttano il contatto con il terreno come strategia passiva di raffrescamento. Penalizzati, invece, risultano gli alloggi ai piani intermedi e quelli in copertura. Le stesse considerazioni sono tuttavia estendibili a tutte le zone climatiche.

Di seguito vengono presentati i risultati aggregati dell'edificio relativi ai diversi casi analizzati e per i periodi di riscaldamento e di raffrescamento analizzati.

In zona climatica A-B (località Palermo), si può notare come il fabbisogno invernale, calcolato sul periodo 1 dicembre – 31 marzo, sia quasi nullo in entrambe le configurazioni (Figura 154), con un discreto miglioramento nel caso della configurazione 2 (2,77 kWh/m² per la configurazione 1 e 1,52 kWh/m² per la configurazione 2). Gli apporti solari e di occupazione compensano le dispersioni di involucro e le perdite per ventilazione, che in inverno sono ridotte al minimo.

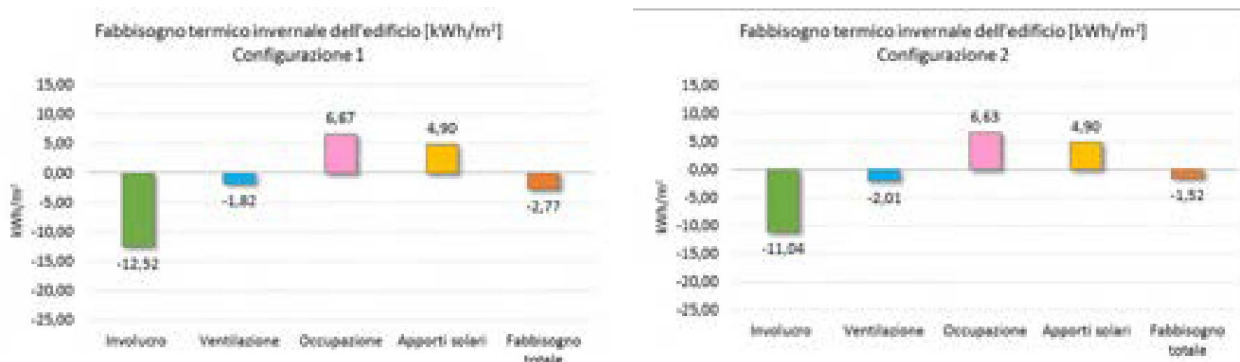


Figura 154. Edificio plurifamiliare in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico invernale

Diversa è la situazione in estate in cui il fabbisogno termico totale subisce un incremento, pur mantenendosi attorno ai 5 kWh/m² in entrambe le configurazioni, in quanto profondamente influenzato dalle condizioni climatiche più critiche e dalle temperature estive elevate. Le due configurazioni sono praticamente confrontabili e richiedono l'utilizzo del sistema di raffrescamento per sopperire al fabbisogno estivo (Figura 155). La configurazione 2 risente, inoltre, del maggiore "isolamento" delle soluzioni costruttive adottate.

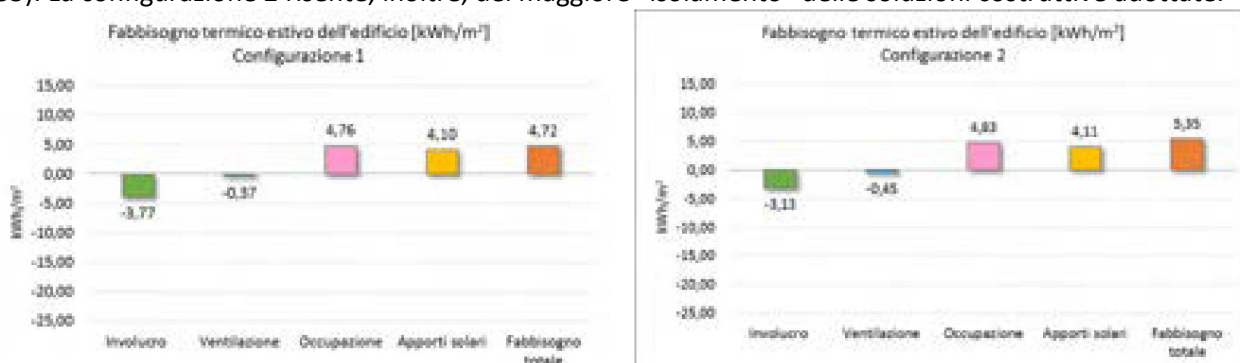


Figura 155. Edificio plurifamiliare in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico estivo

In zona climatica C (località Napoli), il fabbisogno termico invernale, calcolato dal 15 novembre al 31 marzo, presenta un'elevata componente di dispersione attraverso l'involucro, che non riesce ad essere compensata dai guadagni termici dovuti ad occupazione e apporti solari (Figura 156). Il fabbisogno invernale si attesta sui 5,42 kWh/m² per la Configurazione 1 e sui 4,09 kWh/m² per la Configurazione 2 in calcestruzzo aerato. Si ha, quindi, un miglioramento in regime invernale grazie alle componenti di involucro caratterizzate da trasmittanze più basse.

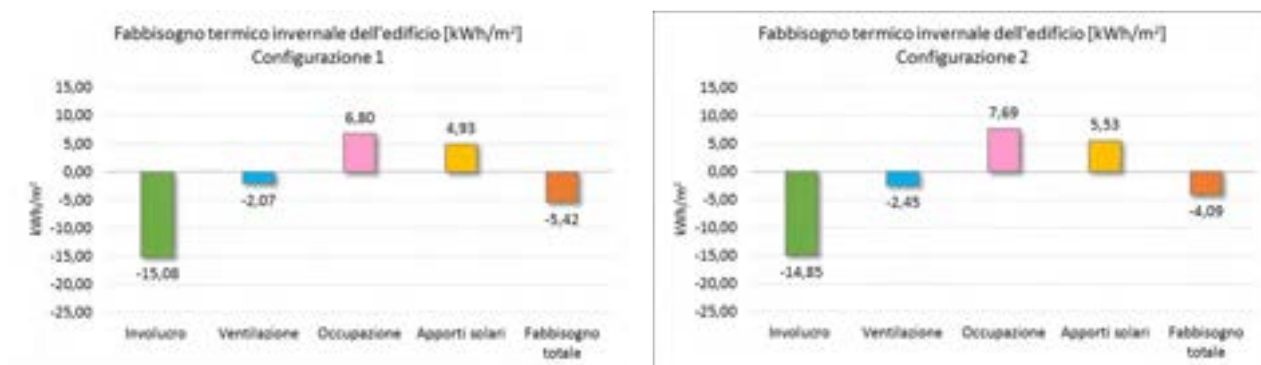


Figura 156. Edificio plurifamiliare in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico invernale

Anche in regime estivo si ottengono risultati accettabili, grazie alle condizioni climatiche meno critiche della zona C rispetto alle zone A e B (Figura 157). Lo stesso incremento dell'isolamento delle strutture determina che la configurazione 2 abbia un fabbisogno totale estivo maggiore della configurazione 1 (rispettivamente di 4,05 kWh/m² e 3,44 kWh/m²).

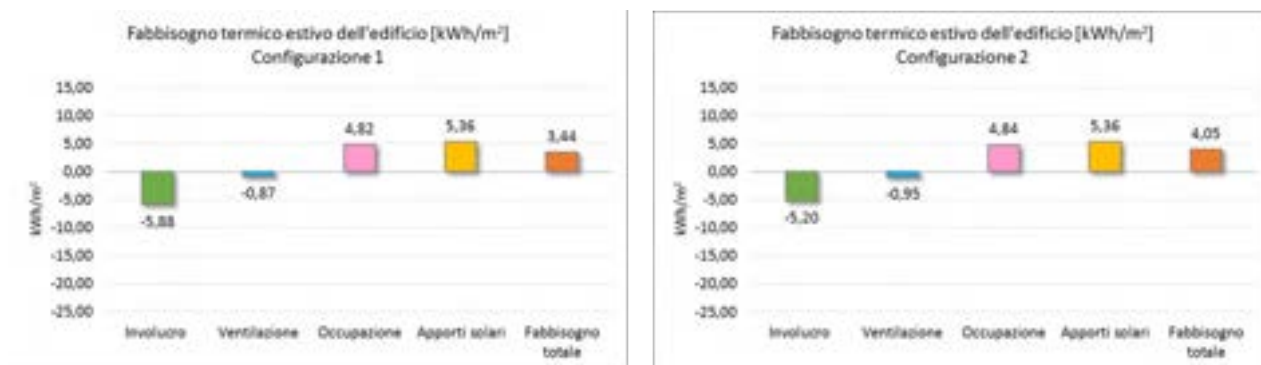


Figura 157. Edificio plurifamiliare in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico estivo

Per la zona climatica D (località Roma), tutti contributi risultano più elevati, determinando un fabbisogno termico invernale, calcolato dall'1 novembre al 15 aprile, pari a 6,36 kWh/m² nella prima configurazione e 4,56 kWh/m² nella seconda, con uno scostamento di quasi 2 kWh/m² (Figura 158).

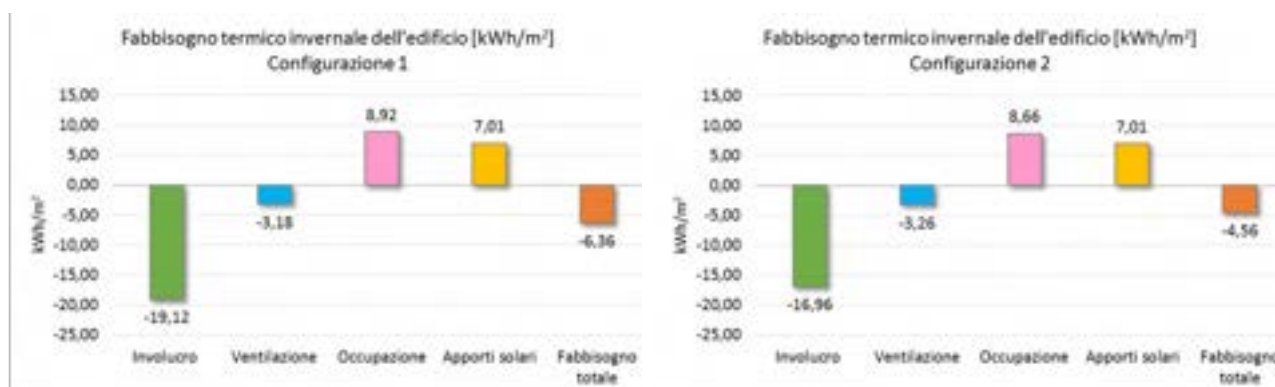


Figura 158. Edificio plurifamiliare in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico invernale

Il corrispettivo fabbisogno estivo è pressoché simile per ordine di grandezza con 6,34 kWh/m² nella prima configurazione e 5,77 kWh/m² nella seconda (Figura 159).

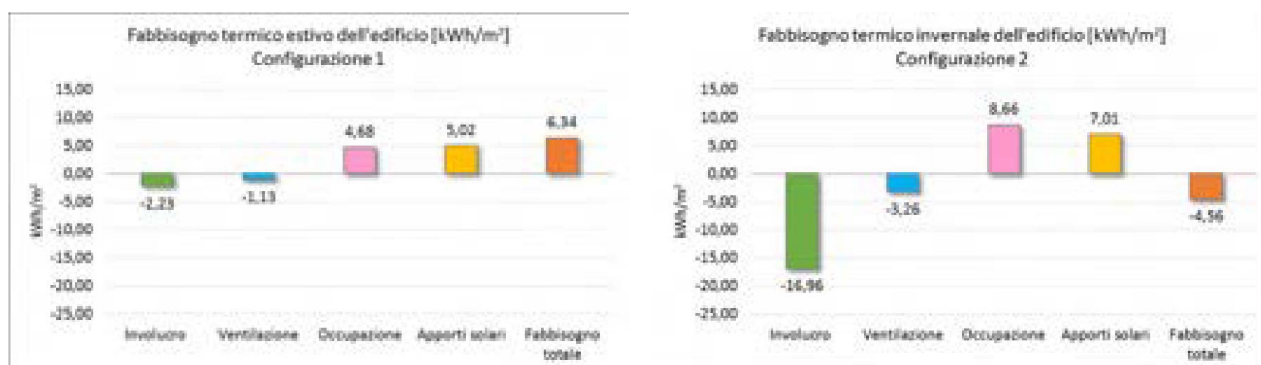


Figura 159. Edificio plurifamiliare in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico estivo

In questo caso, quindi, le stratigrafie con trasmissioni più basse della seconda configurazione non acquiscono di molto il problema del surriscaldamento estivo, mentre forniscono un contributo rilevante in regime invernale. Si notano, inoltre, gli elevati contributi sia in inverno che in estate degli apporti solari (confrontabili nelle due configurazioni in quanto è stato mantenuto lo stesso orientamento dell'edificio), anche rispetto alle zone climatiche più calde. Ciò può essere dovuto alle particolari condizioni di radiazione solare, implementate nei file climatici, da cui dipendono le simulazioni condotte.

Le zone climatiche E ed F si presentano, invece, critiche nel periodo invernale, dall'1 ottobre al 15 aprile, durante il quale il fabbisogno termico risulta più elevato rispetto alle altre località. Durante la stagione estiva, invece, le configurazioni studiate risultano particolarmente performanti e sembrano quasi non necessitare di sistemi di raffrescamento.

In dettaglio, in zona E (località Milano) il fabbisogno invernale si attesta attorno a 8,77 kWh/m² per la prima configurazione e 6,03 kWh/m² per la seconda, con una differenza di 2,74 kWh/m² (Figura 160). La seconda soluzione consente, quindi, una riduzione significativa del fabbisogno termico, auspicabile in un inverno rigido, quale quello che caratterizza la zona climatica E. Gli apporti solari si riducono rispetto al caso precedente, mentre si incrementa il contributo per ventilazione, rispetto alle altre zone.

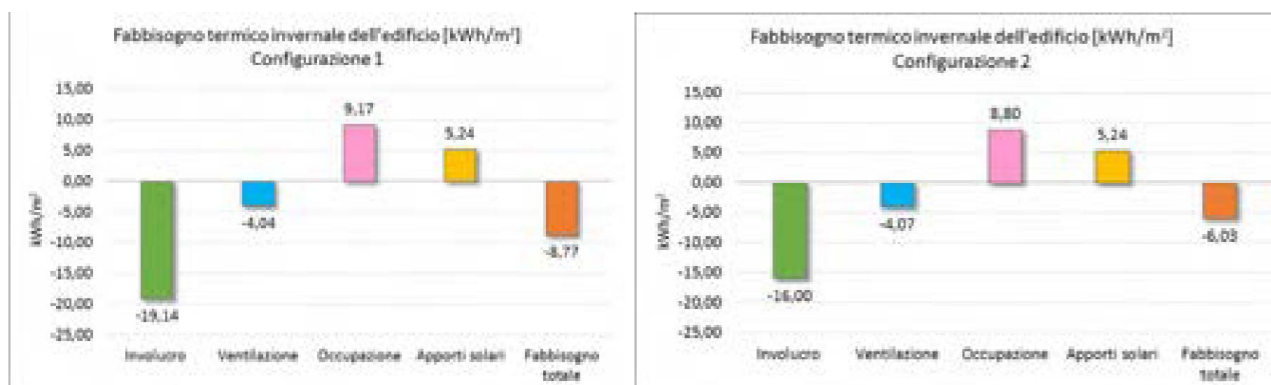


Figura 160. Edificio plurifamiliare in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico invernale

Durante l'estate, il bilancio risulta, invece, più basso rispetto alle altre zone climatiche (Figura 161); la seconda configurazione risulta comunque performante, pur essendo maggiormente isolata, con una differenza di fabbisogno pari a 0,6 kWh/m² tra la configurazione 2 (con fabbisogno termico estivo totale di 3,49 kWh/m²) e configurazione 1 (con fabbisogno termico estivo totale di 2,89 kWh/m²).

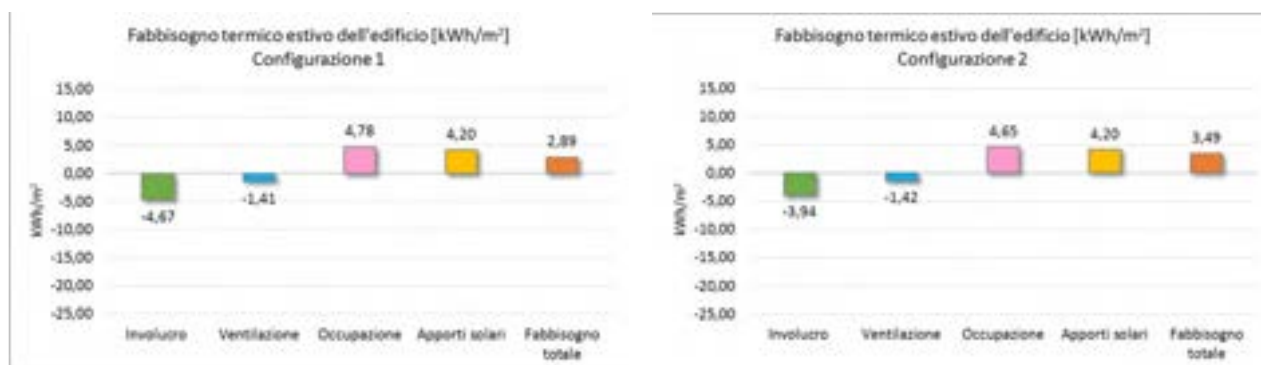


Figura 161. Edificio plurifamiliare in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico estivo

La zona climatica F è, infine, la più critica dal punto di vista del fabbisogno invernale (Figura 162) e la meno critica dal punto di vista del fabbisogno estivo (Figura 163). Quest'ultimo si attesta, infatti, attorno ad un valore vicino allo zero in entrambe le configurazioni, condizione ideale che non richiede sistemi di climatizzazione estiva. Differente è il caso invernale, in cui il fabbisogno termico totale (pari a 11,80 kWh/m² nella configurazione 1 tradizionale e pari a 8,61 kWh/m² nella configurazione 2 più innovativa) pone la necessità di un sistema impiantistico di climatizzazione invernale per sopperire al fabbisogno stesso.

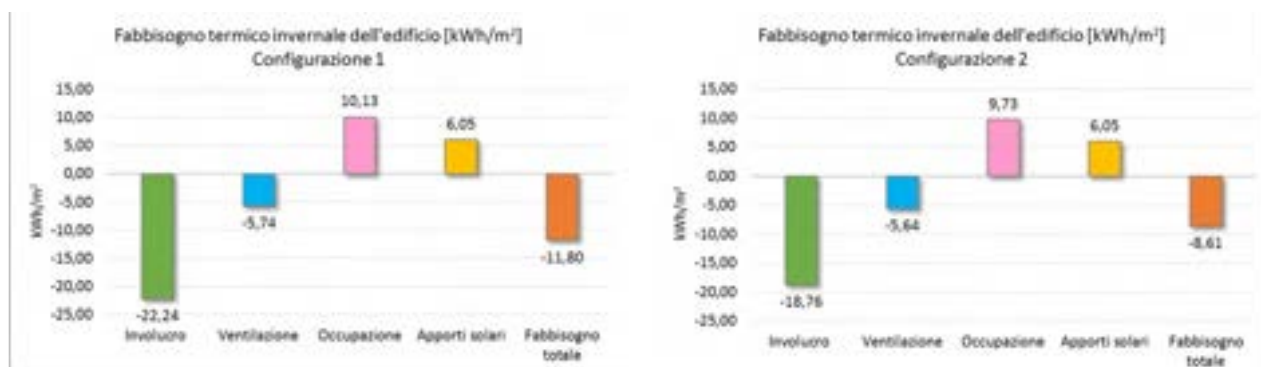


Figura 162. Edificio plurifamiliare in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico invernale

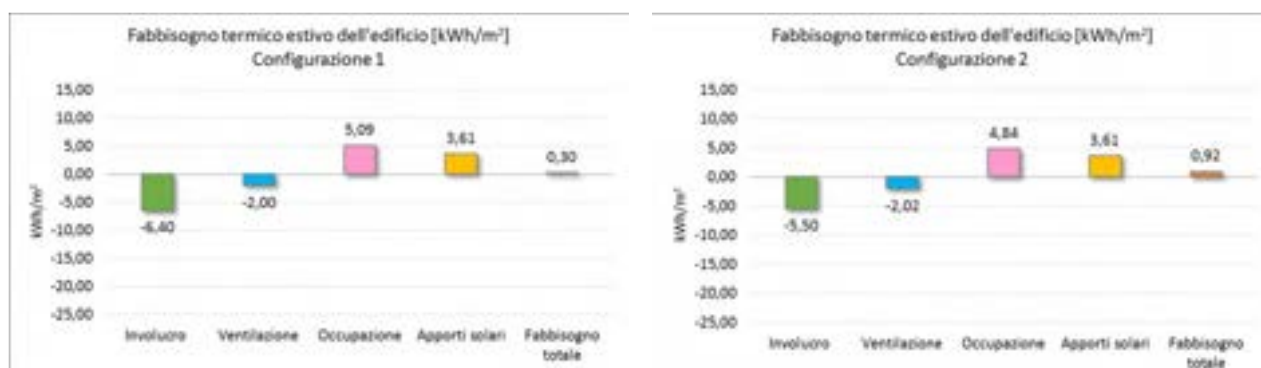


Figura 163. Edificio plurifamiliare in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico estivo

La Figura 164 riassume quanto detto e mette a confronto i fabbisogni totali invernali ed estivi tra le diverse zone climatiche. Durante l'inverno si nota l'andamento crescente al passare dalle zone A-B fino alla F, coerentemente con le condizioni climatiche delle varie zone e la maggiore prestazione della seconda configurazione rispetto alla prima. Durante l'estate, invece, si nota come in zona climatica D ci sia una forte

criticità determinata da un fabbisogno estivo maggiore (probabilmente dovuto ai file climatici utilizzati per la località di Roma) e comunque un andamento decrescente nelle altre zone dalla A alla F.

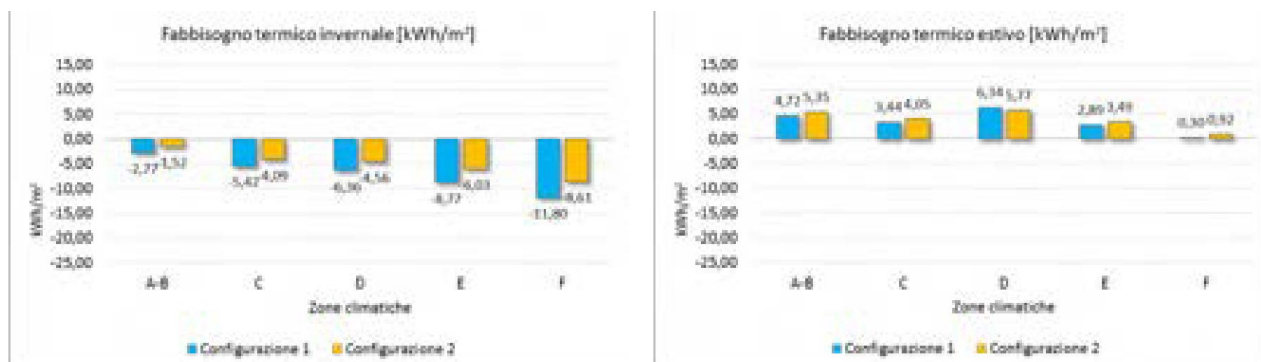


Figura 164. Edificio plurifamiliare – Fabbisogni termici invernale ed estivo nelle due configurazioni in tutte le zone climatiche

8.2 Valutazione dei fabbisogni energetici e produzione da fonti rinnovabili

L'analisi dei risultati di output derivanti dalle simulazioni ha consentito anche di ottenere i fabbisogni energetici per ogni servizio analizzato (riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria) con le considerazioni illustrate di seguito, fornite su base mensile e annuale.

8.2.1 Climatizzazione invernale

Al fine di ottenere un quadro di insieme dei risultati ottenuti, è utile analizzare tutti i casi nel complesso, in quanto risaltano alcune importanti considerazioni.

Innanzitutto, è importante valutare la performance dell'impianto, in merito alla quale le considerazioni sono molteplici. L'aver implementato tre pompe di calore aria-acqua in serie ottimizza la resa dell'impianto stesso in quanto i tre generatori lavorano soltanto all'occorrenza e in ordine di priorità. Se si valutano i COP medi delle macchine essi si attestano in un range tra 3,06 (in zona F) e 3,16 (zona A-B), di poco inferiore rispetto al COP teorico impostato. Si tenga conto che le pompe di calore lavorano a temperature più alte rispetto a quelle standard con una temperatura di mandata di 45°C, in quanto il sistema implementato è dotato di terminali a ventilconvettori. La variazione del COP in funzione della temperatura, impostata con la curva di prestazione apposita, è, infine, minima al di sopra dei 5°C di temperatura esterna.

L'analisi della performance di impianto, quindi, consente di verificare l'andamento del COP per ciascuna zona climatica e per ciascuna configurazione.

A titolo di esempio, si riporta, da Figura 165 a Figura 167, il confronto tra la variazione del COP, su base giornaliera, in funzione della temperatura a bulbo secco esterna, per entrambe le configurazioni analizzate nelle zone climatiche B, D ed F. Come si può notare al diminuire della temperatura il COP medio diminuisce. Ciò si vede per esempio dal grafico in Figura 167, valido per la zona climatica F. In tale zona, infatti, durante il periodo invernale è frequente avere temperature inferiori ai 7°C, condizioni in cui le macchine risultano meno performante.

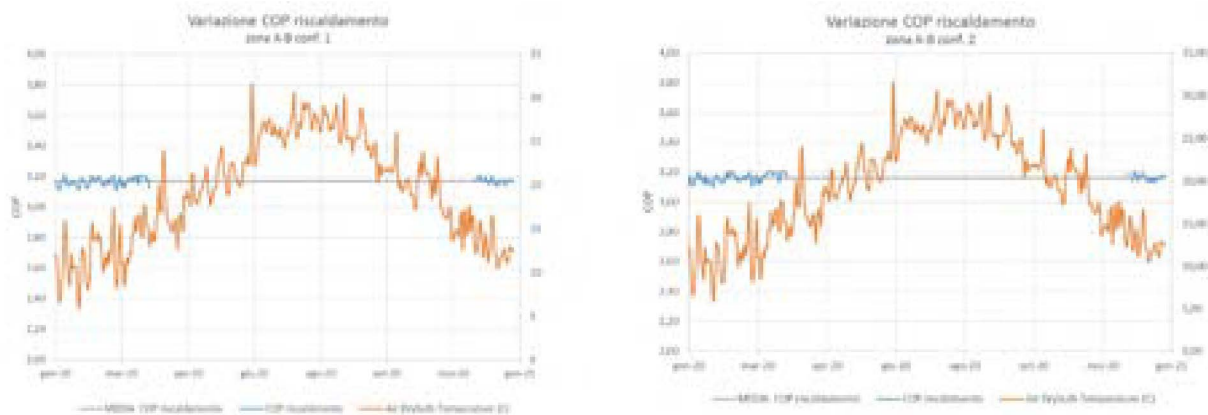


Figura 165. Andamento medio giornaliero del COP in riscaldamento, zona climatica B

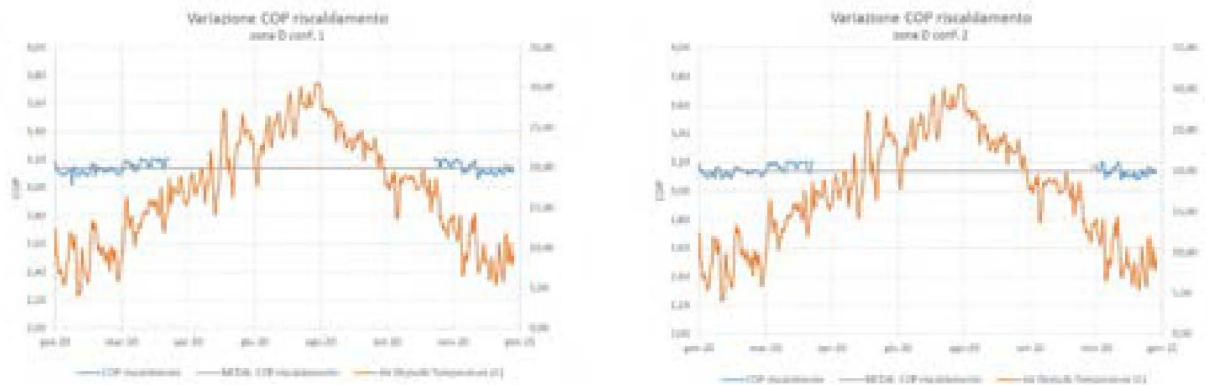


Figura 166. Andamento medio giornaliero del COP in riscaldamento, zona climatica D

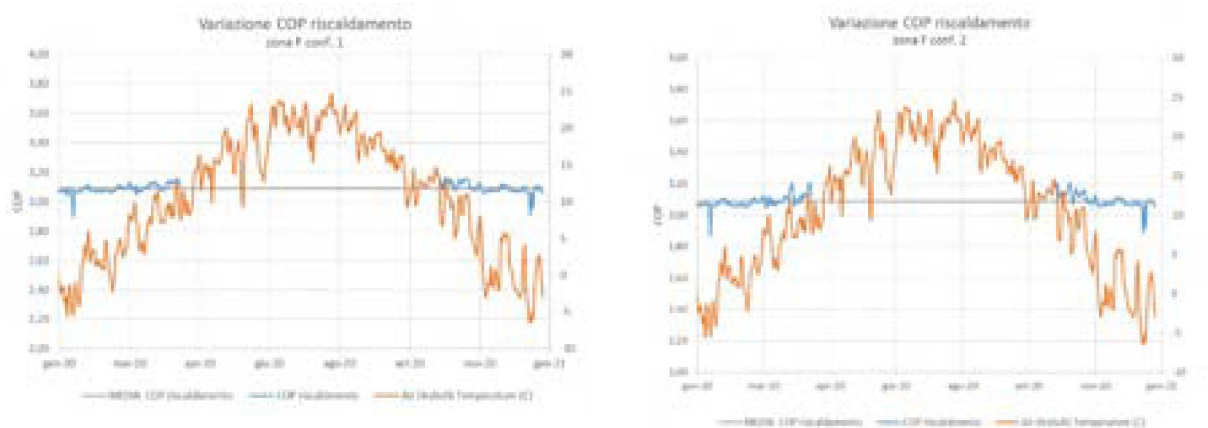


Figura 167. Andamento medio giornaliero del COP in riscaldamento, zona climatica F

Per quanto riguarda i fabbisogni di energia termici ed elettrici, si riportano di seguito i grafici inerenti le singole configurazioni analizzate in tutte le zone climatiche (da Figura 168 a Figura 172). In essi, è stato scelto di uniformare la scala metrica dell'asse Y dell'energia per facilitare il confronto.

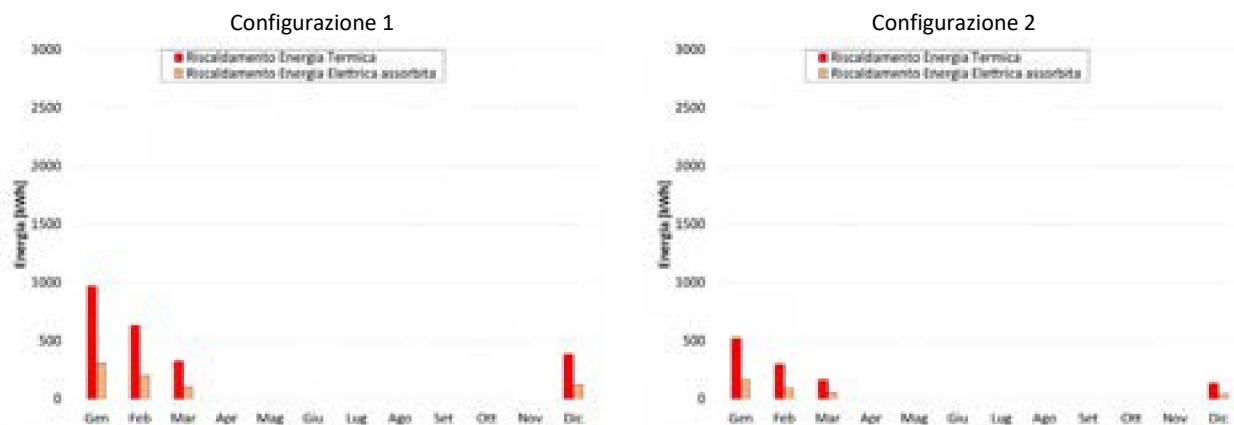


Figura 168. Edificio plurifamiliare in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di riscaldamento

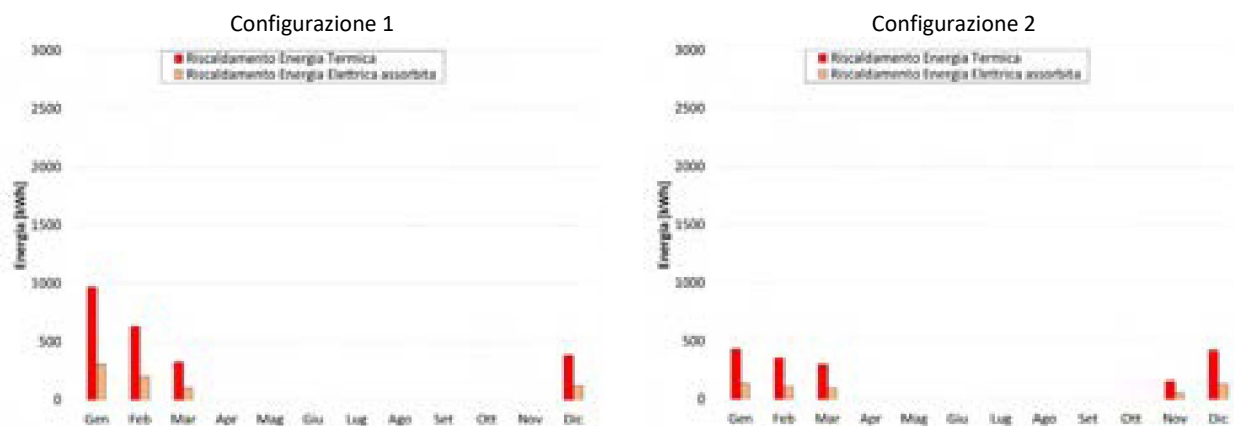


Figura 169. Edificio plurifamiliare in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di riscaldamento

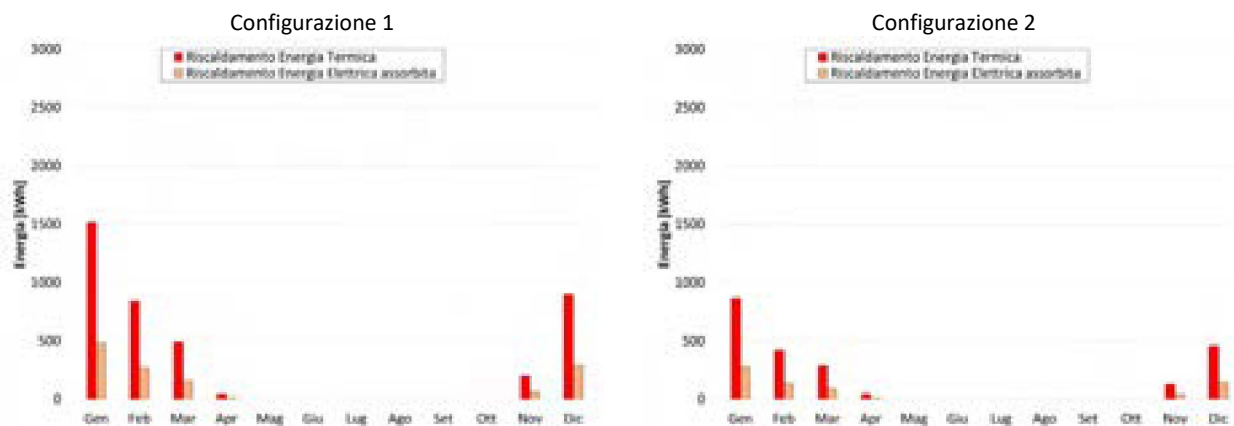


Figura 170. Edificio plurifamiliare in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di riscaldamento

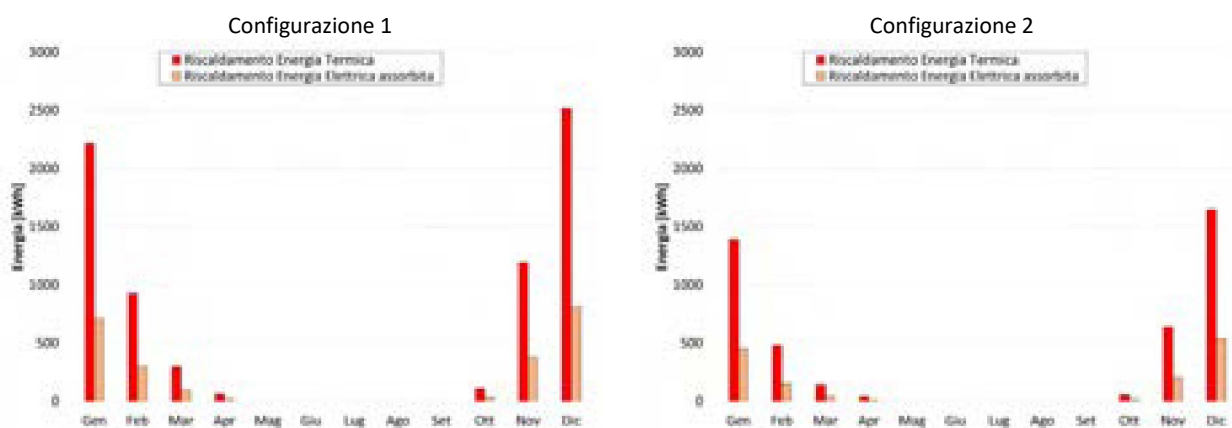


Figura 171. Edificio plurifamiliare in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di riscaldamento

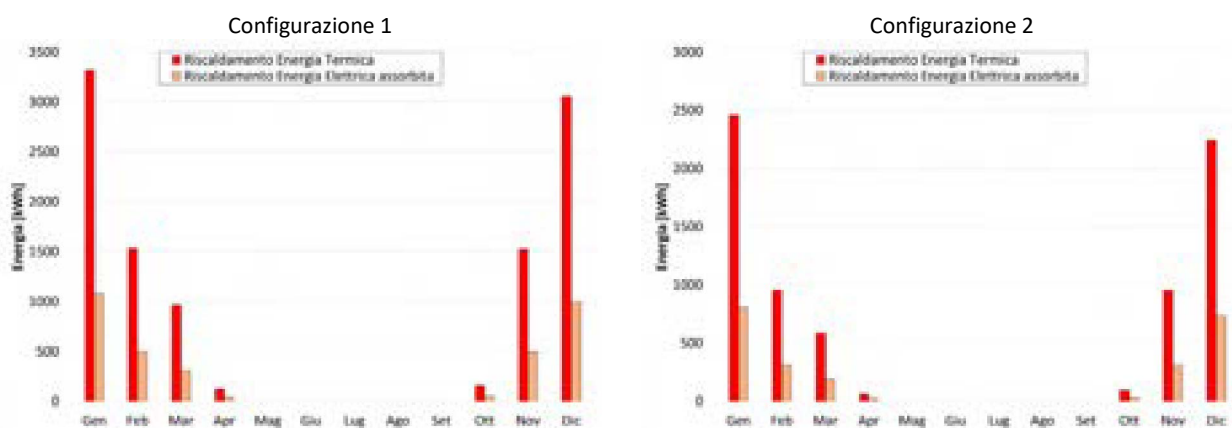


Figura 172. Edificio plurifamiliare in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di riscaldamento

Si evince subito come i fabbisogni per riscaldamento si riducano in tutte le zone climatiche nel passare dalla configurazione 1, tipologia tradizionale e con trasmittanze vicine a quelle di legge attuali, alla configurazione 2, tipologia più innovativa e con elevato isolamento. Si assiste, quindi, ad una riduzione che varia da un minimo del 44% in Zona C ad un massimo del 69% in zona F, rispettivamente tra le due configurazioni. Inoltre, al variare delle zone climatiche si nota un progressivo incremento del fabbisogno di energia termica che passa da un minimo di 1.112 kWh in zona B per la configurazione 2 (conformemente alle condizioni climatiche calde tipiche della località) ad un massimo di 10.678 kWh in zona climatica F configurazione 1. Nella Tabella 84 e nella Tabella 85 si riportano in dettaglio i risultati in termini di energia termica fornita per il riscaldamento ed energia elettrica assorbita per tutte le configurazioni e i mesi dell'anno.

Tabella 84. Energia termica mensile e annuale fornita per il riscaldamento nelle differenti configurazioni e zone climatiche

Mesi	Energia termica [kWh]									
	1AB	1C	1D	1E	1F	2AB	2C	2D	2E	2F
Gen	967	967	1515	2213	3318	521	430	869	1391	2457
Feb	632	829	842	930	1531	296	356	422	481	952
Mar	326	682	491	299	964	160	301	292	143	585
Apr	0	0	43	61	124	0	0	44	42	61
Mag	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Giu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lug	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ago	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Set	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ott	0	0	0	109	160	0	0	0	54	95
Nov	0	342	198	1189	1523	0	158	129	638	955
Dic	388	971	904	2517	3058	136	420	457	1646	2241
Anno	2313	3791	3992	7318	10678	1112	1666	2212	4394	7345

Tabella 85. Energia elettrica mensile e annuale assorbita per il riscaldamento nelle differenti configurazioni e zone climatiche

Mesi	Energia elettrica [kWh]									
	1AB	1C	1D	1E	1F	2AB	2C	2D	2E	2F
Gen	306	307	486	716	1084	165	137	279	451	804
Feb	201	264	270	300	498	94	114	135	155	310
Mar	103	216	157	96	312	51	96	93	46	189
Apr	0	0	13	19	40	0	0	14	13	19
Mag	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Giu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lug	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ago	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Set	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ott	0	0	0	34	51	0	0	0	17	30
Nov	0	109	63	383	494	0	50	41	206	311
Dic	123	309	290	814	1002	43	134	147	533	735
Anno	733	1205	1280	2361	3481	353	531	708	1421	2400

8.2.2 Climatizzazione estiva

Per quanto riguarda la climatizzazione estiva, sono necessarie alcune precisazioni. Il problema del raffrescamento è negli ultimi anni venuto alla ribalta soprattutto per la grande sfida del surriscaldamento a livello mondiale e delle sempre più frequenti ondate di calore che interessano le grandi città. I modelli elaborati sono stati dotati per questo di un profilo spinto, ma verosimile, di ventilazione naturale notturna, per sfruttare il cosiddetto fenomeno del *free cooling*. Nonostante ciò, il comportamento in regime estivo nel periodo considerato (giugno-settembre) resta caratterizzato da consumi rilevanti soprattutto nelle zone climatiche più calde. Inoltre, la configurazione 2, ossia quella maggiormente isolata, presenta generalmente un fabbisogno maggiore in raffrescamento rispetto alla configurazione 1.

Altra criticità è l'utilizzo di pompe utili sia al riscaldamento che al raffrescamento. Ciò comporta in alcuni casi (soprattutto nelle zone climatiche più calde e più fredde) la difficoltà nella scelta della taglia della pompa di calore, che spesso non lavora al meglio della sua prestazione in uno dei due regimi, in quanto dimensionata sulla potenza di picco più alta richiesta.

Nei modelli analizzati, le macchine in raffrescamento risultano meno performanti ponendo non pochi problemi soprattutto durante i mesi ai margini della stagione di raffrescamento, in cui converrebbe spegnere l'impianto in quanto le temperature esterne sono più basse e il carico termico è basso (Figura 173 e Figura 174). Nelle zone climatiche e nei mesi più caldi, tuttavia, si raggiunge un EER medio di 2,76 e, quindi, una prestazione soddisfacente.

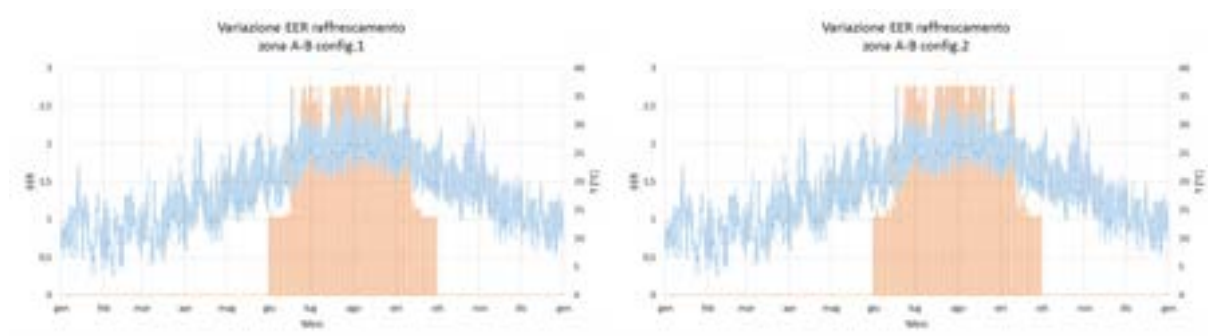


Figura 173. Andamento dell'EER in raffrescamento, zona climatica B

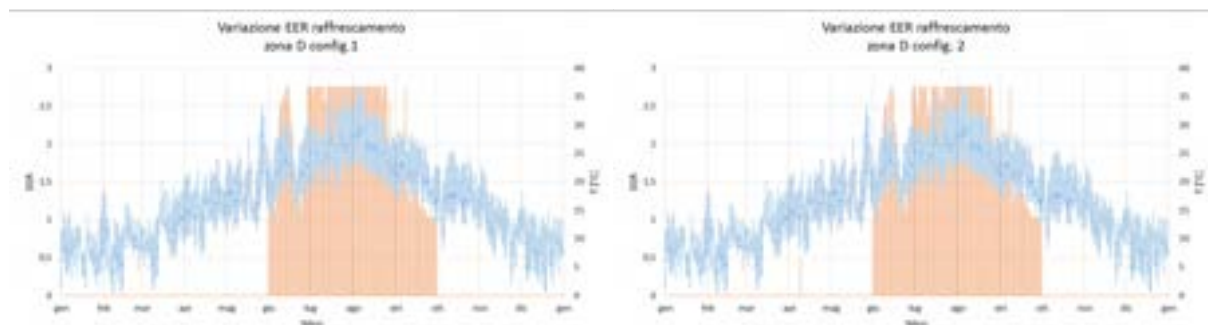


Figura 174. Andamento dell'EER in raffrescamento, zona climatica D

I grafici riportati da Figura 175 a Figura 179 illustrano in dettaglio i fabbisogni termici e i consumi elettrici in raffrescamento, calcolati per i mesi che vanno da giugno a settembre.

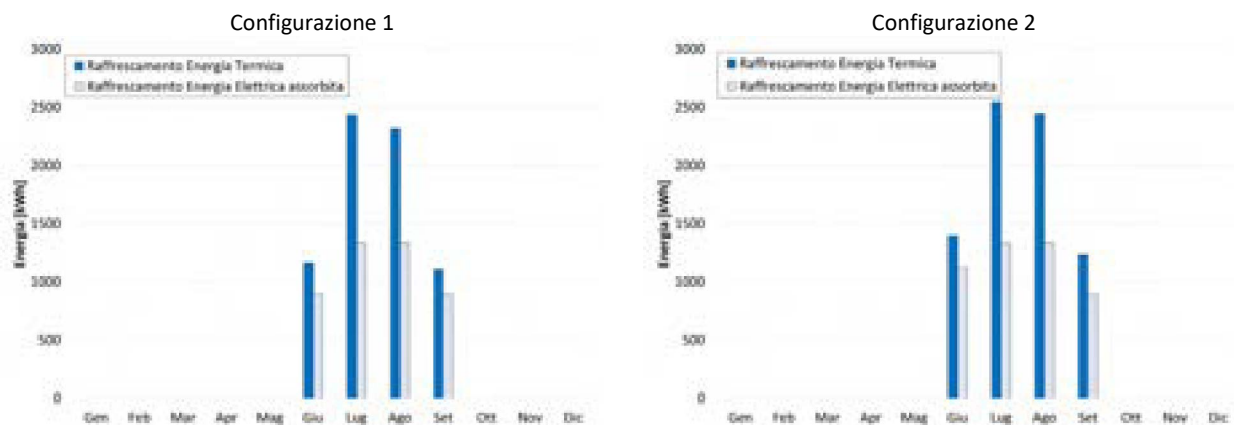


Figura 175. Edificio plurifamiliare in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di raffrescamento

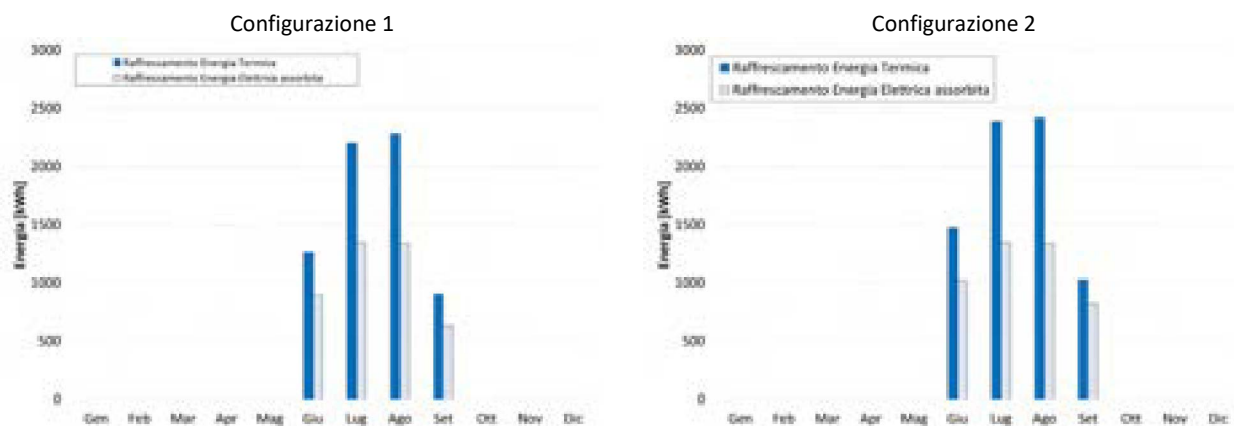


Figura 176. Edificio plurifamiliare in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di raffrescamento

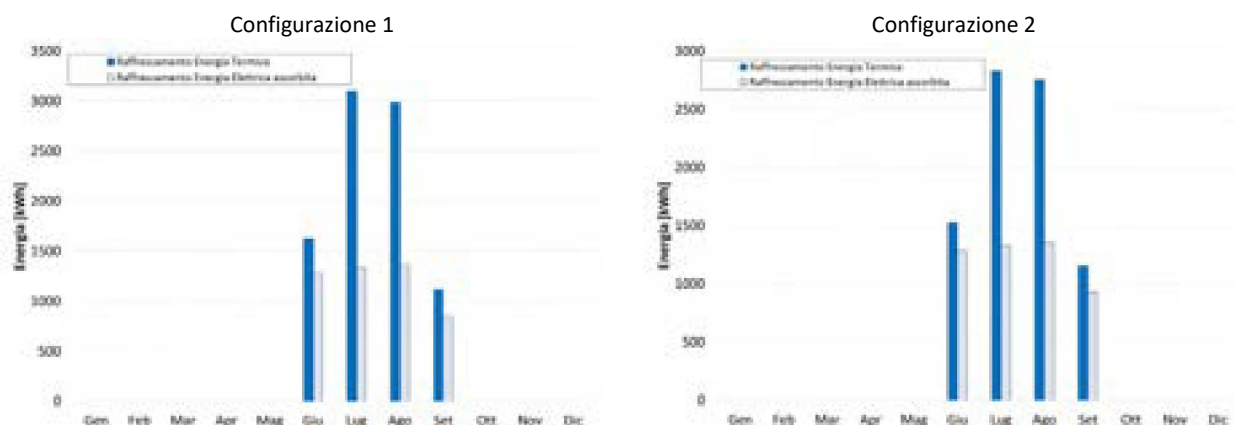


Figura 177. Edificio plurifamiliare in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di raffrescamento

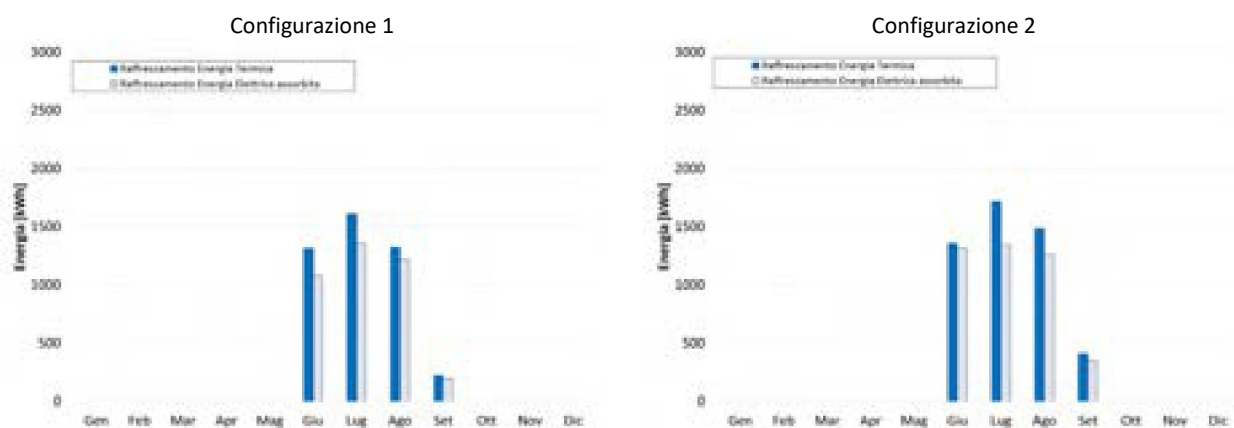


Figura 178. Edificio plurifamiliare in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di raffrescamento

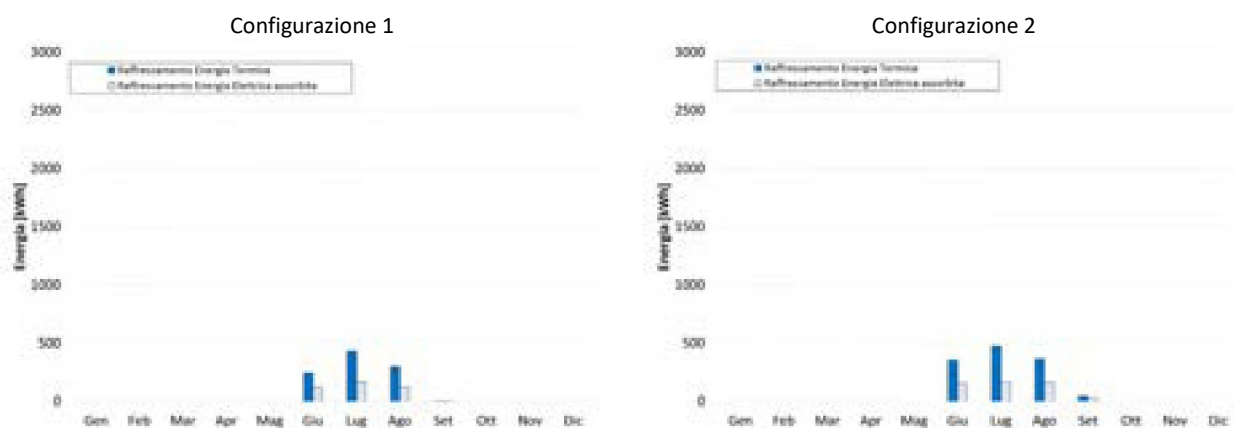


Figura 179. Edificio plurifamiliare in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di raffrescamento

Le zone climatiche più critiche risultano la zona A-B e la zona D, in cui nei mesi più caldi si raggiunge un fabbisogno mensile di circa 3000 kWh. In zona climatica F, invece, la necessità di raffrescamento risulta quasi nulla, date le condizioni climatiche estive più miti. La configurazione 2, inoltre, maggiormente isolata, risulta generalmente meno performante della configurazione 1.

Nella Tabella 86 e nella Tabella 87 si riportano in dettaglio i risultati in termini di energia termica fornita per il riscaldamento ed energia elettrica assorbita per tutte le configurazioni e i mesi dell'anno.

Tabella 86. Energia termica mensile e annuale fornita per il raffrescamento nelle differenti configurazioni e zone climatiche

Mesi	Energia termica [kWh]									
	1AB	1C	1D	1E	1F	2AB	2C	2D	2E	2F
Gen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Feb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Apr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mag	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Giu	1166	1266	1626	1313	248	1396	1473	1530	1354	356
Lug	2431	2196	3103	1613	432	2545	2388	2829	1717	477
Ago	2316	2281	2985	1323	296	2439	2420	2754	1485	364
Set	1108	907	1115	222	0	1232	1028	1157	410	45
Ott	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nov	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dic	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Anno	7021	6649	8829	4471	976	7613	7308	8270	4966	1243

Tabella 87. Energia elettrica mensile e annuale assorbita per il raffrescamento nelle differenti configurazioni e zone climatiche

Mesi	Energia elettrica [kWh]									
	1AB	1C	1D	1E	1F	2AB	2C	2D	2E	2F
Gen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Feb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Apr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mag	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Giu	900	901	1285	1075	122	1123	1013	1282	1312	154
Lug	1332	1346	1336	1355	171	1330	1348	1326	1350	173
Ago	1332	1342	1362	1218	123	1331	1342	1354	1270	161
Set	891	634	850	192	1	900	821	925	350	27
Ott	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nov	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dic	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Anno	4455	4222	4832	3841	416	4684	4524	4887	4282	515

8.2.3 Acqua calda sanitaria e produzione da solare termico

Considerazioni analoghe a quelle del riscaldamento si possono fare per la valutazione del COP della pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria, che risulta abbastanza performante con un COP medio di 3,4 (rispetto a quello nominale impostato a 3,7). A titolo esemplificativo si riportano gli andamenti del COP della pompa di calore per ACS in zone climatiche D ed E (Figura 180 e Figura 181). Gli andamenti mostrati potrebbero a prima vista apparire incongruenti, in quanto la pompa di calore alle alte temperature dovrebbe lavorare meglio che a temperature più basse e ciò comporterebbe un aumento del COP nei giorni più caldi. In questo caso, tuttavia, l'andamento è influenzato dal regime di funzionamento a carico parziale. La pompa di calore nei mesi estivi lavora molto meno o si spegne del tutto, grazie all'integrazione con la produzione da solare termico. Ciò influenza le sue prestazioni e determina un COP medio giornaliero più basso. Tale

problema sarebbe risolvibile utilizzando per la produzione di acqua calda sanitaria la stessa strategia dell'impianto di riscaldamento, ossia l'installazione in serie di pompe di calore di taglia più piccola. Nello studio si è volutamente optato per due scelte distinte, pompe di calore in serie per il riscaldamento-raffrescamento e unica pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria, proprio per illustrare le peculiarità dei due approcci.

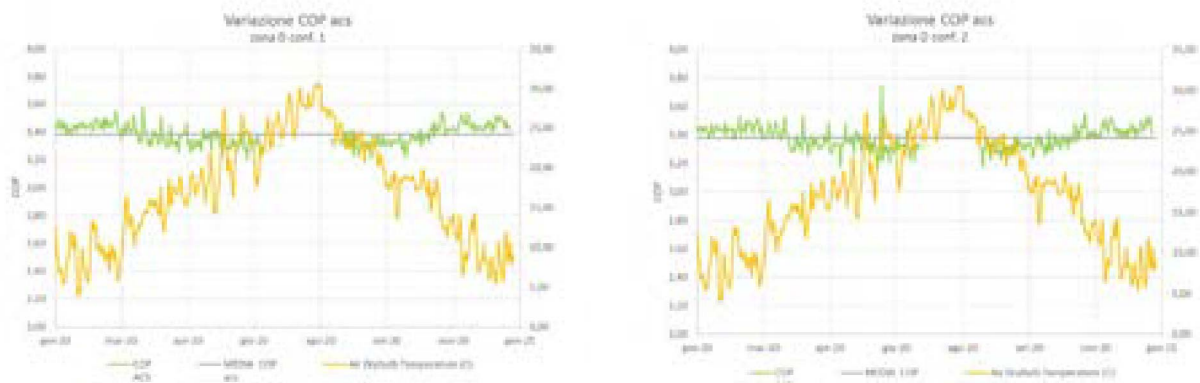


Figura 180 Andamento del COP giornaliero della pompa di calore per la produzione di ACS in zona climatica D

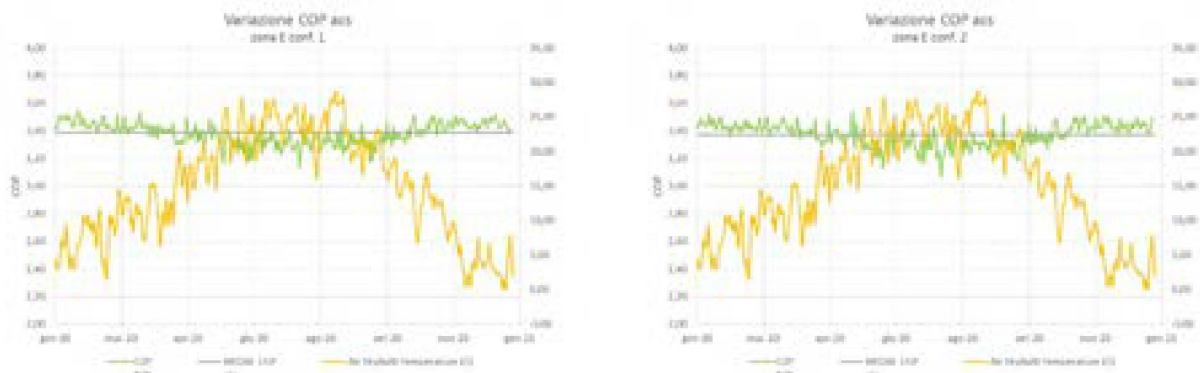


Figura 181 Andamento del COP giornaliero della pompa di calore per la produzione di ACS in zona climatica E

Per quanto riguarda i fabbisogni da Acqua Calda Sanitaria, si può notare dai grafici seguenti (da Figura 182 a Figura 186) che essi si attestano come ci si aspetta dal profilo di utilizzo impostato, attorno ad un valore medio mensile di circa 4200 kWh di energia termica, valido in linea generale per tutte le configurazioni e tutte le zone climatiche. I consumi energetici del sistema impiantistico sono però fortemente legati alla produzione da solare termico.

Come si può vedere dai grafici riportati da Figura 182 a Figura 186, ciò che cambia è l'energia termica fornita dalla pompa di calore, decrescente al crescere della produzione di energia termica da solare e ridotta al minimo durante i mesi estivi laddove la produzione da solare termico arriva a coprire il fabbisogno in una percentuale compresa tra il 75 e il 97% (mesi di giugno, luglio e agosto). Conseguentemente varia anche l'energia elettrica della pompa durante i vari mesi (Tabella 91).

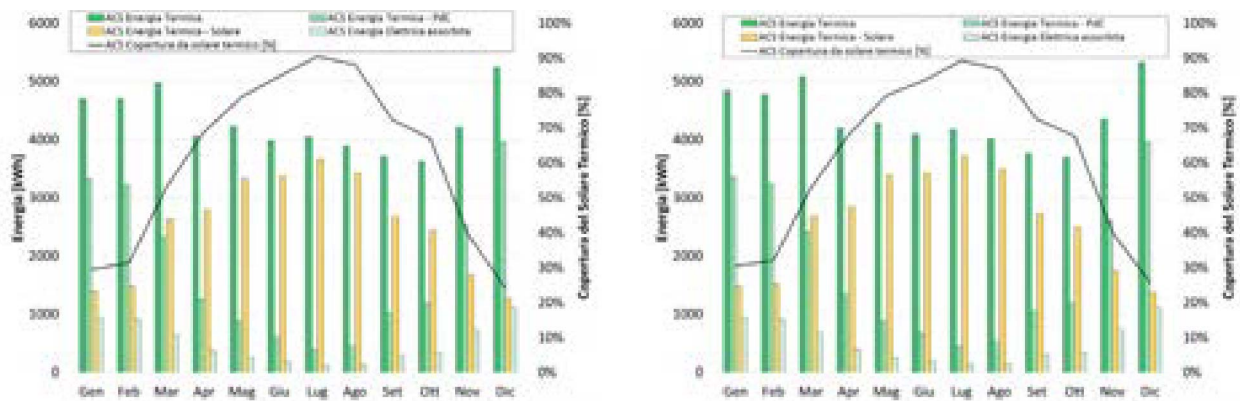


Figura 182. Edificio plurifamiliare in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per ACS

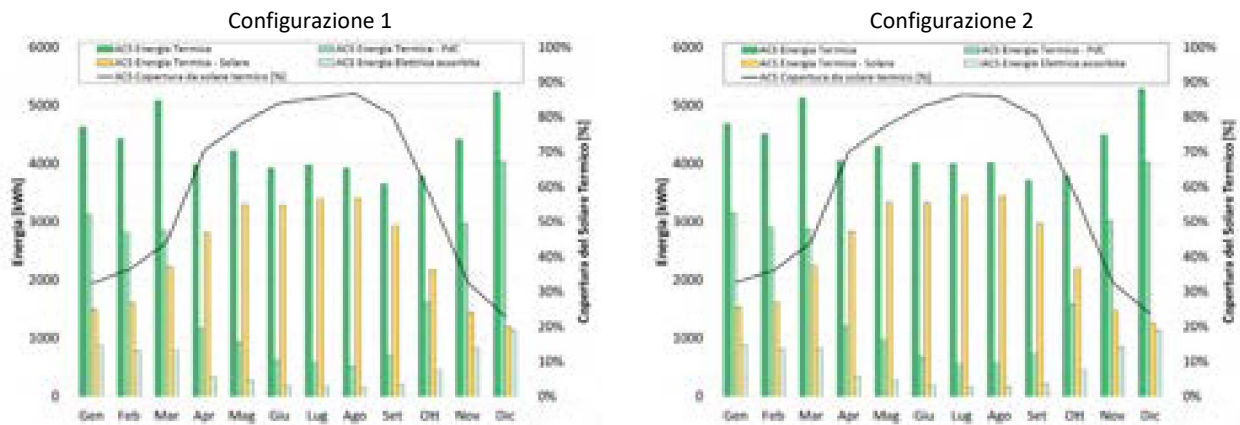


Figura 183. Edificio plurifamiliare in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per ACS

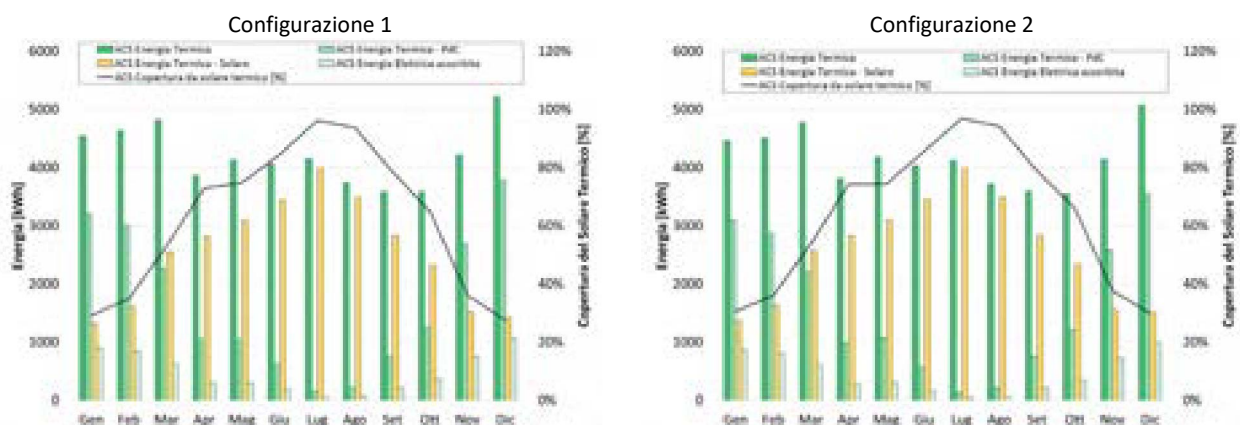


Figura 184. Edificio plurifamiliare in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per ACS

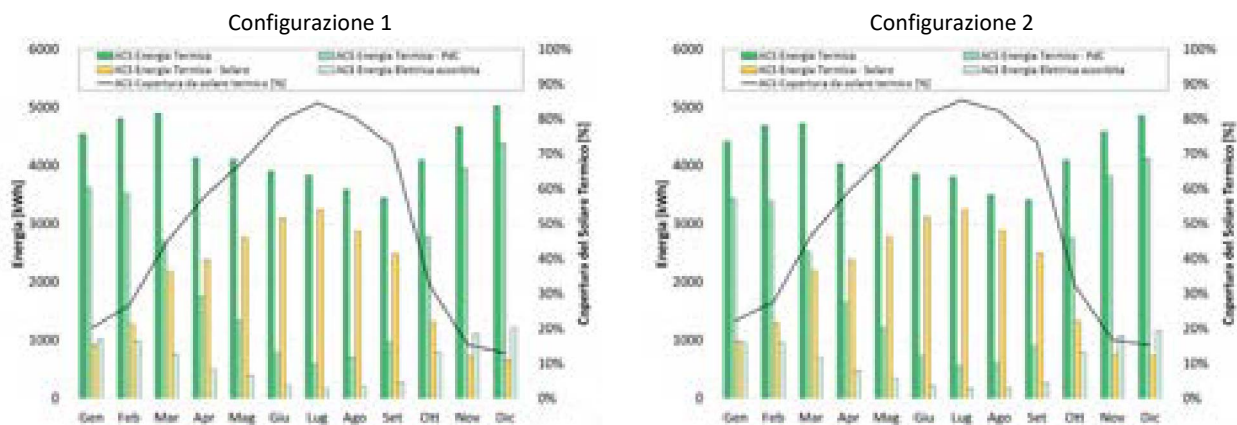


Figura 185. Edificio plurifamiliare in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per ACS

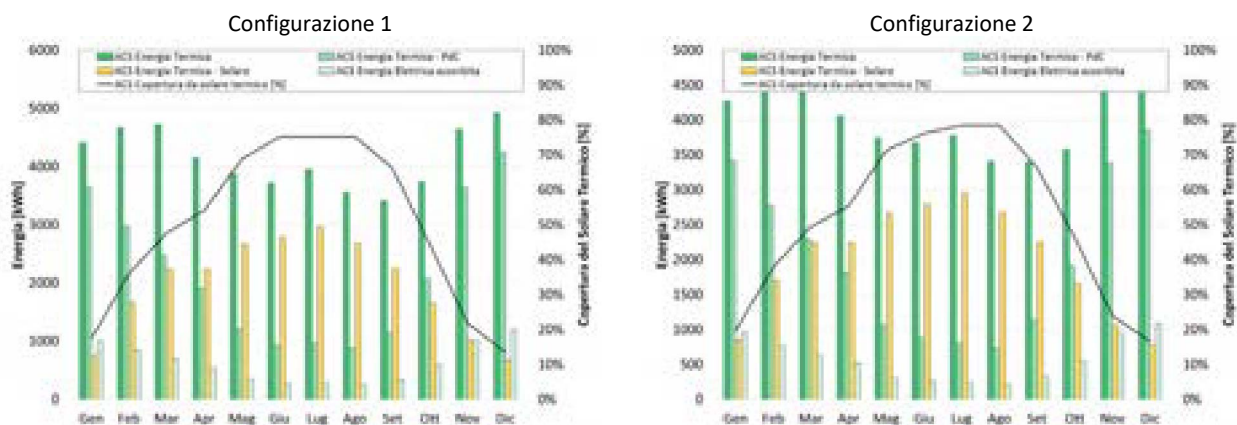


Figura 186. Edificio plurifamiliare in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per ACS

Si riportano in dettaglio in Tabella 88 le quantità di energia termica fornita nell'ordine da pompa di calore e solare termico, insieme, per le due configurazioni nelle diverse zone climatiche e in Tabella 89 e Tabella 90 l'energia termica fornita o prodotta dai due sistemi separatamente.

Tabella 88. Energia termica mensile e annuale fornita per ACS nelle differenti configurazioni e zone climatiche (pdc + solare termico)

Mesi	Energia termica [kWh]									
	1AB	1C	1D	1E	1F	2AB	2C	2D	2E	2F
Gen	4702	4618	4534	4539	4409	4836	4674	4463	4415	4264
Feb	4704	4417	4633	4812	4666	4770	4511	4511	4685	4473
Mar	4964	5076	4816	4890	4713	5081	5126	4777	4718	4538
Apr	4060	3976	3862	4120	4149	4192	4046	3811	4032	4053
Mag	4226	4218	4130	4103	3872	4274	4300	4174	3998	3741
Giu	3975	3913	4070	3901	3718	4095	3999	4034	3846	3674
Lug	4046	3971	4142	3828	3944	4167	3987	4114	3802	3776
Ago	3882	3918	3736	3580	3563	4016	4013	3710	3500	3410
Set	3700	3641	3587	3434	3404	3767	3706	3593	3400	3402
Ott	3619	3780	3585	4094	3735	3690	3787	3552	4085	3578
Nov	4209	4411	4216	4660	4638	4343	4490	4131	4587	4450
Dic	5239	5224	5214	5023	4916	5332	5274	5068	4854	4633
Anno	51328	51163	50526	50985	49727	52563	51913	49937	49922	47992

Tabella 89. Energia termica mensile e annuale fornita per ACS nelle differenti configurazioni e zone climatiche (solo pdc)

Mesi	Energia termica [kWh]									
	1AB	1C	1D	1E	1F	2AB	2C	2D	2E	2F
Gen	3314	3123	3208	3622	3642	3357	3145	3095	3429	3423
Feb	3224	2814	3014	3531	2982	3243	2887	2880	3392	2776
Mar	2331	2846	2260	2706	2472	2404	2874	2208	2527	2296
Apr	1261	1177	1051	1743	1907	1342	1218	985	1645	1809
Mag	891	921	1043	1333	1207	885	965	1070	1217	1073
Giu	604	623	634	803	923	672	669	582	738	876
Lug	388	579	158	590	981	448	548	130	557	812
Ago	460	521	235	707	886	531	570	219	621	734
Set	1025	710	766	954	1148	1039	742	759	912	1145
Ott	1190	1604	1256	2775	2079	1194	1588	1208	2760	1919
Nov	2538	2968	2694	3943	3627	2602	3023	2573	3820	3386
Dic	3966	4033	3784	4370	4248	3961	4024	3550	4114	3860
Anno	21193	21919	20103	27079	26101	21679	22252	19259	25732	24109

Tabella 90. Energia termica mensile e annuale prodotta dal solare termico per ACS nelle differenti configurazioni e zone climatiche

Mesi	Energia termica [kWh]									
	1AB	1C	1D	1E	1F	2AB	2C	2D	2E	2F
Gen	1388	1495	1326	916	766	1479	1529	1368	985	841
Feb	1480	1603	1620	1280	1684	1527	1623	1631	1292	1697
Mar	2633	2229	2555	2184	2242	2677	2252	2569	2191	2242
Apr	2798	2800	2811	2377	2243	2850	2828	2825	2386	2244
Mag	3335	3297	3087	2771	2666	3389	3335	3105	2781	2667
Giu	3371	3290	3436	3098	2795	3423	3330	3452	3108	2798
Lug	3659	3391	3984	3238	2963	3718	3439	3984	3245	2964
Ago	3422	3398	3501	2873	2677	3486	3444	3491	2879	2676
Set	2675	2932	2821	2480	2256	2728	2964	2834	2488	2257
Ott	2430	2176	2329	1319	1656	2496	2199	2343	1326	1660
Nov	1671	1443	1523	717	1010	1741	1467	1558	768	1064
Dic	1274	1191	1430	653	668	1371	1250	1518	740	773
Anno	30135	29245	30423	23907	23626	30885	29661	30678	24189	23883

In Tabella 91 si riportano, invece, i valori dell'energia elettrica mensile e annuale assorbita dalla pompa stessa per garantire la produzione necessaria di acqua calda sanitaria.

Tabella 91. Energia elettrica mensile e annuale assorbita dalla pompa di calore per ACS nelle differenti configurazioni e zone climatiche

Mesi	Energia elettrica [kWh]									
	1AB	1C	1D	1E	1F	2AB	2C	2D	2E	2F
Gen	933	875	899	1015	1020	945	881	870	962	958
Feb	902	785	846	986	838	906	807	810	954	784
Mar	657	798	636	762	696	675	805	621	711	649
Apr	364	339	303	498	541	384	351	285	471	515
Mag	259	268	301	382	348	256	280	309	349	311
Giu	176	182	185	234	268	196	194	170	215	256
Lug	114	169	47	173	285	131	160	39	164	237
Ago	134	152	70	206	258	155	166	65	181	216
Set	297	206	223	277	330	299	215	221	265	330
Ott	342	461	363	789	594	342	456	349	789	549
Nov	720	833	755	1104	1017	735	847	723	1070	954
Dic	1108	1131	1060	1224	1192	1107	1128	997	1159	1083
Anno	6006	6198	5688	7649	7386	6132	6290	5459	7290	6840

In Tabella 92 sono state messe in evidenza le percentuali di copertura del fabbisogno di ACS da solare termico. Come si può notare i mesi critici sono ovviamente i mesi invernali, problematica che si esaspera nelle zone più fredde (E ed F). I mesi estivi, invece, riportano per tutte le configurazioni valori di copertura da fonte rinnovabile notevolmente più elevati.

Tabella 92. Copertura percentuale del fabbisogno di ACS da solare termico nelle differenti configurazioni e zone climatiche

Mesi	Copertura [%]									
	1AB	1C	1D	1E	1F	2AB	2C	2D	2E	2F
Gen	30%	32%	29%	20%	17%	31%	33%	31%	22%	20%
Feb	31%	36%	35%	27%	36%	32%	36%	36%	28%	38%
Mar	53%	44%	53%	45%	48%	53%	44%	54%	46%	49%
Apr	69%	70%	73%	58%	54%	68%	70%	74%	59%	55%
Mag	79%	78%	75%	68%	69%	79%	78%	74%	70%	71%
Giu	85%	84%	84%	79%	75%	84%	83%	86%	81%	76%
Lug	90%	85%	96%	85%	75%	89%	86%	97%	85%	78%
Ago	88%	87%	94%	80%	75%	87%	86%	94%	82%	78%
Set	72%	81%	79%	72%	66%	72%	80%	79%	73%	66%
Ott	67%	58%	65%	32%	44%	68%	58%	66%	32%	46%
Nov	40%	33%	36%	15%	22%	40%	33%	38%	17%	24%
Dic	24%	23%	27%	13%	14%	26%	24%	30%	15%	17%
Anno	61%	59%	62%	50%	50%	61%	59%	63%	51%	52%

8.2.4 Produzione da fotovoltaico

La produzione di energia da fonti rinnovabili è sostanzialmente la peculiarità di una progettazione in direzione ZEB. Le configurazioni 1 e 2 differiscono poco in termini di producibilità da fotovoltaico, in quanto è stata prevista la stessa superficie di pannelli con orientamento a Sud e stessa inclinazione. La differenza, seppur minima, è data dal fatto che i pannelli sono installati in configurazione 1 su copertura piana, e, quindi, influisce un minimo di ombreggiamento (seppur ottimizzato in fase di implementazione del modello). In configurazione 2, invece, la copertura inclinata annulla tale problematica e ottimizza la resa dei pannelli stessi. A tal proposito, alcune delle configurazioni analizzate pongono senz'altro delle criticità in termini di copertura di tutto il fabbisogno e di produzione di surplus di energia.

Come si può ben notare dai grafici sottostanti i modelli simulati in zona climatica A-B, C e D (da Figura 187 a Figura 189) raggiungono la copertura totale del fabbisogno di energia in tutti i mesi, con una producibilità massima nei mesi estivi. Il surplus, tuttavia, è leggermente ridotto in questi mesi in quanto il fotovoltaico assolve alla fornitura di energia necessaria per il raffrescamento. Il fabbisogno energetico risulta coperto anche nei mesi invernali.

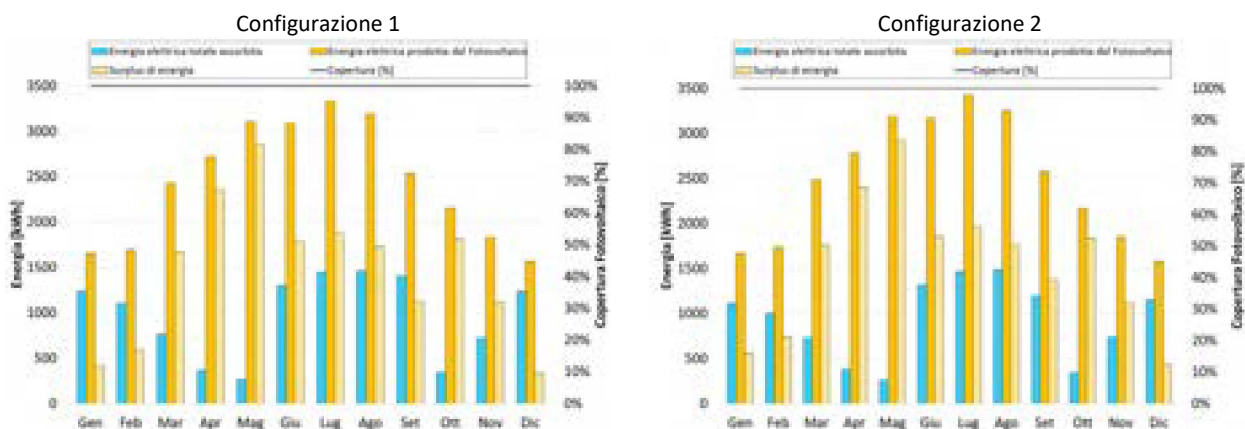
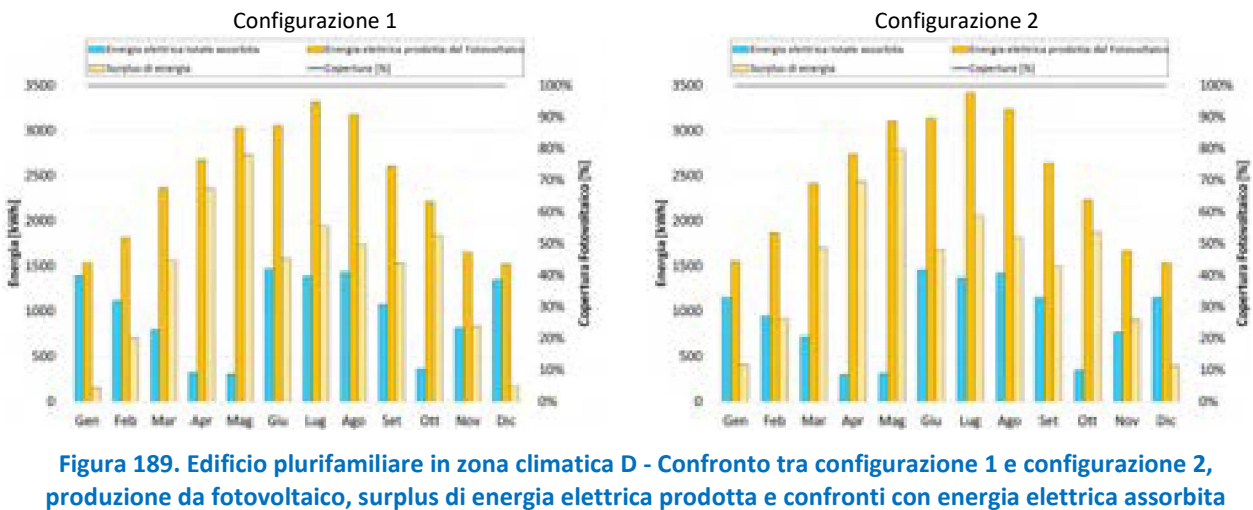
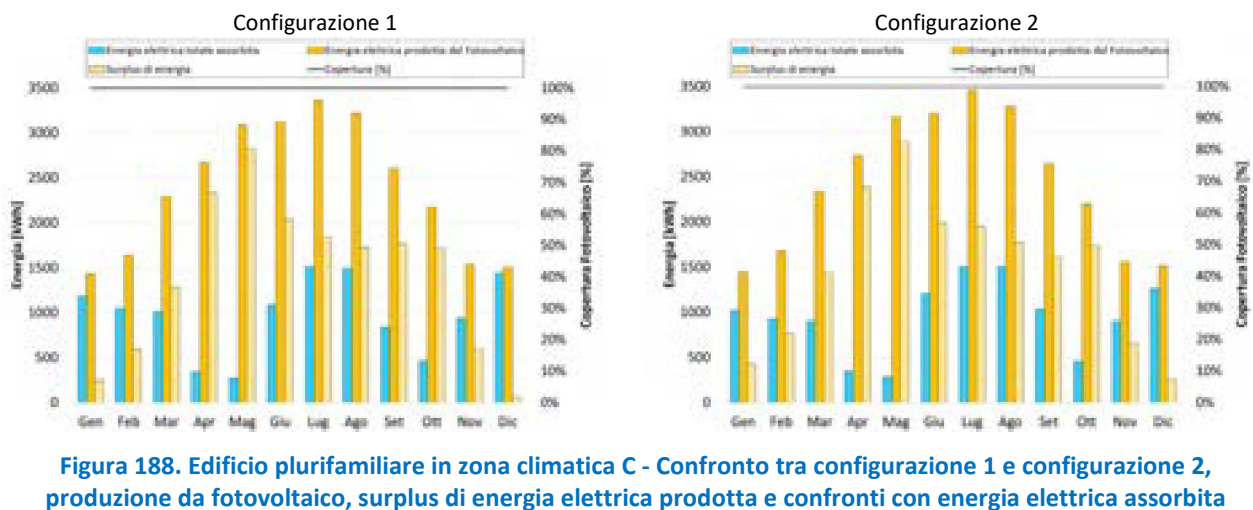
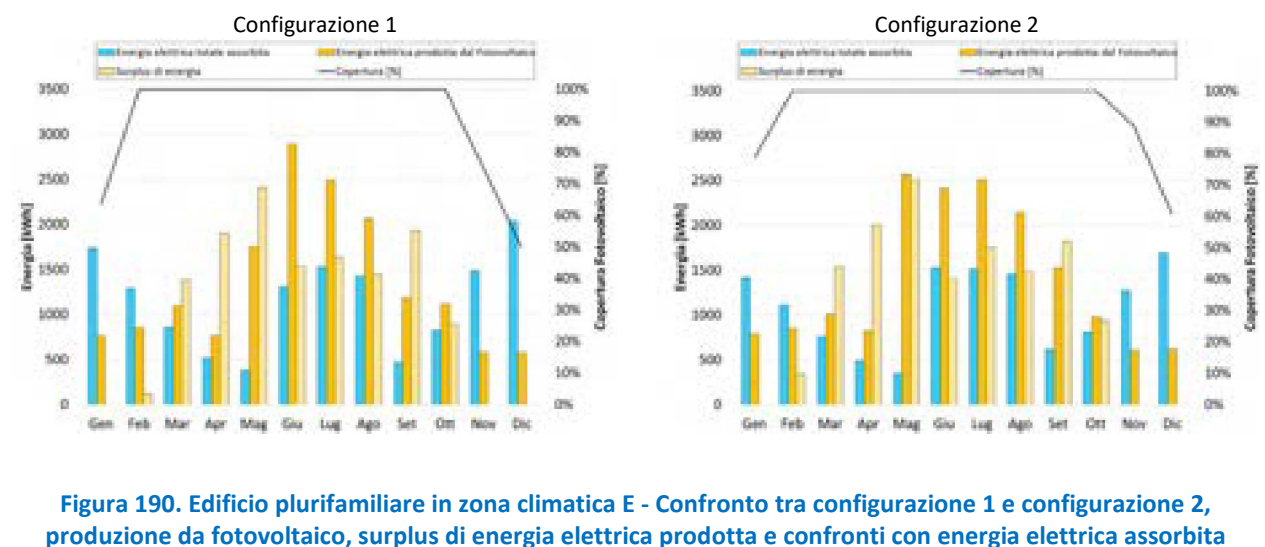


Figura 187. Edificio plurifamiliare in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, produzione da fotovoltaico, surplus di energia elettrica prodotta e confronti con energia elettrica assorbita



Diverso è, invece, il caso delle zone climatiche E ed F, che raggiungono una copertura soddisfacente in tutti i mesi dell'anno, tranne che in quelli di gennaio, novembre e dicembre (Figura 190 e Figura 191), in cui il fabbisogno energetico per riscaldamento e acqua calda sanitaria non è totalmente coperto.



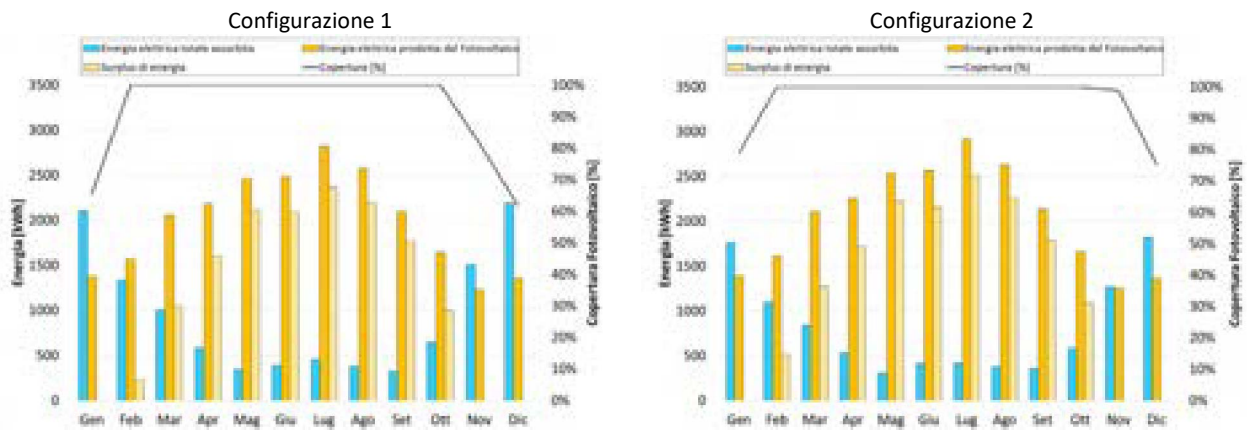


Figura 191. Edificio plurifamiliare in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, produzione da fotovoltaico, surplus di energia elettrica prodotta e confronti con energia elettrica assorbita

Per rendere più chiaro il tutto si riportano in Tabella 93 i valori dell'energia prodotta mensilmente e annualmente e in Tabella 94 le percentuali di copertura da fotovoltaico, comprensive di surplus.

Tabella 93. Energia elettrica mensile e annuale prodotta dal solare fotovoltaico nelle differenti configurazioni e zone climatiche

Mesi	Energia elettrica [kWh]									
	1AB	1C	1D	1E	1F	2AB	2C	2D	2E	2F
Gen	1657	1429	1537	1098	1377	1671	1440	1551	1112	1391
Feb	1694	1638	1819	1403	1568	1738	1677	1863	1447	1612
Mar	2430	2292	2358	2238	2054	2485	2337	2413	2293	2108
Apr	2720	2675	2671	2415	2183	2788	2733	2739	2483	2251
Mag	3112	3090	3028	2789	2462	3184	3162	3100	2861	2532
Giu	3087	3118	3052	2847	2483	3172	3193	3137	2932	2565
Lug	3328	3359	3320	3163	2823	3428	3459	3420	3264	2919
Ago	3194	3218	3173	2866	2573	3254	3278	3233	2927	2630
Set	2534	2607	2601	2395	2096	2574	2647	2641	2435	2136
Ott	2155	2175	2206	1720	1641	2175	2195	2226	1740	1663
Nov	1834	1539	1652	1114	1232	1852	1556	1670	1132	1250
Dic	1567	1504	1526	1016	1359	1577	1514	1536	1026	1369
Anno	29312	28644	28942	25065	23851	29898	29191	29528	25653	24427

Tabella 94. Copertura percentuale da fotovoltaico del fabbisogno di energia elettrica nelle differenti configurazioni e zone climatiche

Mesi	Copertura [%]									
	1AB	1C	1D	1E	1F	2AB	2C	2D	2E	2F
Gen	125%	117%	110%	63%	65%	134%	129%	126%	79%	79%
Feb	135%	136%	139%	108%	115%	142%	145%	149%	123%	132%
Mar	169%	156%	166%	162%	151%	171%	161%	170%	167%	160%
Apr	187%	187%	188%	179%	173%	186%	187%	189%	181%	176%
Mag	192%	191%	190%	186%	186%	192%	191%	190%	188%	188%
Giu	165%	165%	152%	154%	184%	158%	162%	154%	148%	184%
Lug	157%	155%	158%	152%	184%	157%	156%	160%	154%	186%
Ago	154%	154%	155%	150%	185%	154%	154%	156%	150%	186%
Set	153%	168%	159%	180%	184%	153%	161%	157%	175%	183%
Ott	184%	179%	184%	152%	161%	184%	179%	184%	154%	165%
Nov	161%	139%	151%	75%	82%	160%	142%	154%	89%	99%
Dic	121%	104%	112%	50%	62%	127%	117%	126%	61%	75%
Anno	159%	154%	155%	134%	144%	160%	157%	160%	139%	151%

8.2.5 Sintesi dei fabbisogni complessivi e della copertura da fonti rinnovabili

Per completezza e per una lettura più immediata, si riportano i grafici riassuntivi di tutti i fabbisogni energetici analizzati per singoli servizi energetici e l'energia prodotta da fonti rinnovabili, per ogni configurazione e divisi per zone climatiche (da Figura 192 a Figura 196).

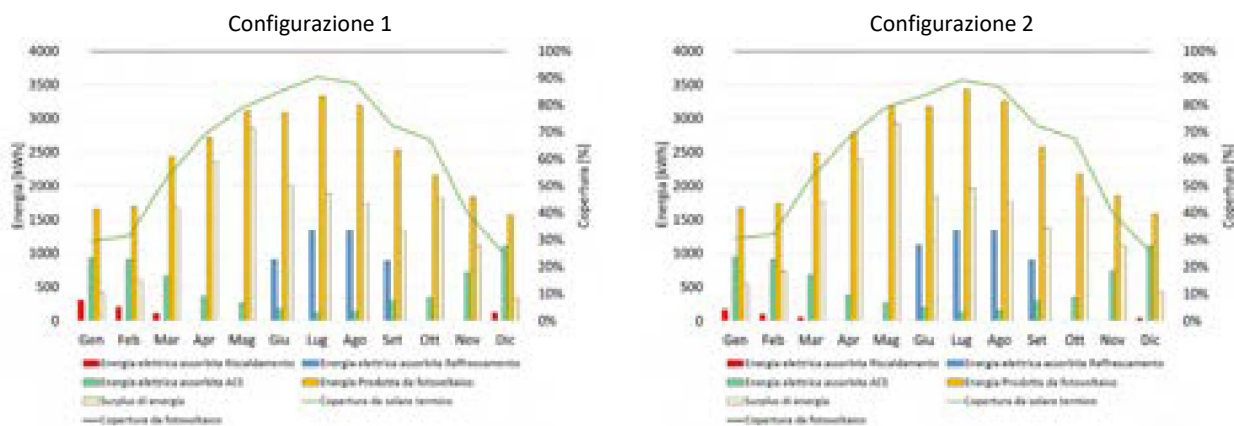


Figura 192. Edificio plurifamiliare in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, grafico riepilogativo dei fabbisogni elettrici e produzione da fonte rinnovabile

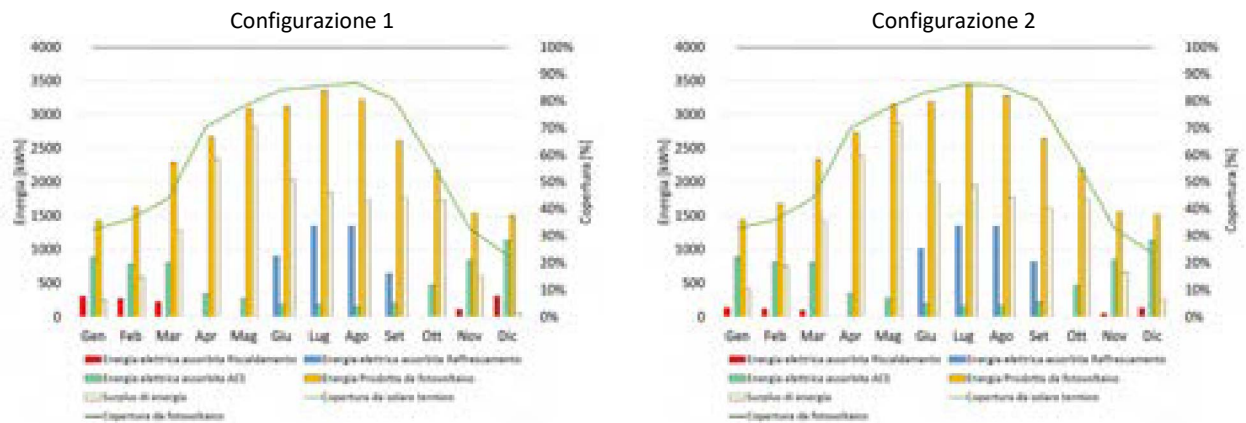


Figura 193. Edificio plurifamiliare in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, grafico riepilogativo dei fabbisogni elettrici e produzione da fonte rinnovabile

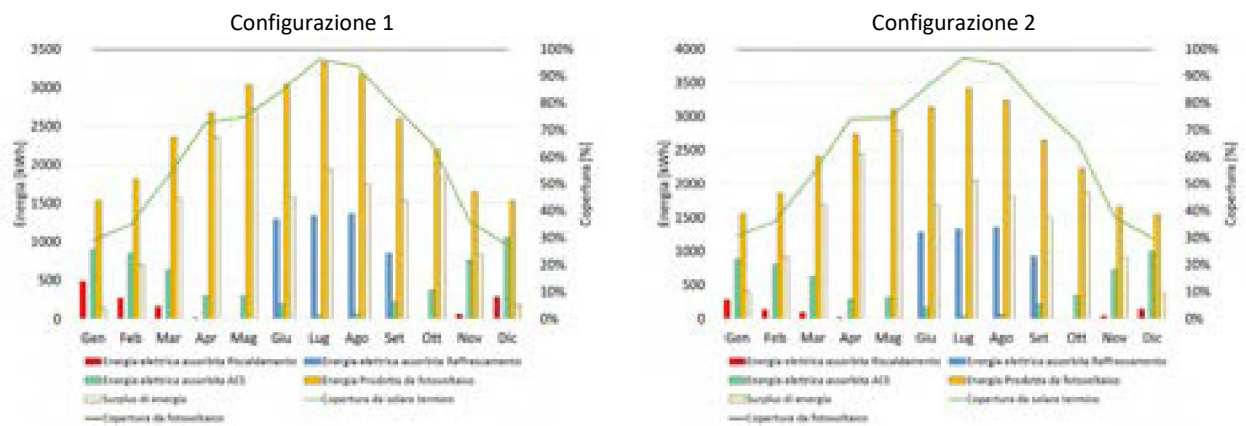


Figura 194. Edificio plurifamiliare in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, grafico riepilogativo dei fabbisogni elettrici e produzione da fonte rinnovabile

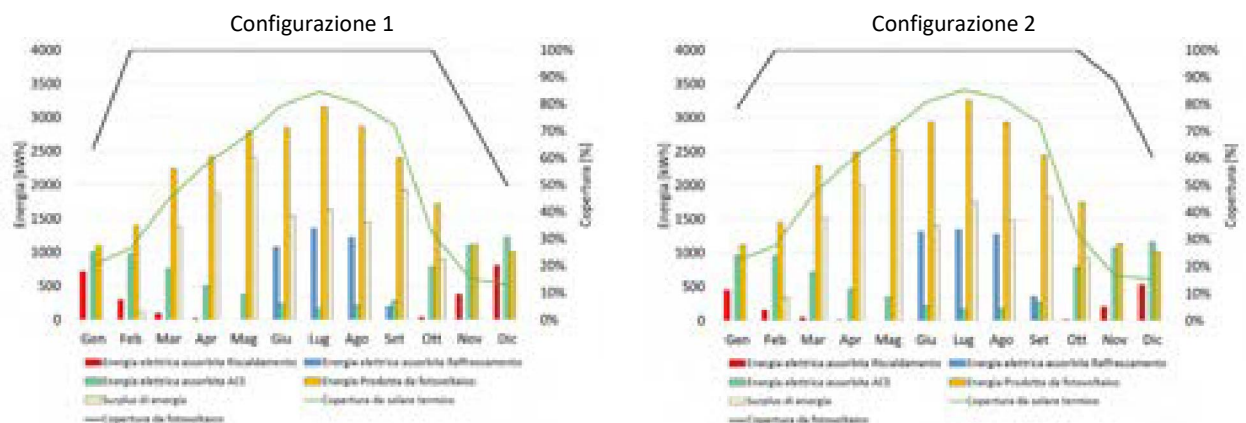


Figura 195. Edificio plurifamiliare in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, grafico riepilogativo dei fabbisogni elettrici e produzione da fonte rinnovabile

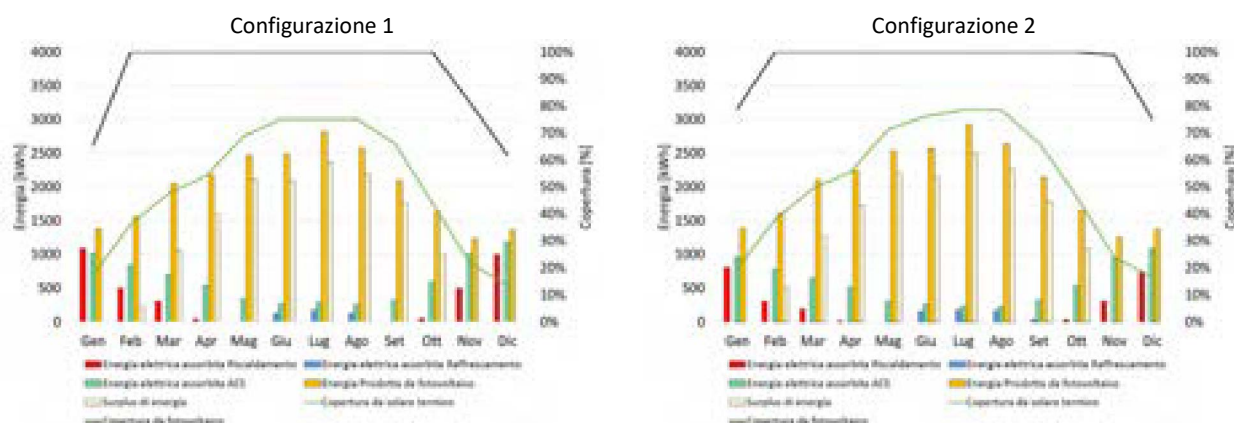


Figura 196. Edificio plurifamiliare in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, grafico riepilogativo dei fabbisogni elettrici e produzione da fonte rinnovabile

Risultato sostanziale, quindi, è che le due configurazioni analizzate si possono definire edifici “zero energy” in quasi tutte le zone climatiche, anche calcolando il fabbisogno totale energetico in termini mensili e non soltanto annuali, con una verifica più stringente. Le uniche configurazioni che non rispondono a tale requisito sono quelle localizzate in zona climatica E ed F durante i mesi di gennaio, novembre e dicembre.

Tuttavia, a livello annuale, tutti i casi raggiungono pienamente l’obiettivo ZEB e anzi lo superano, determinandosi, soprattutto nei mesi delle stagioni intermedie che non necessitano di climatizzazioni invernale o estiva, come edifici “produttori di energia” a tutti gli effetti. Essi, infatti, durante l’anno, possono utilizzare il surplus per coprire i fabbisogni elettrici restanti e riversare la restante quota prodotta in rete.

9 Valutazioni economiche per gli edifici analizzati

9.1 Metodologia usata per la stima dei costi

La fase di valutazione dei costi è fondamentale al fine di dimostrare come l’obiettivo ZEB sia raggiungibile anche dal punto di vista economico. Prima di descrivere il metodo adottato e i risultati raggiunti occorre, tuttavia, premettere che i costi individuati e descritti nel seguito, pur in mancanza di progetti esecutivi veri e propri, sono stati redatti allo scopo di individuare una stima dei costi più verosimili possibili per consentire un confronto economico tra i modelli individuati.

Le voci di costo sono tratte principalmente dal Prezzario Unico del Cratere del Centro Italia [42], ma anche dal Prezzario della Regione Lazio [43] e dal Prezzario DEI [44]. Inoltre, per le soluzioni di involucro o impiantistiche più performanti e all’avanguardia non ricomprese nei prezzari stessi, i costi sono stati desunti da listini e preventivi appositamente elaborati. Nei prezzi sono inoltre comprese le quote per spese generali (15%) e gli utili d’impresa (10%) nonché il compenso per tutti gli oneri attinenti alla esecuzione delle singole categorie di lavoro, in particolare mezzi d’opera, assicurazioni, fornitura materiali, loro lavorazione, sfrido ed impiego. I costi sono IVA esclusa.

I costi dell’involucro sono stati valutati dapprima per singoli componenti (pareti verticali, solai di basamento e di copertura, infissi) e successivamente per la totalità dell’involucro. I costi dei singoli componenti (paragrafo 9.2) sono stati analizzati per alcune delle tipologie costruttive e strutturali più rappresentative e per ciascuna zona climatica, valutazione utile ad orientare le scelte dei componenti di involucro nella fase introduttiva di caratterizzazione dei modelli. Nell’analisi sono stati presi in considerazione gli elementi con estensione superficiale. Elementi lineari o puntuali vengono, invece, conteggiati solo nei computi totali degli edifici (ad es. per le coperture: canali di gronda, bocchette di raccolta dell’acqua piovana, ecc). L’unica eccezione è fatta per i pilastri e per le travi in c.a. il cui contributo viene aggiunto all’interno dei relativi

componenti (parete, solaio, copertura) per consentire un migliore confronto economico tra le varie tipologie strutturali. Inoltre non sono compresi i costi accessori.

Dal par. 9.3 al par. 9.7 viene riportata una valutazione economica dei costi di costruzione delle quattro configurazioni scelte, analizzando separatamente per ciascun modello i costi di involucro, dei sistemi impiantistici e delle opere accessorie. La stima dei costi è stata svolta attraverso la redazione di computi metrici estimativi riportati nell'Allegato 2 del presente report. Non sono stati presi in considerazione i costi legati a condizioni "variabili" al contorno, quali il costo del terreno su cui è costruito l'edificio, gli oneri di costruzione, le sistemazioni esterne, gli arredi interni e talune finiture (rivestimenti di bagni e cucina).

Per i costi della sicurezza, fatta salva la necessità di redazione di un Piano di Sicurezza e Coordinamento ai sensi del D. Lgs 81/2008 [45] e non oggetto dello studio, si è comunque voluto dare una stima approssimativa tenendo conto dei costi accessori più importanti, differenziandoli, dove necessario, a seconda dei tempi ipotizzati per la costruzione relativi a ciascuna tipologia costruttiva ed edilizia.

Infine, si è tenuto conto anche degli oneri progettuali, fornendone un costo stimato pari al 20% del valore presunto dell'opera.

9.2 Costi dei componenti di involucro

Come anticipato nel paragrafo 9.1, nell'analisi economica dei costi dei singoli componenti sono stati presi in considerazione gli elementi con estensione superficiale presenti nel pacchetto stratigrafico del componente in esame. La lettura delle tabelle riportate nei paragrafi seguenti può avvenire consultando la legenda di Tabella 95.

Tabella 95. Legenda dei materiali utilizzati

Sigla	MATERIALE
CLT	Cross Laminated Timber (X-lam)
LAT	Blocco in Laterizio alveolato
Lat-C	Struttura mista Latero-Cementizia
CAA	Blocco di Calcestruzzo Aerato Autoclavato
FL	Fibra di Legno
LR	Lana di Roccia
EPS	Polistirene Espanso Sinterizzato
EPSg	Polistirene Espanso Sinterizzato con grafite

A titolo esemplificativo, si riporta in Tabella 96 lo stralcio di un computo redatto per un componente.

Tabella 96. Stralcio di computo di componente: parete in laterizio e cappotto in lana di roccia

TARIFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	MISURAZIONI:				Quantità	IMPORTI	
		Unità	Lung.	Larg.	H/peso		unitario	TOTALE
A23019.b	Tinteggiatura con idropittura a base di resine silossaniche in dispersione acquosa a finitura opaca, per esterni, resistente alla luce, ad elevata permeabilità al vapore acqueo, applicata a pennello a due mani su supporto preparato: colorata <i>Tinteggiatura esterna</i> SOMMANO mq					1,00	13,22	13,22
A09012.c	Muratura in elevazione realizzata con blocchi di laterizio alveolato di cui alla norma UNI EN 771, retta o curva ed a qualsiasi altezza, compresi oneri e magisteri per l'esecuzione [...] per costruzioni di murature di tamponamento: spessore 30 cm SOMMANO mq					1,00	55,64	55,64
A12042	Rivestimento isolante termico eseguito all'esterno del tipo a cappotto a qualsiasi altezza applicato su superfici nuove intonacate con finitura a frattazzo o staggiata, realizzato nel seguente modo: [...] E' inoltre compreso quanto altro occorre per dare l'opera finita. SOMMANO mq					1,00	43,30	43,30
A12043.c	Compenso al rivestimento isolante termico eseguito all'esterno del tipo a cappotto di cui al prezzo A12042 con pannelli. Pannelli isolanti in lana di roccia [MW - EN 13162], aventi le seguenti caratteristiche [...] Spessore 6 cm. E' inoltre compreso quanto altro occorre per dare l'opera finita. SOMMANO mq					1,00	13,50	13,50
A12043.d	Compenso al rivestimento isolante termico eseguito all'esterno del tipo a cappotto di cui al prezzo A12042 con pannelli. Compenso per ogni cm in più per pannelli isolanti in lana di roccia [...]. E' inoltre compreso quanto altro occorre per dare l'opera finita. SOMMANO mq					1,00	2,30	2,30
Da computo specifico	Realizzazione di pilastri in c.a. comprensivi di fornitura e posa in opera di conglomerato cementizio, armatura e casseformi per il getto, esclusi i ponteggi (contributo stimato al m²) SOMMANO mq					1,00	16,18	16,18
A14010.a	Intonaco civile formato da un primo strato di rinzafo, da un secondo strato tirato in piano con regolo [...] per interni su pareti verticali: con malta di calce spenta e sabbia composta da 500 kg di calce per 1,00 mc di sabbia <i>Intonaco interno</i> SOMMANO mq					1,00	22,11	22,11
A23001	Preparazione del fondo di superfici murarie interne con applicazione a pennello di isolante acrilico all'acqua SOMMANO mq					1,00	1,80	1,80
A23008.b	Tinteggiatura a calce di superfici esclusa la preparazione delle stesse: su superfici interne: per ogni strato a coprire eseguito a pennello <i>tinteggiatura interna a 3 mani</i> SOMMANO mq					3,00	2,10	6,30
	TOTALE euro							174,35

9.2.1 Coperture

In Tabella 97 si riporta una sintesi dei costi delle due tipologie di copertura, in X-lam e in latero-cemento, distinguendole a seconda dell'isolante in estradosso e della tipologia (piana o inclinata).

Nell'analisi dei costi dei solai di copertura in X-lam è stato considerato un pannello a 5 strati con spessore pari a 160 mm mentre per il solaio a struttura mista in calcestruzzo armato e laterizio, a nervature parallele, è stato considerato il costo di un solaio realizzato interamente in opera con l'ausilio di tralicci in armatura presagomati con base in laterizio.

Per i costi delle coperture inclinate si è fatto riferimento alla tipologia con una intercapedine di ventilazione e sono altresì compresi i costi della guaina impermeabile traspirante e del successivo manto di copertura in tegole, mentre per le coperture piane sono stati calcolati i costi di un massetto premiscelato con pendenza minima, di un manto impermeabile e di una pavimentazione per esterni.

Tabella 97. Costi unitari dei solai di copertura

Copertura												
Struttura		Isolante	Spessore isolante per zona climatica					Costi €/m² per zona climatica				
			A e B	C	D	E	F	A e B	C	D	E	F
Inclinata ventilata	CLT	FL	3	4	7	10	12	273	276	282	287	291
	Lat-C	LR	3	3	6	9	10	250	250	259	263	266
	Lat-C	EPSg	3	3	6	9	9	251	251	255	259	259
Piana	CLT	LR	4	4	7	10	11	281	281	287	294	297
	Lat-C	LR	3	4	6	8	10	257	259	308	268	317
	Lat-C	EPSg	2	3	5	8	9	255	258	260	265	266

9.2.2 Pareti

I costi delle pareti sono sintetizzati in Tabella 98, cercando di stimare le soluzioni più affini a quelle dei modelli. Per il costo della parete di tamponatura in blocchi di laterizio è stato considerato il costo del blocco alveolato dello spessore di 30 cm intonacato e tinteggiato internamente e si è tenuto conto anche del contributo derivante dalla realizzazione di pilastri in calcestruzzo armato (pari a 16,18 €/m² per l'edificio monofamiliare). Mentre nel costo della soluzione in X-lam sono stati presi in considerazione pannelli in X-lam di legno di abete a tre strati con spessore 100 mm e il costo di una controparete in cartongesso tinteggiata e fissata su struttura metallica con montanti ad interasse di 60 cm. Su entrambi le soluzioni è stato considerato il costo dell'applicazione del rivestimento a cappotto e della tinteggiatura finale.

In ultimo è stato analizzato il costo della parete in blocco di CCAA, intonacato e tinteggiato su entrambi i lati, comprensivo del contributo derivante dalla realizzazione di pilastri in calcestruzzo armato (pari a 16,18 €/m²).

Tabella 98. Costi unitari delle pareti esterne

Pareti esterne											
Struttura	Isolante	Spessore isolante per zona climatica					Costi €/m ² per zona climatica				
		A e B	C	D	E	F	A e B	C	D	E	F
CLT	FL	8	8	9	11	12	225	225	229	237	241
Lat-C	LR	3	5	7	8	8	165	170	174	177	177
Lat-C	EPS	4	6	8	10	11	164	166	169	171	173
CCA*	-	24	30	35	40	45	142	153	164	168	190

*: in questo caso lo spessore indicato è quello del blocco.

9.2.3 Solai interpiani

Il costo della soluzione in X-lam ammonta a 295 €/m² e prevede il costo del pannello a 5 strati e quello dei pannelli in cartongesso ancorati su struttura metallica e tinteggiati, diversamente la soluzione latero-

cementizia ha un costo che si aggira intorno ai 270 €/m² in quanto prevede oltre al costo del solaio realizzato in opera con tralicci in armatura pre-sagomati con base in laterizio e intradosso intonacato, il contributo delle travi gettate in opera, stimato intorno ai 70 €/m². In entrambi i casi sono stati inseriti i costi di un massetto alleggerito, un foglio di barriera al vapore, un pannello termoacustico, un massetto livellante e la pavimentazione.

9.2.4 Fondazioni e solaio di basamento

È stata svolta una valutazione economica per una fondazione del tipo a travi rovesce sulla base di un progetto strutturale di massima per l'edificio monofamiliare. Il costo ottenuto è stato diviso per la superficie netta dell'edificio ottenendo quindi un costo parametrico pari a 160 €/m². Nel costo del solaio, invece, rientrano i costi di un vespaio aerato realizzato con casseri modulari a perdere autoportante con sovrastante soletta in conglomerato cementizio, massetto premiscelato, pannelli isolante in EPS e ulteriore massetto. Il costo finale comprensivo di solaio e fondazione risulta pari a circa 280 €/m² (Tabella 99).

Tabella 99. Costo unitario di fondazione e solaio a basamento

Fondazione e solaio a basamento	
	Costi €/m ²
Fondazioni a trave rovesce e solaio con vespaio areato	280

9.2.5 Serramenti e infissi

Sono stati analizzati i costi di infissi esterni con caratteristiche termiche simili a quelle utilizzate per i modelli. Nei costi di Tabella 100 sono compresi i controtelai, le maniglie, le guarnizioni e quanto altro occorre per dare l'opera finita.

Tabella 100. Costi unitari degli infissi

Serramenti		
Telaio	Vetro	Costi €/m ²
PVC	Doppio vetro	390
PVC	Triplo vetro	415
Legno lamellare	Doppio vetro	495
Legno lamellare	Triplo vetro	520

9.3 Costi di realizzazione dell'involucro

L'analisi è stata condotta adottando le medesime caratteristiche tecniche utilizzate per i modelli analizzati o le più affini possibile. Al di là delle specifiche tecnologie utilizzate per ciascun edificio, è possibile individuare i costi delle lavorazioni comuni nella realizzazione dei quattro modelli.

Viene previsto il costo di uno scavo di sbancamento effettuato con mezzi meccanici su terreno di roccia alterata per la profondità di 1 metro e con estensione l'impronta delle fondazioni del fabbricato incrementata di un metro per consentire l'esecuzione delle fondazioni stesse, il rinterro con materiale proveniente da cava per la parte necessaria a ricoprire lateralmente le fondazioni e il trasporto a rifiuto della terra non utilizzata, ipotizzata distante 20 km dal cantiere. Quindi la posa del massetto di 30 cm, la predisposizione di casseforme per le travi di fondazione, l'alloggiamento dei ferri di armatura e il successivo getto di conglomerato cementizio (classe di esposizione XC1-XC2.XC3-XC4: C25/30). Non disponendo di un progetto esecutivo strutturale per il costo dell'acciaio ci si è basati su una stima di 100 kg/m³ per le travi di fondazione e 200 kg/m³ per gli altri elementi strutturali (travi di solaio e pilastri).

Sono state conteggiate anche le finiture interne quali intonaco per le tipologie in umido e controparete in cartongesso per la tecnologia a secco dell'X-lam, e la tinteggiatura interna (a calce a 3 mani per bagni e cucina, ad acqua a 2 mani per gli altri ambienti) ed esterna con idropittura a base di resine silossaniche a 2 mani.

All'ingresso degli appartamenti sono previsti portoncini blindati in classe 1 antintrusione, porte interne tamburate e su tutti i serramenti sono installati davanzi termici in EPS grafitato con rivestimento corazzato idrorepellente per la correzione del ponte termico e tapparelle avvolgibili orientabili motorizzate. I balconi aggettanti sono stati foderati con pannelli di isolante termico per un metro di aggetto, così come per i pilastri nella parete in CCAA, priva di cappotto termico, è stato previsto un rivestimento isolante esterno per evitare i ponti termici.

Come anticipato nel paragrafo 9.1, nell'analisi complessiva dei costi di realizzazione non sono stati presi in considerazione i costi legati a condizioni "variabili" o legati al contorno quali il costo del terreno su cui è costruito l'edificio, gli oneri di costruzione, le sistemazioni esterne, gli arredi interni e i rivestimenti di bagni e cucina.

Nella Tabella 102 si riportano le stime di costo delle quattro tipologie di involucro, due per il monofamiliare e due per il plurifamiliare, secondo i parametri della Tabella 101.

Dalla Tabella 102 emerge che i costi legati all'involucro del monofamiliare si attestano intorno a un valore medio di 1.450 € per unità di superficie, con una differenza tra le due configurazioni di 300 €/m², mentre i costi di involucro delle due configurazioni di edificio plurifamiliare sono molto più simili tra loro, con un costo a metro quadro di 1.035 € circa.

Le lavorazioni maggiormente incidenti dal punto di vista economico sono così ripartite:

1. nei modelli con tecnologia a umido (monofamiliare 1 e plurifamiliare 1) le categorie più incidenti sono legate agli infissi (17%) alla struttura in calcestruzzo armato (13%), alle opere di protezione termica (12%), agli intonaci (14%) e infine alle opere murarie (11%);
2. nella seconda configurazione di involucro le categorie relative alle opere strutturali in legno (31%), alle opere di protezione termica e alle strutture di cartongesso (12%) e agli infissi (11%);
3. nel plurifamiliare 2 le categorie più incidenti sono quelle legate alle opere murarie (18%), agli infissi (16%), alla struttura in c.a. (14%), agli intonaci (13%).

Tabella 101. Configurazione e componenti di involucri utilizzati per i quattro modelli nella zona D

Componenti di involucro	MONOFAMILIARE		PLURIFAMILIARE	
	1	2	1	2
Parete	Pilastri in c.a. e tamponatura in blocchi di laterizio alveolato + cappotto in lana di roccia	Pannello in legno X-lam + cappotto in fibra di legno	Pilastri in c.a. e tamponatura in blocchi di laterizio alveolato + cappotto in lana di roccia	Pilastri in c.a. rivestiti con isolante termico in EPS con grafite + tamponatura con blocco di CAA
Copertura	Piana latero-cementizia e isolamento in estradosso in lana di roccia	Inclinata ad una intercapedine di ventilazione in legno X-lam e isolamento all'estradosso in fibra di legno	Piana latero-cementizia e isolamento in estradosso in lana di roccia	Inclinata ad una intercapedine di ventilazione in latero-cemento e isolata con pannelli in EPS con grafite
Solaio interpiano	Solaio latero-cementizio + isolante in lana di roccia	Solaio realizzato in pannelli di legno X-lam + isolante in lana di roccia	Solaio latero-cementizio + isolante termo-acustico in EPS	Solaio latero-cementizio + isolante termo-acustico in EPS
Fondazione e solaio di basamento	Travi continue in c.a. e casseri modulari del tipo igloo autoportanti + isolante in EPS			
Serramenti	PVC – doppio vetro	legno – doppio vetro	PVC – doppio vetro	PVC – doppio vetro

Tabella 102. Ripartizione dei costi di involucro per categorie di lavoro per i quattro modelli

CATEGORIE DI LAVORO		COSTI [€]			
		MONOFAMILIARE		PLURIFAMILIARE	
		1	2	1	2
1.	Movimenti di terra	3.953	3.953	8.524	8.524
2.	Malte, conglomerati cementizi, casseforme e acciaio per c.a.	15.735	9.117	164.152	164.152
3.	Opere di sottofondo	6.563	5.439	81.479	75.062
4.	Strutture costruttive in legno	0	45.355	0	0
5.	Solai	5.490	0	75.945	75.945
6.	Scale	4.500	3.500	18.000	18.000
7.	Opere murarie	11.890		137.940	204.715
8.	Coperture e opere da lattoniere	1.911	8.150	12.811	30.385
9.	Impermeabilizzazioni	1.251	1.049	14.584	14.584
10.	Opere di protezione termica e acustica	14.251	17.936	147.138	62.210
11.	Intonaci	17.454	0	145.505	152.141
12.	Controsoffitti e pareti divisorie	0	17.769	0	0
13.	Pavimenti	4.723	3.017	59.137	50.000
14.	Rivestimenti	3.624	2.972	30.879	30.879
15.	Infissi, tapparelle e inferriate	20.761	16.005	179.505	179.505
16.	Opere da pittore	5.671	11.428	66.365	66.365
Costo complessivo (IVA esclusa)		117.775	145.688	1.141.964	1.132.468
Costo unitario [€/m²]		1.310	1.619	1.038	1.030

9.4 Costi dei sistemi impiantistici

9.4.1 Impianti elettrici e impianti speciali

Nella stima dei costi degli impianti elettrici si è fatto riferimento a un Livello 2 (standard) per edificio residenziale secondo la norma CEI 64-8 [46] che, rispetto al Livello 1, prevede un aumento della dotazione e dei componenti (punti luce, prese di corrente, prese telefoniche...), oltre che l'installazione di dispositivi per la protezione e la sicurezza della casa quali il videocitofono, l'impianto di anti-intrusione e un sistema standard di controllo dei carichi. L'impianto antintrusione comprende sensori del tipo a contatto sui serramenti e un rilevatore a infrarosso nell'ambiente. Non sono compresi i costi di elettrodomestici.

9.4.2 Impianto fotovoltaico

Nella stima dei costi dell'impianto PV è stato considerato oltre al costo dei pannelli con stesse potenze a quelle utilizzate nei modelli, i costi dell'inverter e dell'accumulo elettrico. Per quest'ultimo, dal momento che non è stata condotta un'analisi dei consumi di illuminazione e apparecchiature elettriche, è stata fornita una stima orientativa in modo da tenerne comunque conto nei costi.

9.4.3 Impianto idrico-sanitario

Nella stima dei costi dell'impianto idrico rientrano i costi delle seguenti reti e componenti:

- rete di adduzione per ciascun apparecchio igienico-sanitario, mediante sistema a collettore, con tubo in multistrato, per distribuzione di acqua calda e fredda;
- rete di scarico con tubazioni in pvc tipo 302;
- rete generale di distribuzione acqua calda/ fredda con tubazioni e raccordi a saldare in polipropilene copolimero "random" PN 20-25
- colonna di scarico fonoassorbente realizzata con tubazioni e raccordi in materiale termoplastico, diametro 110 mm, spessore 5 mm, completa di ventilazione primaria e secondaria (diametro 75 mm);
- predisposizione di allaccio per apparecchi igienico-sanitari (lavastoviglie, lavatrice, lavabo, lavello, vaso, cassetta di scarico...), fornito e posto in opera all'interno di bagni e cucine a valle delle valvole di intercettazione ubicate nel locale e fino agli attacchi a filo muro;
- fornitura e posa in opera delle apparecchiature igienico-sanitarie con le relative rubinetterie

- assistenza muraria alla realizzazione degli impianti (calcolata come il 10% del costo dell'impianto)

Non sono compresi l'allaccio in fogna e i pozzetti di raccolta liquami.

9.4.4 Impianto di produzione di ACS

Nella stima dei costi si è tenuto conto dei costi di fornitura e installazione delle pompe di calore dedicate, dei collettori solari e del relativo accumulo con le medesime caratteristiche di potenza ed efficienza dei modelli. Sono compresi i costi di collegamento alla centrale termica.

9.4.5 Impianto di climatizzazione estiva e invernale

Il costo dell'impianto è stato stimato prevedendo

- i costi dei generatori di potenze ed efficienze affini a quelli dei modelli studiati;
- i costi di un circuito a ventilconvettori verticali considerando anche le quote di una valvola di zona per stanza e quella di una valvola on-off su ciascun ventilconvettore, nonché il costo di un pannello di controllo locale per l'impostazione e la visualizzazione delle varie funzioni di caldo/freddo, deumidificazione, ventilazione ecc.;
- i costi di collettori di derivazione per ciascun piano o appartamento e collettori complanari posti in centrale termica;
- i costi dell'assistenza muraria (pari al 10% del costo dell'impianto) e i collegamenti elettrici in centrale termica.

9.4.6 Impianto di sollevamento

Solo per l'edificio plurifamiliare viene conteggiato anche il costo di un ascensore elettrico con una portata fino a 630 kg (8 persone) da 5 fermate. È compresa l'assistenza muraria (pari al 10% del costo dell'ascensore).

9.4.7 Costi complessivi dei sistemi impiantistici

Si riportano in Tabella 103 i costi stimati per ciascuna categoria di lavoro.

Tabella 103. Ripartizione dei costi impiantistici per categorie

CATEGORIE DI LAVORO	COSTI [€]			
	MONOFAMILIARE		PLURIFAMILIARE	
	1	2	1	2
1. Impianti elettrici	7.785	6.720	77.670	77.670
2. Impianti di terra	1.000	1.000	1.000	1.000
3. Impianti speciali	5.164	5.164	38.127	38.127
4. Impianti fotovoltaici	14950	14.950	79.883	79.883
5. Impianto idrico-sanitario	8.260	7.884	111.293	111.293
6. Impianti di riscaldamento e condizionamento	23.322	22.262	240.444	240.444
7. Impianto solare termico	7.935	7.935	68.295	68.295
8. Impianto di sollevamento	0	0	41.565	41.565
Costo totale	68.416	65.915	658.276	658.276
Importo unitario [€/m²]	760	732	598	598

Le differenze di costo che si evincono tra le soluzioni del modello monofamiliare sono date dalla minore incidenza delle opere edili relative agli impianti.

Le categorie di lavoro maggiormente incidenti sono così distribuite:

- Nei modelli monofamiliari l'impianto di riscaldamento e condizionamento rappresenta il 34% dell'importo complessivo, seguito dall'impianto PV (22%) e dagli impianti idrico-sanitario e solare termico (rispettivamente 12%), impianto elettrico (11%);

- Nei modelli plurifamiliari, l'impianto di riscaldamento e condizionamento rappresenta il 37% dell'importo complessivo, seguito dall'impianto idrico-sanitario (17%), impianto elettrico e impianto PV (rispettivamente 12%), impianto solare termico (10%).

9.5 Costi accessori

Non si è proceduti alla redazione di un Piano di Sicurezza e Coordinamento ai sensi del D. Lgs 81/2008 [45], ma si è comunque voluto dare una stima approssimativa tenendo conto delle voci accessorie più importanti (quadro elettrico da cantiere, ponteggi, monoblocchi ad uso uffici e spogliatoi, bagno chimico ecc...), differenziandoli, dove necessario, a seconda dei tempi ipotizzati per la costruzione relativa a ciascuna tipologia costruttiva ed edilizia (Tabella 104). L'incidenza dei costi accessori stimati sul costo totale dell'opera (involucro e impianti) si attesta su una media del 6%, con un valore minimo del 3% nella configurazione monofamiliare in X-lam e un valore massimo dell'8% nella configurazione monofamiliare tradizionale.

Tabella 104. Costi della sicurezza

CATEGORIE DI LAVORO	COSTI [€]			
	MONOFAMILIARE		PLURIFAMILIARE	
	1	2	1	2
Durata ipotizzata del cantiere (mesi)	12	6	30	26
Costi accessori	14.010	6.641	109.922	97.626

9.6 Costi relativi agli oneri di progettazione

Per il calcolo relativo agli oneri professionali (Tabella 105) si stima un costo pari al 20% del valore presunto dell'opera. Il valore dell'opera è dato dalla somma dei costi di realizzazione dell'involucro, di installazione dei sistemi impiantistici e dei costi accessori. Sono esclusi i costi di IVA. e i contributi per la cassa previdenziale.

Tabella 105. Calcolo degli oneri di progettazione

CATEGORIE DI LAVORO	COSTI [€]			
	MONOFAMILIARE		PLURIFAMILIARE	
	1	2	1	2
Costo totale dell'opera	200.339	218.244	1.910.162	1.888.370
Costi di progettazione (20% dell'opera)	40.068	43.649	382.032	377.674

9.7 Costi complessivi

In Tabella 106 si riporta una sintesi della stima dei costi complessivi e suddivisi per macro-categorie di lavoro dei quattro modelli analizzati con le caratteristiche di Tabella 101. Da queste sintesi si può evincere che la seconda configurazione di monofamiliare ha un costo del 10% circa più alto rispetto alla prima, mentre per il plurifamiliare i costi sono pressoché simili sebbene sia leggermente più basso il costo della seconda configurazione. Occorre precisare che i modelli presentano non solo tipologie di involucro diverse in parete ma anche configurazioni diverse (per esempio coperture piane o inclinate) e che quindi il confronto tra i modelli è finalizzato a dare un'indicazione, nei limiti del possibile, dei range di costo che si possono avere per alcune tipologie costruttive ed edilizie più o meno ricorrenti nel patrimonio nazionale.

Tabella 106. Riepilogo dei costi dei 4 modelli di edificio

MACRO-CATEGORIE DI LAVORO	COSTI [€]			
	MONOFAMILIARE		PLURIFAMILIARE	
	1	2	1	2
1. Realizzazione involucro	117.775	145.688	1.141.964	1.132.468
2. Installazione sistemi impiantistici	68.416	65.915	658.276	658.276
3. Costi accessori	14.010	6.641	109.922	97.626
4. Oneri di progettazione	40.068	43.649	382.032	377.674
Costo stimato complessivo dell'opera	240.269	261.893	2.292.194	2.266.044
Costo unitario [€/m²]	2.671	2.910	2.084	2.060

Inoltre, dalla Figura 197 è possibile individuare le incidenze dei vari costi: per tutte le configurazioni l'involucro incide per il 50% del costo complessivo, ad eccezione della seconda configurazione di involucro dove incide il 56% del costo totale, i sistemi impiantistici incidono il 28% in tutte le configurazioni, ad eccezione della seconda del monofamiliare (24%), i costi accessori incidono rispettivamente il 5,9% nel monofamiliare 1, il 2,6% nel monofamiliare 2, il 4,8% nel plurifamiliare 1, il 4,3% nel plurifamiliare 2. Gli oneri progettuali rappresentano per tutti i modelli il 17% circa dell'importo totale.

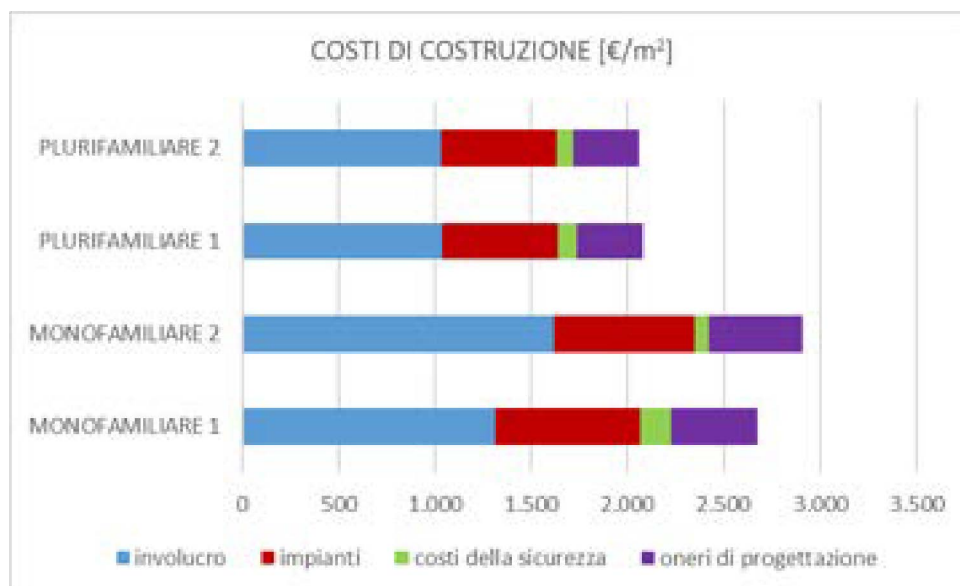


Figura 197. Importi unitari dei 4 modelli di edificio

Volendo confrontare i costi dei singoli modelli tra una zona climatica e l'altra, è stato verificato che essi riportano variazioni poco significative, con scostamenti complessivi tra la zona climatica A e la zona climatica F inferiori al 5%. Ciò dipende dal fatto che le uniche variazioni di costo sono relative all'involucro, in

particolare agli spessori degli isolanti usati in copertura e in parete, ed alla tipologia di infisso (doppio o triplo vetro).

9.8 Confronto dei costi degli edifici-tipo con costi di riferimento di edifici di nuova costruzione ad alta prestazione già realizzati

A conclusione della valutazione sono stati raccolti una serie di dati sui costi di costruzione (Tabella 107 e Tabella 108) di una ventina di edifici monofamiliari e plurifamiliari ad elevate prestazioni (nZEB e oltre) già costruiti nel territorio nazionale per consentire un confronto tra i costi di investimento stimati e i costi associati a edifici residenziali già realizzati con soluzioni tecnologiche simili o meno evolute.

Tabella 107. Raccolta dei costi di costruzione di una selezione di edifici realizzati

Tipologia residenziale	Fonte	Anno	Località	Z.c.	Sup. utile [m ²]	Livelli		Costi di costruzione [€/m ²]		
						nZEB	Oltre nZEB	Costi dei componenti di involucro	Costi dei sistemi impiantistici	Costi totali
Monofamiliare	[16]	2013	Lerma (AL)	E	523	X		-	-	
Monofamiliare	[16]	2017	Riva di Chieri (TO)	E	156	X		-	-	2.000
Monofamiliare	[16]	2018	Mansuè (TV)	E	174	X		-	-	1.666
Monofamiliare	[16]	2017	Tollo (CH)	D	108	X		-	-	
Plurifamiliare	[16]	2016	Torino	E	2006	X		-	-	1.500
Plurifamiliare	[16]	2015	Viterbo	D	2000	X		-	-	1.000
Plurifamiliare	[16]	2018	Roma	D	1100	X		-	-	1.800
Plurifamiliare	[47]	2016	Bisceglie (BAT)	C	3200	X		-	-	1.450
Plurifamiliare	[47]	2016	Roma	D	378	X		1.085	555	1.640
Plurifamiliare	[47]	2015	Cesena	E	320		X	3.343	370	3.713
Plurifamiliare	[47]	2017	Prato	D	2360	X		1.141	385	1.526
Plurifamiliare	[47]	2014	Moglia. V	E	789	X		1.122	502	1.624
Plurifamiliare	[47]	2014	Capurso	C	2045	X		742	258	1.000
Plurifamiliare	[47]	2011	Borgom.	E	840		X	4.040	613	4.653
Plurifamiliare	[47]	2014	Milano	E	854	X		2.225	351	2.576
Plurifamiliare	[47]	2017	Torino	E	2146	X		1.165	275	1.440
Plurifamiliare	[47]	2015	Treviso	E	3207	X		1.249	316	1.565
Plurifamiliare	[47]	2016	Venezia	E	860	X		1.401	280	1.682

Tabella 108. Valore medio dei costi degli edifici di Tabella 107 distinti per tipologia residenziale

Tipologia residenziale	Livelli	Costi di costruzione [€/m ²]		
		Costi dei componenti di involucro	Costi dei sistemi impiantistici	Costi totali
Monofamiliare	nZEB	-	-	1.729
Plurifamiliare	nZEB	1.266	365	1.632
Plurifamiliare	Oltre nZEB	3.691,5	491,5	4.183

La criticità sostanziale emersa nello studio è che i dati disponibili sui costi di edifici realizzati o studiati in letteratura differiscono tra loro (con IVA o senza, con costi accessori o senza) e, talvolta, comprendono costi ulteriori non considerati nella valutazione economica dei modelli, quali demolizioni di opere esistenti, garage e sistemazioni esterne. Inoltre, la limitazione del numero di dati a riferimento e le differenti caratteristiche tecnologiche rendono l'operazione di confronto estremamente complessa. Tuttavia, si è voluto comunque fornire un'indicazione di massima confrontando i costi unitari calcolati per i modelli con i costi degli edifici di Tabella 107. Confrontando i soli costi di involucro e di impianti (escludendo cioè oneri di progettazione, costi accessori e IVA) con i costi di "riferimento" degli edifici già realizzati è possibile fare alcune considerazioni generali:

- Relativamente all'edificio monofamiliare, i costi dei modelli analizzati nel presente report risultano leggermente superiori al valore medio di riferimento, con un incremento di circa il 17% per la soluzione 1 e di circa il 33% per la soluzione 2 (Figura 198).



Figura 198. Confronto tra i costi degli edifici di Tabella 107 e quelli dei modelli ZEB: edilizia residenziale monofamiliare

- Relativamente agli edifici plurifamiliari si osservano nel complesso costi totali inferiori del 17% circa rispetto al costo medio degli edifici di riferimento (Figura 199). Analizzando separatamente i costi di involucro dai costi impiantistici si riscontra un costo più basso sul lato involucro nei modelli analizzati rispetto agli edifici di riferimento, mentre al contrario sono più alti i costi legati ai sistemi impiantistici (Figura 200). Ciò si rispecchia in parte con le scelte fatte nei modelli, dove sono stati simulati involucri con trasmittanze entro i limiti di legge ma non di molto più basse, che per il raggiungimento del target ZEB hanno portato ad un conseguente aumento di componente rinnovabile con l'impianto fotovoltaico, e quindi di costi sul lato impianto.



Figura 199. Confronto tra i costi degli edifici di Tabella 107 e quelli dei modelli ZEB: edilizia residenziale plurifamiliare

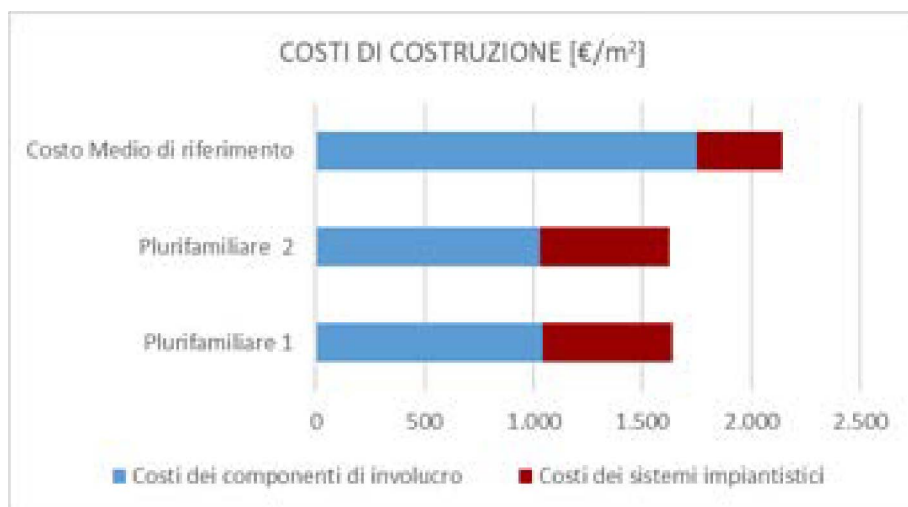


Figura 200. Confronto tra il costo medio degli edifici di Tabella 107 e i modelli ZEB: edilizia residenziale plurifamiliare

10 Conclusioni

Alla luce dell'attività di ricerca condotta e delle analisi riportate in questo documento, il risultato raggiunto pone molteplici riflessioni in relazione all'obiettivo di raggiungere uno standard energetico elevatissimo in direzione *zero energy*.

La fase decisionale degli edifici-tipo ha posto fin da subito dei problemi intrinseci di non poca rilevanza: la libertà di scelta, senza i condizionamenti dettati da contesti esistenti edificati, ha consentito di poter inserire tutto ciò che si riteneva opportuno per conseguire l'obiettivo proposto a livello costruttivo, tecnologico e impiantistico. Tuttavia, il non aver alcun vincolo di "progettazione" ha portato ad una serie inevitabile di scelte ben definite ed esclusive da un lato, semplificative dall'altro.

I modelli studiati sono il risultato di uno sforzo concettuale che cerca di tenere insieme tutti gli aspetti essenziali, senza tralasciare però la possibilità di definire un edificio realmente fattibile e che possa essere comunque preso a riferimento per alcune considerazioni a livello energetico ed economico estensibili in una visione più ampia.

La metodologia utilizzata, di tipo iterativo, ha consentito di ottimizzare i casi studio da tutti i punti di vista raggiungendo livelli performanti in ogni caso, in maniera più o meno diversificata e complessa. Da ciò deriva la scelta di implementare due configurazioni di involucro con tecnologie rispettivamente più tradizionali e più avanzate per entrambi i modelli (monofamiliare e plurifamiliare) e sistemi impiantistici all-electric a pompa di calore e ventilconvettori, con integrazione da fonti rinnovabili (solare e fotovoltaico).

Per l'edificio monofamiliare analizzato, si è visto come la configurazione 2, più innovativa, in X-Lam, raggiunge un minore fabbisogno di energia termica per il riscaldamento e per il raffrescamento praticamente in tutte le zone climatiche analizzate. Relativamente alla produzione di acqua calda sanitaria, è facile osservare come, in tutte le zone il solare termico sopperisce completamente al fabbisogno solo nei mesi più caldi. È, quindi necessario il contributo di una pompa di calore dedicata, con un accumulo opportunamente dimensionato per sopperire all'intero fabbisogno. Relativamente alla produzione di energia elettrica mediante i pannelli fotovoltaici posti in copertura, da un'analisi della produzione si evince che su base annuale, nelle zone climatiche A-B, C e D in entrambe le configurazioni è possibile coprire il 100% del fabbisogno di energia elettrica, in molti casi con una sovrapproduzione anche elevata. Tuttavia, per alcuni mesi dell'anno (tipicamente gennaio, febbraio, novembre e dicembre), non si riesce a coprire il fabbisogno (la percentuale minima rilevata è stata riscontrata in zona F, configurazione 1 ed è pari al 58%).

Per l'edificio plurifamiliare, l'analisi ha evidenziato come durante l'inverno i fabbisogni termici crescano al passare dalle zone A-B fino alla F, coerentemente con le condizioni climatiche delle varie zone e la maggiore prestazione della seconda configurazione rispetto alla prima. Durante l'estate, invece, si nota come in zona

climatica D ci sia una forte criticità determinata da un fabbisogno estivo maggiore (probabilmente dovuto ai file climatici utilizzati per la località di Roma) e comunque un andamento decrescente nelle altre zone dalla A alla F. Inoltre, la configurazione 2, grazie all'involucro maggiormente isolato, risulta più performante rispetto alla configurazione 1.

I fabbisogni per riscaldamento si riducono in tutte le zone climatiche nel passare dalla configurazione 1, tradizionale e con trasmittanze vicine a quelle di legge attuali, alla configurazione 2, con elevato isolamento. Si assiste, quindi, ad una riduzione che varia da un minimo del 44% in Zona C ad un massimo del 69% in zona F, rispettivamente per la configurazione 1 e 2. Inoltre, al variare delle zone climatiche si nota un progressivo incremento del fabbisogno di energia termica dalla zona A-B (configurazione 2) alla zona climatica F (configurazione 1).

Per quanto riguarda il sistema di climatizzazione estiva, si è sottolineato, in particolare, come in zona climatica F la necessità di raffrescamento sia quasi nulla, date le condizioni climatiche particolarmente fredde.

I consumi energetici del sistema impiantistico deputato alla produzione di acqua calda sanitaria sono fortemente legati alla produzione da solare termico, la cui copertura si attesta annualmente tra il 50% e il 61%. I mesi critici sono ovviamente i mesi invernali, problematica che si esaspera nelle zone più fredde (E ed F). I mesi estivi, invece, riportano per tutte le configurazioni valori di copertura da fonte rinnovabile notevolmente più elevati fino ad un massimo del 97%.

La produzione di energia da fonti rinnovabili è sostanzialmente la peculiarità di una progettazione in direzione ZEB. I modelli di edificio plurifamiliare simulati in zona climatica A-B, C e D raggiungono la copertura totale del fabbisogno di energia in tutti i mesi, producendone in surplus soprattutto nei mesi estivi. Diverso è, invece, il caso delle zone climatiche E ed F, che raggiungono comunque una copertura soddisfacente ma a livello mensile presentano criticità nei mesi di gennaio, novembre e dicembre.

Risultato sostanziale, quindi, è che quasi tutte le configurazioni si possono definire edifici "zero energy" anche se si calcola il fabbisogno in termini mensili e non soltanto annuali, andando ad effettuare verifiche più stringenti. Le uniche configurazioni del plurifamiliare che non rispondono a tale requisito sono quelle localizzate in zona climatica E ed F durante i mesi di gennaio, novembre e dicembre.

Tuttavia, a livello annuale, tutti i casi studiati, mono e plurifamiliari, raggiungono pienamente l'obiettivo ZEB e anzi lo superano, confermandosi edifici "produttori di energia" a tutti gli effetti. Essi, infatti, durante l'anno possono riversare in rete il surplus prodotto, sicuramente superiore a quanto fornito dalla rete stessa durante i mesi critici.

Per quanto riguarda l'aspetto economico, la criticità sostanziale emersa nello studio è che i dati disponibili sui costi di edifici realizzati o studiati in letteratura differiscono tra loro (con Iva o senza, con costi accessori o senza). Inoltre, la limitazione del numero di dati a riferimento e le differenti caratteristiche tecnologiche hanno reso l'operazione di confronto estremamente complessa. È stata comunque ricavata un'indicazione di massima confrontando i costi unitari calcolati per i modelli con quelli analizzati.

Prendendo in esame soltanto i costi legati a involucro e sistemi impiantistici, relativamente all'edificio monofamiliare, i costi dei modelli analizzati risultano leggermente superiori al valore medio del costo unitario degli edifici realizzati, con un incremento di circa il 17 % per la soluzione 1 e di circa il 33% per la soluzione 2. Relativamente agli edifici plurifamiliari si osservano, nel complesso, costi unitari totali inferiori del 17% circa rispetto al costo medio degli edifici di riferimento. Analizzando separatamente i costi di involucro e quelli impiantistici, nei modelli analizzati si riscontra un costo più basso sul lato involucro e costi più alti sul lato impianti, valutati rispetto agli edifici di riferimento. Il raggiungimento del target ZEB ha portato, in ogni caso, ad un conseguente aumento di componente rinnovabile con l'impianto fotovoltaico e, quindi, ad un aumento di costi sul lato delle componenti impiantistiche, in quanto altamente performanti.

Da tutto il lavoro emergono, quindi, alcune criticità e conclusioni sostanziali.

L'importante risultato raggiunto è sicuramente l'aver dimostrato che per ottenere edifici ZEB, di prestazione più elevata di quella ad oggi richiesta, non è così necessario spingersi di molto oltre i valori nZEB già normati dalla legislazione italiana, né aumentare in maniera troppo significativa la superficie di fotovoltaico come si potrebbe pensare, grazie soprattutto alle moderne tecnologie di produzione da fonti rinnovabili. Gli edifici *zero energy* in campo residenziale sembrano, quindi, già perfettamente realizzabili nel panorama attuale,

grazie alle elevate performance di tutte le componenti che li costituiscono, da quelle di involucro a quelle impiantistiche.

È chiaro che tale conclusione può essere supportata solo attraverso uno studio dettagliato dei singoli casi che deve essere effettuato con strumenti avanzatissimi e metodologie di calcolo in regime dinamico, gli unici a poter fornire un'analisi dettagliata a livello orario, giornaliero, mensile e annuale dell'andamento e della variabilità di tutte le grandezze in gioco. Criticità sostanziale è la complessità del metodo dinamico, che richiede uno studio dettagliato e specifico per ogni caso, difficilmente generalizzabile e influenzato da ogni scelta costruttiva, impiantistica, di utilizzo, ecc. L'edificio *zero energy*, quindi, diventa un obiettivo raggiungibile ma è necessaria una valutazione paragonabile a quella di una diagnosi energetica affinché esso sia realizzabile realmente e a costi confrontabili con le attuali soluzioni presenti sul mercato. Infine, è fondamentale scegliere il periodo di riferimento rispetto al quale effettuare il bilancio energetico dell'edificio. Si è visto, infatti, come i fabbisogni mensili siano sicuramente più critici rispetto a quelli annuali (generalmente soddisfatti da produzione da fonti rinnovabili in ottica ZEB).

In quest'ottica, molti nZEB, presenti sul nostro territorio, potrebbero già essere considerati ZEB, in quanto la normativa italiana è molto stringente in tal senso. Ciò pone, quindi, una riflessione sul fatto che l'obiettivo di una progettazione in direzione *zero energy*, in una visione ottimistica, sia già raggiungibile anche a partire dal D. M. 26.06.2015 "Requisiti minimi".

Sicuramente si tratta di un obiettivo comunque sfidante, ma perseguibile se avallato da una profonda conoscenza tecnica e scientifica di tutti gli aspetti che concorrono alla prestazione energetica di edifici così altamente performanti.

11 Ringraziamenti

L'attività di ricerca condotta è il frutto del lavoro in team degli autori, ma anche della disponibilità di alcuni esperti che hanno messo a disposizione il loro know-how, oltre ad una serie di dati e materiali senza i quali alcuni aspetti sarebbero stati inevitabilmente trascurati.

A tal proposito si ringraziano: Francesco Spinelli per i dati forniti sulla radiazione solare delle località scelte per l'analisi dei modelli, indispensabili per i file climatici su cui si basano le simulazioni, elaborati specificamente per lo studio condotto; Giorgio Lupato per la consulenza in merito all'implementazione del sistema HVAC dettagliato nelle simulazioni dinamiche; Michele Zinzi per le informazioni sui costi economici di edifici realizzati ad alte prestazioni.

12 Riferimenti bibliografici

1. S. Di Turi, I. Falcone, I. Nardi, L. Ronchetti, N. Calabrese, "Analisi energetica di edifici in direzione Zero Energy Buildings in Italia: stato dell'arte", Ricerca di Sistema Elettrico, Report RdS/PTR2019/033, Accordo di programma MISE- ENEA, Dicembre 2019.
2. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, "ASHRAE 2020: Producing Net Zero Energy Buildings. Providing tools by 2020 that enable the building community to produce market viable NZEBs by 2030", 2007, pp. 1-38.
3. G. Cammarata, M. Cammarata, G. D'Amico, F. Russo, "Edifici quasi zero energia. Principi di termofisica e bioclimatica per la progettazione di edifici a quasi zero energia e la riqualificazione energetica degli edifici esistenti", 2015, pp. 9-10, GRAFILL S.r.l., 2ed., Palermo.
4. ANCE – Associazione Nazionale Costruttori Edili, "Osservatorio congiunturale sull'industria delle costruzioni" (a cura della Direzione Affari Economici e Centro Studi), Gennaio 2020. Disponibile online sul sito: <https://www.acerweb.it/wp-content/uploads/2020/01/Osservatorio-Gennaio-2020.pdf>, consultato in data 10 Marzo 2020.
5. Sigest Centro Studi, "Residenziale a Milano: mercato immobiliare e trend emergenti. Analisi delle nuove iniziative e anticipazione delle tendenze dell'abitare", Vol. 2019. Abitare e digitale, Milano, 2019. Disponibile online sul sito: www.centrostudisigest.it, consultato in data 01 Aprile 2020.
6. Divisione Servizi Direzione Centrale Servizi Estimativi e Osservatorio Mercato Immobiliare, "Rapporto immobiliare 2019. Il settore residenziale", 23 maggio 2019 (periodo di riferimento 2018). Disponibile

- online sul sito: <https://www.agenziaentrate.gov.it/portale/web/guest/schede/fabbricatiterreni/omi/pubblicazioni/rapporti-immobiliari-residenziali>, consultato in data 10 Marzo 2020.
7. Istat, Censimento Popolazione Abitazioni 2011. Disponibile online sul sito: <http://dati-censimentopopolazione.istat.it/Index.aspx>, consultato in data 18 Marzo 2020.
 8. V. Corrado, I. Ballarini, S.P. Corgnati, Building Typology Brochure – Italy. Fascicolo sulla Tipologia Edilizia Italiana. Progetto Tabula. Disponibile online sul sito: <http://dati-censimentopopolazione.istat.it/Index.aspx>, consultato in data 18 Marzo 2020.
 9. Istat, “Annuario statistico italiano 2019”, Roma 2019. Disponibile online sul sito: <https://www.istat.it/it/files//2019/12/C18.pdf>
 10. S. Deng, R.Z. Wang, Y.J. Dai, “How to evaluate performance of net zero energy building – A literature research”, Energy 71 (2014) 1-16. Disponibile on line sul sito: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.007>
 11. F. Ascione, M. Borrelli, R.F. De Masi, F. de Rossi, G.P. Vanoli, “A framework for NZEB design in Mediterranean climate: Design, building and set-up monitoring of a lab-small villa”, Solar Energy 184 (2019), 11-29. Disponibile online sul sito: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.083>
 12. F. Causone, M. Pietrobon, L. Pagliano, S. Erba, “A high performance home in the Mediterranean climate: from the design principle to actual measurements”, Energy Procedia 140 (2017) 67-79. Disponibile online sul sito: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.124>
 13. Disponibile on line sul sito <https://www.sapienzaepartners.it/botticelli-home>
 14. Disponibile on line sul sito <http://www.progetto-smartcase.it/nzeb-benevento>
 15. AA.VV., “LombardiA+.L’edilizia a consumo quasi zero in Lombardia”, Edizioni Ambiente 2012. Disponibile online sul sito: <https://www.cened.it>
 16. E. Costanzo, R. Basili, F. Hugony, M. Misceo, R. Pallottelli, F. Zanghirella, N. Labia, “Osservatorio degli edifici a energia quasi zero (nZEB) in Italia 2016-2018”, ENEA, 2019.
 17. Cresme, F.I.V.R.A., “Valutazione della convenienza e dell’impatto economico dell’isolamento termico-acustico degli edifici”, Settembre 2014. Disponibile sul sito http://www.fivra.it/f/documenti/Rapporto_CRESME_set14.pdf
 18. Sigest Centro Studi, “Residenziale a Milano: mercato immobiliare e trend emergenti. Analisi delle nuove iniziative e anticipazione delle tendenze dell’abitare”, Vol. 2018, Milano, 2018 Disponibile online sul sito: www.centrostudisigest.it , consultato in data 06 Aprile 2020.
 19. Aurora. La nuova milano da vivere. Disponibile online sul sito: <https://www.auroralanuovamilano.it/>, consultato in data 07 Aprile 2020.
 20. CityLife. Disponibile online sul sito: <https://www.infobuild.it/progetti/citylife/>, consultato in data 02 Aprile 2020.
 21. Casalgrande Padana, CityLife. Disponibile online sul sito: https://www.arketipomagazine.it/whitepaper_library/citylife.pdf, consultato in data 03 Aprile 2020.
 22. Eccellenza e sostenibilità: A2A Calore & Servizi in prima fila per CityLife, Lettera2azionisti, n.7, Marzo 2014. Disponibile online sul sito: https://www.a2acaloreservizi.eu/home/cms/a2a_caloreservizi/societa/comunicazione/news/documenti/Lettera2azionisti-marzo-2014---CityLife.pdf, consultato in data 03 Aprile 2020.
 23. Residenze Hadid. Disponibile online sul sito: <https://www.ordinearchitetti.mi.it/it/mappe/milanohecambia/edificio/202-residenze-hadid/11-citylife>, consultato in data 02 Aprile 2020.
 24. Residenze Libeskind. Disponibile online sul sito: <https://www.ordinearchitetti.mi.it/it/mappe/milanohecambia/edificio/203-residenze-libeskind/11-citylife>, consultato in data 02 Aprile 2020.
 25. Residenze Arata Isozaki + Andrea Maffei. Disponibile online sul sito: <https://www.ordinearchitetti.mi.it/it/mappe/milanohecambia/edificio/204-residenze/11-citylife>, consultato in data 02 Aprile 2020.
 26. AA.VV. L’Aquila. Il progetto C.A.S.E. Complessi antisismici ed ecocompatibili, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna 2013.

27. Protezione Civile, Map – Moduli Abitativi Provvisori: <http://www.protezionecivile.gov.it/>
28. C. Tosco, Una possibile geografia dell'abitare contemporaneo. L'Aquila 2009-2017. LIBRO 1, Politecnico di Torino, 2017. Disponibile online sul sito: https://issuu.com/cristianot/docs/libro_i consultato in data 06 Aprile 2020.
29. Comitato Termotecnico Italiano (CTI), Anni tipo climatici, Disponibile online sul sito: <https://try.cti2000.it>, consultato in Marzo 2020.
30. F. Spinelli, E. Coglianì, A. Maccari e M. Milone (2007), “La misura e la stima della radiazione solare: l'archivio dell'ENEA e il sito Internet dell'Atlante italiano della radiazione solare per la pubblicazione dei dati” <http://www.solaritaly.enea.it/Documentazione/Archivio%20Radiazione%20e%20Solaritaly.pdf>
31. F. Spinelli, “Attività di misurazione e stima dell'irraggiamento solare in ambito dipartimentale: ricognizione della situazione attuale e proposte”, Rapporto tecnico interno ENEA, SOL/RS/2009/15, Roma, 27 aprile 2009
32. Decreto Ministeriale 26.6.2015. Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle precisazioni e dei requisiti minimi degli edifici.
33. 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 (GU Serie Generale n.242 del 14-10-1993 - Suppl. Ordinario n. 96)
34. Decreto del Presidente della Repubblica 16 aprile 2013, n. 74. Regolamento recante definizione dei criteri generali in materia di esercizio, conduzione, controllo, manutenzione e ispezione degli impianti termici per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici e per la preparazione dell'acqua calda per usi igienici sanitari, a norma dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e c), del d.lgs. 19 agosto 2005, n. 192 (G.U. n. 149 del 27 giugno 2013).
35. Buchanan AH, Levine SB. “Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions”, Environmental Science and Policy 2 (1999), 427–437
36. L. F.Cabeza, C. Barreneche, L. Miróa, J. M.Morera, E. Bartolí, A.I. Fernández, “Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews 23 (2013) 536-542. Disponibile online sul sito: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.017>
37. Direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica degli edifici. Sintesi disponibile online sul sito: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=LEGISSUM%3Aen0021>
38. Vignola, Simulazione Termoeconomica dinamica del sistema edificio-impianto di una Passivhaus in Putignano. DICAR, Politecnico di Bari, Tesi di laurea magistrale in Fisica Tecnica Ambientale a.a. 2016-2017. Relatori: P. Stefanizzi, Corelatori: F. Nesi, P. Russo
39. KiloWattene: analisi dei consumi elettrici residenziali italiani e distribuzione statistica dei valori di consumo annuo. Disponibile online sul sito: <http://kilowattene.enea.it/KiloWattene-consumi-famiglie.html>
40. DesignBuilder/EnergyPlus. Manuale disponibile sul sito: <http://www.designbuilder.co.uk/helpv6.0>.
41. ASHRAE Standard 55-2017. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Disponibile online sul sito: <https://www.ashrae.org/>
42. Prezzario Unico del Cratere del Centro Italia, 2018. Disponibile online sul sito https://sisma2016.gov.it/wp-content/uploads/2019/12/Allegato-3-Prezzario-Cratere_2018-Finale.pdf
43. Tariffa dei prezzi 2020, Regione Lazio. Disponibile online sul sito http://www.regione.lazio.it/rl_infrastrutture/?vw=contenutiDettaglio&cat=1&id=122
44. Prezzario Impianti elettrici, DEI, 2018
45. Decreto Legislativo 9 aprile 2008 , n. 81 “Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro” (G.U. n. 101 del 30 aprile 2008)
46. Norma CEI 64-8/7: “Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua - Parte 7”.
47. AA.VV., “Overview of Cost Baseline for three Building Levels”, Solution sets for the Cost Reduction of the New Nearly Zero-Energy Buildings – CoNZEBS (2017). Disponibile online sul sito: <https://www.conzebs.eu/>

13 Abbreviazioni ed acronimi

Abbreviazioni

1AB	Configurazione 1 – zona climatica A-B
1C	Configurazione 1 – zona climatica C
1D	Configurazione 1 – zona climatica D
1E	Configurazione 1 – zona climatica E
1F	Configurazione 1 – zona climatica F
2AB	Configurazione 2 – zona climatica A-B
2C	Configurazione 2 – zona climatica C
2D	Configurazione 2 – zona climatica D
2E	Configurazione 2 – zona climatica E
2F	Configurazione 2 – zona climatica F
ACS	Acqua Calda Sanitaria
BACS	Building Automation and Control Systems
CAA	Calcestruzzo Aerato Autoclavato
CLT	Cross Laminated Timber
COP	Coefficient of Performance
EER	Energy Efficiency Ratio
EMS	Energy Management System
EPS	Polistirene espanso sinterizzato
HR	Heat Recovery (Recupero di calore)
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
IAQ	Indoor Air Quality
LED	Light Emitting Diode
PLC	Controllore Logico Programmabile
PLR	Part Load Ratio
PV	Fotovoltaico
PVC	Polivinilcloruro
PVE	Parete Verticale Esterna
SCT	Solaio Controtterra
SI	Solaio Interpiano
VD	Vetro Doppio
VT	Vetro Triplo
VMC	Ventilazione Meccanica Controllata
XPS	Polistirene Espanso Estruso
ZEB	Zero Energy Building

Simboli	Grandezze fisiche	Unità di misura
c	Calore specifico	J/kgK
f	Fattore di attenuazione	-
$I_{m,s}$	Irradianza media solare	W/m ²
M_s	Massa superficiale	kg/m ²
s	Spessore	m
U	Trasmittanza termica	(W/m ² K)
Y_{IE}	Trasmittanza termica periodica	(W/m ² K)
ϕ	Sfasamento	h
λ	Conducibilità Termica	W/mK
ρ	Densità	kg/m ³

14 Indice delle figure

Figura 1. Diagramma di flusso della metodologia adottata	8
Figura 2. Andamento degli investimenti per le nuove abitazioni in termini di decremento o incremento percentuale annuo. Rielaborazione da [4]	11
Figura 3. Numero di Transazioni Normalizzate (NTN) 2018 per classi di superficie delle abitazioni per area. Rielaborazione da [6].....	11
Figura 4. Numero di Transazioni Normalizzate (NTN) 2018 per classi di superficie delle abitazioni per area nei capoluoghi. Rielaborazione da [6]	12
Figura 5. Numero di Transazioni Normalizzate (NTN) 2018 per classi di superficie delle abitazioni per area nei non capoluoghi. Rielaborazione da [6]	12
Figura 6. Numero di abitazioni per edificio relazionate al numero di edifici totali presenti nelle varie zone d'Italia. Rielaborazione da Dati Istat [7]	13
Figura 7. Ripartizione degli edifici residenziali per numero di piani. Rielaborazione da [7]	14
Figura 8. Elaborazione Dati Istat. Abitazioni in edifici ad uso abitativo per epoca di costruzione e numero di abitazioni nell'edificio – Italia (dati censimento 2001). Fonte: [7].....	15
Figura 9. Casa Botticelli a Mascalucia (CT): pianta (rielaborata da [12]), foto aerea della copertura, foto del prospetto e del patio interno [13].....	16
Figura 10. BNZEB-Benevento: pianta rielaborata e foto di un prospetto [11], foto della struttura in fase di realizzazione [14].....	17
Figura 11. Edificio a energia zero, Bergamo: rielaborazione di pianta e prospetto nord da [15], foto del prospetto sud [15].....	18
Figura 12. Viste del complesso edilizio Aurora a Milano e pianta di uno dei piani dell'edificio a torre dello stesso complesso tratta da [19].	23
Figura 13. Viste del complesso edilizio Piranesi44 a Milano e piante di alcuni alloggi. Tratta da [19].	24
Figura 14. Descrizione e viste delle residenze del complesso CityLife. Immagini tratte da [20, 24].....	25
Figura 15. Descrizione e viste delle residenze del complesso CityLife. Immagini tratte da [25].....	26
Figura 16. Descrizione e viste delle residenze del complesso CityLife. Immagini tratte da [20, 24].....	26
Figura 17. Complesso plurifamiliare isolato in via Don Luigi Sturzo a L'Aquila: pianta, prospetto, spaccato assonometrico e modello aggregativo tratti da [28].....	27
Figura 18. Palazzo plurifamiliare puntuale in via Strinella a L'Aquila: pianta, prospetto, spaccato assonometrico e modello aggregativo tratti da [28].....	28
Figura 19. Complesso Wood Beton a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].....	29
Figura 20. Complesso Consorzio Stabile Consta a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].	29
Figura 21. Complesso Consorzio Stabile Etruria a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].	29
Figura 22. Complesso Costruzioni G. Maltaurio a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].	30
Figura 23. Complesso Costruzioni Generali a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].	30
Figura 24. Complesso ing. Armido Frezza a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].	30
Figura 25. Complesso Meraviglia a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].....	31
Figura 26. Complesso Eschilo a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].....	31
Figura 27. Complesso Iter Gestione e Appalti a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].	31

Figura 28. Complesso Donati a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].....	32
Figura 29. Consorzio stabile Arcale a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].....	32
Figura 30. Complesso D'Agostino Costruzioni Generali a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].	32
Figura 31. Complesso Orceana Costruzioni a L'Aquila: con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].....	33
Figura 32. Complesso Imprese Costruzioni Pellegrini a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].	33
Figura 33. Complesso COSBAU a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].....	33
Figura 34. Complesso ILLE Prefabbricati a L'Aquila: pianta con individuazione degli elementi strutturali e vista tridimensionale d'insieme tratti da [26].....	34
Figura 35. Esempio di inserimento di dati per la creazione del file climatico in Elements (in questo caso riferito alla città di Roma).....	41
Figura 36. Layout piano terra e primo.....	44
Figura 37. Prospetti residenza monofamiliare, configurazione 1 e 2.....	44
Figura 38. Modello edificio monofamiliare – configurazione 1.....	53
Figura 39. Modello edificio monofamiliare – configurazione 2.....	54
Figura 40. Layout piano terra	54
Figura 41. Layout piano primo.....	55
Figura 42. Definizione stratigrafia parete verticale opaca. Caratteristiche termo fisiche	57
Figura 43. Esempio di definizione di un materiale isolante a) sue caratteristiche termo-fisiche, e b) analisi della condensa con diagramma di Glaser.....	57
Figura 44. Esempio di definizione infisso (in questo caso utilizzato in zona climatica D, $U=1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$)	58
Figura 45. Esempio di template delle attività definito per l'alloggio monofamiliare.....	59
Figura 46. Layout dettagliato edificio monofamiliare	64
Figura 47. Coefficienti e andamento della curva della capacità in riscaldamento della pompa di calore in funzione delle temperature.....	66
Figura 48. Coefficienti e andamento della curva di variazione del COP in funzione delle temperature	66
Figura 49. Coefficienti e andamento della curva di correlazione a carico parziale della pompa di calore.	66
Figura 50. Caratteristiche della pompa di calore per raffrescamento.	67
Figura 51. Coefficienti e andamento della curva della capacità in raffrescamento della pompa di calore in funzione delle temperature.....	67
Figura 52. Coefficienti e andamento della curva di variazione della potenza di raffrescamento in funzione delle temperature.....	68
Figura 53. Coefficienti e andamento della curva di correlazione a carico parziale della pompa di calore	68
Figura 54. Layout del circuito ACS, con pompa di calore, e solare termico.	69
Figura 55. Coefficienti e andamento della curva della capacità della pompa di calore per acqua calda sanitaria in funzione delle temperature.....	71
Figura 56. Coefficienti e andamento della curva di potenza in riscaldamento della pompa di calore per acqua calda sanitaria in funzione delle temperature	71
Figura 57. Coefficienti e andamento della curva di correlazione a carico parziale della pompa di calore per acqua calda sanitaria	71
Figura 58. Layout circuito solare	72
Figura 59. Layout disposizione pannelli fotovoltaici in copertura nelle due configurazioni.....	74
Figura 60. Settaggio caratteristiche dati input dei moduli fotovoltaici e dell'accumulo	74
Figura 61. Radiazione solare trasmessa attraverso le finestre, nei giorni 5 e 6 Agosto, Roma, con l'utilizzo di un sistema di oscuramento esterno tipo brise-soleil, orientabile.....	75

Figura 62. Apporti solari attraverso le finestre, nei giorni 5 e 6 agosto, Roma, senza l'utilizzo di un sistema di oscuramento esterno	75
Figura 63. funzionamento della pompa di calore, la variazione della T media dell'aria in ciascun ambiente, tasso di riscaldamento in W di ciascun fancoil (uno per ogni ambiente).....	76
Figura 64. Andamento delle curve di performance per la pompa di calore in modalità riscaldamento (output)	76
Figura 65. Verifica della temperatura media dell'aria nei singoli ambienti, delle ore di discomfort negli ambienti, e ventilazione naturale invernale.....	77
Figura 66. Funzionamento della pompa di calore nella stagione estiva, verifica della T media aria e delle ore di discomfort.....	78
Figura 67. Verifica del mancato raggiungimento del set-point per raffrescamento in concomitanza con il ricambio d'aria.....	79
Figura 68. Verifica del funzionamento dell'impianto solare termico - estate.....	79
Figura 69. Temperature interne agli accumuli per ACS.....	80
Figura 70. Verifica del funzionamento dell'impianto solare termico inverno.....	81
Figura 71. Confronto tra la produzione di energia elettrica, in simulazione estiva ed invernale per un periodo di riferimento in estate ed in inverno	81
Figura 72. Edificio monofamiliare in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico invernale.....	82
Figura 73. Edificio monofamiliare in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico estivo	83
Figura 74. Edificio monofamiliare in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico invernale.....	83
Figura 75. Edificio monofamiliare in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico estivo	84
Figura 76. Edificio monofamiliare in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico invernale.....	84
Figura 77. Edificio monofamiliare in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico estivo	84
Figura 78. Edificio monofamiliare in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico invernale.....	85
Figura 79. Edificio monofamiliare in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico estivo	85
Figura 80. Edificio monofamiliare in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico invernale.....	85
Figura 81. Edificio monofamiliare in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico estivo	86
Figura 82. Edificio monofamiliare - confronto tra i fabbisogni termici invernali ed estivi nelle configurazioni 1 e 2, per ciascuna zona climatica	86
Figura 83. Edificio monofamiliare – Confronto fabbisogno totale invernale nelle 2 configurazioni per le 5 zone climatiche analizzate	87
Figura 84. Edificio monofamiliare – Confronto fabbisogno totale estivo nelle 2 configurazioni per le 5 zone climatiche analizzate	87
Figura 85. Andamento del COP della pompa di calore per riscaldamento zona climatica C	88
Figura 86. Andamento del COP della pompa di calore per riscaldamento zona climatica D	88
Figura 87. Andamento del COP della pompa di calore per riscaldamento zona climatica E.....	88
Figura 88. Edificio monofamiliare in zona climatica A-B – Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di riscaldamento	89
Figura 89. Edificio monofamiliare in zona climatica C– Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di riscaldamento	89

Figura 90. Edificio monofamiliare in zona climatica D– Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di riscaldamento	89
Figura 91. Edificio monofamiliare in zona climatica E– Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di riscaldamento	90
Figura 92. Edificio monofamiliare in zona climatica F – Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di riscaldamento	90
Figura 93. Andamento medio giornaliero dell'EER nel mese di agosto, zona climatica D configurazione1 ...	91
Figura 94. Edificio monofamiliare in zona climatica A-B – Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di raffrescamento	92
Figura 95. Edificio monofamiliare in zona climatica C – Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di raffrescamento	92
Figura 96. Edificio monofamiliare in zona climatica D – Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di raffrescamento	92
Figura 97. Edificio monofamiliare in zona climatica E – Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di raffrescamento	93
Figura 98. Edificio monofamiliare in zona climatica F – Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di raffrescamento	93
Figura 99. Andamento del COP della pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria - zona climatica A	95
Figura 100. Andamento del COP della pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria - zona climatica D	95
Figura 101. Monofamiliare in zona climatica A-B – Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno di energia termica ed elettrica per la pompa di calore dedicata all'ACS, % di copertura del solare termico	95
Figura 102. Monofamiliare in zona climatica C– Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno di energia termica ed elettrica per la pompa di calore dedicata all'ACS, % di copertura del solare termico.	96
Figura 103. Monofamiliare in zona climatica D– Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno di energia termica ed elettrica per la pompa di calore dedicata all'ACS, % di copertura del solare termico.	96
Figura 104. Monofamiliare in zona climatica E– Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno di energia termica ed elettrica per la pompa di calore dedicata all'ACS, % di copertura del solare termico.	96
Figura 105. Monofamiliare in zona climatica F– Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno di energia termica ed elettrica per la pompa di calore dedicata all'ACS, % di copertura del solare termico.	97
Figura 106. Edificio monofamiliare in zona climatica A-B –produzione di energia rinnovabile da fotovoltaico in copertura	100
Figura 107. Edificio monofamiliare in zona climatica C –produzione di energia rinnovabile da fotovoltaico in copertura	100
Figura 108. Edificio monofamiliare in zona climatica D – produzione di energia rinnovabile da fotovoltaico in copertura	100
Figura 109. Edificio monofamiliare in zona climatica E – produzione di energia rinnovabile da fotovoltaico in copertura	101
Figura 110. Edificio monofamiliare in zona climatica F – produzione di energia rinnovabile da fotovoltaico in copertura	101
Figura 111. Edificio monofamiliare in zona climatica A - B – grafico riepilogativo di confronto, configurazione 1 e 2	102
Figura 112. Edificio monofamiliare in zona climatica C – grafico riepilogativo di confronto, configurazione 1 e 2	103
Figura 113. Edificio monofamiliare in zona climatica D – grafico riepilogativo di confronto, configurazione 1 e 2	103
Figura 114. Edificio monofamiliare in zona climatica E – grafico riepilogativo di confronto, configurazione 1 e 2	103

Figura 115. Edificio monofamiliare in zona climatica F – grafico riepilogativo di confronto, configurazione 1 e 2.....	104
Figura 116. Piante dei differenti piani e relative distribuzioni funzionali	106
Figura 117. Prospetti dell’edificio plurifamiliare con copertura piana.....	108
Figura 118. Studio qualitativo degli ombreggiamenti sulla facciata a Sud per le diverse zone climatiche...	109
Figura 119. Studio qualitativo degli ombreggiamenti tra pannelli per la copertura piana e disposizione dei collettori solari e dei pannelli nel modello plurifamiliare per entrambe le configurazioni	118
Figura 120. Modello edificio plurifamiliare – configurazione 1.....	120
Figura 121. Modello edificio plurifamiliare – configurazione 2.....	120
Figura 122. Layout piano terra, piano tipo e attico dell’edificio plurifamiliare.....	121
Figura 123. Esempio di template delle attività definito per i singoli alloggi dell’edificio plurifamiliare (in questo caso riferito all’alloggio A)	126
Figura 124. Layout dettagliato del sistema impiantistico per l’edificio plurifamiliare	134
Figura 125. Esempio di calcolo della potenza di progetto necessaria in riscaldamento (Zona D)	135
Figura 126. Esempio di calcolo della potenza di progetto necessaria in raffrescamento (Zona D)	135
Figura 127. Coefficienti e andamento della curva della capacità in riscaldamento delle pompe di calore in funzione delle temperature – edificio plurifamiliare	137
Figura 128. Coefficienti e andamento della curva della variazione della potenza di riscaldamento in funzione delle temperature.....	137
Figura 129. Coefficienti e andamento della curva di correlazione a carico parziale	138
Figura 130. Caratteristiche del refrigeratore.....	138
Figura 131. Coefficienti e curva della capacità in raffrescamento in funzione delle temperature caratteristica della pdc in raffrescamento.....	139
Figura 132. Coefficienti e curva della potenza in raffrescamento in funzione delle temperature caratteristica della pdc in raffrescamento.....	139
Figura 133. Coefficienti e curva di correlazione al carico parziale caratteristica della pdc in raffrescamento	140
Figura 134. Layout del circuito per la produzione di acqua calda sanitaria, con pompa di calore, solare termico e accumuli, implementato nell’edificio plurifamiliare	141
Figura 135. Coefficienti e andamento della curva della capacità in funzione delle temperature caratteristica della pompa di calore per acqua calda sanitaria	143
Figura 136. Coefficienti e andamento della curva del COP in funzione delle temperature caratteristica della pompa di calore per acqua calda sanitaria.....	143
Figura 137. Coefficienti e andamento della curva di correlazione al carico parziale caratteristica della pompa di calore per acqua calda sanitaria	143
Figura 138. Rappresentazione dei pannelli fotovoltaici (in blu) posti in copertura nelle due configurazioni di edificio plurifamiliare e diagramma solare e ombreggiamento relativo ad un giorno tipico di agosto (ore 13:00, 3 Agosto, zona climatica D)	145
Figura 139. Settaggi relativi ai dati di input dei moduli fotovoltaici e dell’accumulo	145
Figura 140. Apporti solari attraverso le finestre degli alloggi più significativi, nei giorni 14 e 15 Gennaio, con la limitazione al minimo dei sistemi di schermatura, dotati di sistema di controllo della radiazione diretta e diffusa (modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D)	147
Figura 141. Apporti solari attraverso le finestre degli alloggi più significativi, nei giorni 5 e 6 Agosto, con l’utilizzo di un sistema di oscuramento esterno tipo brise soleil, orientabile con controllo della radiazione solare (modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D)	148
Figura 142. Grafico della temperatura media dell’aria negli alloggi più significativi, delle ore di discomfort e del funzionamento della ventilazione naturale invernale impostato (modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D – settimana invernale di progetto).....	149
Figura 143. Variazione della temperatura media dell’aria in ciascun ambiente e funzionamento delle pompe di calore in riscaldamento in termini di energia e potenza (modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D – settimana invernale di progetto)	150

Figura 144. Andamento delle curve di performance per la pompa di calore in modalità riscaldamento (modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D – settimana invernale di progetto).	151
Figura 145. Esempio di verifica del COP della macchina in un giorno invernale tipico.....	151
Figura 146. Andamento del COP delle pompe di calore implementate in funzione della temperatura e delle ore durante il mese di gennaio (modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D).....	152
Figura 147. Funzionamento della pompa di calore nella stagione estiva, verifica della temperatura media dell'aria e delle ore di discomfort (modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D – settimane estiva di progetto)	152
Figura 148. Verifica dell'andamento delle temperature medie dell'aria, delle eventuali ore di discomfort e della coincidenza con il profilo di ventilazione negli alloggi più significativi durante la settimana estiva di progetto (modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D).....	153
Figura 149. Andamento degli EER delle tre pompe di calore per il mese di agosto (modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D)	153
Figura 150. Verifica del funzionamento dell'impianto solare termico – estate (modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D – 1-15 Agosto).....	154
Figura 151. Temperature interne agli accumuli per ACS (modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D – 1-15 Agosto)	154
Figura 152. Verifica del funzionamento dell'impianto solare termico – inverno (modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D – 1-15 Gennaio)	155
Figura 153. Confronto tra la produzione di energia elettrica, in simulazione estiva (mesi di luglio e agosto) ed invernale (mesi di gennaio e febbraio) - modello di edificio plurifamiliare, configurazione 1, zona climatica D	156
Figura 154. Edificio plurifamiliare in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico invernale.....	159
Figura 155. Edificio plurifamiliare in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico estivo	159
Figura 156. Edificio plurifamiliare in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico invernale.....	160
Figura 157. Edificio plurifamiliare in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico estivo	160
Figura 158. Edificio plurifamiliare in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico invernale.....	160
Figura 159. Edificio plurifamiliare in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico estivo	161
Figura 160. Edificio plurifamiliare in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico invernale.....	161
Figura 161. Edificio plurifamiliare in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico estivo	162
Figura 162. Edificio plurifamiliare in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico invernale.....	162
Figura 163. Edificio plurifamiliare in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogno termico estivo	162
Figura 164. Edificio plurifamiliare – Fabbisogni termici invernale ed estivo nelle due configurazioni in tutte le zone climatiche.....	163
Figura 165. Andamento medio giornaliero del COP in riscaldamento, zona climatica B.....	164
Figura 166. Andamento medio giornaliero del COP in riscaldamento, zona climatica D.....	164
Figura 167. Andamento medio giornaliero del COP in riscaldamento, zona climatica F	164
Figura 168. Edificio plurifamiliare in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di riscaldamento	165
Figura 169. Edificio plurifamiliare in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di riscaldamento	165

Figura 170. Edificio plurifamiliare in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di riscaldamento	165
Figura 171. Edificio plurifamiliare in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di riscaldamento	166
Figura 172. Edificio plurifamiliare in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di riscaldamento	166
Figura 173. Andamento dell'EER in raffrescamento, zona climatica B	168
Figura 174. Andamento dell'EER in raffrescamento, zona climatica D	168
Figura 175. Edificio plurifamiliare in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di raffrescamento	169
Figura 176. Edificio plurifamiliare in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di raffrescamento	169
Figura 177. Edificio plurifamiliare in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di raffrescamento	169
Figura 178. Edificio plurifamiliare in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di raffrescamento	170
Figura 179. Edificio plurifamiliare in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per il periodo di raffrescamento	170
Figura 180 Andamento del COP giornaliero della pompa di calore per la produzione di ACS in zona climatica D.....	172
Figura 181 Andamento del COP giornaliero della pompa di calore per la produzione di ACS in zona climatica E	172
Figura 182. Edificio plurifamiliare in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per ACS	173
Figura 183. Edificio plurifamiliare in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per ACS	173
Figura 184. Edificio plurifamiliare in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per ACS	173
Figura 185. Edificio plurifamiliare in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per ACS	174
Figura 186. Edificio plurifamiliare in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, fabbisogni termici ed elettrici per ACS	174
Figura 187. Edificio plurifamiliare in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, produzione da fotovoltaico, surplus di energia elettrica prodotta e confronti con energia elettrica assorbita	177
Figura 188. Edificio plurifamiliare in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, produzione da fotovoltaico, surplus di energia elettrica prodotta e confronti con energia elettrica assorbita	178
Figura 189. Edificio plurifamiliare in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, produzione da fotovoltaico, surplus di energia elettrica prodotta e confronti con energia elettrica assorbita	178
Figura 190. Edificio plurifamiliare in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, produzione da fotovoltaico, surplus di energia elettrica prodotta e confronti con energia elettrica assorbita	178
Figura 191. Edificio plurifamiliare in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, produzione da fotovoltaico, surplus di energia elettrica prodotta e confronti con energia elettrica assorbita	179
Figura 192. Edificio plurifamiliare in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, grafico riepilogativo dei fabbisogni elettrici e produzione da fonte rinnovabile	180
Figura 193. Edificio plurifamiliare in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, grafico riepilogativo dei fabbisogni elettrici e produzione da fonte rinnovabile	181

Figura 194. Edificio plurifamiliare in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, grafico riepilogativo dei fabbisogni elettrici e produzione da fonte rinnovabile.....	181
Figura 195. Edificio plurifamiliare in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, grafico riepilogativo dei fabbisogni elettrici e produzione da fonte rinnovabile.....	181
Figura 196. Edificio plurifamiliare in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, grafico riepilogativo dei fabbisogni elettrici e produzione da fonte rinnovabile.....	182
Figura 197. Importi unitari dei 4 modelli di edificio	191
Figura 198. Confronto tra i costi degli edifici di Tabella 107 e quelli dei modelli ZEB: edilizia residenziale monofamiliare	193
Figura 199. Confronto tra i costi degli edifici di Tabella 107 e quelli dei modelli ZEB: edilizia residenziale plurifamiliare	193
Figura 200. Confronto tra il costo medio degli edifici di Tabella 107 e i modelli ZEB: edilizia residenziale plurifamiliare	194

15 Indice delle tabelle

Tabella 1. Parametri geometrici e dimensionali relativi agli edifici costruiti dopo il 2005 [8]	13
Tabella 2. Ripartizione percentuale degli edifici residenziali per numero di abitazioni nell'anno 2017. Rielaborazione da [9].....	13
Tabella 3. Parametri geometrici e dimensionali relativi agli edifici costruiti dopo il 2005. Fonte: [8].....	14
Tabella 4. Dati relativi agli edifici nZEB di nuova costruzione censiti nell'Osservatorio nZEB a cura di ENEA: parametri geometrici e descrizione dell'involucro con le relative trasmittanze.	19
Tabella 5. Dati relativi agli edifici nZEB di nuova costruzione censiti nell'Osservatorio nZEB a cura di ENEA: descrizione dei sistemi impiantistici con i relativi parametri e ulteriori informazioni.	20
Tabella 6. Valori medi di trasmittanza dei componenti di involucro dei casi studio di Tabella 4	21
Tabella 7. Elenco di 84 edifici di nuova costruzione plurifamiliari a Milano [18].....	22
Tabella 8. Tecnologie costruttive per gli edifici del progetto C.A.S.E. Elaborazione da [26].....	34
Tabella 9. Caratteristiche impianti di riscaldamento e ACS nel progetto C.A.S.E. Elaborazione da [26]	35
Tabella 10. Caratteristiche sistemi da fonti rinnovabili nel progetto C.A.S.E. Elaborazione da [26]	35
Tabella 11. Certificazioni LEED e Protocollo ITACA. Tratta da [26]	36
Tabella 12. Dati relativi agli edifici nZEB di nuova costruzione censiti nell'Osservatorio nZEB a cura di ENEA: parametri geometrici e descrizione dell'involucro con le relative trasmittanze. Rielaborazione dei dati tratti da [16].....	37
Tabella 13. Dati relativi agli edifici nZEB di nuova costruzione censiti nell'Osservatorio nZEB a cura di ENEA: descrizione dei sistemi impiantistici con i relativi parametri e ulteriori informazioni. Rielaborazione dei dati tratti da [16]	38
Tabella 14. Località utilizzate per le simulazioni nelle differenti zone climatiche	40
Tabella 15. Trasmittanza termica delle strutture nell'edificio di riferimento [32].....	42
Tabella 16. Trasmittanza termica periodica delle strutture nell'edificio di riferimento [32].....	42
Tabella 17. Ore giornaliere di riscaldamento ipotizzate per zona climatica e relativo periodo di accensione	42
Tabella 18. Dati generali del modello di edificio monofamiliare	43
Tabella 19. Componenti di involucro per il modello di edificio tipo monofamiliare. Gli spessori variano a seconda della zona climatica analizzata	45
Tabella 20. Valutazione degli spessori di isolante per ciascuna zona climatica, per entrambe le configurazioni di edificio monofamiliare.....	46
Tabella 21. Tabella riassuntiva delle caratteristiche termo-fisiche, dei componenti di involucro per la configurazione 1 – edificio monofamiliare.....	47
Tabella 22. Tabella riassuntiva delle caratteristiche termo-fisiche, dei componenti di involucro per la configurazione 2 – edificio monofamiliare.....	48
Tabella 23. Tabella riassuntiva delle caratteristiche termo-fisiche del solaio su vespaio aerato comune ad entrambe le configurazioni – edificio monofamiliare	49
Tabella 24. Tabella riassuntiva delle caratteristiche degli infissi nelle due configurazioni analizzate, per ciascuna zona climatica	49
Tabella 25. Schematizzazione dell'ipotesi adottata di configurazioni impiantistiche per il modello di edificio tipo monofamiliare.....	50
Tabella 26. Descrizione e parametri significativi del sistema di generazione per la climatizzazione estiva e invernale adottato nell'edificio monofamiliare.....	51
Tabella 27. Stima dell'indice di consumo giornaliero di acqua calda sanitaria	52
Tabella 28. Caratteristiche del collettore solare ipotizzato nell'edificio monofamiliare	52
Tabella 29. Caratteristiche pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria – edificio monofamiliare	52
Tabella 30. Caratteristiche dei pannelli fotovoltaici adottati nel modello di edificio monofamiliare	53
Tabella 31. Tabella riassuntiva con le caratteristiche di involucro relative alle diverse configurazioni analizzate nelle differenti zone climatiche e confrontate con le trasmittanze limite come da D.M. 26.06.2015	56

Tabella 32. Esempio di settaggi per il profilo di Occupazione	60
Tabella 33. Esempio di settaggi per l'Acqua Calda Sanitaria	61
Tabella 34. Esempio di settaggi per il Controllo Ambientale: Riscaldamento.....	61
Tabella 35. Esempio di settaggi per il Controllo Ambientale Raffrescamento	62
Tabella 36. Ventilazione naturale – schedule dettagliato	63
Tabella 37. Caratteristiche della pompa di calore per riscaldamento e dettaglio dati dei singoli componenti	65
Tabella 38. Caratteristiche della pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria, e dettaglio dati dei singoli componenti	70
Tabella 39. Caratteristiche del circuito solare per la produzione di acqua calda sanitaria e dettaglio dei singoli componenti	73
Tabella 40. Energia termica mensile e annuale fornita per il riscaldamento nelle differenti configurazioni e zone climatiche.....	90
Tabella 41. Energia elettrica mensile e annuale fornita per il riscaldamento nelle differenti configurazioni e zone climatiche.....	91
Tabella 42. Energia termica mensile ed annuale per il raffrescamento nelle differenti configurazioni e zone climatiche	94
Tabella 43. Energia termica mensile ed annuale per il raffrescamento nelle differenti configurazioni e zone climatiche	94
Tabella 44. Energia fornita dalla pompa di calore, su base mensile ed annuale, per la produzione di acqua calda sanitaria nelle differenti configurazioni e zone climatiche	97
Tabella 45. Energia fornita dal solare termico, su base mensile ed annuale, per la produzione di acqua calda sanitaria nelle differenti configurazioni e zone climatiche	98
Tabella 46. Energia termico complessiva, su base mensile ed annuale, per la produzione di acqua calda sanitaria nelle differenti configurazioni e zone climatiche	98
Tabella 47. Energia elettrica mensile ed annuale, per la produzione di acqua calda sanitaria nelle differenti configurazioni e zone climatiche	99
Tabella 48. Percentuali di copertura da solare termico del fabbisogno termico per la produzione di acqua calda sanitaria nelle differenti configurazioni e zone climatiche	99
Tabella 49. Percentuali di copertura fabbisogno di energia nelle differenti configurazioni e zone climatiche	102
Tabella 50. Caratteristiche dimensionali dell'edificio plurifamiliare.....	107
Tabella 51. Caratteristiche e distribuzione delle diverse tipologie di alloggio.....	107
Tabella 52. Componenti di involucro per il modello di edificio tipo plurifamiliare. Gli spessori variano a seconda della zona climatica analizzata.	110
Tabella 53. Valutazione degli spessori di isolante per ciascuna zona climatica, per entrambe le configurazioni di edificio plurifamiliare.....	111
Tabella 54. Tabella riassuntiva delle caratteristiche termo-fisiche, dei componenti di involucro per la configurazione 1 – edificio plurifamiliare	112
Tabella 55. Tabella riassuntiva delle caratteristiche termo-fisiche, dei componenti di involucro per la configurazione 2 – edificio plurifamiliare.....	113
Tabella 56. Tabella riassuntiva delle caratteristiche termo-fisiche del solaio su vespaio aerato comune ad entrambe le configurazioni – edificio plurifamiliare	114
Tabella 57. Tabella riassuntiva delle caratteristiche degli infissi nelle due configurazioni analizzate, per ciascuna zona climatica – Edificio plurifamiliare	114
Tabella 58. Schematizzazione generale dell'ipotesi adottata di configurazioni impiantistiche per il modello di edificio tipo plurifamiliare	115
Tabella 59. Descrizione e parametri significativi del sistema di generazione per la climatizzazione estiva e invernale adottato nell'edificio plurifamiliare.....	116
Tabella 60. Stima degli indici di consumo giornalieri di acqua calda sanitaria rapportati alla superficie dei singoli alloggi	117

Tabella 61. Caratteristiche del collettore solare ipotizzato nell'edificio plurifamiliare	117
Tabella 62. Caratteristiche della pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria – edificio plurifamiliare	118
Tabella 63. Caratteristiche dei pannelli fotovoltaici adottati nel modello di edificio plurifamiliare	119
Tabella 64. Esempio di definizione delle caratteristiche termo-fisiche dei materiali (nel caso specifico dettaglio del materiale isolante in lana di roccia – configurazione 1)	121
Tabella 65. Esempio di definizione delle caratteristiche termo-fisiche dei materiali (nel caso specifico dettaglio del blocco di calcestruzzo aerato autoclavato – configurazione 2).....	121
Tabella 66. Esempio di definizione di un elemento di involucro (nel caso specifico dettaglio di parete verticale esterna implementata per la zona climatica D – Roma – configurazione 1).....	122
Tabella 67. Esempio di definizione di un elemento di involucro (nel caso specifico dettaglio di chiusura opaca orizzontale di copertura implementata per la zona climatica D – Roma – configurazione 1)	123
Tabella 68. Tabella riassuntiva con le caratteristiche di involucro relative alle diverse configurazioni analizzate nelle differenti zone climatiche e confrontate con le trasmittanze limite come da D.M. 26.06.2015	124
Tabella 69. Profilo di funzionamento delle schermature applicate alle aperture con controllo della radiazione solare	125
Tabella 70. Esempio di settaggi per il profilo di Occupazione	127
Tabella 71. Esempio di settaggi per l'Acqua Calda Sanitaria (Alloggio A)	128
Tabella 72. Esempio di settaggi per il Controllo Ambientale: Riscaldamento (zona climatica D)	129
Tabella 73. Differenti profili di riscaldamento adottati a seconda delle zone climatiche.....	129
Tabella 74. Esempio di settaggi per il Controllo Ambientale: Raffrescamento	130
Tabella 75. Primo esempio di settaggi per il Controllo Ambientale: Ventilazione naturale – schedule compatto	131
Tabella 76. Secondo esempio di settaggi per il Controllo Ambientale: Ventilazione naturale – schedule dettagliato	132
Tabella 77. Potenze di progetto in riscaldamento e raffrescamento per le differenti configurazioni nelle varie zone climatiche.....	135
Tabella 78 Caratteristiche della pompa di calore per riscaldamento, e dettaglio dati dei singoli componenti	136
Tabella 79. Codice EMS implementato per evitare la contemporaneità di funzionamento dei sistemi di riscaldamento e raffrescamento	140
Tabella 80. Caratteristiche della pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria, e dettaglio dati dei singoli componenti	142
Tabella 81. Caratteristiche del circuito solare per la produzione di acqua calda sanitaria e dettaglio dei singoli componenti	144
Tabella 82. Fabbisogni termici invernali di differenti alloggi dell'edificio plurifamiliare in zona climatica D - Configurazione 1.....	157
Tabella 83. Fabbisogni termici estivi di differenti alloggi dell'edificio plurifamiliare in zona climatica D - Configurazione 1.....	158
Tabella 84. Energia termica mensile e annuale fornita per il riscaldamento nelle differenti configurazioni e zone climatiche.....	167
Tabella 85. Energia elettrica mensile e annuale assorbita per il riscaldamento nelle differenti configurazioni e zone climatiche.....	167
Tabella 86. Energia termica mensile e annuale fornita per il raffrescamento nelle differenti configurazioni e zone climatiche.....	171
Tabella 87. Energia elettrica mensile e annuale assorbita per il raffrescamento nelle differenti configurazioni e zone climatiche.....	171
Tabella 88. Energia termica mensile e annuale fornita per ACS nelle differenti configurazioni e zone climatiche (pdc + solare termico).....	175
Tabella 89. Energia termica mensile e annuale fornita per ACS nelle differenti configurazioni e zone climatiche (solo pdc)	175

Tabella 90. Energia termica mensile e annuale prodotta dal solare termico per ACS nelle differenti configurazioni e zone climatiche	176
Tabella 91. Energia elettrica mensile e annuale assorbita dalla pompa di calore per ACS nelle differenti configurazioni e zone climatiche	176
Tabella 92. Copertura percentuale del fabbisogno di ACS da solare termico nelle differenti configurazioni e zone climatiche.....	177
Tabella 93. Energia elettrica mensile e annuale prodotta dal solare fotovoltaico nelle differenti configurazioni e zone climatiche.....	179
Tabella 94. Copertura percentuale da fotovoltaico del fabbisogno di energia elettrica nelle differenti configurazioni e zone climatiche	180
Tabella 95. Legenda dei materiali utilizzati	183
Tabella 96. Stralcio di computo di componente: parete in laterizio e cappotto in lana di roccia	184
Tabella 97. Costi unitari dei solai di copertura.....	185
Tabella 98. Costi unitari delle pareti esterne	185
Tabella 99. Costo unitario di fondazione e solaio a basamento.....	186
Tabella 100. Costi unitari degli infissi	186
Tabella 101. Configurazione e componenti di involucri utilizzati per i quattro modelli nella zona D.....	187
Tabella 102. Ripartizione dei costi di involucro per categorie di lavoro per i quattro modelli	188
Tabella 103. Ripartizione dei costi impiantistici per categorie.....	189
Tabella 104. Costi della sicurezza	190
Tabella 105. Calcolo degli oneri di progettazione	190
Tabella 106. Riepilogo dei costi dei 4 modelli di edificio.....	191
Tabella 107. Raccolta dei costi di costruzione di una selezione di edifici realizzati	192
Tabella 108. Valore medio dei costi degli edifici di Tabella 107 distinti per tipologia residenziale.....	192