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 non residenziale

Silvia Di Turi, Laura Ronchetti, Raniero Sannino

Report RdS/PTR2021/105

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

S. Di Turi, L. Ronchetti, R. Sannino (ENEA)

Con il contributo di: N. Calabrese, G. Elmo, I. Falcone, D. Magrì, I. Nardi (ENEA)

Dicembre 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 - III 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: *LA1.3 - Analisi energetica di edifici in direzione Zero Energy Buildings in Italia: studio di edifici – tipo a carattere non residenziale*
Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi
Responsabile del Work package: Domenico Iatauro

Indice

SOMMARIO 6
SUMMARY 7
1 INTRODUZIONE 8
2 L'APPROCCIO METODOLOGICO 9
3 LE NUOVE COSTRUZIONI A CARATTERE NON RESIDENZIALE: DEFINIZIONE E QUADRO GENERALE SULLA DIFFUSIONE DI EDIFICI AD USO UFFICIO IN ITALIA 12
3.1 TECNOLOGIE MAGGIORMENTE UTILIZZATE IN EDIFICI AD USO UFFICIO AD ELEVATE PRESTAZIONI 14
4 PREMESSE ALLO STUDIO ENERGETICO CON METODO DI CALCOLO DINAMICO 35
4.1 SCELTA DELLE LOCALITÀ CLIMATICHE DI RIFERIMENTO PER LE SIMULAZIONI E IMPLEMENTAZIONE DEI FILE CLIMATICI 35
4.2 CRITERI GENERALI ADOTTATI PER LA SCELTA DEI CASI STUDIO E PER LE ANALISI ENERGETICHE 36
5 SCELTA DEL MODELLO DI EDIFICIO-TIPO AD USO UFFICIO 38
5.1 IPOTESI DI DEFINIZIONE DELLE CONFIGURAZIONI DI EDIFICIO TIPO AD USO UFFICIO E DELLE RELATIVE TECNOLOGIE COSTRUTTIVE E IMPIANTISTICHE APPLICATE - CARATTERISTICHE GENERALI 38
5.1.1 Caratteristiche generali, geometriche e dimensionali 38
5.1.2 Tecnologie costruttive di involucro 42
Configurazione 1 42
Configurazione 2 48
5.1.3 Tecnologie impiantistiche e sistemi di produzione da fonti rinnovabili 51
5.2 LA COSTRUZIONE DEI MODELLI DI EDIFICIO AD USO UFFICIO PER LE SIMULAZIONI IN REGIME DINAMICO 56
5.2.1 Geometria e involucro opaco e trasparente 56
5.2.2 Profili di occupazione 63
5.2.3 Profili di acqua calda sanitaria 68
5.2.4 Profili di controllo ambientale 69
5.2.5 Definizione dell'HVAC dettagliato 75
Sistema di tipo pompa di calore 78
Sistema di tipo VRF 82
5.2.6 Definizione dell'impianto fotovoltaico 87
5.3 ANALISI DEGLI OUTPUT DI SIMULAZIONE IN DETTAGLIO 89
5.3.1 Comportamento invernale 89
5.3.2 Comportamento estivo 93
5.3.3 Ventilazione meccanica e recupero di calore 96
6 RISULTATI ENERGETICI PER L'EDIFICIO TIPO AD USO UFFICIO NELLE DIVERSE ZONE CLIMATICHE 99
6.1 VALUTAZIONE DEL FABBISOGNO TERMICO 99
6.1.1 Contributi di bilancio termico in regime estivo e invernale 99
6.1.2 Fabbisogni termici estivi e invernali 113
6.2 VALUTAZIONE DEI FABBISOGNI ENERGETICI E PRODUZIONE DA FONTI RINNOVABILI 117
6.2.1 Climatizzazione invernale 118
6.2.2 Climatizzazione estiva 127
6.2.3 Ventilazione meccanica e recupero di calore 135
6.2.4 Acqua calda sanitaria 141
6.2.5 Contributi dei carichi elettrici 142
6.2.6 Produzione da fonti rinnovabili 150
6.2.7 Fabbisogni complessivi e copertura da fonti rinnovabili 159
7 VALUTAZIONI ECONOMICHE PER GLI EDIFICI ANALIZZATI 167

7.1 METODOLOGIA USATA PER LA STIMA DEI COSTI 167
7.2 COSTI DEI COMPONENTI DI INVOLUCRO 168
7.2.1 Coperture 170
7.2.2 Pareti esterne 170
7.2.3 Solai interpiani 170
7.2.4 Fondazioni e solaio di basamento 170
7.2.5 Serramenti e infissi 171
7.3 COSTI DI REALIZZAZIONE DELL'INVOLUCRO 171
7.4 COSTI DEI SISTEMI IMPIANTISTICI 172
7.4.1 Impianti elettrici e impianti speciali 172
7.4.2 Impianto fotovoltaico e di accumulo elettrico 173
7.4.3 Impianto idrico-sanitario e di produzione di Acqua Calda Sanitaria 173
7.4.4 Impianto di climatizzazione estiva e invernale 173
7.4.5 Impianto di ventilazione meccanica 174
7.4.6 Impianto di sollevamento 174
7.4.7 Costi complessivi dei sistemi impiantistici 174
7.5 COSTI ACCESSORI 174
7.6 COSTI RELATIVI AGLI ONERI DI PROGETTAZIONE 175
7.7 COSTI COMPLESSIVI 175
7.8 CONFRONTO DEI COSTI DEGLI EDIFICI-TIPO CON COSTI DI RIFERIMENTO DI EDIFICI DI NUOVA COSTRUZIONE AD ALTA PRESTAZIONE GIÀ REALIZZATI E/O STIMATI 176
8 CONCLUSIONI 179
9 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE: CONFRONTO TRA EDIFICI RESIDENZIALI E TERZIARI E SVILUPPI FUTURI 183
10 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI 185
11 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI 189
12 INDICE DELLE FIGURE 191
13 INDICE DELLE TABELLE 196
ALLEGATO 1: MODELLI E OUTPUT DELLE ANALISI ENERGETICHE .....
ALLEGATO 2: STIMA DEI COSTI DEI MODELLI ANALIZZATI .....

Sommario

L'attività di ricerca condotta affronta lo studio di alcune configurazioni di edifici a carattere non residenziale, che sfruttano la combinazione di soluzioni tecnologiche performanti di involucro e impianto per raggiungere l'obiettivo "Zero Energy Building" (ZEB).
Gli edifici a carattere non residenziale si contraddistinguono per caratteristiche di utilizzo e tipologiche ben specifiche che si concretizzano in una complessità progettuale elevata soprattutto se rapportata ad un'elevata ed efficiente prestazione energetica. Il tutto è rivolto, pur senza trascurare l'aspetto di fattibilità economica, ad ottenere un'esigua o nulla richiesta di energia soddisfatta totalmente attraverso la produzione da fonti rinnovabili in situ (ZEB) o al più a riversare in rete l'energia autoprodotta in quantità uguale a quella prelevata (netZEB).

Al fine di dimostrare la possibilità dell'effettivo raggiungimento di tale obiettivo, lo studio analizza un edificio a carattere non residenziale e in particolare con destinazione d'uso ad ufficio, appositamente ideato, tenendo conto di tutti gli aspetti architettonici, tipologici e termofisici dei materiali, oltre che impiantistici, volti all'ottimizzazione delle strategie passive e attive in termini energetici.

Ad esso sono applicate due differenti sistemi di involucro e due differenti tipologie impiantistiche (comprensive dei servizi di climatizzazione estiva e invernale, acqua calda sanitaria, ventilazione meccanizzata) integrate con sistemi fotovoltaici e accumuli, oltre a sistemi avanzati di controllo delle schermature solari e dell'illuminazione artificiale, per valutarne le differenze in termini di prestazione energetica e di fattibilità economica. Tutti i casi studio, ideati secondo un approccio iterativo di scelta delle strategie e verifica di efficacia delle stesse, sono, quindi, il frutto di una valutazione della reale possibilità di realizzare edifici *zero energy* da un punto di vista tecnico ed economico.

Le quattro configurazioni così ottenute sono modellate e simulate con metodo di calcolo dinamico, definendo in dettaglio tutti gli aspetti relativi al sistema edificio-impianto (parametri termofisici, materici e stratigrafici di involucro, sistemi impiantistici e relative curve di prestazione, profili di utilizzo degli impianti, profili di occupazione, ombreggiamento, illuminazione artificiale, e così via).

I risultati ottenuti forniscono, dopo accurata elaborazione, i fabbisogni termici ed energetici dei casi analizzati, la quantificazione della produzione di energia da fonti rinnovabili di ciascuna configurazione, analizzata nelle località rappresentative di ciascuna zona climatica in cui il territorio italiano si divide.

Il lavoro fornisce l'analisi comparativa di tali risultati e parallelamente le valutazioni economiche sui relativi costi di realizzazione rapportati a edifici di nuova costruzione plausibilmente diffusi sul mercato al fine di valutare la fattibilità economica degli edifici-tipo proposti.

Infine, il report presenta un'analisi critica finale degli scenari studiati e dei risultati più rilevanti ottenuti sul settore residenziale e terziario, evidenziando punti di forza e di debolezza nel raggiungimento dell'obiettivo ZEB e la necessità contemporanea di una conoscenza approfondita di tutti gli aspetti tecnico-costruttivi ed economici che concernono la progettazione in direzione ZEB, coadiuvata da strumenti e metodi di calcolo avanzati per la stima realistica dei fabbisogni.

Summary

The research is focused on the study of different configurations of a non-residential building, which exploit the combination of high-performance envelope and advanced system technological solutions to achieve the "Zero Energy Building" (ZEB) goal.

The non-residential buildings are characterized by very specific usage and typological characteristics which result in a high design complexity especially when related to a high and efficient energy performance. Without neglecting the aspect of economic feasibility, it aims at obtaining a small or no energy demand totally satisfied through the production from renewable sources in situ (ZEB) or at most to put the self-produced energy into the grid in the same quantity as the one withdrawn (netZEB).

In order to demonstrate the possibility of actually achieving this objective, the study analyses a tertiary sector building (an office), designed taking into account all the architectural, typological and thermophysical aspects of the envelope materials, as well as plant engineering systems, aimed at optimizing passive and active strategies for the energy performance.

Two different envelopes and two different types of plant systems are applied to it (including heating and cooling, domestic hot water, mechanized ventilation) integrated with photovoltaic systems and storage, as well as advanced control systems for solar shading and artificial lighting, to evaluate the differences in terms of energy performance and economic feasibility. All the case studies, conceived according to an iterative approach of choosing strategies and verifying their effectiveness, are therefore the result of an evaluation of the actual possibility of creating zero energy buildings from a technical and economic point of view.

The four configurations thus obtained are modeled and simulated with a dynamic calculation method, defining in detail all the aspects relating to the building-plant system (thermophysical, material and stratigraphic parameters of the envelope, plant systems and related performance curves, profiles of use of the plants, occupancy, shading, lighting and so on).

After a careful processing, the obtained results provide the thermal and energy needs of the analyzed cases, the quantification of the production of energy from renewable sources for each configuration, that are studied in the representative localities of each Italian climatic zone.

The work provides the comparative analysis of these results and at the same time the economic assessment of the related construction costs in relation to the new constructions plausibly widespread on the market in order to assess the economic feasibility of the proposed buildings-type.

Finally, the report presents a critical analysis of the studied scenarios and the most relevant results obtained in the residential and tertiary sector, highlighting the strengths and weaknesses in achieving the ZEB objective and the simultaneous need for in-depth knowledge of all the technical-constructive and economic aspects which concern the design in the ZEB direction, assisted by advanced calculation tools and methods for the realistic estimate of the energy needs.

1 Introduzione

L'attività condotta prosegue il lavoro iniziato nelle annualità precedenti [1, 2] e si focalizza in particolare su edifici a carattere non residenziale e a destinazione d'uso ufficio, caratterizzati dalla combinazione di soluzioni tecnologiche performanti di involucro e impianto oltre che di produzione di energia da fonti rinnovabili nell'obiettivo comune di individuare e analizzare alcuni scenari di edifici di nuova costruzione rivolti a comprendere se e come l'obiettivo "Zero Energy Building" sia raggiungibile.
Gli edifici a carattere non residenziale sono caratterizzati da destinazione d'uso e caratteri tipologici ben specifici che si concretizzano in una complessità progettuale elevata soprattutto se rapportata alla necessità di ottenere un'estrema efficienza dal punto di vista della prestazione energetica. L'obiettivo ZEB, infatti, è rivolto, come più volte ribadito [1], ad ottenere una richiesta nulla o esigua di energia soddisfatta totalmente attraverso la produzione da fonti rinnovabili in situ nel caso di ZEB o al più a riversare in rete l'energia autoprodotta in quantità uguale a quella prelevata (netZEB), pur senza trascurare l'aspetto di fattibilità economica.

Dal punto di vista tecnologico, la sfida dell'edificio a carattere non residenziale si pone soprattutto nella preponderanza di tecnologie di involucro maggiormente orientate verso l'utilizzo di materiali esteticamente accattivanti, quali il vetro e l'acciaio, e tecnologie impiantistiche che devono sopperire a fabbisogni elevati energetici elevati.

Negli edifici ad uso ufficio, in particolare, se da un lato l'utilizzo prevalentemente diurno asseconda la natura giornaliera variabile di fonti rinnovabili come la radiazione solare, sfruttando al meglio le ore di maggior produzione, dall'altro l'edificio stesso risulta estremamente energivoro nonostante l'utilizzo e l'ottimizzazione di tutte le strategie passive e attive ad esso applicate, in quanto la richiesta non si limita ai servizi di climatizzazione estiva e invernale e di ventilazione meccanizzata (ad oggi sempre più diffusa negli edifici del settore terziario di nuova costruzione), ma deve considerare, dal punto di vista elettrico, la quota parte di apparecchiature elettriche utilizzate (computer, apparecchiature d'ufficio, e così via). È necessaria quindi un'estrema attenzione all'implementazione e utilizzo di sistemi domotici di controllo e regolazione molto più spinti che nel settore residenziale, oltre che sistemi di accumulo volti a conservare l'energia autoprodotta e riutilizzarla in caso di necessità. Tali sistemi incidono anche sulla fattibilità economica e sui costi di realizzazione di tali tipologie, ma risultano indispensabili per la riduzione dei consumi e la gestione energetica globale dell'edificio stesso.

Risulta più opportuno, quindi, puntare in questo caso all'obiettivo netZEB e considerare la quota di energia reimmessa in rete come quantità di energia che contribuisce favorevolmente alla riduzione del fabbisogno totale dell'edificio considerando un bilancio positivo tra energia prodotta ed assorbita.

A partire da tali considerazioni, il report presenta lo studio di un edificio a carattere non residenziale ad uso ufficio, appositamente ideato, tenendo conto di tutti gli aspetti architettonici, tipologici e termo-fisici dei materiali, oltre che impiantistici, la cui scelta è stata implementata attraverso un approccio di tipo iterativo di scelta e verifica dell'efficacia delle soluzioni adottate. L'edificio è stato declinato in due differenti configurazioni di involucro e due configurazioni di impianto appositamente messe a punto e analizzate attraverso simulazioni condotte con metodi di calcolo dinamici avanzati, con un approccio di tipo analitico e dettagliato che richiede la definizione 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. Tutte le configurazioni sono state analizzate nelle diverse zone climatiche italiane e l'elaborazione dei risultati ottenuti su base oraria ha permesso un confronto approfondito e un'analisi di tutte le implicazioni che le scelte progettuali comportano sulle stime dei fabbisogni energetici ed elettrici dell'edificio. Parallelamente sono stati analizzati i costi necessari alla costruzione di edifici siffatti per capirne la reale fattibilità economica.

Infine, si riporta un'analisi critica degli scenari studiati e dei risultati più rilevanti ottenuti nel corso del triennio sia per il settore residenziale sia per quello terziario, evidenziando punti di forza e di debolezza nel raggiungimento dell'obiettivo ZEB e la necessità contemporanea di una conoscenza approfondita di tutti gli

aspetti tecnico-costruttivi ed economici coinvolti, coadiuvata da strumenti e metodi di calcolo avanzati per la stima realistica dei fabbisogni.

2 L'approccio metodologico

La metodologia adottata è di tipo iterativo (Figura 1), già messa a punto e consolidata in [2], e sfrutta casi studio appositamente ideati e ritenuti significativi per l'attività di ricerca condotta.

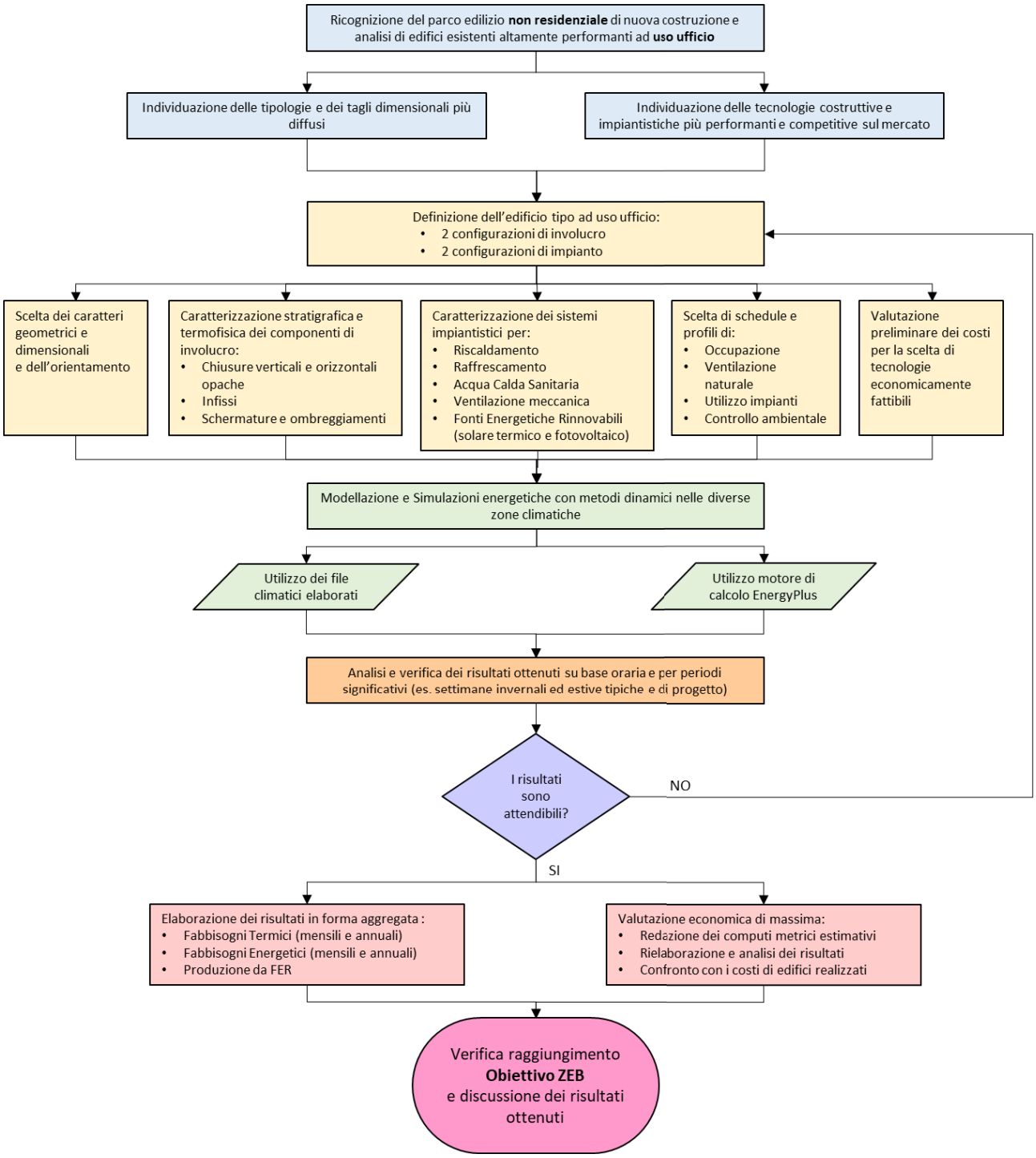


Figura 1. Diagramma di flusso della metodologia adottata

Il settore non residenziale è caratterizzato da un'estrema varietà di tipologie edilizie, diffuse sul territorio nazionale. Per tale motivo si è subito reso indispensabile analizzare il parco edilizio esistente e restringere il

campo alla destinazione ad uso ufficio per individuare, attraverso dati Istat o rivenienti dal mercato edilizio degli ultimi anni, le caratteristiche tipologiche e i tagli dimensionali più comuni in Italia. Inoltre, sono stati analizzati alcuni casi ad hoc di edifici di nuova costruzione appena realizzati o in fase di progettazione e costruzione con elevate prestazioni energetiche che potessero essere di aiuto e spunto per ideare il modello di edificio tipo utile al conseguimento degli obiettivi prefissati. I casi più significativi sono stati analizzati evidenziandone, attraverso schede descrittive, i caratteri tipologici, costruttivi e impiantistici, oltre che tutte le strategie adottate per ottenere una prestazione energetica elevata.

Successivamente alla fase di ricognizione e acquisizione delle informazioni descritte, è stato elaborato l'edificio tipo ad uso ufficio, individuando due diverse configurazioni di involucro e due diverse configurazioni di impianto. Per quanto riguarda i componenti di involucro e costruttivi, si è preferito adottare due tipologie di soluzioni più diffuse sul parco edilizio: nella prima è stata privilegiata l'adozione di un involucro vetrato, pur tuttavia considerando tutte le sfide che tali sistemi comportano soprattutto in regime estivo; nella seconda si è scelta una soluzione tradizionale con muratura in laterizio e isolamento a cappotto, diffusa anch'essa negli edifici terziari. In entrambi i casi, è stata verificata la rispondenza ai requisiti minimi prescritti dalla normativa vigente per gli edifici di nuova costruzione con particolare attenzione alla verifica delle trasmittanze e dei parametri di massa superficiale. Allo stesso modo, si è deciso di analizzare due configurazioni di impianto entrambe all-electric implementando sistemi sia a pompa di calore che VRF integrati con sistemi di produzione da fonti rinnovabili, ossia pannelli fotovoltaici di pertinenza dell'edificio. Inoltre, è stato previsto un sistema di ventilazione meccanica e recupero di calore per tutte le configurazioni analizzate.
I modelli ottenuti sono quindi il risultato finale della combinazione di tali configurazioni di involucro e di impianto, analizzati per comprendere se l'obiettivo *zero energy building* (ZEB) sia effettivamente raggiungibile e allo stesso tempo quali siano i costi di investimento necessari a tale scopo, considerazioni rapportate a casi effettivamente realizzabili in quanto sfruttano tecnologie presenti e diffuse sul mercato.
Tutte le configurazioni sono state adattate e personalizzate a seconda delle differenti zone climatiche e località rappresentative, appositamente scelte come già discusso in [2].

La fase di modellazione e analisi dei fabbisogni energetici e derivanti consumi è stata implementata con metodo di calcolo dinamico attraverso il motore di calcolo EnergyPlus nei diversi contesti climatici. A tal fine sono stati caratterizzati in dettaglio tutti i parametri termo-fisici dei materiali utilizzati, le stratigrafie delle chiusure verticali e orizzontali, le tipologie di infissi e di vetri adottati, dei sistemi di schermatura e tutti gli altri elementi volti a massimizzare le prestazioni di involucro attraverso l'utilizzo di strategie passive.

Le differenti tipologie impiantistiche scelte hanno anch'esse comportato la scelta e caratterizzazione dei vari componenti a seconda dei servizi erogati (climatizzazione estiva e invernale, ventilazione meccanica per il ricambio d'aria e recupero di calore, produzione di acqua calda sanitaria). Il tutto è stato finalizzato all'adozione di sistemi impiantistici quanto più efficienti e volti a garantire non solo elevate prestazioni energetiche, ma anche condizioni buone di comfort interno e salubrità dell'aria. Inoltre, elemento chiave è stato l'integrazione della produzione da fonti energetiche rinnovabili (FER) per la copertura del fabbisogno energetico, attraverso l'introduzione di pannelli fotovoltaici, anch'essi adeguatamente caratterizzati, e di sistemi di accumulo, regolazione e controllo. Tutti i sistemi adottati sono stati valutati dal punto di vista dei costi e della fattibilità tecnica ed economica, aspetto imprescindibile nel processo di definizione dell'edificio-tipo.

Infine si è proceduto alla individuazione dei profili di occupazione e dei profili di utilizzo di schermature e sistemi impiantistici, oltre che particolare attenzione è stata attribuita al settaggio di schedule di regolazione e controllo ambientale (ad esempio, attivazione degli impianti con orari di preriscaldamento per il raggiungimento di temperature di set-back o controllo della luce solare sia per i sistemi di schermatura, sia per l'accensione e spegnimento dell'illuminazione artificiale).

Il processo di definizione di tutti gli aspetti elencati si è dunque articolato in più fasi iterative finalizzati al raggiungimento di configurazioni ottimali e quanto più efficienti nell'ottica del raggiungimento dell'obiettivo ZEB.

I modelli di edificio ottenuti sono stati simulati nelle diverse zone climatiche italiane, adottando i diversi file climatici già elaborati in [2], su base oraria.

Al fine di valutazioni accurate dei risultati ottenuti, sono stati analizzati i fabbisogni termici degli edifici valutando i diversi contributi, quali trasmissione (attraverso i componenti di involucro), ventilazione, apporti interni (derivanti da occupazione e apparecchiature elettriche presenti) e solari. Si è analizzato in dettaglio il funzionamento dei singoli componenti impiantistici e la sua rispondenza e coerenza con i profili impostati, i dati di temperatura esterna e interna simulati e da scheda tecnica.

Sono stati analizzati quindi le prestazioni termo-energetiche e il comportamento globale dell'edificio per periodi di riferimento su base oraria. Attestata e verificata l'attendibilità dei risultati stessi (o, in caso contrario, successivamente alla eventuale modifica dei modelli stessi, coerentemente con il metodo iterativo adottato), si è passati alla fase di elaborazione e aggregazione dei numerosi dati ottenuti, per ottenere i risultati in forma aggregata, su base mensile e annuale, 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 e delle coperture percentuali dei fabbisogni totali.

In tal modo, è stato possibile confrontare i risultati ottenuti per i vari casi, adeguatamente discussi nell'ottica di una visione globale delle prestazioni stesse.

Parallelamente allo studio energetico, sono state effettuate valutazioni economiche di massima delle soluzioni adottate, analizzando i costi di investimento per la realizzazione eventuale degli edifici simulati attraverso veri e propri 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 realizzati e con due modelli di costo ascrivibili ad edifici affini ai casi studiati ma dotati di prestazioni assimilabili ad un edifico nZEB, ossia allo standard previsto da norma per le nuove costruzioni.
Tutti i casi proposti rappresentano quindi l'occasione per valutare la reale possibilità di realizzazione di edifici zero energy da un punto di vista sia tecnico sia economico, localizzati nelle diverse zone climatiche presenti sul territorio italiano.

Il presente report contiene in successione tutte le fasi metodologiche adottate, la descrizione dei casi analizzati e tutti i risultati raggiunti, rielaborati e riassunti in forma grafica e tabellare e adeguatamente discussi.

A corollario del lavoro, nell'Allegato I, vengono fornite le schede riassuntive di tutte le configurazioni studiate nei singoli contesti climatici con gli input e i parametri ad esse associate 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 caso analizzato.

3 Le nuove costruzioni a carattere non residenziale: definizione e quadro generale sulla diffusione di edifici ad uso ufficio in Italia

L'emergenza sanitaria causata dalla pandemia ha investito tutta l'economia italiana e bloccato i primi timidi segni di ripresa del mercato delle costruzioni, già gravemente colpito dalla crisi del 2007, registrando, secondo una stima ANCE [3], una flessione degli investimenti del -10,1%. In particolare, nel comparto delle costruzioni non residenziali, gli investimenti privati segnano un significativo calo del 13,5% in termini reali nel 2020, mentre quelli pubblici indicano una flessione del -2,5%. Anche i dati Istat relativi ai permessi di costruire riferiti all'edilizia non residenziale registrano una flessione del 39,3% nei primi due semestri 2020 e del -18,7% nel terzo trimestre, con un numero complessivo di permessi di costruire nel 2020 pari a 6.395.079, interrompendo una dinamica positiva in atto dal 2015 [4],
Secondo una analisi della CNCE (Commissione Nazionale paritetica per le Casse Edili) su 114 casse edili nei mesi da Gennaio a Novembre del 2020 nell'ambito dell'occupazione nel settore delle costruzioni si evidenzia una diminuzione del 10,5% del numero di ore lavorate a fronte di un lieve incremento del numero dei lavoratori iscritti (+2,1%) rispetto all'anno precedente, segno che le imprese, nonostante la crisi epidemica, hanno conservato la propria forza-lavoro e il know-how acquisito nel tempo, per ripartire tempestivamente con le attività produttive non appena ci sarà un allentamento delle restrizioni e un miglioramento della situazione economica generale [3].
Inoltre, sulla base di alcune novità presenti sul mercato (Superbonus 110%, Next Generation EU, ecc.) l'Ance prevede per il 2021 un rialzo dell'8,6% degli investimenti in costruzioni, trainato principalmente dal comparto del recupero abitativo e da una graduale ripresa dell'attività sia nel comparto non residenziale privato che in quello pubblico. Per il settore non residenziale privato e pubblico si stima un aumento dei livelli produttivi rispettivamente del 5% e del 7,7% in confronto al 2020 [Figura 2].

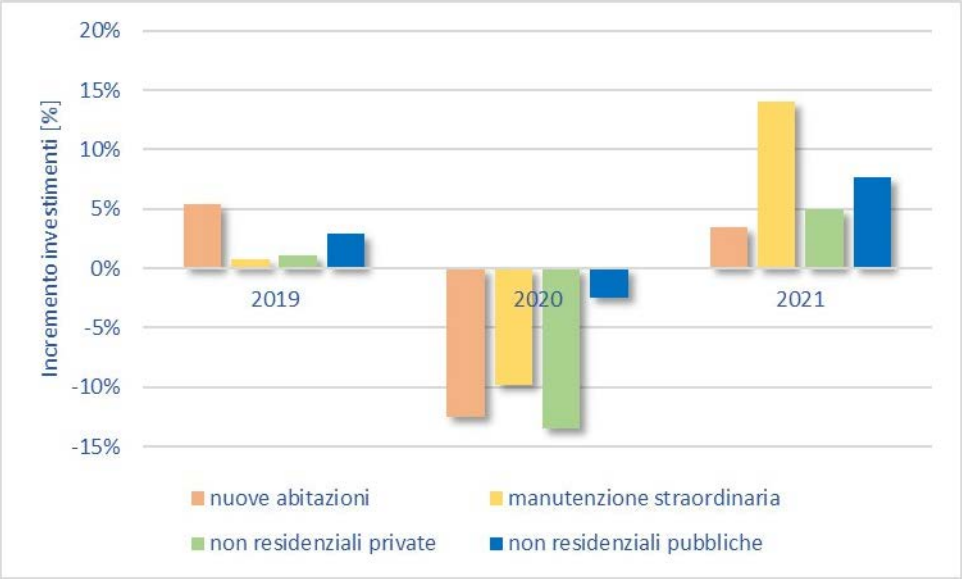


Figura 2. Andamento degli investimenti per le costruzioni in termini di decremento o incremento percentuale annuo. Rielaborazione da [3]

Dopo una fase di espansione del mercato immobiliare in generale, e dei vari settori del mercato non residenziale in particolare, il 2020 ha segnato, come facilmente prevedibile, un elemento di rottura, per effetto delle misure anti Covid poste dal governo, portando il numero complessivo di transizioni al di sotto delle 110 mila unità [5], di cui più del 50% resta concentrato al Nord (Figura 3).
Lo stock al 2020 è costituito da quasi 10 milioni di unità immobiliari ad uso non residenziale in cui, dopo le autorimesse e i depositi, prevalgono tipologie ad uso ufficio (quasi 7%), tipologie ad uso produttivo (8%), negozi (26%) (Figura 4). In particolare, risultano censite negli archivi catastali quasi 640 mila unità immobiliari della tipologia uffici, corrispondenti alla categoria catastale A/10. Tuttavia, questo numero risulta

sottostimato rispetto all'effettivo patrimonio immobiliare nazionale realmente destinato a tale uso, in quanto non è raro che una unità immobiliare di tipo residenziale venga adibita ad ufficio senza che ne venga comunicata la variazione catastale e, in più, in alcuni comuni non è prevista la classificazione specifica, facendo rientrare la tipologia ad ufficio nella categoria del residenziale. Inoltre, in questa classificazione non rientra la maggior parte degli edifici "strutturati" per ufficio, generalmente censiti nelle categorie specifiche per l'industria ed il commercio [5].
Scendendo a scala territoriale, il Nord è quello che detiene più del 50% di uffici (solo la Lombardia ne detiene il 21% circa), il 20% circa si trova nel Centro e il restante 25% nel Sud e nelle Isole. Emerge anche che più del 54% dello stock nazionale si trova nei comuni non capoluoghi, ad eccezione del centro dove invece questo dato si ribalta portando i capoluoghi al 52%. I fabbricati per uffici utilizzati dalle Amministrazioni Pubbliche sono 43.599 pari allo 0,5% del totale [5].

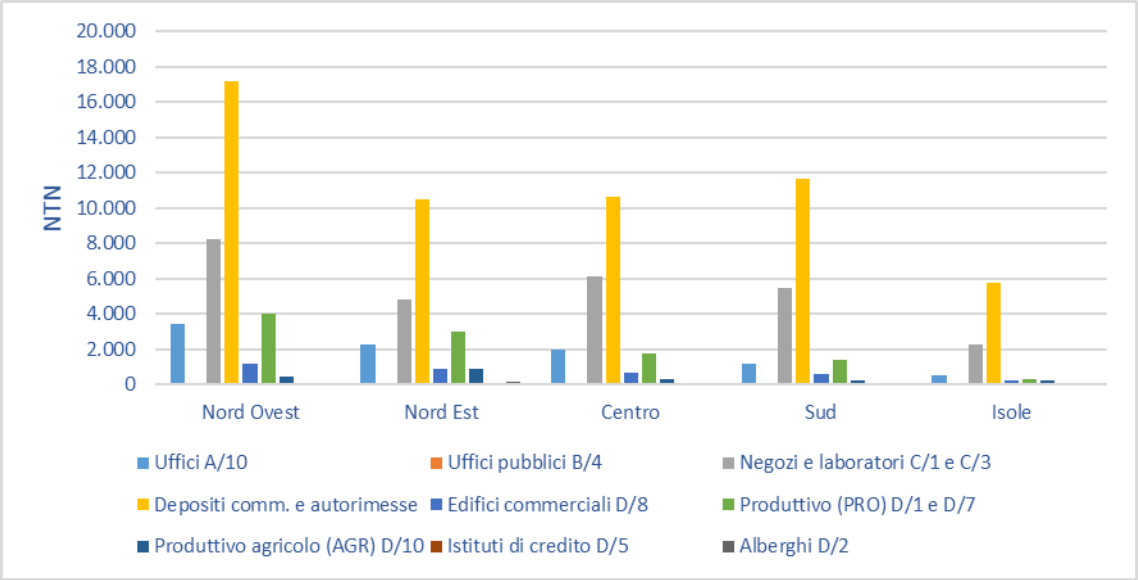


Figura 3. Numero di Transazioni Normalizzate (NTN) 2019 per tipologia non residenziale e area geografica. Rielaborazione da [5]

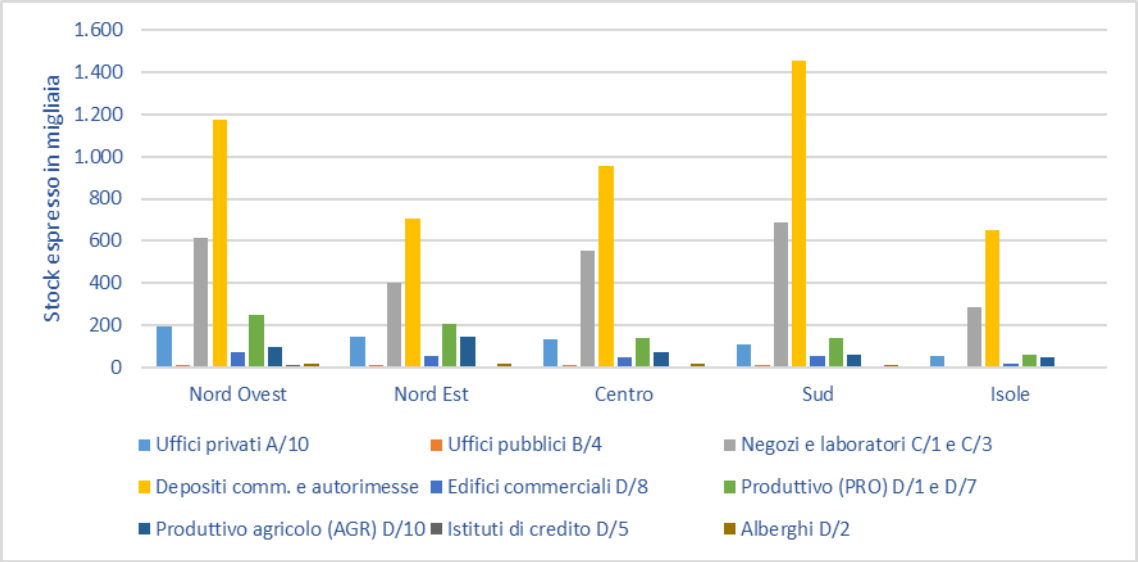


Figura 4. Ripartizione dello stock delle unità immobiliari per tipologia non residenziale e area geografica. Rielaborazione da [5]

Relativamente ai valori di mercato (Figura 5), si è registrato un calo generalizzato delle quotazioni medie, con tassi che vanno dal -2,7% dei negozi al -1,5% rilevato nel comparto degli uffici. Per quest'ultimo comparto la quotazione media annuale di riferimento è pari a 1.335 €/m^2 a livello nazionale. In termini assoluti, la Liguria è la regione con la quotazione media superiore a 1.981 €/m^2, seguita dal Lazio con una quotazione di 1.845 €/m^2.

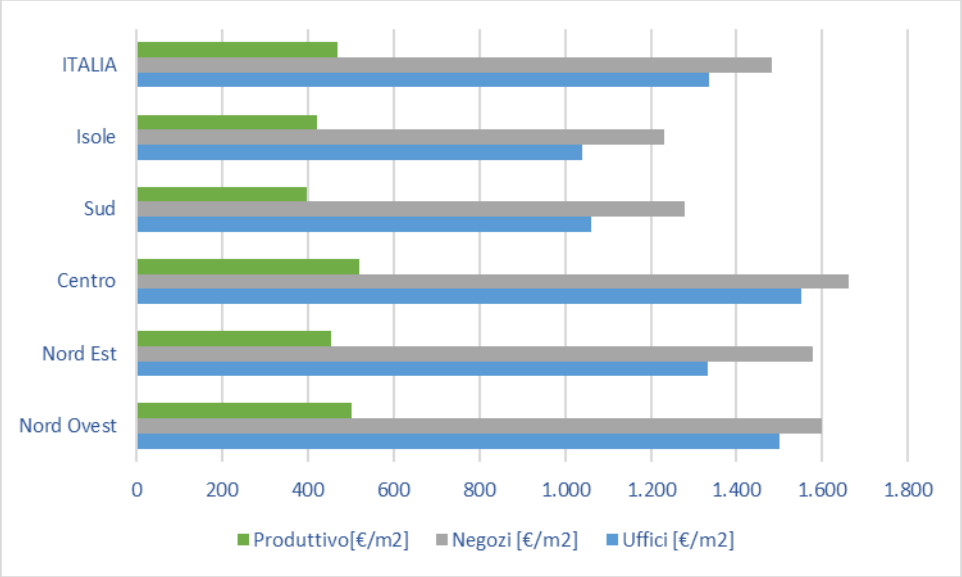


Figura 5. Quotazione media 2019 per tre tipologie di edifici non residenziali. Rielaborazione da [5]

3.1 Tecnologie maggiormente utilizzate in edifici ad uso ufficio ad elevate prestazioni

Per quanto riguarda gli aspetti più strettamente costruttivi, da un rapporto ENEA [6] emerge che gli edifici ad uso ufficio realizzati dal 1992 al 2009 prediligono una struttura in calcestruzzo armato con tamponature in muratura (78%) rispetto alla struttura in calcestruzzo e vetro, e adottano principalmente serramenti con telaio in alluminio (70% circa) e presentano le caratteristiche geometriche di Tabella 1. Dal punto di vista impiantistico, per la climatizzazione invernale al Nord e al Centro Italia prevale, in tali edifici, il vettore gas (80%) al gasolio e all'elettrico, a differenza del Sud dove, invece, viene prediletto il vettore elettrico (44%).

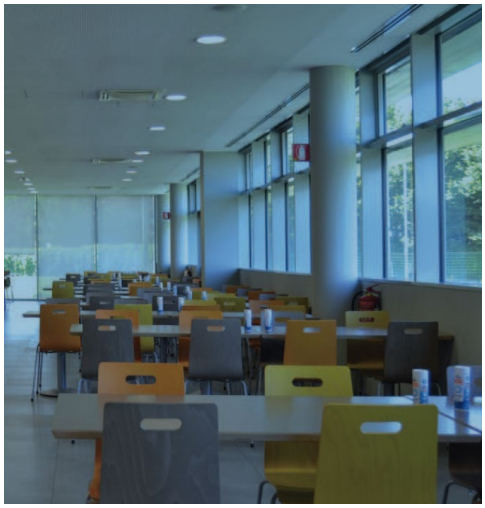
Tabella 1. Caratteristiche geometriche degli edifici ad ufficio realizzati dal 1992 al 2009 [6]

TIPOLOGIA COSTRUTTIVA	VOLUME LORDO CLIMATIZZATO	SUPERFICIE RISCALDATA	RAPPORTO DI FORMA	N. PIANI	ALTEZZA EDIFICIO
	[m^3]	[m^2]	[m^{-1}]		
Muratura +c.a.	1.253	216	0,34	2	5,8
C.a. + vetro	6.960	480	0,34	5	14,5

Al fine di ottenere un quadro conoscitivo più attuale e aggiornato in merito a tali costruzioni, sono state condotte ricerche volte all'individuazione delle tecnologie più utilizzate negli edifici ad uso ufficio di più recente realizzazione e, quindi, anche con più elevate prestazioni.
Come emerso nell'analisi introduttiva, la Lombardia, con Milano *in primis*, rappresenta la regione più attiva in termini di realizzazione di nuovi edifici ad elevate prestazioni, non solo nel settore residenziale, come già evidenziato nell'annualità precedente [2], ma anche in quello non residenziale. In essi, l'utilizzo del vetro è sicuramente uno degli elementi più degni di nota, come dimostrano le schede riportate di seguito (Scheda 1 – Scheda 7) di sette edifici ad uso ufficio di nuova costruzione.

Scheda 1. Headquarter 3M Italia, nuova sede aziendale a Pioltello (MI)

Il complesso per uffici si inserisce all'interno di un'area alle porte di Milano con l'obiettivo di realizzare un edificio a elevatissime prestazioni e volto alla massima sostenibilità attraverso una gestione consapevole tra architettura e ambiente. La struttura ha uno sviluppo lineare di 105 metri per una larghezza di 21 metri, con un numero di piani variabile da due a cinque, più uno interrato adibito a parcheggi e magazzini. Gran parte del piano terra e del primo piano sono destinati a spazi aperti al pubblico (area accoglienza, sale riunioni, zona espositiva e internet bar). Due corti interne a cielo libero (Figura 6) favoriscono l'ingresso della luce naturale, mentre il fronte sud è caratterizzato da una serie di terrazze che fungono da "tampone ambientale" proteggendo dagli sbalzi termici tra la stagione invernale e quella estiva. Le altre facciate utilizzano vetri a elevate prestazioni e brise-soleil verticali e orizzontali, studiate in modo tale che, nei fronti est e ovest, le postazioni di lavoro non siano colpite dalla luce solare diretta. L'edificio è servito da un impianto a pompe di calore ad acqua di falda e travi fredde con sistema di distribuzione a quattro tubi, alimentato in buona parte dall'impianto fotovoltaico installato in parte in copertura e in parte integrato nei sistemi di schermatura. Non mancano un sistema di ventilazione che fornisce aria primaria a tutti gli ambienti, controllandone anche umidità e purezza, e un Building Management Systema (BMS) che controlla e gestisce tutti gli impianti, in particolare di climatizzazione e illuminazione [7].



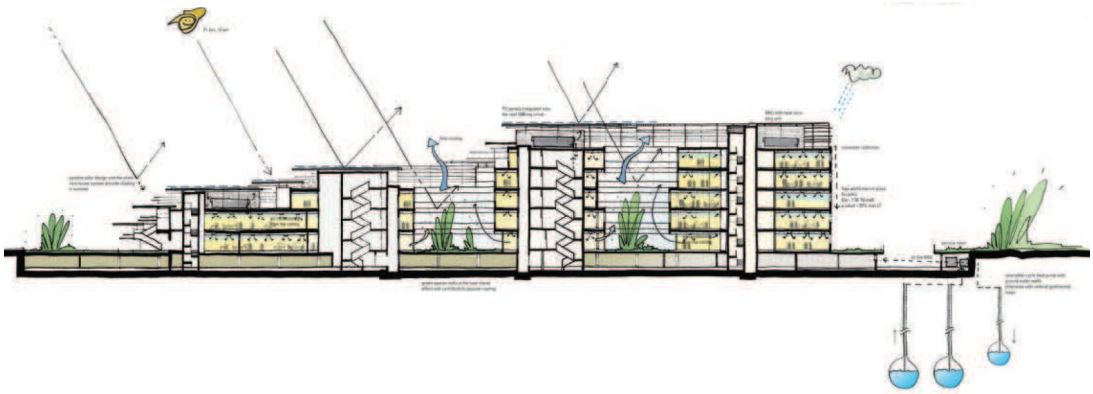


Figura 6. Viste dell'esterno e di una delle sale interne e sezione trasversale dell'edificio, tratte da [7 e 8]

Scheda 2. Perseo Expo District a Pero (MI)

L'opera, situata alle porte di Milano vicino alla Nuova Fiera e all'area Expo 2015, ha una speciale configurazione ad H con orientamento sud-ovest così da sfruttare al meglio gli apporti solari in inverno, ma è dotato di una copertura che svetta al di sopra del tetto che consente di proteggere gli interni dall'irraggiamento estivo (Figura 7). Tale sistema, inoltre, si estende alla corte interna, creando un giardino coperto, il quale consente, da un lato, di ottimizzare l'illuminazione naturale e, dall'altro, di sfruttare il massimo apporto solare in inverno. La facciata continua è realizzata con serramenti di alluminio a elevate prestazioni energetiche e vetro basso emissivo magnetronico a controllo solare.

L'edificio è servito da pompe di calore che controllano anche umidità e qualità dell'aria e da terminali tipo *fancoils* che consentono di adattare la temperatura più consona per ciascun utente migliorando così il comfort interno. È stato installato un campo fotovoltaico, coordinato con le lamelle di protezione della copertura ombreggiante dell'edificio, così da far rientrare l'edificio in classe A [7].

Figura 7. Viste e planimetria del complesso Perseo Expo District, tratte da [9]

Scheda 3. Complesso direzionale Auros a MIlano

Il complesso, posto in un quartiere industriale storico di Milano, è composto da due volumi di cinque piani collegati a tutti i livelli da un corpo trasversale (Figura 8), che al piano terra occupa un atrio comune di grandi dimensioni. Le ampie superfici vetrate sono dotate di schermature interne mobili che ombreggiano automaticamente in funzione della posizione del sole e della quantità della radiazione solare così da sfruttare al massimo gli apporti solari gratuiti nella stagione invernale ed evitare carichi non voluti nei mesi estivi. L'edificio utilizza pompe di calore geotermiche che coadiuvano un sistema a volume di refrigerante variabile (VRV) e che creano un anello di acqua con la funzione di trasferire il calore dalle zone calde de raffreddare a quelle fredde da riscaldare. Parte dell'energia necessaria per la climatizzazione e la produzione di acqua calda sanitaria (ACS) viene fornita da un campo fotovoltaico (FV) installato in copertura [7].

Figura 8. Viste delle facciate e di un interno del complesso direzionale Auros, tratte da [7].

Scheda 4. Edificio Parallelo a Milano

Con lo sviluppo longitudinale che lo contraddistingue (Figura 9), l'edificio favorisce la flessibilità nella distribuzione degli spazi, l'ottimizzazione delle superfici e l'interazione tra le persone. Ogni piano, con superficie di circa 4000 m^2, può essere segmentato in moduli così da garantirne la piena adattabilità. Ospita non solo uffici (300 postazioni a piano con un parametro dimensionale di 12,5 m^2/persona), ma anche una sezione commerciale e una produttiva, oltre ad archivi e aree comuni. Le caratteristiche tecniche della facciata, la configurazione volumetrica, l'orientamento solare, le pompe di calore e la geotermia, la copertura con 1.034 m^2 di impianto fotovoltaico e una produzione di energia annua pari a 150.000 KWh permettono a questo "grattacielo orizzontale" di risparmiare notevolmente sul costo energetico, facendolo rientrare nei più elevati standard energetici (classe A) [10].

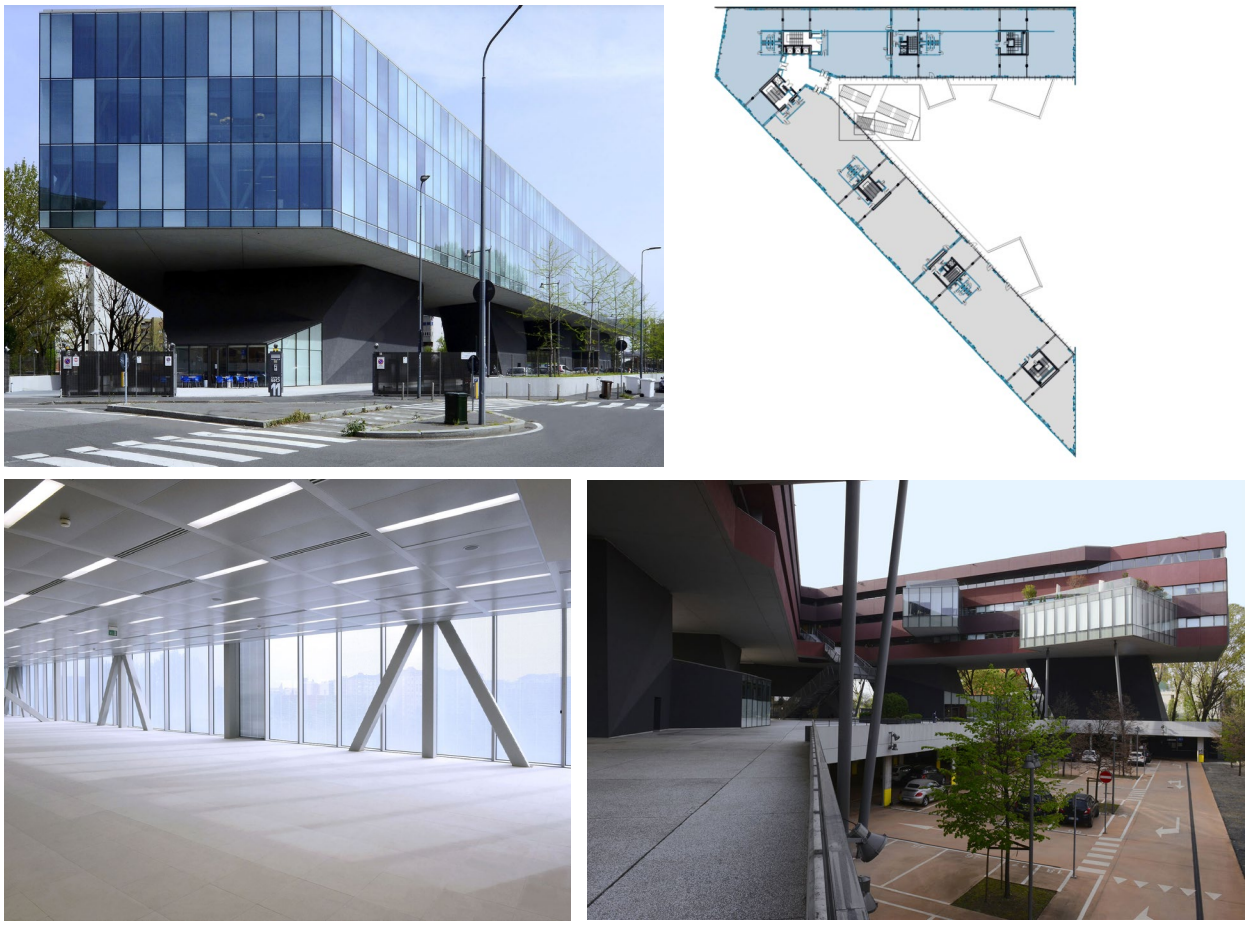


Figura 9. Viste e planimetria dell'edificio Parallelo a Milano, tratte da [10].

Scheda 5. Headquarters a Fiorano Modenese (MO)

L'edificio per uffici ultimato nel 2020 nasce con l'intento di sfruttare un involucro semplice e funzionale. Le strutture sono pensate in elementi prefabbricati di legno (pilastri in legno lamellare, setti portanti e solai in X-Lam), garantendo così l'utilizzo delle ultime tecnologie costruttive in quanto a materiali, sostenibilità e sistemi di prefabbricazione. La permeabilità della luce naturale è affidata a grandi trasparenze verso l'esterno e affacci su una corte interna arricchita da arbusti. A protezione dell'irraggiamento sulle superfici vetrate si estende una grande vela di copertura aggettante (Figura 10) con sbalzi differenti a seconda dell'orientamento e della radiazione solare [11].

Figura 10. Viste degli Headquarters a Fiorano Modenese, tratte da [11].

Scheda 6. Focchi Headquarters, Rimini

Risultato del progetto di Mario Cucinella Architects SRL e realizzato tra il 2003 e il 2005, l'edificio (Figura 11) presenta un unico volume trasparente che si collega all'edificio preesistente. L'ingresso è caratterizzato da uno spazio a doppia altezza, oltre il quale si sviluppano due piani di uffici, connessi visivamente con l'esterno e il giardino. L'edificio ha sostanzialmente la funzione di moderatore e filtro bioclimatico, capace di fronteggiare le variazioni di temperatura annuali che caratterizzano il clima italiano. Interessante è la tecnologia di facciata, studiata appositamente per adattarsi alla diversa incidenza del sole durante le diverse stagioni. Viene, infatti, adottata una facciata continua in vetro trasparente blu verde, che diventa traforata al piano intermedio per mascherare il solaio intermedio. Il sistema è composto da un reticolo di montanti e traversi e tamponamenti con moduli vetrati prefabbricati. Le facciate sono in grado di sfruttare la radiazione solare durante l'inverno per riscaldare gli ambienti e allo stesso tempo proteggere gli ambienti interni dal surriscaldamento durante l'estate, raggiungendo un compromesso tra illuminazione naturale e la necessità di rimozione del calore in eccesso. Le finestre sono apribili in modo tale da consentire la ventilazione naturale e i sistemi di schermatura inseriti consentono di ombreggiare ulteriormente gli ambienti, qualora fosse necessario. L'edificio è anche dotato di un sistema avanzato di gestione e controllo BMS con sensori e attuatori integrati in facciata che consentono di gestire i fan-coil inseriti anch'essi in facciata, in un sistema interconnesso con l'impianto di riscaldamento/raffrescamento per garantire la prestazione energetica dell'edificio [12].

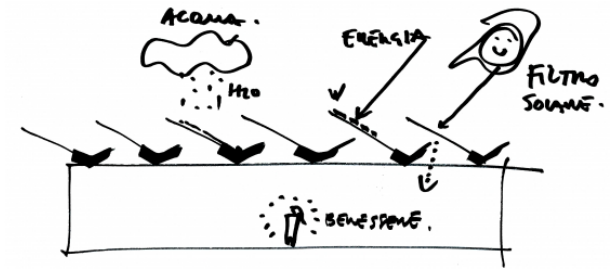


Figura 11. Viste della facciata continua adottata e concept bioclimatico tratti da [13]

Scheda 7. Headquarters Intecs a Roma

L'edificio per uffici ultimato nel 2014 si colloca nel nuovo Tecnopolo Tiburtino ed è composto da una serie di piani connessi tra loro tramite collegamenti che si rileggono in facciata (Figura 12), diventando a volte scale, a volte terrazze o piani inclinati ospitanti sale conferenze e auditorium all'aperto e creando un layout vario e flessibile. La forma a pianta quadrata comprende una corte che permette all'edificio di essere percepito anche dal suo interno. La facciata è costituita da pannelli in acciaio inox specchianti, alternati a pannelli in vetro creando un gioco di riflessi e trasparenze. Sia l'involucro che gli impianti, realizzati con sistemi domotici, hanno permesso al progetto di ottenere la classe energetica A della certificazione Casaclima. L'edificio dispone di sistemi di pompa di calore tipo VRV integrati a sistemi di ventilazione meccanica controllata associata a recuperatori di energia ad alto rendimento. Il fabbisogno energetico è soddisfatto in parte dai collettori solari termici e in parte da pannelli fotovoltaici [14].

Figura 12. Viste degli Headquarters Intecs a Roma, tratte da [14].

Il vetro è, quindi, sicuramente il materiale per eccellenza tra i componenti di involucro della tipologia ad uso ufficio usato per molteplici aspetti: offre maggiore visibilità e pregio all'edificio stesso e una maggiore illuminazione naturale alle postazioni di lavoro; inoltre, consente una maggiore permeabilità tra interno ed esterno creando un legame con il paesaggio circostante.

Le facciate continue in vetro rappresentano un tipo di involucro leggero di cui diverse sono le tipologie rappresentative dell'attuale panorama produttivo (a montanti e traversi, a cellule, a ritegni puntuali e a doppia pelle).

La facciata realizzata per montanti verticali e traversi orizzontali viene assemblata in cantiere a pannelli solo trasparenti o sia trasparenti che opachi (spandrel) e ad elementi finestrati. In questo ultimo caso, il pannello opaco oltre a contenere l'isolante termico, può essere rivestito esternamente dallo stesso tipo di vetro scelto per le parti trasparenti, consentendo di ottenere l'effetto continuo in facciata.

La tecnologia a montanti e traversi risale, nelle sue prime forme, agli anni Cinquanta e prevede l'assemblaggio in cantiere degli elementi strutturali realizzati con profili estrusi in alluminio tagliati e lavorati in stabilimento. Il sistema di tenuta è garantito dalla presenza di guarnizioni tra il reticolo e la tamponatura. Tuttavia, questo tipo di facciate può essere soggetto a degrado sia per l'azione degli agenti atmosferici sia per difetti di montaggio e messa in opera.

Naturale evoluzione alla facciata a montanti a traversi è la facciata a cellule (o moduli), in cui i singoli pannelli composti da un'intelaiatura metallica, generalmente di alluminio, e tamponatura (trasparente o opaca) vengono assemblati in officina e successivamente montati in cantiere, ancorati alla struttura portante dell'edificio e fissati in maniera meccanica o ad incollaggio con silicone strutturale. L'assemblaggio nello stabilimento produttivo permette di ottenere un prodotto estremamente preciso, di poter effettuare un accurato controllo qualità e di facilitare le fasi di montaggio in cantiere. Per garantire la tenuta della facciata dagli agenti atmosferici i profili hanno un sistema di incastro maschio-femmina e sono dotati di guarnizione. Vengono usati, in particolare, nei casi di edifici a torre o nei casi in cui sia impossibile installare un ponteggio, assicurando stabilità e tenuta del sistema. I costi di realizzazione sono inizialmente più elevati rispetto al sistema precedente in favore di tempi di installazione più brevi e di prestazioni energetiche migliori.

Sebbene queste due soluzioni di facciata presentino generalmente una scarsa inerzia termica dovuta alle caratteristiche dei materiali leggeri utilizzati per i tamponamenti opachi, attualmente si trovano in

commercio soluzioni evolute di pannelli (Figura 13) che prevedono l'introduzione di un substrato a densità maggiore in materiali come il calcestruzzo, il cartongesso e materiali compositi che racchiudono internamente ed esternamente il pannello isolante e che consentono il rispetto dei requisiti minimi di trasmittanza termica periodica [15], rendendoli tecnologie di facile realizzazione, costo competitivo[1] ed elevato potenziale in termini di prestazione.

Figura 13. Immagini illustrative di facciate continue. Fonte: sx [16], dx [17]

Nei sistemi di facciata strutturale le vetrate sono incollate a un telaio portante mediante sigillante siliconico, consentendo alle lastre di affiancarsi le une alle altre lasciando il telaio in posizione arretrata e realizzando pareti in vetro senza soluzione di discontinuità. Generalmente non presentano apertura e la climatizzazione interna è affidata ai sistemi meccanici; tuttavia, si possono creare aperture finestrate tramite lastre intelaiate a una cerniera che usano i profili di silicone come battuta [18].
La facciata a doppia pelle (Figura 14) rappresenta una recente evoluzione della facciata continua come dimostra il complesso di edifici in Scheda 8.

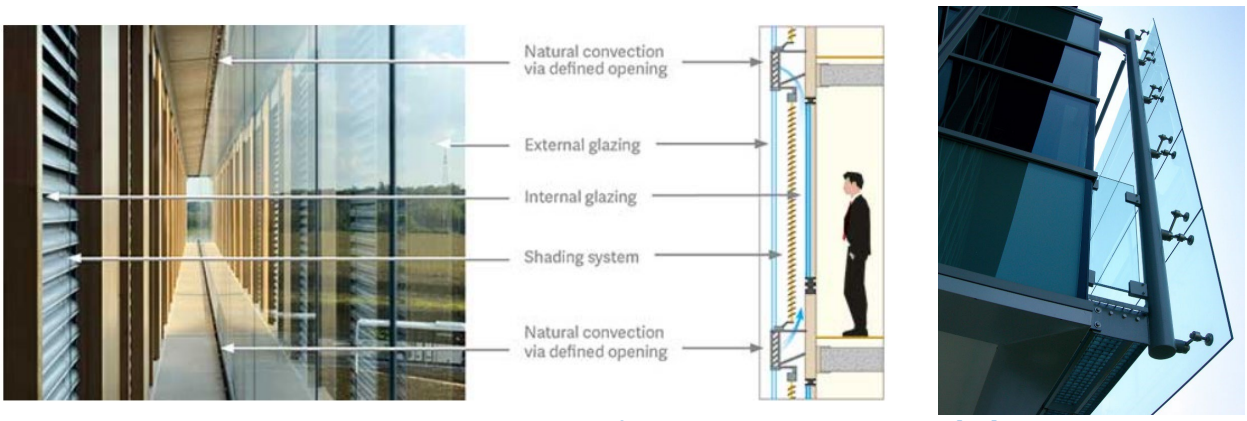


Figura 14. Immagini illustrative di facciate a doppia pelle. Fonte: [22]

[1] Il costo da prezzario si aggira sui 515-550 €/m^2 compreso isolante in lana minerale di 10 cm, esclusi scarico, ponteggi, inserti (finestrature) e pulizia finale della facciata.

Scheda 8. Edison Business Center Development, Sesto San Giovanni, Milano

Su progetto di Lissoni & Partners, l'edificio si sviluppa linearmente su 100 m ed è caratterizzato dall'utilizzo di lastre di vetro montate su una struttura di acciaio zincato davanti alla tradizionale facciata in vetro e ad intervalli irregolari (Figura 15). I tre edifici (variabili dagli 8 ai 10 piani) e situati nell'area industriale dismessa in cui sorgeva la Magneti Marelli e riqualificata da Nexity Italia Spa nel 2007-2009, è degno di nota per l'utilizzo sapiente dei materiali (vetro, alluminio e cotto). Le cellule della facciata a doppia pelle, costituite da telaio perimetrale in alluminio e listelli orizzontali in cotto, sono state completamente preassemblate in officina e montate aggettanti sulla facciata vetrata, creando un'intercapedine nella quale sono inserite le passerelle in grigliato di acciaio zincato per la manutenzione.

Nella zona "bolla" è stato utilizzato un vetro selettivo con trasmittanza pari a 1,4 W/m^{2}K, mentre per i corpi uffici sono stati adottati serramenti a taglio termico dalle alte prestazioni, appositamente studiati.

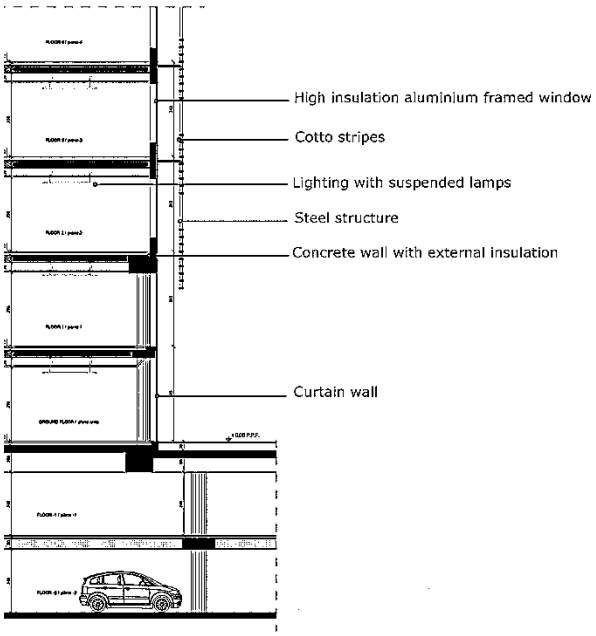


Figura 15. Vista del complesso [19] e di uno degli edifici e dettaglio costruttivo della facciata [20]

Essa è tradizionalmente costituita da una facciata esterna in pannelli di vetro monolitico o frangisole orientabili, da un'intercapedine e da una facciata interna in vetro camera e telaio a taglio termico o realizzata con strutture opache massive e coibentate. L'intercapedine ha profondità variabile tra i 20 cm e i 2 m, sebbene sia generalmente preferibile uno spessore minimo di 40 cm per poter consentire la manutenzione delle superfici [21] e l'alloggiamento dei sistemi di ombreggiamento.
Inoltre, l'intercapedine può prevedere una ventilazione naturale o meccanica. Nel primo caso vengono usate bocchette di ventilazione, di entrata e di uscita, che possono essere dotate di serrande azionabili manualmente o attraverso sistemi di controllo automatico; mentre nel caso di ventilazione meccanica vengono inseriti dei ventilatori integrati all'impianto di climatizzazione. La ventilazione può essere anche ibrida: in questo caso, quando la circolazione naturale dell'intercapedine diventa insufficiente, entrano in funzione automaticamente, tramite sensori appositi, i ventilatori che ristabiliscono una corretta intensità circolatoria dell'aria. L'effetto negativo della ventilazione meccanica e ibrida è dato dall'impossibilità per l'edificio di aprirsi verso l'esterno. In questi casi, la mancanza di finestre apribili e, quindi, di aria fresca comporta problemi di natura fisica e psicologica per gli utenti, legati alla cosiddetta "sindrome di edificio malato" [18].
L'intercapedine consente nella stagione invernale, con entrambe le bocchette chiuse, lo sfruttamento dell'effetto serra e un conseguente smorzamento delle perdite di calore, mentre nella stagione estiva, con entrambe le bocchette aperte, svolge la funzione di un "camino di ventilazione", facendo fuoriuscire il calore in eccesso [23]. Baldinelli [24] ha dimostrato che i risparmi possono raggiungere in questi sistemi il 65% se confrontanti con sistemi di facciata a singola pelle interamente vetrate grazie alla riduzione dei carichi di riscaldamento.
Dal punto di vista economico, la facciata a doppia pelle vetrata presenta dei costi del 20-80% più elevati della singola pelle [18] tanto che, per giustificare questo extra-costo, occorrono risparmi energetici notevolissimi, e costi di manutenzione più elevati dal momento che le superfici da pulire sono quattro. Ulteriori criticità sono connesse ai maggiori rischi in caso di incendio per la propagazione del fumo e delle fiamme lungo l'intercapedine d'aria. Alcuni progettisti, per ovviare a questo problema, interrompono l'intercapedine all'altezza di ogni piano con un elemento divisorio.
Sicuramente nella progettazione e nell'analisi della prestazione energetica di facciate di questo tipo occorre prestare attenzione al dimensionamento dell'intercapedine e delle aperture, per determinare la velocità e il flusso dell'aria, nonché la tipologia di ventilazione e le caratteristiche termofisiche del vetro. Infatti, i componenti vetrati hanno generalmente valori di trasmittanza molto più elevati rispetto a quelli delle pareti opache. Inoltre, in climi caldi e caldo-umidi, dove il rischio maggiore delle tipologie tutto vetro è il surriscaldamento degli ambienti interni, emerge l'importanza di adottare sistemi di schermatura o vetri trattati con pellicole assorbenti e riflettenti e l'importanza di una ventilazione meccanica o ibrida [23] (Figura 16).

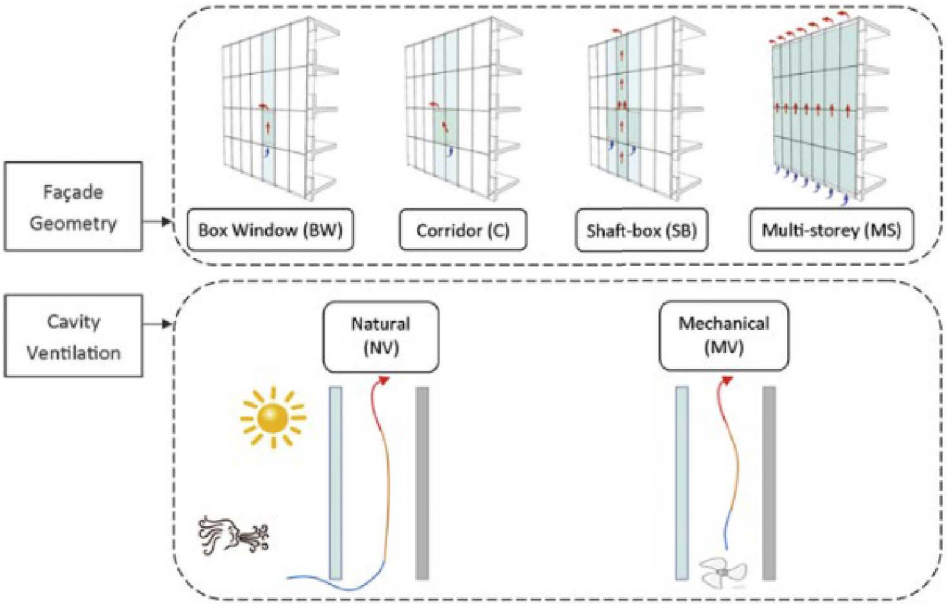


Figura 16. Funzionamento di diverse tipologie di facciata a doppia pelle con e senza ventilazione meccanizzata. Fonte: [21]

Spesso contenuto in telai di alluminio e nella forma del vetro strutturale, il vetro presenta caratteristiche di elevate prestazioni con valori di trasmittanza dell'infisso U_w=1,3-1,4 W/m^{2}K, con rivestimenti basso emissivi. I casi-studio analizzati mostrano come sia importante l'utilizzo del vetro non solo sulle facciate rivolte all'ambiente esterno, ma anche con funzione di filtro verso corti interne così da apportare gli stessi benefici di irraggiamento e illuminazione in ambienti altrimenti meno illuminati.
D'altro canto, come già evidenziato, la progettazione di così grandi superfici vetrate non può prescindere da uno studio attento dell'orientamento dell'edificio e da un corretto posizionamento dei sistemi di schermatura, che si è visto possono essere visivamente anche molto importanti soprattutto quando posizionate al di sopra della copertura dell'edificio e con aggetti importanti sulle facciate più a Sud (Scheda 2 e Scheda 5), oppure integrate alle facciate, tramite schermature mobili interne, magari meccanizzate (Scheda 3), o tramite elementi verticali o orizzontali che scandiscono ritmicamente la facciata (Scheda 1), talvolta posati in moduli prefabbricati insieme al vetro così da garantire la perfetta posa in opera.

Differenti sono gli ulteriori quattro casi-studio presentati a seguire che, per relazionarsi meglio al contorno edilizio, presentano una volumetria più chiusa verso l'esterno, ma mostrano, in analogia con i casi precedenti, un accurato studio delle aperture vetrate e degli ombreggiamenti. Le tecnologie costruttive utilizzate per le tamponature, in questi casi, sono diverse: nei primi due viene usata una facciata ventilata (Scheda 9 e Scheda 10), in un caso viene usato il calcestruzzo gettato in casseforme isolanti a perdere (Scheda 11), in ultimo viene utilizzato un involucro in legno con isolamento a cappotto (Scheda 12).

Scheda 9. Faber Headquarters a Cividale del Friuli (UD)

L'edificio per uffici (Figura 17) è posizionato a confine tra un'area industriale e una azienda agricola e il volume dell'edificio è disegnato per portare i due paesaggi all'interno e integrarli nel nuovo spazio. Il complesso si compone di due volumi longitudinali collegati da una *hall* di ingresso, per una superficie di 3170 m^2, comprensiva di un piano interrato. La pelle della facciata, del tipo ventilato, è realizzata con elementi modulari di uguali dimensioni sia per il blocco nero di calcestruzzo prefabbricato sia per il pannello vetrato scuro. La struttura è costituita da un telaio in calcestruzzo armato e da tamponature in mattoni forati, isolate da entrambi i lati della parete [25].

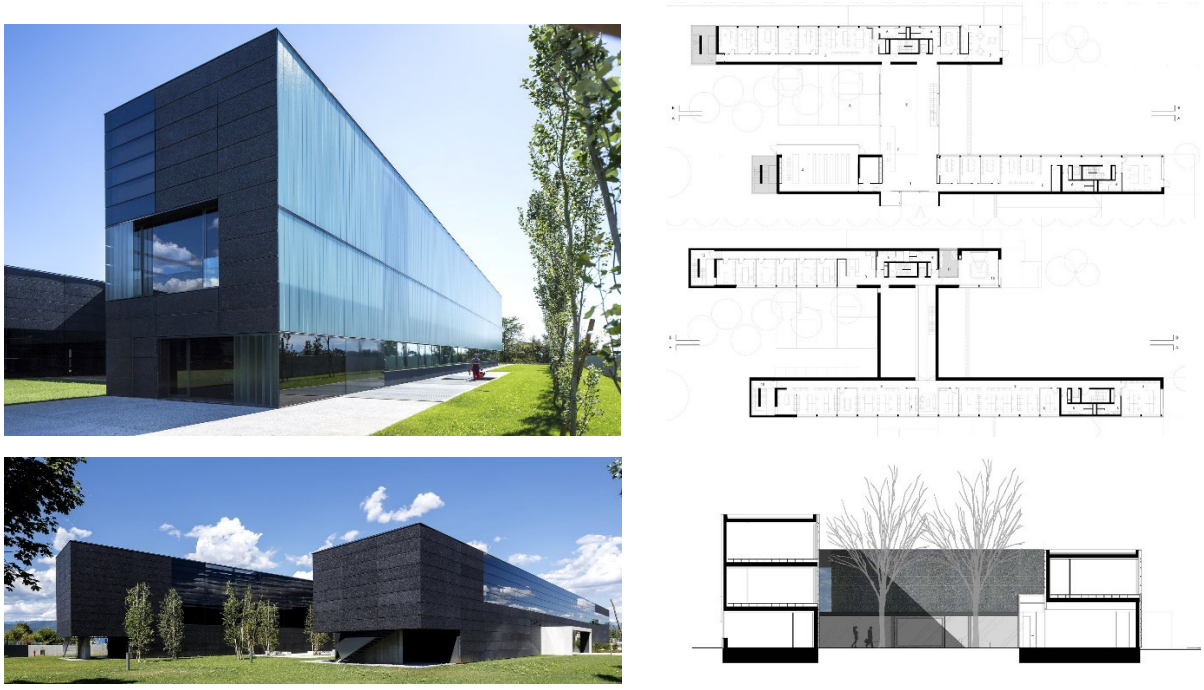


Figura 17. Vista ed elaborati grafici tratti da [26].

Scheda 10. Edificio per uffici a Travagliato (BS)

Il disegno della pianta è molto semplice e l'edificio si eleva per tre piani fuori terra occupando una superficie complessiva di 1.400 m^2, adibiti esclusivamente ad uffici. Una fascia distributiva accoglie i servizi e il sistema di scale e ascensori, mentre tutti gli uffici, disposti in maniera seriale, si affacciano verso l'area verde e sono schermati dalle alberature del giardino. Al piano interrato un parcheggio occupa l'intera area del lotto e integra i 16 posti auto situati accanto all'edificio. Un sistema di pieni e vuoti ritma la composizione dei due prospetti lunghi circa 40 metri. L'effetto è determinato dalla disposizione seriale delle aperture a tutta altezza, sfalsate verticalmente l'una rispetto all'altra. I pannelli sono realizzati con resine termoindurenti rinforzate con fibre di legno pressate e fissati alla sottostruttura metallica.

Il fronte principale è rappresentativo, invece, della funzione direzionale dell'edificio nel rapporto con la circolazione veicolare della strada. Uno sbalzo di circa 6 metri, determinato dall'aggetto dei due piani superiori, offre al visitatore una piazza coperta d'ingresso e la facciata è interamente vetrata relazionandosi ad ambienti interni open spaces.

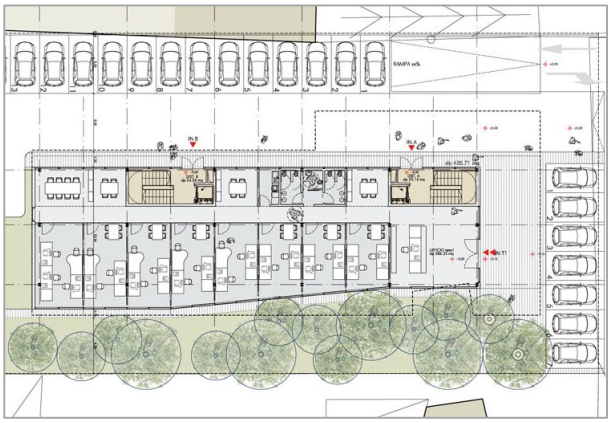


Figura 18. Vista e sezione tratte da [27]

Nel dettaglio, l'uso di facciate ventilate opache (Opaque Ventilated Façade o, più brevemente, OVF) è aumentato considerevolmente negli ultimi anni come soluzione costruttiva di involucro per diverse tipologie di edificio. Il loro principale interesse è dovuto alla capacità di ridurre i carichi termici estivi. Si tratta di una soluzione composta da due strati opachi e una intercapedine ventilata nel mezzo. Lo strato più esterno è composto generalmente da pannelli modulari di possibili materiali diversi (metallo, gres porcellanato, pietra o materiali compositi), mentre lo strato interno può essere costituito da parete in laterizio, in calcestruzzo armato o da tamponature leggere, come pannelli sandwich, e pannelli in cartongesso. I giunti tra i pannelli possono essere sigillati, predisponendo, in questo caso, aperture di ventilazione alla base e alla sommità del rivestimento.

All'interno della cavità di ventilazione si innesca un moto convettivo naturale, che dipende dalla differenza di temperatura che si crea tra interno ed esterno dell'intercapedine. In estate, l'innalzamento della temperatura dell'aria nell'intercapedine, causata dalla radiazione solare sul rivestimento, crea un effetto camino che portando via il calore verso l'alto riduce la temperatura sulla parete interna: maggiore è la radiazione solare, maggiore è la velocità dell'aria nell'intercapedine. Nella stagione invernale, invece, le aperture predisposte vengono chiuse in modo tale da evitare la ventilazione in intercapedine e non disperdere il calore all'esterno.

Importante è trovare sempre il giusto rapporto tra altezza della facciata e spessore di intercapedine. Prevalgono generalmente spessori di intercapedine tra 4 e 10 cm [28], anche se sensibili risultati in termini di raffrescamento estivo si iniziano a notare con spessori maggiori di 7 cm fino ad avere risultati massimi con spessori di 20-30 cm [29]. Relativamente al rivestimento esterno, in estate per le facciate esposte a sud, est e ovest sono da preferire materiali con un fattore di assorbimento solare basso e di colore chiaro. Inoltre, secondo alcuni studi [30], al fine di ottenere risparmi di energia pari al 35%, mentre con un rivestimento esterno metallico è necessario uno spessore di intercapedine di 17 cm, con un rivestimento esterno ceramico è sufficiente un'intercapedine d'aria di 9 cm.

Anche nei casi della Scheda 11 e della Scheda 12, in cui i progetti nascono dalla demolizione dell'esistente e dalla sua ricostruzione, si osserva facilmente come ci si discosti totalmente dalla struttura edilizia originaria, privilegiando le tecnologie più innovative come il legno e la facciata ventilata.

Scheda 11. Nuova sede aziendale a Molfetta (BA)

La nuova architettura in classe A+ (Figura 19) recupera e si allinea a quelle preesistenti nell'utilizzo del colore avorio chiaro "sabbia" dell'intonaco e nel rimando alle fasce di cotto, materiale ricorrente sugli altri edifici esistenti e con cui dialoga. Le murature portanti in c.a. sono realizzate mediante casserature a perdere in pannelli di legno-fibra cemento, talvolta con interposto uno strato di polistirolo sinterizzato con grafite, mentre per le superfici trasparenti sono stati adottati vetri strutturali trasparenti/opachi temperati e/o stratificati senza profili esterni a vista [31].

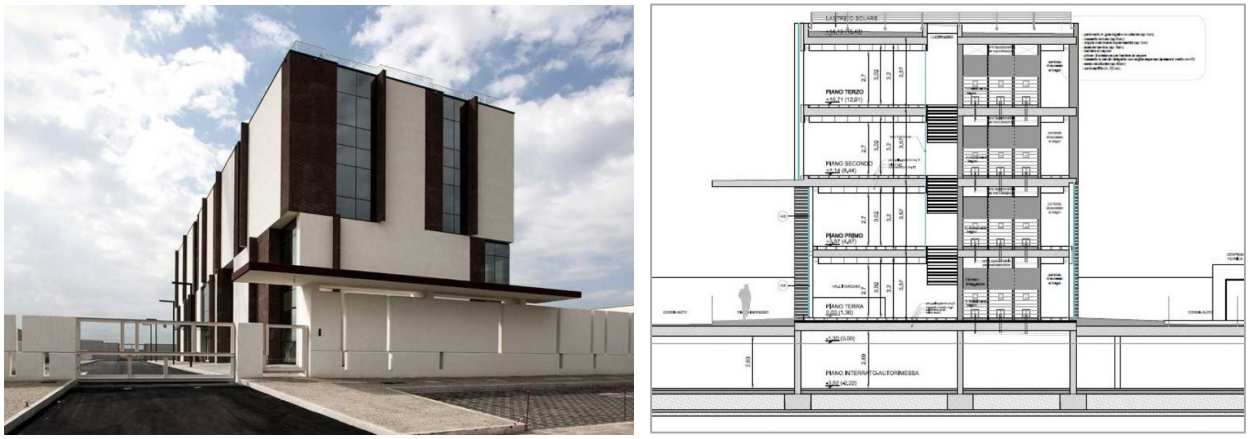


Figura 19. Vista e sezione tratte da [31].

Scheda 12. Sede comunale a Gabicce Mare (PU)

L'edificio (Figura 20) nasce da un progetto di demolizione e ricostruzione della sede comunale preesistente con l'intento di ridurre il volume originario e creare un involucro in legno e isolamento in lana di roccia. L'impianto per la climatizzazione estiva ed invernale è costituito da un sistema ad espansione diretta con modulazione del carico ottenuta tramite controllo automatico e dinamico non solo della portata ma anche della temperatura di evaporazione/condensazione del gas refrigerante con compensazione climatica. È presente un impianto di ventilazione meccanica controllata con immissioni di aria dall'esterno attraverso un recuperatore di calore ad alta efficienza. L'impianto di illuminazione, con corpi a LED, è controllato da un impianto base domotico. Il fabbisogno energetico è coperto, in parte, da un impianto fotovoltaico installato in copertura.

Figura 20. Viste tratte da [32]

Ampliando l'analisi ad ulteriori edifici a carattere terziario più esteso, come quelli ad uso scolastico e sanitario (Tabella 2), si è potuto constatare come il legno (nella forma di lamellare, X-lam o a telaio) sia l'elemento strutturale prevalentemente usato per queste tipologie caratterizzate da altezze non superiori a 1-2 piani.

Nei fabbricati con uffici adibiti prevalentemente alla produzione industriale, i cosiddetti "capannoni", si riscontra più facilmente la struttura metallica sia in elevazione che in copertura con tamponature in pannelli in c.a. precompresso abbinati a pannelli sandwich, ovvero moduli prefabbricati con anima isolante e pelle in alluminio.
Si è notato, invece, che nei casi di interventi di ristrutturazione in cui si decide di mantenere la muratura originaria, si tende ad optare per il più tradizionale cappotto esterno. I materiali isolanti più utilizzati, in generale, sono la lana di roccia, il polistirene, il poliuretano e la lana di vetro.
Dal punto di vista impiantistico (Tabella 3), i sistemi di climatizzazione invernale più diffusi nei casi-studio analizzati sono principalmente tre:

- pompa di calore del tipo aria-aria (VRF o a flusso refrigerante variabile);
- pompa di calore aria-acqua associata a terminali tipo fan coil, con la regolazione manuale per zona della temperatura interna che consente la possibilità di creare un microclima più personalizzato;
- pompa di calore ad acqua di falda associata a travi fredde a soffitto, con cui è possibile garantire la massima flessibilità gestionale.

Questi sistemi sono generalmente reversibili per la climatizzazione estiva, mentre è presente in tutti i casi analizzati un sistema di ventilazione meccanica, quasi sempre con recuperatore di calore, che fornisce l'aria primaria a tutti gli ambienti, controllando l'umidità relativa e la purezza dell'aria stessa.
Buona parte dell'energia elettrica richiesta dalle pompe di calore è fornita dall'impianto fotovoltaico che può diventare un elemento distintivo dell'intero edificio, come si nota, a titolo dimostrativo, nell'esempio illustrato in Scheda 13. Tale sistema, installato generalmente in copertura e talvolta integrato anche nei sistemi di schermatura, è prevalentemente del tipo monocristallino o policristallino con una estensione superficiale osservata che va da un minimo di 30 m^2 a un massimo di 500 m^2. In alcuni casi di Tabella 3 si osserva una copertura del fabbisogno energetico dell'edificio superiore al 60%.
Negli edifici ad uso ufficio si ritiene rilevante ottimizzare il consumo elettrico per l'illuminazione utilizzando preferibilmente corpi con luci a LED, anche se sono ancora diffuse lampade fluorescenti, che si attivano con sensori di movimento o con controllo automatico in funzione del contributo di luce naturale. L'installazione di un sistema di domotica o di BMS (Building Management System) consente, infatti, di controllare e gestire tutti gli impianti, in particolare gli impianti di climatizzazione e illuminazione, ma anche di regolare l'illuminazione solare tramite l'apertura e la chiusura di sistemi di ombreggiamento.

Tabella 2. Dati relativi agli edifici ad uso terziario nZEB di nuova costruzione di casi studio selezionati: parametri geometrici e descrizione dell'involucro con le relative trasmittanze.

FONTE	DESTIN. D'USO	DENOMINAZIONE	Z.C	ANNO	N. PIANI	SUPERF. [m²]	PARETI ESTERNE	U_{PAR} [W/m²K]	COPERTURE	U_{COP} [W/m²K]	U_{PAV} [W/m²K]	INFISSI	U_G [W/m²K]	U_F [W/m²K]
[33]	scolastica	Scuola «Italo Calvino» a Novate Milanese	E	2017	2	2.200	prefabbricato in legno	0,154	-	0,133	0,187		1,1	1,2
[33]	scolastica	Asilo nido nel quartiere S. Andrea a Fermo	D	2017	1	525	struttura in legno lamellare	0,293	-	-	-	metallo e doppio vetro	-	1,35
[33;34]	scolastica	Scuola materna «Sandro Pertini» a Bisceglie (BAT)	C	2017	1	1.300	muratura armata in laterizio porizzato	0,23	-	0,189	0,26	alluminio a taglio termico + doppio vetro b.e.	< 2	-
[7]	uffici	Nuova sede aziendale a Pioltello (MI)	E	2010	da 2 a 5 + 1 interrato	8.985,30	struttura in c.a. e pareti vetrate e opache	0,25	copertura piana terrazzata	0,2	0,2	-	U_w=1,4	
[7]	uffici	Perseo Expo District a Pero (MI)	E	2010	6 + 1 interrato	11.824	facciata in vetro strutturale	0,34	soletta in c.a. + copertura ombreggiante di brise-soleil	0,26	0,27	alluminio + vetri b.e.	U_w=1,38	
[7]	uffici	Complesso direzionale Auros a Milano	E	2010	5	11.426	facciata in vetro strutturale	0,28	copertura piana	0,27	0,34	-	U_w=1,4	
[7]	uffici	Edificio Parallelo a Milano	E	2012	3	12.286	facciata in vetro strutturale a SO, finestre a nastro nella corte	0,31	copertura piana	0,29	0,33	-	U_w=1,4	
[7]	struttura sanitaria	Edifcio ad uso farmacia e studi medici a Brescia	E	2011	3	1.191,20	sistema "a secco" in legno	0,2	copertura piana	0,21	0,27	con sistemi ombreggianti integrati	Uw=1,3	
[7]	produttivo +uffici	Edificio industriale con uffici a Gussago (BS)	E	2011	-	16.640 (prod) + 837 (uffici)	struttura metallica con pannelli in c.a. p. da 20 cm + pannelli sandwich	0,33	copertura a shed su struttura metallica e falde rivolte a sud	0,27	0,29	-	Uw=1,75	

FONTE	DESTIN. D'USO	DENOMINAZIONE	Z.C	ANNO	N. PIANI	SUPERF. [m²]	PARETI ESTERNE	U_{PAR} [W/m²K]	COPERTURE	U_{COP} [W/m²K]	U_{PAV} [W/m²K]	INFISSI	U_G [W/m²K]	U_F [W/m²K]
[7]	scolastica	Scuola per l'infanzia a Bareggio (MI)	E	2009	1	2.086	struttura in legno lamellare con tamponature in mattoni fortai	0,16-0,20	legno lamellare	0,2	0,23	legno massello	Uw=1,3	
[7]	struttura sanitaria	Residenza sanitaria assisitita a Lecco	E	2010	4 + 2 interrati	4.934,09	blocchi porizzati	0,32	Copertura co rivestimento in alluminioi	0,16	0,32	alluminio?	Uw=1,3	
[7]	struttura sanitaria	Centro di cura per disabili a Sesto San Giovanni (MI), padiglione E	E	2010	1	428,29	struttura in c.a. e tamponature con grandi vetrate	0,19	copertura piana	0,168	0,256	doppio vetro b.e.	Uw=1,35	
[7]	scolastica	Campus scolastico a Solferino (MN)	E	2010	1	1.780	materiali specializzati leggeri assemblati a secco	0,11	legno lamellare	o,2	0,15	-	Uw=1,4	

Tabella 3. Dati relativi agli edifici nZEB di nuova costruzione di casi studio selezionati: descrizione dei sistemi impiantistici con i relativi parametri e ulteriori informazioni.

FONTE	DENOMINAZIONE	IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE INVERNALE	POTENZA INV [kW]	IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE ESTIVA	POTENZA EST [kW]	VMC	PORTATA VMC [m³/h]	ACS	FER	SUPER F. PV [m²]	POTENZA PV [kWp]	ILLUMINAZIONE	ALTRE INFO
[33]	Scuola «Italo Calvino» a Novate Milanese	Pdc elettrica aria-aria	86,53	Pdc elettrica aria-aria	77,76	-	-	Pdc dedicata (P=2,16 kW)	pannelli PV in monocristallino	(85% di copertura)	46,5	-	-
[33]	Asilo nido nel quartiere S. Andrea a Fermo	Pdc aria-acqua	-	Pdc aria-acqua	-	VM con recuperatori di calore a doppio flusso 70%	3.176,41	accumulo da 600 l	Pannelli solari termici e PV in policristallino	130,47 (61% di copertura)	20	lampade fluorescenti	-
[33; 34]	Scuola materna «Sandro Pertini» a Bisceglie (BAT)	Pdc aria-acqua con pannelli radianti a pavimento	63	raffrescamento passivo (corte centrale e pergolato)	-	-	-	sistema dedicato (P=2 kW)	pannelli PV monocristallini	187 (69 % di copertura)	40	LED	frangisole a pergolato, ventilazione della corte centrale
[7]	Nuova sede aziendale a Pioltello (MI)	Pdc ad acqua di falda con travi fredde a soffitto a 4 tubi	580	(vedi impianto di risc.)	850	Ventilazione meccanica aria primaria a portata variabile	-	-	pannelli PV monocristallini	493	89,1	sistema computerizzato di illuminazione	Building Management System collegato a tutti gli impianti, corti interne e sistemi di ombreggiamento
[7]	Perseo Expo District a Pero (MI)	Pdc aria-aria (sistema VRV) con fancoil	1.770	gruppo frigo condensato ad aria (sistema VRV) e fancoil	-	VMC con HR	-	-	pannelli PV policristallini	246	29,5	-	corte interna, copertura con brise-soleil per corte e facciate sud-ovest, pavimento galleggiante, sistemi di automazione
[7]	Complesso direzionale Auros a Milano	Pdc aria-aria (sistema VRV) con fancoil	591	gruppo frigo condensato ad acqua di falda	-	VMC con HR	-	-	pannelli PV monocristallini	196	25,4	-	presenti sistemi di automazione dell'edificio
[7]	Edificio Parallelo a Milano	Pdc reversibile ad acqua di falda con travi fredde a soffitto a 4 tubi	2 x 735	Pdc reversibile ad acqua di falda con ventilconvettori integrati a soffitto	2 x 690	VM aria primaria a portata variabile	-	-	pannelli PV monocristallini	1.277	153,9	lampade ad alta efficienza	Building Management System collegato a tutti gli impianti

FONTE	DENOMINAZIONE	IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE INVERNALE	POTENZA INV [kW]	IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE ESTIVA	POTENZA EST [kW]	VMC	PORTATA VMC [m³/h]	ACS	FER	SUPER F. PV [m²]	POTENZA PV [kWp]	ILLUMINAZIONE	ALTRE INFO
[7]	Edifcio ad uso farmacia e studi medici a Brescia	Pdc reversibile ad acqua di falda con pannelli radianti a pavimento e radiatori (bagni)	30,5	(vedi impianto di risc.)	30,7	VMC con HR	-	-	pannelli PV monocristallini	49,12	7,05	lampade a basso consumo e sensori di presenza	-
[7]	Edificio industriale con uffici a Gussago (BS)	Pdc reversibile ad acqua di falda con pannelli radianti a pavimento (produzione) e Pdc aria-aria con VRV (uffici)	720 (produzione) + 75 (uffici)	free-cooling da acqua di falda con scambiatore di calore interposto (produzione) e Pdc aria-aria (uffici)	67 (uffici)	VMC con HR (64%)	-	-	pannelli PV policristallini	7.300	999	corpi illuminanti a ridotto consumo fluorescenti	installazione di 3 sistemi bus per il controllo illuminazione, apertura finestre e contabilizzazione dei consumi
[7]	Scuola per l'infanzia a Bareggio (MI)	Pdc geotermica reversibile con pannelli radianti a pavimento	105,9	(vedi impianto di risc.)	50,7	VMC	-	-	pannelli PV policristallini	115,3	19,8	-	schermature in legno, camini di ventilazione natura
[7]	Residenza sanitaria assisitita a Lecco	Pdc geotermica con pannelli radianti a soffitto o pavimento	114,6	Pdc geotermica reversibile con pannelli radianti a soffitto o pavimento	2 x 110	VMC a doppio flusso con HR (65%)	-	Pdc geotermica	pannelli PV in silicio amorfo	400	19,58	dimmerabile con controllo automatico in funzione del contributo di luce naturale	sistema BMS degli impianti di climatizzazione, segnalazione di stato/allarme circuiti elettrici
[7]	Centro di cura per disabili a Sesto San Giovanni (MI), padiglione E	impianto centralizzato esistente con radiatori	85,13	Pdc aria-aria con multisplit	61,6	VMC a doppio flusso con HR (65%)	-	36,48 kW	non presenti	-	-	lampade fluorescenti con sensori di presenza	schermature con frangisole a doghe apribili elettricamente in alluminio per le vetrate fisse e tende oscuranti a rullo esterne elettrificate per i vasistas
[7]	Campus scolastico a Solferino (MN)	Pdc aria-acqua con pannelli radianti a pavimento	156,1	(vedi impianto di risc.)	141,5	VMC con HR a entalpia	-	-	collettori solari (13,5 m_2)	-	-		

Scheda 13. Arval Headquarters, Scandicci, Firenze

Il progetto di Massimo Pierrattelli, soprannominato la "Saetta fotovoltaica" (Figura 21), cerca di conciliare forma architettonica, tecnologia avanzata e innovativa, sostenibilità ambientale ed efficienza energetica. L'edificio, classificato in classe A e ad emissioni nulle, risulta autosufficiente dal punto di vista energetico grazie all'impiego di fonti rinnovabili con sistemi di impianti fotovoltaici e geotermici, pur garantendo elevate prestazioni in termini di comfort e qualità ambientale. Le facciate caratterizzate da grandi vetrate a nastro garantiscono la penetrazione della luce naturale diffusa. Peculiarità del progetto sono le "vele" esterne di oltre 1100 m^2 realizzate con una struttura reticolare in acciaio su cui sono montati pannelli fotovoltaici innovativi (le cellule di silicio sono affogate in un pannello di pvc trasparente, il che rende i pannelli leggeri pur garantendo un'altissima efficienza) e flessibili che si aggiungono ai pannelli di copertura. L'energia prodotta viene utilizzata a favore delle pompe geotermiche poste nel sottosuolo, rendendo l'edificio autosufficiente dal punto di vista energetico. Infine, tutti gli impianti sono dotati di un sistema di controllo e gestione automatizzato che ne ottimizza il funzionamento [35].

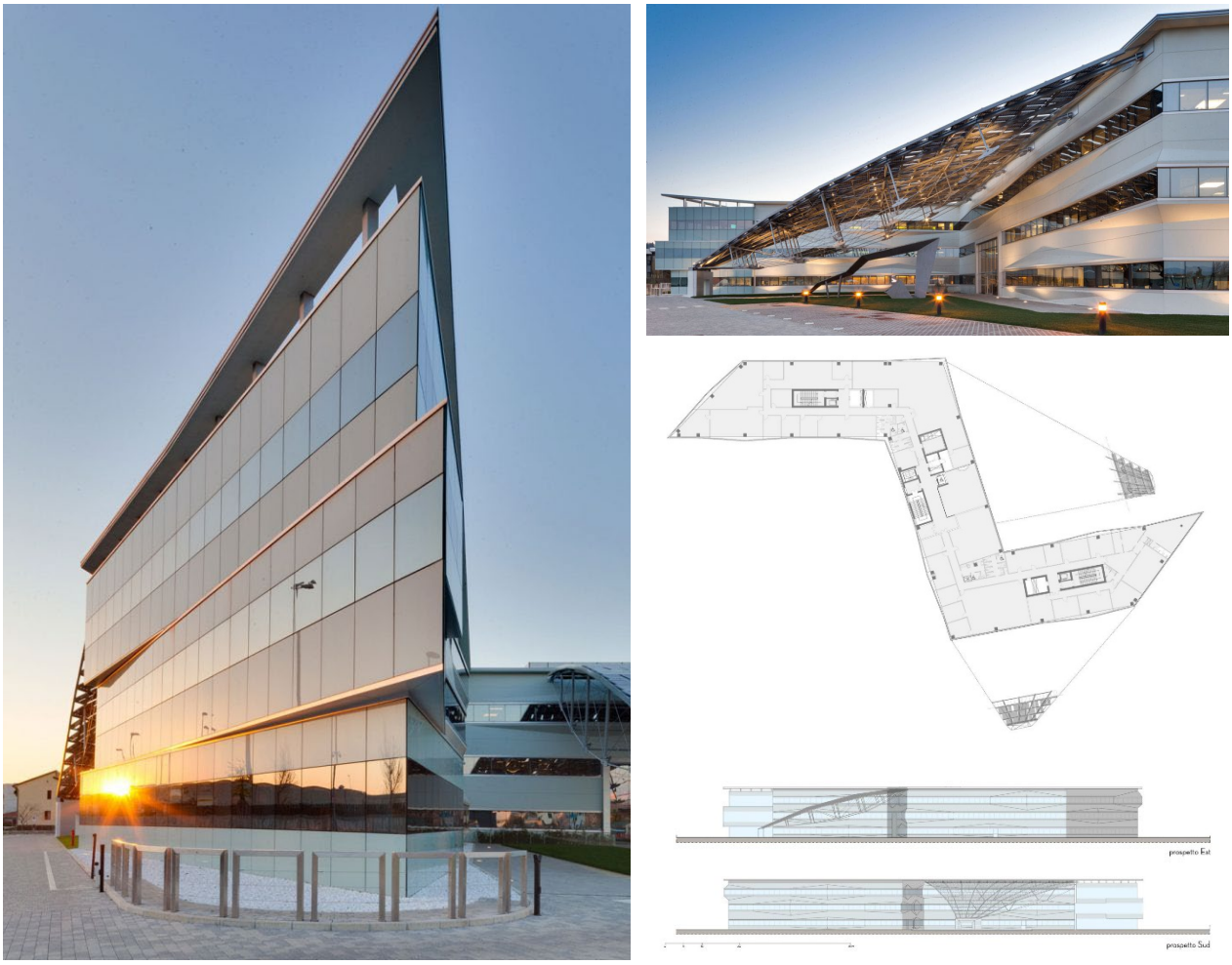


Figura 21. Vista dell'edificio e dettaglio costruttivo della facciata tratti da [36;37]

4 Premesse allo studio energetico con metodo di calcolo dinamico

Lo studio e l'analisi energetica condotte, pur seguendo un approccio teorico e di calcolo, hanno avuto l'obiettivo di analizzare scenari plausibili e verosimili nell'ottica del raggiungimento dello *zero energy buildings.*

Coerentemente con il metodo seguito già nella precedente annualità, il metodo di calcolo dinamico è stato indispensabile per ottenere dei risultati quanto più accurati. Ciò comporta tuttavia la necessità di curare ogni dettaglio dei casi studio analizzati e definire modelli di edificio tali da ottenere un'analisi coerente con la loro complessità.

Come detto in precedenza, tutte le ipotesi riguardanti le configurazioni scelte sono il risultato di una valutazione a monte e di tipo iterativi di una serie di alternative progettuali verificate man mano per la definizione delle configurazioni più opportune da analizzare, che non sempre risultano le migliori possibili in termini assoluti ma offrono una varietà di spunti e discussione in merito al raggiungimento degli obbiettivi prefissati.

Il metodo dinamico richiede, quindi, come già visto in [2], un livello di dettaglio paragonabile quasi a quello della progettazione rendendo indispensabile l'analisi dei risultati ed un processo ciclico di revisione e iterazione delle scelte e delle verifiche in modo da ottenere modelli coerenti e affidabili. Allo stesso tempo, il metodo consente di ottenere un quadro chiaro del comportamento del sistema edificio-impianto su base oraria e considerando caratteristiche quali l'inerzia termica lo sfasamento dell'onda termica nel tempo, il fattore di attenuazione o smorzamento dell'onda termica e la trasmittanza termica periodica dei componenti di involucro e tutta la variabilità derivante dai diversi profili di occupazione e di funzionamento degli impianti, utilizzo delle schermature, controllo ambientale impostati per ogni giorno dell'anno e per le differenti ore della giornata (pertanto strettamente legati alla tipologia edilizia e alla destinazione d'uso analizzata).

Per tale motivo lo strumento fondamentale per lo studio condotto è stato l'utilizzo del motore di calcolo dinamico EnergyPlus che ha consentito di effettuare la stima dei carichi e dei fabbisogni termici ed energetici, dipendenti dall'utenza e dai profili impostati. L'ingente quantità di risultati ottenibili in termini numerici su base oraria, giornaliera, mensile e annuale è stata oggetto di attenta valutazione per verificarne la congruenza e l'attendibilità oltre che per il processo di post-elaborazione al fine di ricavare considerazioni più immediate e utili allo scopo del lavoro.

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

I criteri di scelta delle località climatici sono riportati in [2]. Per motivi di coerenza e per preservare la possibilità di effettuare considerazioni conclusive a margine del triennio di attività condotto, si è preferito conservare lo stesso approccio metodologico e per ogni zona climatica riconsiderare le stesse città, elencate di seguito in Tabella 4. Le zone climatiche A e B sono state considerate insieme, data l'esigua estensione in Italia della zona climatica A, di fatto sottoposta a limiti di legge simili a quelli della zona climatica B.

Tabella 4. 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

Per tali località sono stati utilizzati i file climatici [2] ad hoc e aggiornati per ciascuna località, ricavati dalle elaborazioni dei dati del Comitato Termotecnico Italiano (CTI) [38] e implementati nel software Elements attraverso l'inserimento dei dati di località e dei parametri climatici (temperatura a bulbo secco, pressione atmosferica, umidità relativa, velocità del vento). Per quanto riguarda le grandezze descrittive della

radiazione solare, è stata ricavata la componente diretta normale avvalendosi dei dati disponibili in ENEA [39 e 40], secondo il modello di stima per la radiazione HE08k/39st, e considerando il valore medio orario dell'angolo zenitale per il calcolo dell'irradianza diretta normale (DNI). È stato infine verificato che il valore ottenuto della radiazione globale, derivante dalle due componenti di radiazione DNI e diffusa, risultasse coerente con i dati forniti dal CTI stesso.

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

I criteri generali e le assunzioni adottate a monte dei modelli e delle simulazioni energetiche hanno riguardato fondamentalmente la volontà di slegarsi almeno in parte dagli standard attuali prescritti dalla normativa vigente per gli edifici ad uso non residenziale di nuova costruzione, in quanto l'obiettivo del lavoro è quello di superare lo standard "nearly zero energy building" definito dal Decreto Requisiti Minimi (Appendice A) [15], e ottenere almeno edifici *zero energy*.
Si è deciso quindi di considerare comunque gli obblighi richiesti per tutti i parametri relativi al fabbricato e all'impianto così come normati per l'edificio di riferimento, ma allo stesso tempo effettuare delle valutazioni delle scelte verso strategie che riescono ad assolvere con ampio margine all'obiettivo preposto.
Per ciascun componente di involucro sono stati considerati i valori di trasmittanza U dell'edificio di riferimento, differenziati per zona climatica (Tabella 5), nel tentativo di assolvere al soddisfacimento della verifica invernale dell'involucro (Decreto Requisiti Minimi (Appendice A) [15]), nonché i valori di trasmittanza termica periodica Y_{IE} (Tabella 6) 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 5. Trasmittanza termica delle strutture nell'edificio di riferimento [15]

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 6. Trasmittanza termica periodica delle strutture nell'edificio di riferimento [15]

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

A partire da questi valori limite, sono stati inizialmente individuati componenti di involucro rispettosi di tali requisiti e, a seconda dei casi, si è deciso di adottare soluzioni di involucro ancor più performanti o coadiuvarle con sistemi impiantistici più avanzati per la riduzione dei consumi energetici finali.

Nella scelta dei periodi di riscaldamento e raffrescamento utili all'analisi dei risultati derivanti dalle simulazioni, per i suddetti motivi di coerenza con i criteri già adottati nel report della precedente annualità [2], si è deciso, per il periodo invernale, di prendere a riferimento quello definito dalla normativa [41,42] 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 (Tabella 7).

Tabella 7. 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, sono stati considerati i mesi da giugno a settembre.
Tutte le simulazioni sono state condotte su base oraria, giornaliera e mensile.

5 Scelta del modello di edificio-tipo ad uso ufficio

L'edificio tipo scelto per questo studio è stato ideato in modo tale che esso risulti rappresentativo della tipologia analizzata, pur mantenendo caratteristiche di semplicità, generalizzabilità e versatilità, indispensabili per delle valutazioni estensibili su scala nazionale e nelle diverse fasce climatiche. Inoltre, l'attenzione è stata posta sull'obiettivo di rendere tali edifici effettivamente realizzabili da un punto di vista sia tecnico sia economico, secondo le tendenze più attuali del mercato per dimensioni, materiali, tecnologie e utilizzo.
Nel panorama variegato degli edifici ad uso ufficio di nuova costruzione si è riscontrato, dalla ricognizione effettuata, un'estrema spinta verso architetture moderne che utilizzano materiali come vetro e acciaio, soprattutto in caso di committenti di alto calibro e prestigio internazionale. L'attività di ricerca condotta ha voluto, tuttavia, inglobare un'utenza più ampia e, a tal fine, il modello adottato si colloca in una prospettiva intermedia che soddisfi anche il mercato di fascia più ridotta ma che possa assolvere all'obiettivo di 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 edifici ZEB o netZEB [1,43,44].
Come nell'attività precedente, tutte le scelte preliminari sulle caratteristiche dei modelli analizzati sono derivate da una serie di analisi inerenti aspetti costruttivi, impiantistici e bioclimatici, con l'assunzione di profili di utilizzo/occupazione e di funzionamento degli impianti e l'adozione di soluzioni di schermatura dotati di un elevato grado di complementarità e coerenza. Particolare attenzione è stata attribuita alla produzione da fonti rinnovabili, anch'esse indispensabili nel delineare il complesso sistema edificio-impianto, ottimizzato e definito al meglio delle possibilità per integrare strategie passive, attive e produzione di energia da fonti rinnovabili in un unico approccio.

5.1 Ipotesi di definizione delle configurazioni di edificio tipo ad uso ufficio e delle relative tecnologie costruttive e impiantistiche applicate - caratteristiche generali

L'edificio è stato definito al fine del raggiungimento dello *zero energy building*, coerentemente con l'obiettivo dell'attività condotta, con lo scopo di ottenere un fabbisogno energetico pari a zero o comunque minimo attraverso un approccio integrato e consapevole nell'adozione di criteri bioclimatici, componenti efficienti sia di involucro che di impianto e produzione da fonti rinnovabili.

5.1.1 Caratteristiche generali, geometriche e dimensionali

La scelta principale, anche derivante dalla ricerca condotta a monte nei dati di letteratura, report tecnici, dati statistici e analisi di edifici di nuova costruzione già realizzati, è ricaduta su un modello di edificio ad uso ufficio caratterizzato da uno sviluppo lineare rettangolare, che consente il giusto grado di replicabilità e generalizzabilità del caso.
L'edificio (Figura 22) è lungo circa 48 m^2 e largo circa 11 m^2 e si sviluppa su cinque piani con una superficie utile complessiva a piano di circa 442 m^2 al netto delle scale ma non dei divisori interni. I due vani scala presenti garantiscono la distribuzione verticale e sono dotati entrambi di ascensori, nel rispetto della vigente normativa antincendio[2].

[2] 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 citati è necessaria una progettazione adeguata di tutto il sistema edificio-impianto.

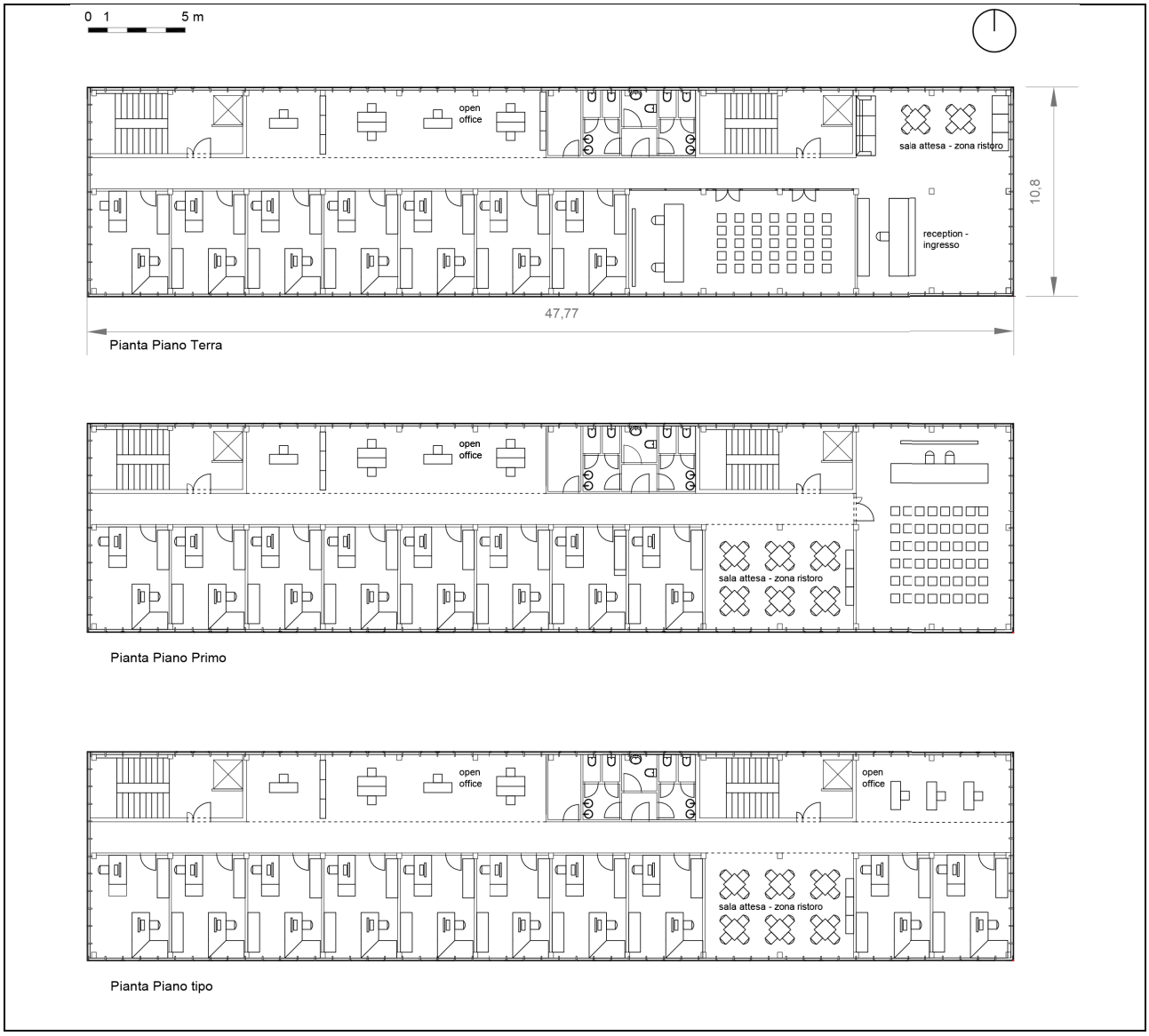


Figura 22. Piante dei differenti piani e relative distribuzioni funzionali

Il piano terra prevede la presenza di una reception-hall con spazio di accoglienza, una sala riunioni e l'alternanza di openspace e stanze adibite ad ufficio, caratteristiche queste ultime mantenute ai piani restanti per garantire la cooperazione e gli spazi aggregativi. Anche il primo piano, come il piano terra è dotato di un'ulteriore sala riunioni-conferenze, che lascia il posto nei piani successivi ad ulteriori uffici.
L'analisi ha previsto quattro varianti dell'edificio, scegliendo due configurazioni di involucro e due configurazioni di impianto differenti che saranno descritte nel seguito.
A livello generale, lo sviluppo lineare è evidente nei prospetti, che si presentano semplici e uniformi nella prima configurazione dotata di involucro trasparente (Figura 23), coerentemente con la prassi esecutiva attualmente più diffusa della facciata continua vetrata, mentre sono scanditi dalle superfici vetrate quasi "a nastro" degli infissi, presenti in ogni piano, nella seconda configurazione di involucro scelta (Figura 24), ossia una tamponatura isolata esternamente a cappotto che utilizza materiali più tradizionali.

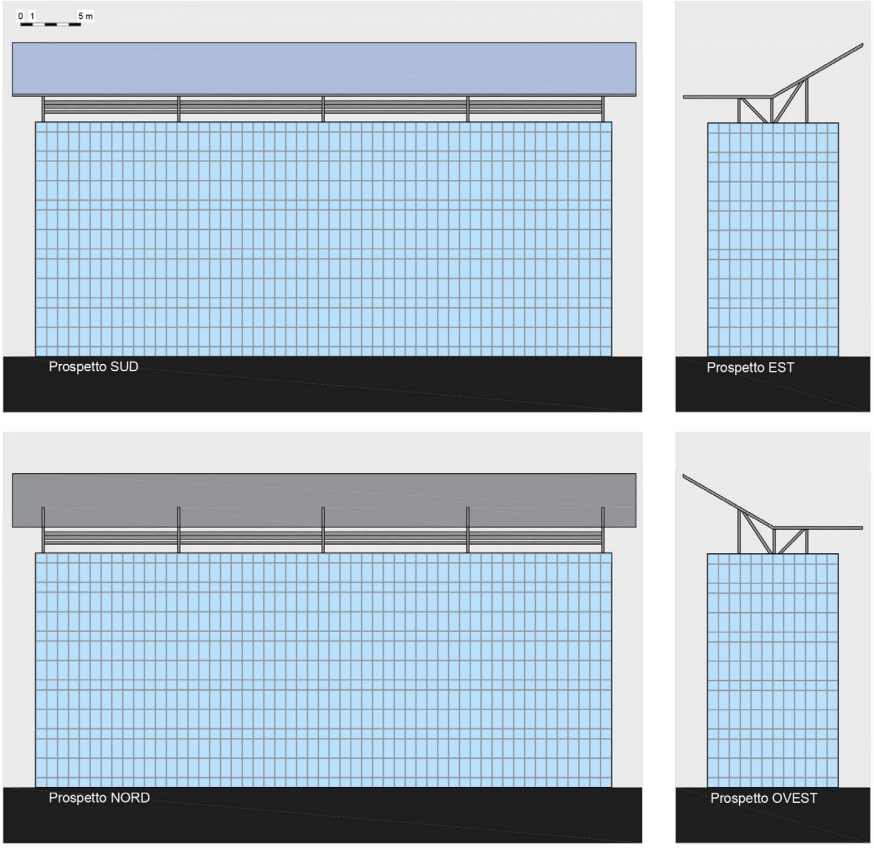


Figura 23. Prospetti dell'edificio ad uso ufficio vetrato (configurazione 1) con pensilina fotovoltaica.

Figura 24. Prospetti dell'edificio ad uso ufficio con tamponatura opaca (configurazione 2).

La Tabella 8 riporta le caratteristiche geometriche e dimensionali più significative dell'intero edificio, mentre la Tabella 9 presenta quelle delle singole zone, adibite a differenti destinazioni d'uso, distribuite per piani, con particolare attenzione alle superfici e ai numeri di occupanti. Per stabilire il numero di occupanti per ciascun ambiente sono stati considerati gli indici di affollamento convenzionali secondo la norma UNI 10339 [45], così come riportati in Tabella 9. In più, per gli uffici presenti ai differenti piani, occupati da 2 persone ciascuno, la dimensione è stata fissata con uno sviluppo pari a 5,3 x 3,8 m, al fine di rispettare l'indice delle prescrizioni dei vigili del fuoco sulle aree lavorative minime negli edifici ad uso ufficio (1 persona ogni 10 m^2[46]).

Tabella 8. Caratteristiche dimensionali dell'edificio ad uso ufficio

Caratteristiche	
Superficie totale lorda a piano (m^2)	516
Sup. netta a piano escluso vano scala/ascensore (m^2)	442
N. piani	5
N. totale di uffici	45
Altezza netta interpiano (m)	2.90
N. occupanti totali (uffici)	120

Tabella 9. Caratteristiche e distribuzione degli ambienti con differenti destinazioni d'uso e suddivisi per piano

Destinazione d'uso	Numero di ambienti per piano	Superficie utile per ambiente [m^2]	N. occupanti per ambiente	Indice di affollamento per ambiente
Piano terra				
Reception	1	42,97	4	0,09
Sala di attesa-ristoro	1	27,76	max 17	0,60
Uffici	7	20,18	2	0,10
Open office	1	53,79	6	0,12
Sala riunioni	1	62,34	Max 37	0,60
Distribuzione	1	76,00	/	/
Servizi igienici (inclusi antibagni)	2	12,5	/	/
Piano 1				
Sala di attesa-ristoro	1	41,52	Max 25	0,60
Uffici	8	20,18	2	0,10
Open office	1	53,79	6	0,12
Sala riunioni	1	83,86	Max 50	0,60
Distribuzione	1	63,00	/	/
Servizi igienici (inclusi antibagni)	2	12,5	/	/
Piano tipo (tre piani)				
Sala di attesa-ristoro	1	41,52	Max 25	0,60
Uffici	10	20,18	2	0,10
Open office 1	1	53,79	6	0,12
Open office 2	1	27,76	3	0,12
Distribuzione	1	76,00	/	/
Servizi igienici (inclusi antibagni)	2	12,5	/	/

Collocato in un clima temperato quale è quello italiano, l'orientamento dell'edificio si sviluppa seguendo la direzione Est-Ovest, ossia con le facciate più lunghe esposte a Sud e a Nord. In tal modo, si ottimizza a Sud il guadagno termico durante la stagione invernale, mentre la facciata Nord risulta comunque più esposta alle dispersioni termiche attraverso l'involucro a causa della radiazione solare ridotta.

In estate, la facciata a Sud riceve un irraggiamento diretto inferiore rispetto a quelle a Est e Ovest, grazie alla perpendicolarità dei raggi solari rispetto alla superficie terrestre.
Aspetto di grande importanza è l'adozione di sistemi di ombreggiamento fissi e dinamici (brise-soleil e lamelle orientabili), dotati di sistemi di controllo adattivi su tutte le facciate, che contrastano il surriscaldamento dovuto all'alta percentuale di superficie vetrata presente.

5.1.2 Tecnologie costruttive di involucro

A livello di involucro, la prassi costruttiva consolidatasi negli ultimi anni, come dimostrato nel par. 3.1, predilige l'utilizzo di materiali come acciaio e vetro. Le grandi superfici vetrate sono tuttavia da un punto di vista energetico abbastanza sfidanti, soprattutto nell'ottica del raggiungimento dell'obiettivo ZEB.
Ciò ha determinato la convinzione della necessità di analizzare da un lato una prima configurazione di involucro che tenga conto delle tendenze attuali di mercato (quindi con un evidente sviluppo vetrato), dall'altro una seconda configurazione energeticamente più idonea all'obiettivo dell'attività condotta e più tradizionale con tamponatura opaca ad elevato isolamento.
La definizione dell'involucro edilizio ha tenuto conto dei requisiti minimi definiti per ogni componente costruttivo volti al soddisfacimento degli standard normativi attuali, così come si ritrovano nel D.M. 26/06/2015 [15], rispetto all'edificio di riferimento. Tale scelta, operata anche nella precedente annualità [2], consente di porsi in una condizione di partenza già performante, dovendo garantire livelli elevati di prestazione energetica, oltre a tener conto dell'indispensabile esigenza di valutare la fattibilità sia tecnica che economica dell'edificio stesso.
Da qui, il passo successivo è la scelta di soluzioni che, pur soddisfacendo i requisiti minimi, siano tali da raggiungere livelli di prestazione ancor più elevati, in modo da garantire il raggiungimento dell'obiettivo zero energy, attraverso il consolidato approccio di una progettazione integrata dell'insieme edificio-impianto-fonti rinnovabili.

Configurazione 1

La prima configurazione analizzata prevede l'adozione di un sistema di facciata continua a cellule autoportanti costituita per circa il 50% da superficie vetrata e per la restante parte da pannelli coibentati che si compongono a loro volta di un pannello di tipo sandwich o spandrel (in lana di roccia rivestito da lastre di alluminio) più un rivestimento interno in cartongesso ed esterno in lastra di vetro. Tali pannelli hanno la funzione di coprire gli elementi di costruzione interposti tra le parti trasparenti di un edificio, come ad esempio i bordi dei solai, dei sistemi di ventilazione e le tubature degli impianti.
Tale soluzione rappresenta un'ottima alternativa alla facciata puramente vetrata in quanto il rivestimento esterno in vetro garantisce la continuità estetica e visiva dell'involucro trasparente, mentre la stratigrafia interna consente di ottenere elevate prestazioni e soddisfare i requisiti energetici richiesti dal D.M. 26/06/2015 [15].
Come si vedrà in seguito in dettaglio, quest'ultimo aspetto risulta particolarmente critico: il pacchetto scelto, infatti, se da un lato garantisce il soddisfacimento dei limiti di trasmittanza imposti dalla norma, dall'altro non rende sempre possibile l'assolvimento ai requisiti imposti in termini di massa superficiale e trasmittanza termica periodica, in quanto la struttura in sé risulta estremamente "leggera". Il rischio, quindi, di effettuare un puro esercizio teorico, accontentandosi di una soluzione che soddisfa soltanto in parte i requisiti richiesti, ha portato all'analisi di un ulteriore elemento costruttivo in grado, invece, di assolvere anche a tali aspetti a fronte del raggiungimento di un isolamento di gran lunga superiore rispetto alle prescrizioni minime vigenti per le diverse zone climatiche. Ciò, tuttavia, potrebbe comportare il rischio di surriscaldamento dell'edificio stesso nelle zone climatiche più calde (per esempio la zona A e B), aspetti questi che saranno meglio approfonditi nei prossimi paragrafi.
La prima soluzione trattata (configurazione 1-VAR - Figura 25), dunque, prevede l'utilizzo di un isolamento in lana di roccia di spessore variabile a seconda delle zone climatiche per il soddisfacimento della trasmittanza limite dell'edificio di riferimento, seppur essa ponga alcuni problemi sul soddisfacimento dei requisiti di massa superficiale e trasmittanza termica periodica.

Si è valutata, a tal proposito, la sostituzione della lana di roccia con isolanti a maggiore densità come la fibra di legno. In tal caso, con spessori da 14 a 16 cm si riescono anche a soddisfare i suddetti requisiti per tutte le zone climatiche, ma ciò comporta che, in quelle più calde, lo spessore risulti troppo elevato, determinando possibili problemi di surriscaldamento. Inoltre, la fibra di legno è un materiale a rischio di condensa, problema tutt'altro che trascurabile. Da indagini di mercato effettuate non risulta, infine, un pannello del tipo "spandrel" con l'impiego di tale materiale. Altre varianti, rivenienti da letteratura [47], potrebbero prevedere l'utilizzo dei *Vacuum Insulation Panels* (VIP), già citati nel Report della I annualità [2].

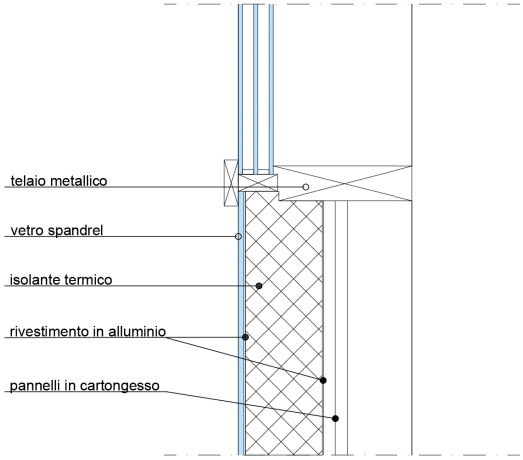


Figura 25. Dettaglio di un pannello del tipo "spandrel", adottato in configurazione 1-VAR.

Si tratta di pannelli costituiti da un materiale poroso sottovuoto sigillato all'interno di un involucro multistrato. La sottrazione di aria dall'interno dei pannelli comporta una riduzione della trasmissione di energia per conduzione termica, irraggiamento e convezione, e una conseguente elevata capacità isolante. In tal modo, si riducono notevolmente gli spessori di isolamento richiesti, ma anche in questo caso non si riescono a soddisfare i requisiti di trasmittanza termica periodica definiti per gli involucri opachi. Inoltre, valutando la soluzione in termini puramente economici, il solo costo del pannello sottovuoto si attesta tra gli 80 e i 126 €/m^2, a seconda dello spessore (1 cm, 1,5 cm e 2 cm), di gran lunga più elevato rispetto al costo della lana di roccia (tra i 7 e 28 €/m^2) [48]. Le considerazioni appena riportate sul mancato rispetto dei requisiti minimi citati e sull'aumento di prezzo hanno, pertanto, indirizzato la scelta sull'utilizzo della lana di roccia come materiale isolante.

Come già detto, non è possibile per tale soluzione adottare degli spessori tali da garantire i requisiti di massa superficiale o tramittanza termica periodica, come imposti dal D.M. 26/06/2015 [15]. Per tale motivo, in alternativa ad essa, si è deciso di trattare anche una seconda soluzione (Configurazione 1-PIR) che consente di rispettare tutti i requisiti minimi citati.

Si tratta di una soluzione che sfrutta lo stesso principio del pannello "spandrel" ed è adatta a perseguire l'obiettivo "zero-energy" in edifici vetrati, in quanto consente di incrementare il valore di resistenza termica, aumentando lo spessore della soluzione senza modificare l'involucro esterno. Questa tecnologia proveniente dal mercato estero, e in particolare quello americano, rappresenta la naturale "evoluzione" del classico spandrel in linea con i più restrittivi requisiti minimi del Decreto [15].

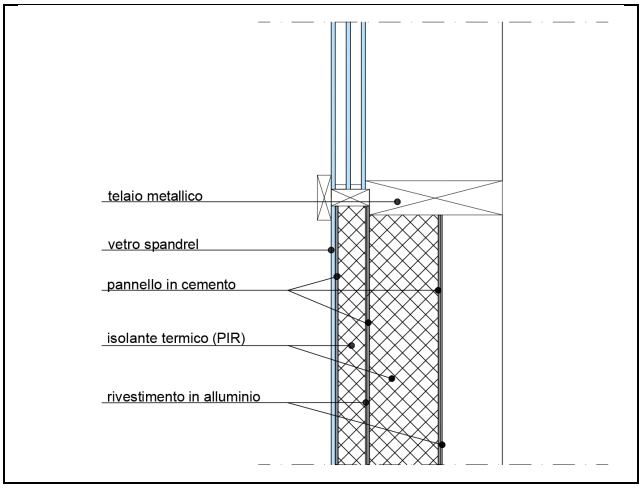


Figura 26. Dettaglio di pannello con utilizzo dell'isolante Polyiso (PIR), adottato in configurazione 1-PIR.

Il sistema presenta in aggiunta al classico pannello già descritto, un ulteriore pannello di riempimento a scelta tra materiali diversi (truciolato, cartongesso, lastre di cemento e polipropilene scanalato, ecc.), che può essere affiancato all'isolante, generalmente EPS o Polyiso (PIR), o contenerlo all'interno (Figura 26). Utilizzando il PIR, che ha caratteristiche di densità, calore specifico e conduttività maggiori rispetto all'EPS, si riescono a rispettare i requisiti minimi con lo spessore di 14 cm di isolante, non incrementando quindi di troppo il suo valore.
Questo pacchetto viene reso più performante con l'aggiunta verso l'ambiente interno di un ulteriore strato dello stesso materiale isolante racchiuso dal substrato di riempimento e dal rivestimento interno (Figura 26).
Nella configurazione in esame, si è optato per un pannello composto da rivestimento esterno in vetro e rivestimenti intermedio e interno in alluminio, lastra di riempimento in cemento e isolante in PIR.
A completamento della facciata si snodano le vetrate continue (doppi o tripli vetri a seconda della zona climatica), utili a garantire l'illuminazione naturale all'interno degli uffici e dei diversi ambienti, ad esclusione delle zone adibite a servizi igienico-sanitari opportunamente trattate (con vetri colorati o opacizzati).
La facciata è dotata di sistemi di schermatura avanzati dinamici integrati che cambiano l'orientamento a seconda dell'incidenza della radiazione solare diretta e diffusa, adattandosi e ottimizzando il guadagno solare in inverno e la protezione da essa in estate.
Per quanto riguarda le chiusure orizzontali, il solaio contro-terra è stato dotato di vespaio con igloo e pavimento galleggiante utile all'alloggiamento di eventuali sistemi impiantistici, mentre lo strato di isolante in EPS è stato scelto di spessore variabile tale da garantire il soddisfacimento del requisito di trasmittanza limite per ciascuna zona climatica.
I solai di interpiano, costituiti da solai in latero-cemento tradizionali presentano un più sottile strato di isolante termo-acustico con pavimento galleggiante per favorire l'alloggio di eventuali impianti elettrici e idrici. Inoltre, è previsto, per lo stesso motivo, la presenza del controsoffitto, per ospitare le componenti impiantistiche del sistema di ventilazione meccanizzata. Dallo studio preliminare è emerso che il pavimento galleggiante o sopraelevato viene utilizzato spesso negli edifici ad uso ufficio, anche se ha un costo più elevato rispetto ad un pavimento tradizionale (da prezzario dagli 80 ai 120 €/m^2 rispetto ai 60 €/m^2 di un pavimento vinilico tradizionale), per consentire la massima flessibilità degli spazi nel tempo e quindi una maggiore facilità di manutenzione, dal momento che viene installato a secco al di sopra del massetto. Consente anche un alto comfort acustico sia alla trasmissione aerea che da calpestio, evitando l'utilizzo di un ulteriore strato di isolamento acustico.
Infine, la copertura è anch'essa tradizionale con solaio piano in latero-cemento e isolamento in EPS di spessore variabile a seconda delle zone climatiche. Sempre in copertura, al fine di garantire una più ampia superficie da adibire a fotovoltaico e, allo stesso tempo, un maggiore ombreggiamento, è stata ideata una

pensilina aggettante in acciaio[3] che conferisce all'edificio maggior carattere e diventa elemento caratterizzante dell'edificio stesso, prendendo spunto dagli esempi analizzati nella parte introduttiva.
Si è cercato infine di minimizzare al meglio i ponti termici in modo da ridurre le dispersioni da parte dell'involucro, sfruttando il fatto che le vetrate sono inglobate all'interno del sistema di facciata continua.
La configurazione descritta è sintetizzata per una maggior chiarezza in Tabella 10.

Tabella 10. Componenti di involucro per il modello di edificio tipo ad uso ufficio – Configurazione 1. Gli spessori variano a seconda della zona climatica analizzata.

CONFIGURAZIONE 1: INVOLUCRO	
Codice struttura	Descrizione
Involucro opaco - Pareti verticali esterne per il modello di edificio tipo	
PVE1 (Var)	Pilastri in c.a./facciata continua a montanti e traversi con pannelli coibentati in lana di roccia
PVE1 (PIR)	Pilastri in c.a./facciata continua a montanti e traversi con pannelli coibentati PIR
Involucro opaco - Solaio interpiano	
SI1	Solaio in latero-cemento con isolante termico e acustico in EPS
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 latero-cementizia con isolante termico in EPS + pensilina fotovoltaica
Involucro trasparente	
SVD1	Superficie vetrata - Doppio Vetro (zone A, B, C, D)
SVT1	Superficie vetrata - Triplo Vetro (E, F)
Schermature	
SCH	Schermature esterne integrate con controllo dinamico

Gli spessori di isolamento in tutti i pacchetti costruttivi sono stati variati a seconda della zona climatica analizzata e degli standard normativi minimi da rispettare, tranne che per la parete verticale esterna per cui sono state adottate le due soluzioni già descritte (Tabella 11).

Tabella 11. Spessori di isolante per ciascuna zona climatica, per l'edificio ad uso ufficio – Configurazione 1.

CONFIGURAZIONE 1: ISOLAMENTO						
Tipo di chiusura	*Tecnologia scelta*	*Spessori di isolante per zona climatica*				
		A-B	C	D	E	F
Verticale esterna	PVE1 (Var)*	7	9	11	12	13
	PVE1 (PIR)**	14	14	14	14	14
Solaio interpiano	SI1	2	2	2	2	2
Orizzontale contro-terra	SCT1	3	5	8	9	10
Orizzontale di copertura	COP1	2	3	6	8	10
		Tipologia di vetri per zona climatica				
Superfici vetrate	Taglio termico	SVD1	SVD1	SVD1	SVT1	SVT1

*(Var) = pannelli di tipo sandwich con isolamento in lana di roccia a spessore variabile a seconda delle zone climatiche (non è garantita la massa superficiale).

[3] La pensilina è da considerare come puro esempio dimostrativo di estensibilità della superficie da adibire all'installazione di pannelli fotovoltaici. La forma e le dimensioni sono state ricavate da un'analisi di varie configurazioni sia dimensionali che di orientamento e inclinazione, tra le quali è stato considerato il miglior compromesso in termini di efficienza e fattibilità. È ovviamente sottintesa la necessità di calcoli strutturali ad hoc e valutazioni per i carichi derivanti dal vento cui essa sarebbe sottoposta, in caso di progettazione reale.

**(PIR) = pannelli di tipo sandwich con isolamento PIR a spessore unico per tutte le zone climatiche (è garantita la massa superficiale).

Per un maggiore dettaglio si riportano di seguito (Tabella 12) gli strati che compongono i singoli componenti con tutte le caratteristiche termofisiche dei materiali adottati (spessore, conducibilità, calore specifico, densità, resistenza alla diffusione del vapore).

Tabella 12. Tabella riassuntiva delle caratteristiche termo-fisiche, dei componenti di involucro per l'edificio tipo ad uso ufficio - Configurazione 1

PVE1-Var	**Chiusura verticale esterna: Facciata continua con pannelli coibentati in lana di roccia**					
	Descrizione degli strati	Spessore (s) [m]	Conduttività termica (λ) [W/mK]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m³]	Resistenza termica [m²K/W]
1	Cartongesso	0,036	0,210	1000	1000	
2	Lastra in alluminio	0,002	220,000	880	1800	
3	Lana di roccia	Varia a seconda della zona climatica	0,034	1030	80	
4	Lastra in alluminio	0,002	220,000	880	1800	
5	Rivestimento in vetro	0,008	1,000	1000	2400	
PVE1-PIR	**Chiusura verticale esterna: Facciata continua con pannelli coibentati PIR**					
	Descrizione degli strati	Spessore (s) [m]	Conduttività termica (λ) [W/mK]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m³]	Resistenza termica [m²K/W]
1	Rivestimento in alluminio	0,002	220	880	1800	
2	Pannello in cemento	0,004	1,400	1000	2000	
3	Polyiso	0,100	0,026	1480	100	
4	Pannello in cemento	0,004	1,400	1000	2000	
5	Lastra in alluminio	0,002	220	880	1800	
6	Polyiso	0,040	0,026	1480	100	
7	Pannello in cemento	0,004	1,400	1000	2000	
8	Rivestimento in vetro	0,006	1,000	1000	2400	

SI1	**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/m³]	Resistenza termica [m²K/W]
1	Pavimentazione in gres porcellanato	0,034	1,64	1000	1600	
2	Intercapedine	0,120				0,210
3	Massetto autolivellante	0,020	0,34	1000	270	
4	Isolante in EPS	0,020	0,037	1200	12	
5	Solaio latero-cemento	0,30	0,46	840	220	
6	Intercapedine	0,500				0,210
7	Cartongesso	0,037	0,210	1000	1300	

COP1	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/m³]	Resistenza termica [m²K/W]
1	Pavimentazione per esterni	0,02	1	800	2000	
2	Collante per piastrelle	0,002	1	1000	1800	
3	Impermeabilizzante	0,002	0,23	1000	1100	
4	Isolante in EPS con grafite	Varia a seconda della zona climatica	0,035	1400	25	
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	Intercapedine	0,500				0,210
9	Cartongesso	0,037	0,210	1000	1300	

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/m³]	Resistenza termica [m²K/W]
1	Pavimento galleggiante	0,034	1,64	1000	1600	
2	Intercapedine	0,12				0,210
3	Massetto autolivellante	0,02	0,34	1000	270	
4	Isolante in EPS	Varia a seconda della zona climatica	0,037	1200	12	
5	Caldana in calcestruzzo	0,14	0,34	1000	270	
6	Vespaio	0,40				0,16
7	Magrone	0,15	0,34	1000	270	

Per quanto riguarda invece le parti unicamente vetrate (Tabella 13), sono state ipotizzate vetrate isolanti doppie a controllo solare in caso di zone climatiche calde e selettive doppie o triple in caso di zone climatiche più fredde con intercapedine riempita di argon, caratterizzate da isolamento termico buono, elevata illuminazione e ridotto ingresso di calore solare, definite in base ad alcune caratteristiche di infissi presenti sul mercato e rispettando i valori limite del Decreto Requisiti Minimi nelle varie zone [15].

Tabella 13. Tabella riassuntiva delle caratteristiche delle superfici vetrate nelle due configurazioni analizzate, per ciascuna zona climatica per l'edificio tipo ad uso ufficio - Configurazione 1

Zona climatica	Vetro	Spessore Strati [mm]	Gas intercapedine	Fattore solare	Trasmissione luminosa [%]	U_w [W/m²K]	$U_{W,lim\ 2021}$ [W/m²K]
A e B	Doppio vetro selettivo	6-16-4	Argon	0,22		1,8	3
C	Doppio vetro selettivo	6-16-4	Argon	0,22		1,8	2,2
D	Doppio vetro selettivo	6-16-4	Argon	0,28	70	1,2	1,8
E	Triplo vetro selettivo	6-16-6-16-4	Argon	0,28	70	0,74	1,4
F	Triplo vetro selettivo	6-16-6-16-4	Argon	0,28	70	0,74	1,1

Configurazione 2

La seconda configurazione di involucro è stata scelta con la finalità di dare spazio a tecnologie più tradizionali ed economicamente fattibili, anche nelle realtà più piccole e con budget economici da investire inferiori.
Il sistema è costituito da un'intelaiatura in pilastri in cemento armato con tamponature in laterizio ed elevato livello di isolamento, applicato per lo più all'esterno con sistema a cappotto. Il laterizio presenta una buona massa superficiale e ottimi valori di traspirabilità e durabilità con ottime caratteristiche termiche e un buon comportamento invernale ed estivo. Come materiale isolante è stata scelta la lana di roccia, materiale economico ma performante che applicato alla struttura muraria garantisce elevate prestazioni energetiche all'involucro.
Si è preferito non variare i pacchetti stratigrafici di solaio contro-terra, copertura e interpiano in quanto strettamente legati ai sistemi impiantistici adottati e ritenuti soluzioni efficienti e rientranti nelle verifiche di legge per le nuove costruzioni.
In copertura si è ritenuto opportuno distinguere la seconda configurazione dalla prima e mantenerne il carattere tradizionale prevedendo che non venga realizzata alcuna pensilina, lasciando semplicemente la copertura piana con uno spazio riservato all'alloggiamento delle macchine e dei sistemi di generazione impiantistici.
I ponti termici sono stati minimizzati, seppur anche in questo caso l'inserimento di ampie fasce vetrate che garantiscano il comfort visivo e l'illuminazione naturale all'interno degli ambienti, ponga notevoli criticità in tal senso. Le discontinuità geometriche e costruttive risultano ovviamente punti sensibili e difficoltosi nel garantire la continuità dell'isolamento. Soprattutto per le vetrate si è ipotizzato che esse siano inserite nell'isolante degli elementi orizzontali superiori e inferiori in cui si innestano.
La configurazione 2 è sintetizzata in Tabella 14.

Tabella 14. Componenti di involucro per il modello di edificio tipo ad uso ufficio. Gli spessori variano a seconda della zona climatica analizzata.

CONFIGURAZIONE 2: INVOLUCRO	
Codice struttura	Descrizione
Involucro opaco - Pareti verticali esterne per il modello di edificio tipo	
PVE2	Pilastri in c.a./parete in laterizio con isolante esterno a cappotto in lana di roccia
Involucro opaco - Solaio interpiano	
SI1	Solaio in latero-cemento con isolante termico e acustico in EPS
Involucro opaco - Solaio contro-terra	
SCT1	Fondazione a travi rovesce in c.a. e vespaio aerato con isolante in EPS e impermeabilizzazione
Involucro opaco - Solaio di copertura	
COP2	Copertura piana latero-cementizia con isolante termico in EPS
Involucro trasparente – Serramenti a taglio termico	
VD2	Infissi - Alluminio e Doppio Vetro (zone A, B, C, D)
VT2	Infissi - Alluminio e Triplo Vetro (E, F)
Schermature	
SCH	Schermature esterne integrate con controllo dinamico

Anche in questo caso gli spessori di isolamento in tutti i pacchetti costruttivi variano a seconda della zona climatica analizzata e degli standard normativi minimi da rispettare (Tabella 15).

Tabella 15. Spessori di isolante per ciascuna zona climatica, per l'edificio ad uso ufficio – Configurazione 2.

CONFIGURAZIONE 2: ISOLAMENTO						
Tipo di chiusura	*Tecnologia scelta*	*Spessori di isolante per zona climatica*				
		A-B	C	D	E	F
Verticale esterna	PVE2	3	5	7	8	10
Solaio interpiano	SI1	2	2	2	2	2
Orizzontale contro-terra	SCT1	3	5	8	9	10
Orizzontale di copertura	COP2	2	3	6	8	10
		Tipologia di vetri per zona climatica				
Superfici vetrate	Taglio termico	VD2	VD2	VD2	VT2	VT2

Sono state definite tutte le stratigrafie dei componenti di involucro Tabella 16 con i relativi parametri termo-fisici dei materiali che li costituiscono (spessore, conducibilità, calore specifico, densità, resistenza alla diffusione del vapore).

Tabella 16. Tabella riassuntiva delle caratteristiche termo-fisiche dei componenti di involucro per la configurazione 2

PVE2	**Chiusura verticale esterna: Parete in laterizio + isolante 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	Varia a seconda della zona climatica	0,034	1030	80	
3	Laterizio porizzato rettificato	0,30	0,23	1000	800	
4	Intonaco interno	0,02	0,9	1000	1800	

SI1	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/m³]	Resistenza termica [m²K/W]
1	Pavimentazione in gres porcellanato	0,034	1,64	1000	1600	
2	Intercapedine	0,120				0,210
3	Massetto autolivellante	0,020	0,34	1000	270	
4	Isolante in EPS	0,020	0,037	1200	12	
5	Solaio latero-cemento	0,30	0,46	840	220	
6	Intercapedine	0,500				0,210
7	Cartongesso	0,037	0,210	1000	1300	

COP2	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/m³]	Resistenza termica [m²K/W]
1	Pavimentazione per esterni	0,02	1	800	2000	
2	Collante per piastrelle	0,002	1	1000	1800	
3	Impermeabilizzante	0,002	0,23	1000	1100	
4	Isolante in EPS con grafite	Varia a seconda della zona climatica	0,035	1400	25	
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	Intercapedine	0,500				0,210
9	Cartongesso	0,037	0,210	1000	1300	

SCT	Chiusura orizzontale di base: Solaio contro-terra con vespaio					
	Descrizione degli strati	Spessore (s) [m]	Conduttività termica (λ) [W/mK]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m³]	Resistenza termica [m²K/W]
1	Pavimento galleggiante	0,034	1,64	1000	1600	
2	Intercapedine	0,12				0,210
3	Massetto autolivellante	0,02	0,34	1000	270	
4	Isolante in EPS	Varia a seconda della zona climatica	0,037	1200	12	
5	Caldana in calcestruzzo	0,14	0,34	1000	270	
6	Vespaio	0,40				0,16
7	Magrone	0,15	0,34	1000	270	

Per quanto riguarda invece le aperture (Tabella 17), queste sono state definite in base ad alcune caratteristiche di infissi presenti sul mercato, selezionando tipologie in alluminio a doppio vetro e triplo vetro con trasmittanza che rispetta i valori limite del Decreto Requisiti Minimi nelle varie zone [15].

Tabella 17. Tabella riassuntiva delle caratteristiche degli infissi nella configurazione analizzata, per ciascuna zona climatica per l'edificio tipo ad uso ufficio - Configurazione 2

Zona climatica	Vetro	Spessore Strati [mm]	Gas intercapedine	Materiale telaio	Fattore solare	U_w [W/m²K]	$U_{W,lim\ 2021}$ [W/m²K]
A e B	Doppio vetro	6-16-4	Argon	Alluminio	0,22	1,8	3
C	Doppio vetro	6-16-4	Argon	Alluminio	0,22	1,8	2,2
D	Doppio vetro	6-16-4	Argon	Alluminio	0,28	1,2	1,8
E	Triplo vetro	6-16-6-16-4	Argon	Alluminio	0,28	0,74	1,4
F	Triplo vetro	6-16-6-16-4	Argon	Alluminio	0,28	0,74	1,1

5.1.3 Tecnologie impiantistiche e sistemi di produzione da fonti rinnovabili

In linea con le considerazioni illustrate nelle due annualità precedenti [1;2], anche per l'utenza di tipo non residenziale studiata nel presente report si è optato per impianti di climatizzazione, condizionamento e acqua calda sanitaria alimentati da energia elettrica.

Per soddisfare i carichi termici dell'utenza ufficio, sono state considerate due distinte soluzioni impiantistiche caratterizzate sia da un'elevata maturità tecnologica che da una consolidata sostenibilità economica; inoltre, dal momento che sono stati considerati i vincoli presenti nella normativa vigente sui ricambi d'aria per la specifica destinazione d'uso degli ambienti [45], entrambe le soluzioni proposte sono di tipo misto, ovvero sono costituite da un elemento per il controllo dei carichi termici e da una unità di trattamento aria (UTA). La prima soluzione, che da ora in poi sarà indicata con la sigla **PdC**, prevede l'utilizzo di due pompe di calore aria-acqua il cui fluido termovettore alimenta sia i fan coil negli ambienti che le batterie di scambio contenute nell'UTA; la seconda soluzione, invece, designata con la sigla **VRF**, prevede un'unità di trattamento aria in cui l'aria prelevata dall'esterno viene riscaldata o raffreddata attraverso delle batterie di scambio termico alimentate da un VRF. A questa si aggiungono cinque unità VRF, una per ogni piano, adibite ai servizi di climatizzazione estiva e invernale. In Figura 27 sono rappresentati gli schemi funzionali per entrambi i sistemi.

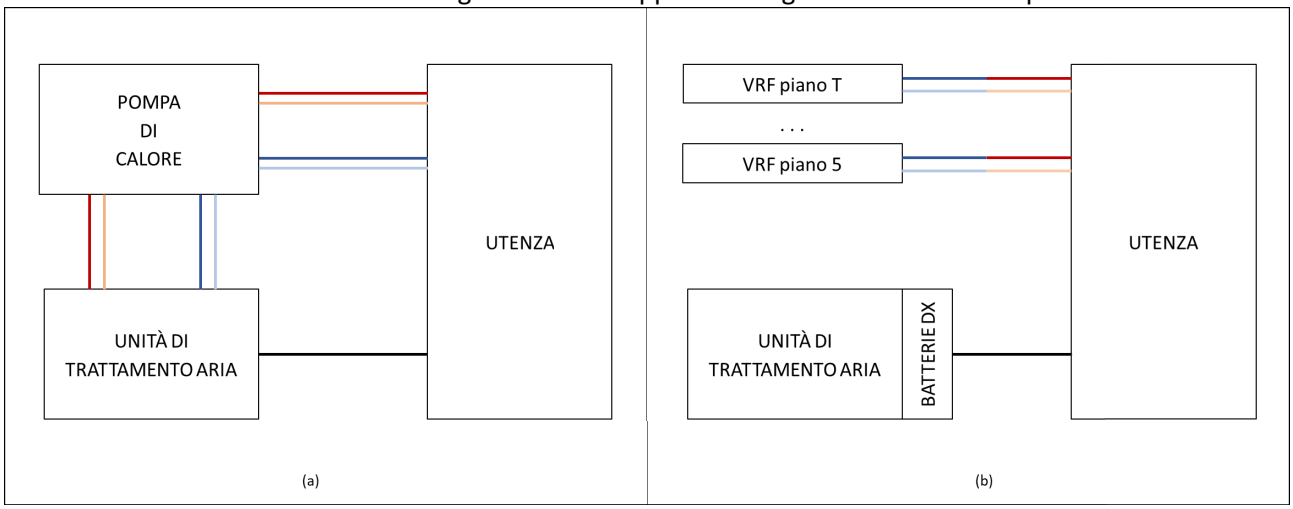


Figura 27. Schemi funzionali delle due configurazioni impiantistiche PdC (a) e VRF (b).

Come è stato anticipato, le due tecnologie per la climatizzazione degli ambienti hanno entrambe un technology readiness level (TRL) alto, e sono contraddistinte da affidabilità e prestazioni elevate. Inoltre, si è scelto di confrontare le performance energetiche di una tipologia di impianto largamente diffusa (pompa di calore reversibile) con un'altra la cui attenzione dal punto di vista scientifico è in continuo aumento (Variable

Refrigerant Flow). Recenti articoli su rivista internazionale attestano come le configurazioni impiantistiche energeticamente più efficienti per utenze non residenziali siano basate su impianti a flusso variabile di refrigerante [49;50].
La Tabella 18 riassume le due configurazioni impiantistiche adottate, mentre in Tabella 19 e Tabella 20 sono stati riportati i principali dati tecnici delle soluzioni PdC e VRF, rispettivamente.

Tabella 18. Schematizzazione delle due soluzioni impiantistiche per il modello di edificio uffici

PdC	VRF
Climatizzazione/Ventilazione meccanica controllata	
2 pompe di calore aria-acqua	5 unità VRF esterne
1 unità di trattamento aria con batteria di riscaldamento e raffrescamento ad acqua	1 unità di trattamento aria con batteria di riscaldamento e raffrescamento ad espansione diretta alimentata da unità VRF dedicata
Terminali a ventilconvettori	Terminali ad espansione diretta
Terminali a circolazione forzata d'aria	Terminali a circolazione forzata d'aria
Acqua calda sanitaria	
1 pompa di calore aria-acqua	1 pompa di calore aria-acqua
Fonti rinnovabili	
Pannelli fotovoltaici installati in copertura e integrati in superfici inclinate	Pannelli fotovoltaici installati in copertura e integrati in superfici inclinate

Tabella 19. Caratteristiche del sistema di tipo pompa di calore

Climatizzazione invernale ed estiva			
		PdC1	PdC2
Caratteristiche in riscaldamento			
Temperatura di set-point in inverno	°C	20	
Capacità nominale (aria esterna b.s. + 7 °C / b.u. + 6°C, acqua 45 - 40 °C)	kW	53,7	40,4
Potenza assorbita (aria esterna b.s. + 7 °C / b.u. + 6°C, acqua 45 - 40 °C)	kW	16,2	11,8
COP nominale (aria esterna b.s. + 7 °C / b.u. + 6°C, acqua 45 - 40 °C)	-	3,3	3,42
Mandata acqua ventilconvettori	°C	45	45
Caratteristiche in raffrescamento			
Temperatura di set-point in estate	°C	26	
Capacità nominale (aria esterna b.s. + 35 °C / b.u. +24 °C, acqua 7 - 12 °C)	kW	49,9	35,9
Potenza assorbita (aria esterna b.s. + 35 °C / b.u. +24 °C, acqua 7 - 12 °C)	kW	15,6	11,3
EER nominale (aria esterna b.s. + 35 °C / b.u. +24 °C, acqua 7 - 12 °C)	-	3,20	3,18
Mandata acqua ventilconvettori	°C	6	6
Ventilazione meccanica controllata			
Potenza massima ventilatori	kW	4	
Portata d'aria massima massima	m^3/s	30000	

Tabella 20. Caratteristiche del sistema di tipo VRF

Climatizzazione invernale ed estiva		
6 unità VRF		
Caratteristiche in riscaldamento (per ciascuna macchina)		
Temperatura di set-point in inverno	°C	20
Capacità nominale (aria esterna b.s. + 8 °C / b.u. + 6°C, aria interna b.s. 21 °C)	kW	23,74
Potenza assorbita (aria esterna b.s. + 8 °C / b.u. + 6°C, aria interna b.s. 21 °C)	kW	5,02
COP nominale (aria esterna b.s. + 8 °C / b.u. + 6°C, aria interna b.s. 21 °C)	-	4,73
Mandata acqua ventilconvettori	°C	45
Caratteristiche in raffrescamento (per ciascuna macchina)		
Temperatura di set-point in estate	°C	26
Capacità nominale (aria esterna b.s. + 35 °C, aria interna b.s. 27 °C / b.u. 19 °C)	kW	21,10
Potenza assorbita (aria esterna b.s. + 35 °C, aria interna b.s. 27 °C / b.u. 19 °C)	kW	4,37
EER nominale (aria esterna b.s. + 35 °C, aria interna b.s. 27 °C / b.u. 19 °C)	-	4,83
Mandata acqua ventilconvettori	°C	7
Ventilazione meccanica controllata		
Potenza massima	kW	4
Portata d'aria massima	m^3/h	30000

La temperatura di progetto per la stagione invernale è fissata, come da normativa, a 20 °C, mentre per la stagione estiva la temperatura interna agli ambienti deve essere pari a 26 °C. Queste temperature sono da intendersi come temperature operative, ovvero pari alla media aritmetica tra la temperatura media dell'aria e la temperatura media radiante. Inoltre, sono stati impostati anche altri due valori di temperatura cosiddetti di "set-back", che rappresentano la temperature da raggiungere nei periodi in cui le zone da climatizzare non sono occupate: l'introduzione del set-back è rilevante poiché permette di avviare gli impianti HVAC in anticipo rispetto all'inizio delle attività lavorative, facilitando il transitorio di avviamento degli impianti e, al tempo stesso, permettendo agli occupanti di trovare gli ambienti già nelle condizioni di progetto.
La ventilazione meccanica controllata, invece, è resa possibile dall'unità di trattamento aria (UTA), il cui schema di funzionamento è riportato in Figura 28: l'aria esterna attraversa le quattro sezioni in cui è stata schematizzata l'UTA, ovvero recupero termico, ricircolo, pretrattamento e movimentazione. Nella prima sezione, l'aria prelevata dall'ambiente scambia calore con l'aria estratta dai locali dell'edificio, avvicinando la propria temperatura a quella di progetto se le condizioni termodinamiche sono favorevoli. L'aria che verrà inviata nell'edificio sarà composta dall'aria esterna appena entrata nell'UTA miscelata alla cosiddetta aria di ricircolo, ovvero aria di ritorno dagli ambienti; tale miscela circola nella sezione di pretrattamento, in cui ne verranno verificate le condizioni termo-igrometriche, dopo di che verrà inviata nei locali da climatizzare ad opera dei ventilatori presenti nella sezione di movimentazione. L'aria di ritorno, invece, compie il percorso inverso, ovvero viene estratta dagli ambienti dell'edificio tramite una apposita macchina e viene direzionata prima verso il ricircolo e poi verso il recupero termico, per poi essere scaricata in ambiente.

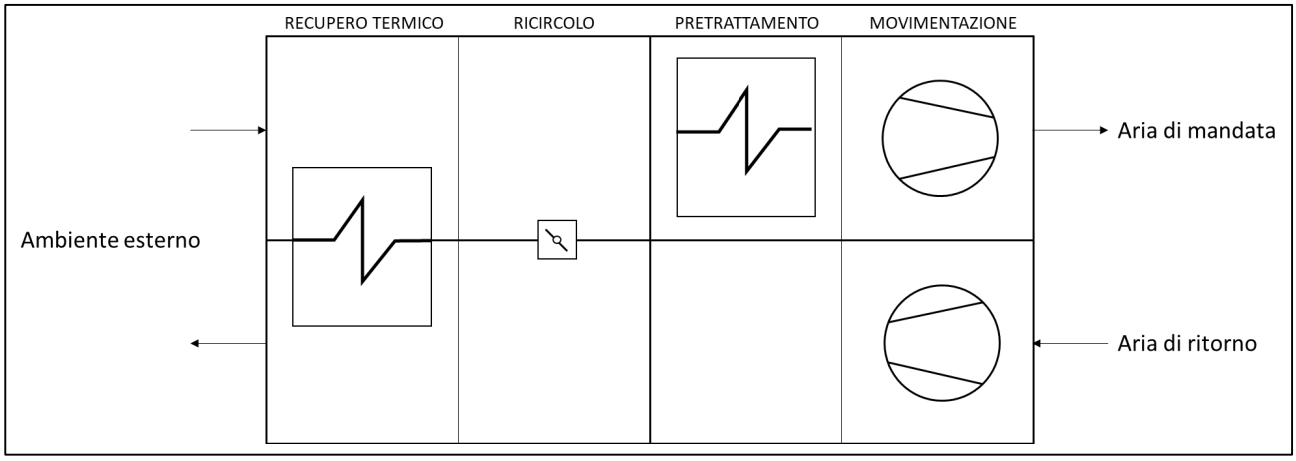


Figura 28. Schema funzionale dell'unità di trattamento aria

Per quanto riguarda il fabbisogno di acqua calda sanitaria, il prospetto 31 della UNI TS 11300-2:2019 [51] definisce il fabbisogno specifico giornaliero in litri/giorno per superficie netta climatizzata per attività di tipo uffici pari a 0,2; inoltre, studi scientifici [53,54] riportano la distribuzione oraria per l'utenza ufficio, la quale presenta tre picchi di consumo corrispondenti all'ora di ingresso, all'ora di pranzo e all'ora di uscita, mentre nelle ore rimanenti si può stimare al 50% del massimo.
Dal punto di vista impiantistico, considerando le ipotesi di sistema impiantistico all-electric, si è individuata una pompa di calore aria-acqua per la produzione di acqua calda sanitaria i cui dati tecnici sono stati riportati in Tabella 21.

Tabella 21. Dati tecnici della pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria

Pompa di calore aria-acqua per ACS		
Consumo di energia nel ciclo di riscaldamento A15/W10-55	kWh	5,65
Consumo di energia nel ciclo di riscaldamento A7/W10-55	kWh	5,77
COP ACS (A15/W10-55) EN 16147	-	3,39
COP ACS (A7/W10-55) EN 16147	-	3,33
Capienza serbatoio	l	295
Dispersione termica serbatoio	W/K	0,95

L'utilizzo di energia rinnovabile per l'edificio ad uso ufficio è stato oggetto di importanti valutazioni, rapportate al fine ultimo dell'attività che è quello di ottenere modelli di edifici *zero energy* con copertura totale del fabbisogno da fonti rinnovabili. Innanzitutto, dal momento che il fabbisogno di energia per la produzione di acqua calda sanitaria è nettamente inferiore rispetto al fabbisogno di energia elettrica per la climatizzazione e per i dispositivi elettrici, si è scelto di destinare tutte le superfici utili alla captazione di energia solare per generare energia elettrica tramite impianti fotovoltaici.
Nella configurazione 1 con involucro vetrato (Figura 29a), una superficie complessiva di pannelli fotovoltaici pari a 825,4 m^2 è stata ottenuta installando gli stessi sul tetto e, in particolare, sfruttando una pensilina costituita da una superficie orizzontale e una superficie inclinata di 30° rispetto al piano orizzontale; in questo modo si è riusciti sia ad aumentare significativamente la superficie captante sia a massimizzarne la resa. Nella configurazione 2 (Figura 29b), coerentemente con la scelta di utilizzare tecnologie tradizionali per l'involucro (tamponatura in laterizio con isolamento a cappotto), è stata sfruttata unicamente la superficie disponibile in copertura, seppur ridotta rispetto al caso precedente, collocando i pannelli direttamente sul tetto in orizzontale. La superficie diminuisce, quindi, dai 442.4 m^2 inclinati + 383 m^2 piani della configurazione 1 a 434 m^2 piani della configurazione 2. Tale riduzione si è dimostrata l'occasione per capire se si riesce a soddisfare il fabbisogno annuale della configurazione 2, anche avendo a disposizione una superficie inferiore, aspetto che sarà ampiamente trattato nel paragrafo 6.2. La Tabella 22 riporta le specifiche tecniche dei pannelli fotovoltaici adottati.

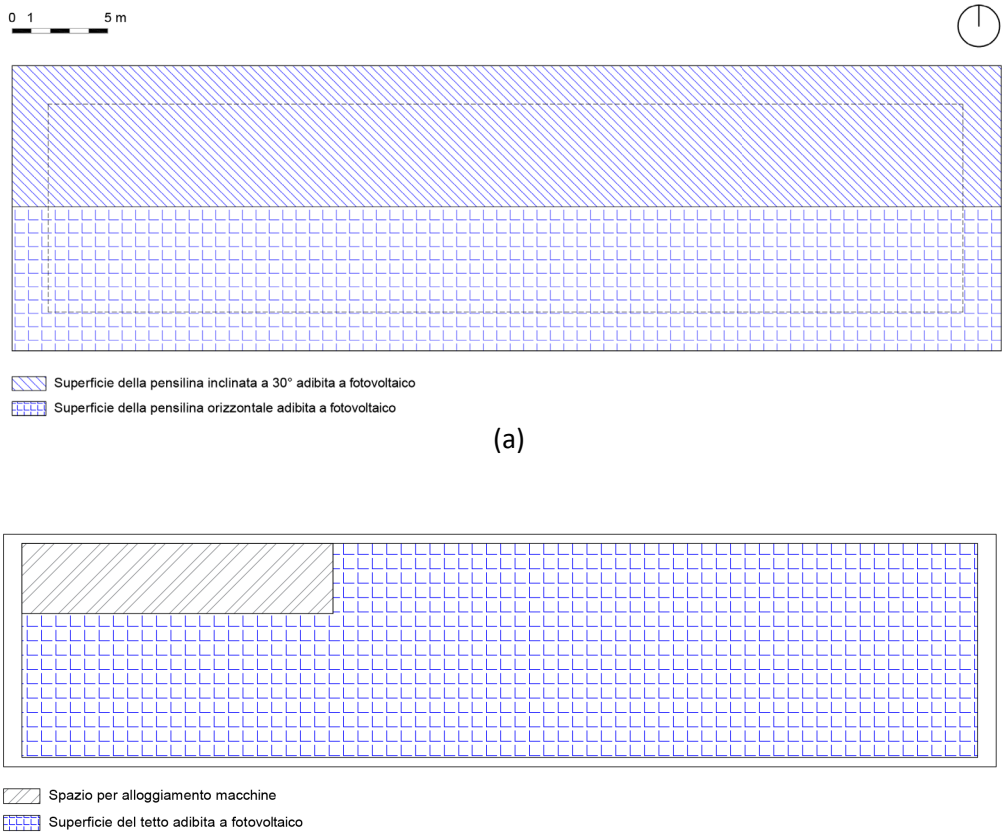


Figura 29. Rappresentazione in pianta delle superfici adibite a fotovoltaico: a) PV installa su pensilina mista con piano orizzontale e piano inclinato – Configurazione 1; b) PV installato su tetto piano - Configurazione 2.

Tabella 22. Caratteristiche dei pannelli fotovoltaici

Pannello fotovoltaico		
Tecnologia	Monocristallino	
Dimensioni	1,72 x 1,13	m
Superficie	1,95	m^2
Potenza nominale Condizioni di prova standard (irradianza 1000 W/m², AM 1.5, 25 °C)	415	W
Efficienza	21,3	%

Inoltre, a corredo del sistema di generazione di energia elettrica da fonte solare, è stato previsto l'utilizzo di batterie per lo stoccaggio di energia elettrica nel caso che la produzione e l'utilizzo avvengano in momenti diversi. La tecnologia scelta per le celle di accumulo è al litio-ferro-fosfato, per le migliori prestazioni e il minor impatto ambientale rispetto alle altre tecnologie commercialmente disponibili. In Tabella 23 sono riassunte le principali caratteristiche del sistema di batterie utilizzato.

Tabella 23. Caratteristiche dell'accumulo elettrico

Accumulo elettrico		
Tecnologia	Litio-ferro-fosfato	
Energia utilizzabile	44,2	kWh
Rendimento di roundtrip	≥ 96	%
Corrente massima	50	A
Tensione operativa	320 ~ 480	V
Temperatura operativa	-10 ~ +50	°C

Per quanto riguarda la movimentazione delle persone, sono presenti due ascensori all'interno dell'edificio. Dal punto di vista termico, l'apporto è stato trascurato in quanto l'unico carico termico è relativo al motore che è confinato in un apposito vano e dunque non ha un impatto significativo sul bilancio dell'edificio; il volume contenente la cabina è stato considerato non climatizzato. Il calcolo elettrico è stato fatto sulla base della norma UNI/TS 11300-6 [55], secondo le seguenti ipotesi:

- Categoria d'uso edificio: 5A
  - giorni di utilizzo ascensore: 260
  - corse medie giornaliere: 300
  - velocità: 1,6 m/s
  - corsa media: 44%
- Portata: 630 kg
- Corsa: 14 m
- Tipo di ascensore: impianti elettrici a fune con contrappeso
  - Motore gearless con inverter e velocità oltre 1 m/s
- Apparecchiature di comando e segnalazione: con microprocessore
  - Illuminazione: led con spegnimento nelle fasi di sosta

L'energia annuale risultante è pari a 910,9 kWh; all'ascensore così ipotizzato corrisponde un'energia di funzionamento specifica per ciclo di funzionamento medio pari a 0,63 mWh/kg*m, che corrisponde al livello prestazionale 1 secondo il prospetto 5 della UNI EN ISO 25745-2:2015 [56].

5.2 La costruzione dei modelli di edificio ad uso ufficio per le simulazioni in regime dinamico

Il modello di edificio ad uso ufficio è stato implementato utilizzando per le analisi di prestazione energetica il motore di calcolo *EnergyPlus* e differenziando i parametri termo-fisici selezionati per ciascun componente a seconda delle zone climatiche italiane. La finalità, coerente con l'obiettivo stesso della ricerca, è stato quello di ottenere risultati quanto più attendibili per valutare se i casi studio analizzati rientrano nella definizione di edifici ZEB.

5.2.1 Geometria e involucro opaco e trasparente

La definizione della geometria ha consentito di ricostruire i modelli tridimensionali delle due configurazioni Figura 30 e Figura 31), tenendo conto delle superfici e volumetrie individuate in fase di progettazione.
Ogni piano è stato modellato considerando le differenti destinazioni d'uso degli ambienti (Figura 32) e le loro esposizioni verso l'esterno o ambienti non riscaldati (quali vani tecnici e vani scala). Negli edifici ad uso ufficio è, infatti, indispensabile tener conto delle differenze di modi di utilizzo delle singole zone che risentiranno della variazione delle esposizioni e dell'orientamento, ma anche dei profili di occupazione, climatizzazione, ventilazione meccanizzata e così via, rivelandosi determinanti nella valutazione della prestazione energetica.

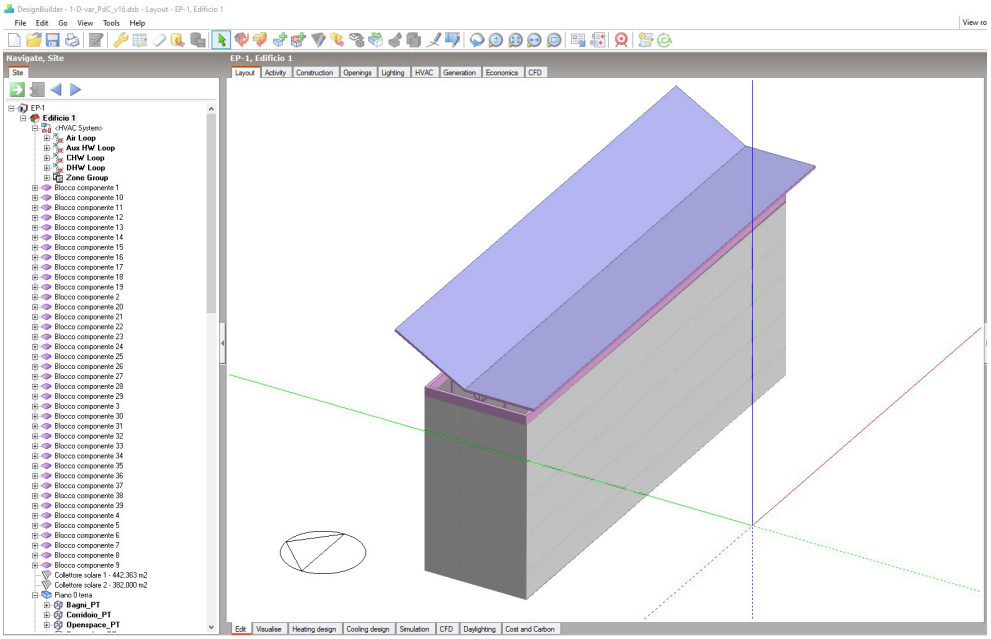


Figura 30. Modello dell'edificio ad uso ufficio – Configurazione 1 (vetrata)

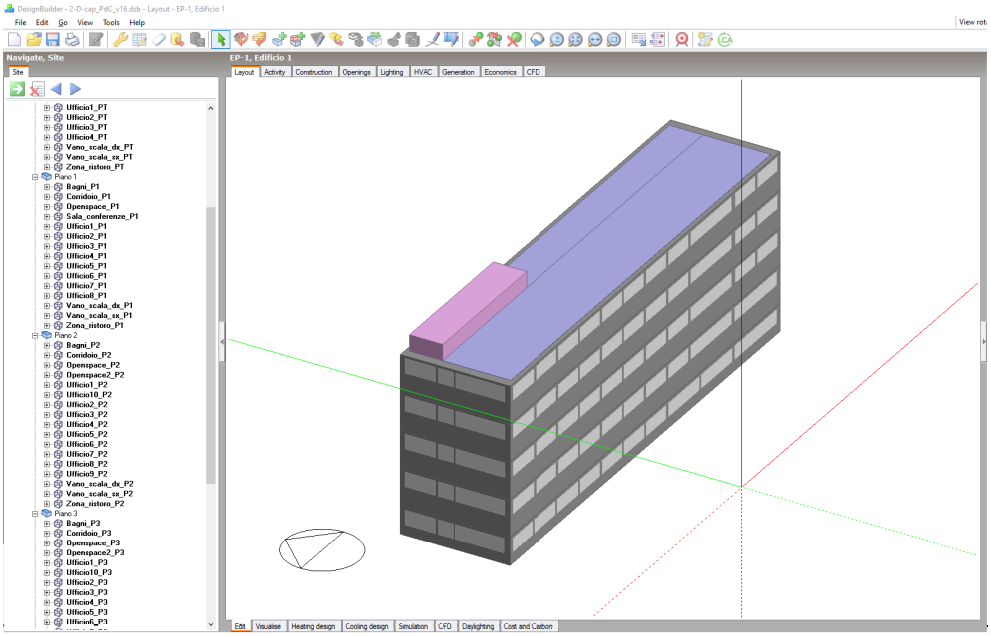


Figura 31. Modello edificio ad uso ufficio – Configurazione 2 (opaca)

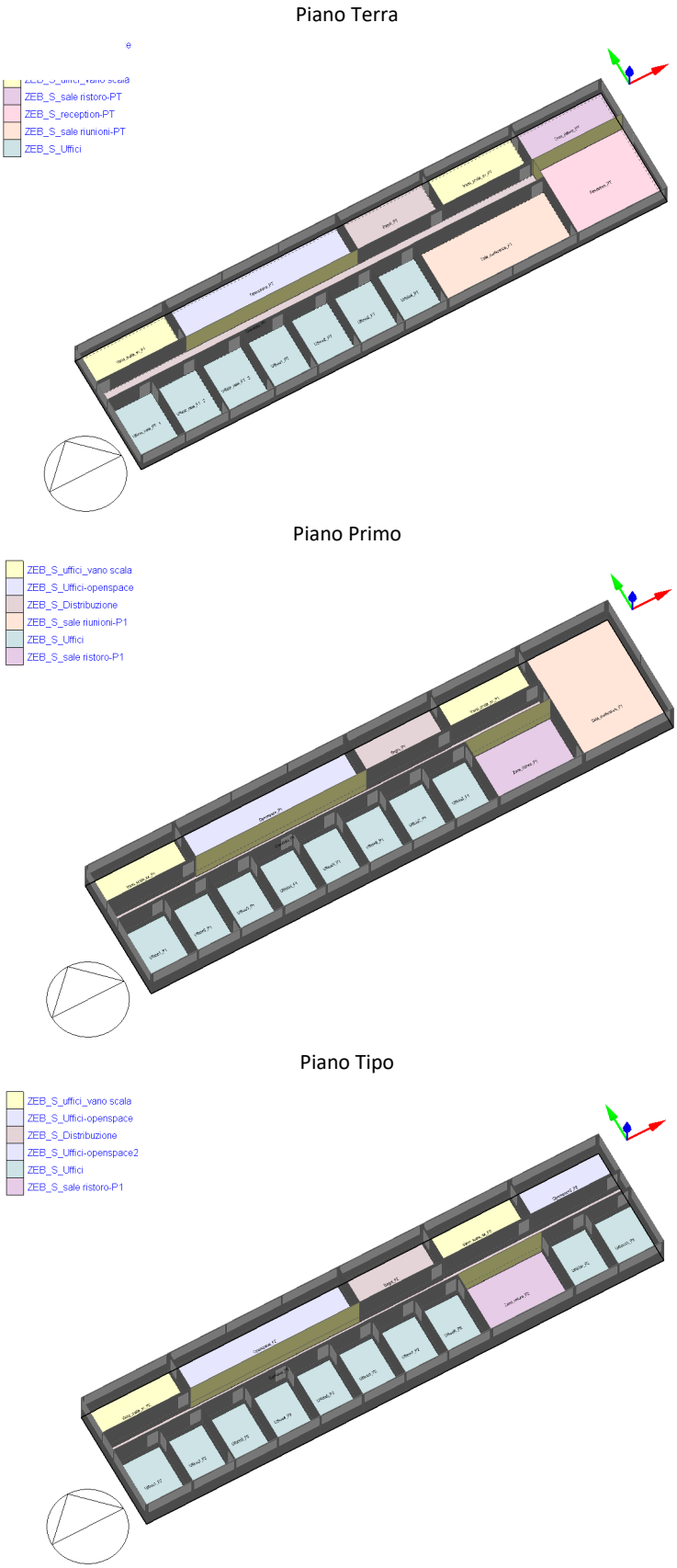


Figura 32. Layout piano terra, piano primo e piano tipo dell'edificio ad uso ufficio implementato nel modello

Per ciascun modello, sono stati implementati nel dettaglio tutti i componenti di involucro definiti nel Par. 5.1.2 attraverso i cosiddetti *template di costruzione* (Tabella 24 e Tabella 25) che hanno permesso di inserire le caratteristiche termo-fisiche di tutti i materiali utilizzati nelle diverse stratigrafie come descritte in Tabella 12, Par. 5.1.2.

Tabella 24. Esempio di definizione delle caratteristiche termo-fisiche dei materiali (nel caso specifico dettaglio del materiale polyiso – configurazione 1)

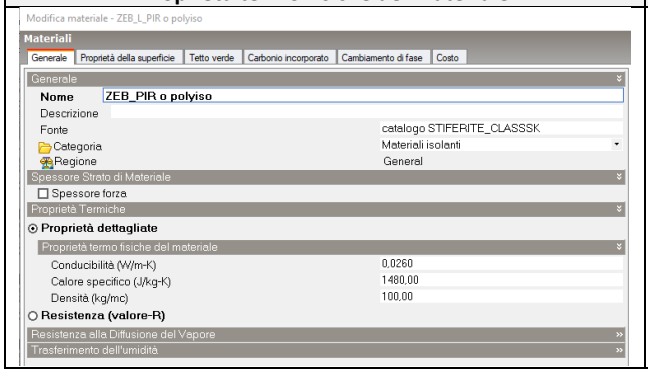
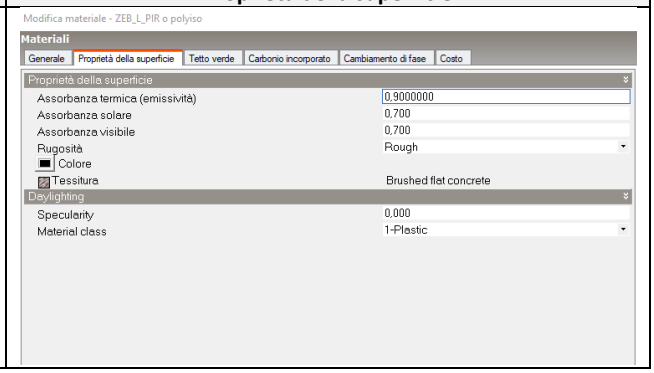
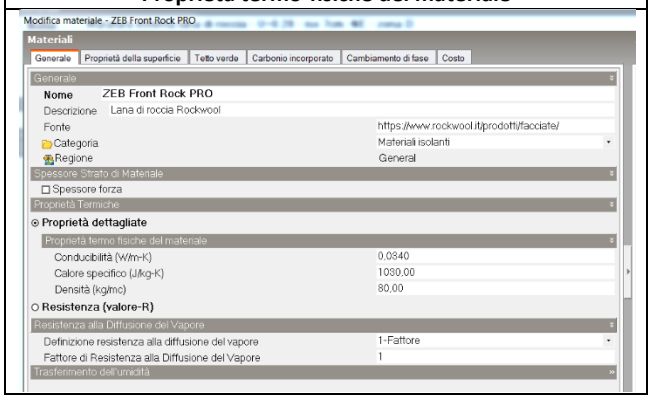
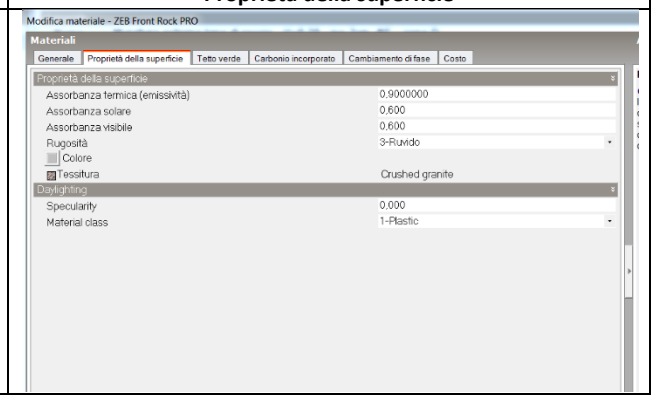
Proprietà termo-fisiche del materiale	Proprietà della superficie
	

Tabella 25. Esempio di definizione delle caratteristiche termo-fisiche dei materiali (nel caso specifico dettaglio del materiale isolante in lana di roccia – configurazione 2)

Proprietà termo-fisiche del materiale	Proprietà della superficie
	

In tal modo sono stati definiti pareti verticali, coperture, pavimenti, solai di interpiano e contro-terra per ciascun modello e per ogni zona climatica, nel rispetto delle trasmittanze minime di legge, verificando che non sia presente alcun fenomeno di condensa interstiziale Tabella 26 e Tabella 27).

Tabella 26. Esempio di definizione di un elemento di involucro (nel caso specifico dettaglio della facciata continua con isolante PIR – configurazione 1)

Stratigrafia

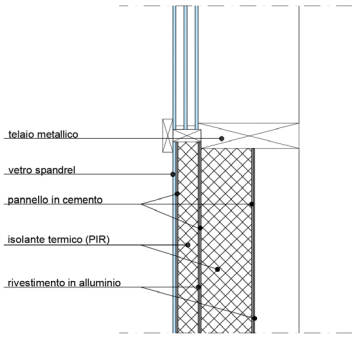
Modifica costruzione - ZEB_L_Spandrel +RIEMP+PIR(4+10) U=0,18

Costruzioni

Strati | Proprietà della superficie | Immagine | Calcolato | Costo | Sorgente interna | Analisi di condensazione

Generale	
Nome	**ZEB_L_Spandrel +RIEMP+PIR(4+10) U=0,18**
Fonte	MAPES-R+ INFILL PANELS
Categoria	Pareti
Regione	ITALY
Colore	
Definizione	
Metodo di definizione	1-Layers
Impostazioni di calcolo	
Strati	
Numero di strati	8
Strato più esterno	
Materiale	ZEB_Lastra di vetro esterna
Spessore (m) (m)	0,0060
Strato termicamente eterogeneo? (UNI 6946)	
Strato 2	
Materiale	ZEB_L_pannello_cemento
Spessore (m) (m)	0,0040
Strato termicamente eterogeneo? (UNI 6946)	
Strato 3	
Materiale	ZEB_L_PIR o polyiso
Spessore (m) (m)	0,0400
Strato termicamente eterogeneo? (UNI 6946)	
Strato 4	
Materiale	Lastra in Alluminio
Spessore (m) (m)	0,0020
Strato termicamente eterogeneo? (UNI 6946)	
Strato 5	
Materiale	ZEB_L_pannello_cemento
Spessore (m) (m)	0,0040
Strato termicamente eterogeneo? (UNI 6946)	
Strato 6	
Materiale	ZEB_L_PIR o polyiso
Spessore (m) (m)	0,1000
Strato termicamente eterogeneo? (UNI 6946)	
Strato 7	
Materiale	ZEB_L_pannello_cemento
Spessore (m) (m)	0,0040
Strato termicamente eterogeneo? (UNI 6946)	
Strato più interno	
Materiale	Lastra in Alluminio
Spessore (m) (m)	0,0020
Strato termicamente eterogeneo? (UNI 6946)	

Immagine



Calcoli

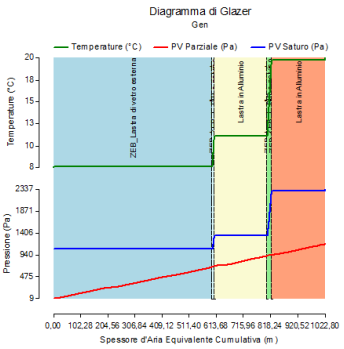
Modifica costruzione - ZEB_L_Spandrel +RIEMP+PIR(4+10) U=0,18

Costruzioni

Strati | Proprietà della superficie | Immagine | Calcolato | Costo | Sorgente interna | Analisi di condensazione

Superficie più interna	
Coefficiente convettivo di scambio di calore (W/mq-K)	5,846
Coefficiente radiativo di scambio di calore (W/mq-K)	1,847
Resistenza di superficie (mq-K/W)	0,130
Superficie più esterna	
Coefficiente convettivo di scambio di calore (W/mq-K)	22,720
Coefficiente radiativo di scambio di calore (W/mq-K)	2,280
Resistenza di superficie (mq-K/W)	0,040
Nessuno strato termicamente eterogeneo	
Valore-U da superficie a superficie (W/mq-K)	0,185
Valore-R (mq-K/W)	5,569
Valore-U (W/mq-K)	**0,180**
Con strato termicamente eterogeneo (BS EN ISO 6946)	
Spessore muro (m)	0,1620
Cm - Capacità Termica interna (KJ/mq-K)	25,0800
Limite di resistenza superiore (mq-K/W)	5,569
Limite di resistenza inferiore (mq-K/W)	5,569
Valore-U da superficie a superficie (W/mq-K)	0,185
Valore-R (mq-K/W)	5,569
Valore-U (W/mq-K)	**0,180**

Diagramma di Glaser



Analisi di condensa mese più critico

Condensazione interstiziale	Assente
N. interfacce di condensazione	0
Condensazione superficiale	Qualità termica Buona. Improbabile formazione muffe

Tabella 27. 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)

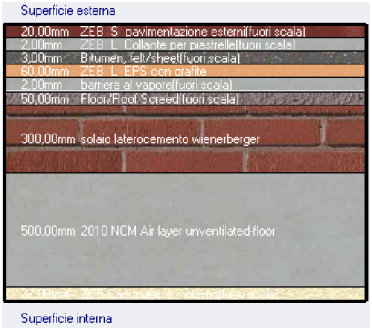
Stratigrafia

Costruzioni

Strati | Proprietà della superficie | Immagine | Calcolato | Costo | Sorgente interna | Analisi di condensazione

Generale	
Nome	ZEB_L_Tetto Piano EPS+grafite 6cm U=0,239 zona D
Fonte	
Categoria	Tetti
Regione	ITALY
Colore	
Definizione	
Metodo di definizione	1-Layers
Impostazioni di calcolo	
Strati	
Numero di strati	9
Strato più esterno	
Materiale	ZEB_S_pavimentazione esterni
Spessore (m) (m)	0,0200
Strato termicamente eterogeneo? (UNI 6946)	
Strato 2	
Materiale	ZEB_L_Collante per piastrelle
Spessore (m) (m)	0,0020
Strato termicamente eterogeneo? (UNI 6946)	
Strato 3	
Materiale	Bitumen, felt/sheet
Spessore (m) (m)	0,0030
Strato termicamente eterogeneo? (UNI 6946)	
Strato 4	
Materiale	ZEB_L_EPS con grafite
Spessore (m) (m)	0,0600
Strato termicamente eterogeneo? (UNI 6946)	
Strato 5	
Materiale	barriera al vapore
Spessore (m) (m)	0,0020
Strato termicamente eterogeneo? (UNI 6946)	
Strato 6	
Materiale	Floor/Roof Screed
Spessore (m) (m)	0,0500
Strato termicamente eterogeneo? (UNI 6946)	
Strato 7	
Materiale	solaio laterocemento wienerberger
Spessore (non usato nei calcoli termici) (m)	0,3000
Strato 8	
Materiale	2010 NCM Air layer unventilated-floor
Spessore (non usato nei calcoli termici) (m)	0,5000
Strato più interno	
Materiale	ZEB-Cartongesso - interno
Spessore (m) (m)	0,0370
Strato termicamente eterogeneo? (UNI 6946)	

Immagine



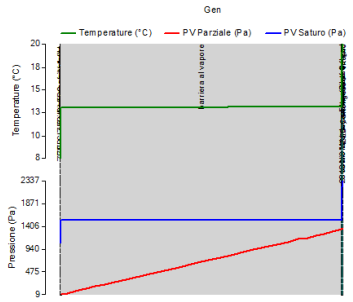
Calcoli

Costruzioni

Strati | Proprietà della superficie | Immagine | Calcolato | Costo | Sorgente interna | Analisi di condensazione

Superficie più interna	
Coefficiente convettivo di scambio di calore (W/mq-K)	4,460
Coefficiente radiativo di scambio di calore (W/mq-K)	5,540
Resistenza di superficie (mq-K/W)	0,100
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)	0,260
Valore-R (mq-K/W)	3,993
Valore-U (W/mq-K)	**0,250**
Con strato termicamente eterogeneo (BS EN ISO 6946)	
Spessore muro (m)	0,9740
Cm - Capacità Termica interna (KJ/mq-K)	48,1000
Limite di resistenza superiore (mq-K/W)	3,993
Limite di resistenza inferiore (mq-K/W)	3,993
Valore-U da superficie a superficie (W/mq-K)	0,260
Valore-R (mq-K/W)	3,993
Valore-U (W/mq-K)	**0,250**

Diagramma di Glaser



Analisi di condensa mese più critico

Condensazione interstiziale	Assente
N. interfacce di condensazione	0
Condensazione superficiale	Qualità termica Buona. Improbabile formazione muffe

Per quanto riguarda i ponti termici, le trasmittanze lineiche sono state calcolate e assunte differenti per ciascuna delle discontinuità materiche e geometriche, in particolare nei nodi strutturali tra i vari componenti di involucro.
Come ribadito in Tabella 28, gli spessori degli isolanti delle chiusure verticali e delle chiusure orizzontali di copertura e di base 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 28. 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[4]	Spessore isolamento	Ambiente confinante	**U**	**Yie**	**ϕ**	**f**	**m**	**Ki**	U_{limite}
		[m]			[W/m²K]	[W/m²K]	[h]	[-]	[kg/m²]	[kJ/m²K]	[W/m²K]
Chiusure verticali esterne – Configurazione 1											
$PVE1_{var}$	A-B	0,37	0,07	Esterno	0,415	0,363	3,01	0,874	68	34	0,43
$PVE1_{var}$	C	0,14	0,09	Esterno	0,334	0,286	3,44	0,858	70	34,8	0,34
$PVE1_{var}$	D	0,16	0,11	Esterno	0,279	0,233	3,94	0,837	71	35,4	0,29
$PVE1_{var}$	E	0,17	0,12	Esterno	0,258	0,212	4,21	0,824	72	35,7	0,26
$PVE1_{var}$	F	0,18	0,13	Esterno	0,240	0,194	4,50	0,809	73	35,9	0,24
$PVE1_{PIR}$	Tutte	0,16	0,14	Esterno	0,18	0,087	7,34	0,484	60	17	/
Chiusure verticali esterne – Configurazione 2[5]											
PVE2	A-B	0,37	0,03	Esterno	0,421	0,045	14,13	0,11	332	50,3	0,43
PVE2	C	0,39	0,05	Esterno	0,339	0,03	14,57	0,09	334	50,1	0,34
PVE2	D	0,41	0,07	Esterno	0,284	0,022	14,98	0,08	335	50,1	0,29
PVE2	E	0,43	0,09	Esterno	0,244	0,017	15,42	0,07	337	50	0,26
PVE2	F	0,44	0,10	Esterno	0,229	0,016	15,66	0,07	338	50	0,24
Chiusura orizzontale intermedia tra appartamenti											
SI	Tutte	1,03	0,02	Ambiente climatizzato	0,117	10,11	0,346	174	40,6	0,117	0,8
Chiusura orizzontale superiore											
COP	A-B	0,93	0,02	Esterno	0,350	0,052	12,57	0,161	221	39,5	0,35
COP	C	0,94	0,03	Esterno	0,319	0,040	12,80	0,136	222	39,4	0,33
COP	D	0,97	0,06	Esterno	0,250	0,024	13,23	0,101	222	39,2	0,26
COP	E	0,99	0,08	Esterno	0,219	0,019	13,47	0,090	223	39,1	0,22
COP	F	1,01	0,10	Esterno	0,195	0,015	13,71	0,083	223	39,1	0,20
Chiusura orizzontale inferiore											
SCT	A-B	0,84	0,03	Terreno	0,430	0,201	7,51	0,459	138	30,9	0,44
SCT	C	0,91	0,05	Terreno	0,349	0,147	7,82	0,415	139	30,5	0,38
SCT	D	0,94	0,08	Terreno	0,272	0,104	8,12	0,379	139	30,0	0,29
SCT	E	0,95	0,09	Terreno	0,253	0,095	8,20	0,371	139	30,0	0,26
SCT	F	0,96	0,10	Terreno	0,237	0,087	8,28	0,364	139	29,9	0,24

[4] In caso di chiusure orizzontali, lo spessore totale è comprensivo dei controsoffitti destinati all'alloggiamento degli impianti.
[5] Nel caso della Parete verticale PVE3 il blocco di calcestruzzo cellulare aerato hai già buone caratteristiche di isolamento e non necessita di isolante aggiuntivo. Si indica pertanto lo spessore del blocco stesso come indicazione di variazione.

Per quanto riguarda i componenti finestrati, essi rivestono un ruolo importante nella definizione dell'involucro del caso studio selezionato (configurazione 1), in quanto è stata scelta la tipologia della facciata continua con vetrate a nastro. Le caratteristiche sono state definite coerentemente con la Tabella 13 e la Tabella 17, rispettivamente per la configurazione 1 e la configurazione 2, utilizzando vetri selettivi doppi o tripli a seconda delle zone climatiche.
Particolare attenzione è stata attribuita alla definizione di sistemi di schermature solari, previste in facciata con sistemi integrati a lamelle, indispensabili per il controllo della radiazione solare soprattutto durante il periodo estivo, nel quale il rischio di surriscaldamento è estremamente elevato, in particolare per le facciate continue vetrate. Per tale motivo il funzionamento di tali schermature dinamiche, coadiuvato dalle caratteristiche di selettività del vetro, è stato impostato subordinandolo all'andamento della radiazione solare e, quindi, calibrandolo in base alle ore di maggiore esposizione.
Si è deciso, pertanto, di considerare un controllo automatizzato delle schermature, in modo da gestire il sistema indipendentemente dai fruitori dell'edificio, ottimizzandone il funzionamento a seconda della radiazione solare incidente. La tipologia di controllo adottata ha permesso di differenziare l'uso delle schermature a seconda dell'orientamento delle facciate, enfatizzandone l'utilizzo sulle esposizioni Est, Ovest e Sud. A seconda della radiazione solare che colpisce l'edificio, le schermature si disattivano se la radiazione solare diretta e diffusa che colpiscono le vetrate superano il setpoint solare, fissato a 120 W/m^2.

5.2.2 Profili di occupazione

Nella definizione dei dati di occupazione e nei profili di utilizzo, per l'edificio ad uso ufficio si è ritenuto doveroso considerare le differenti destinazioni d'uso che coesistono al suo interno coniugando le esigenze degli occupanti al tempo effettivo di fruizione degli spazi. Per ogni zona, quindi, sono stati settati tutti i dati di occupazione con i relativi profili e i parametri di controllo ambientale richiesti (Figura 33), al fine implementare il *Template Attività* per ciascuno degli ambienti (che differiscono per densità di persone a m^2 e tempi di utilizzo).

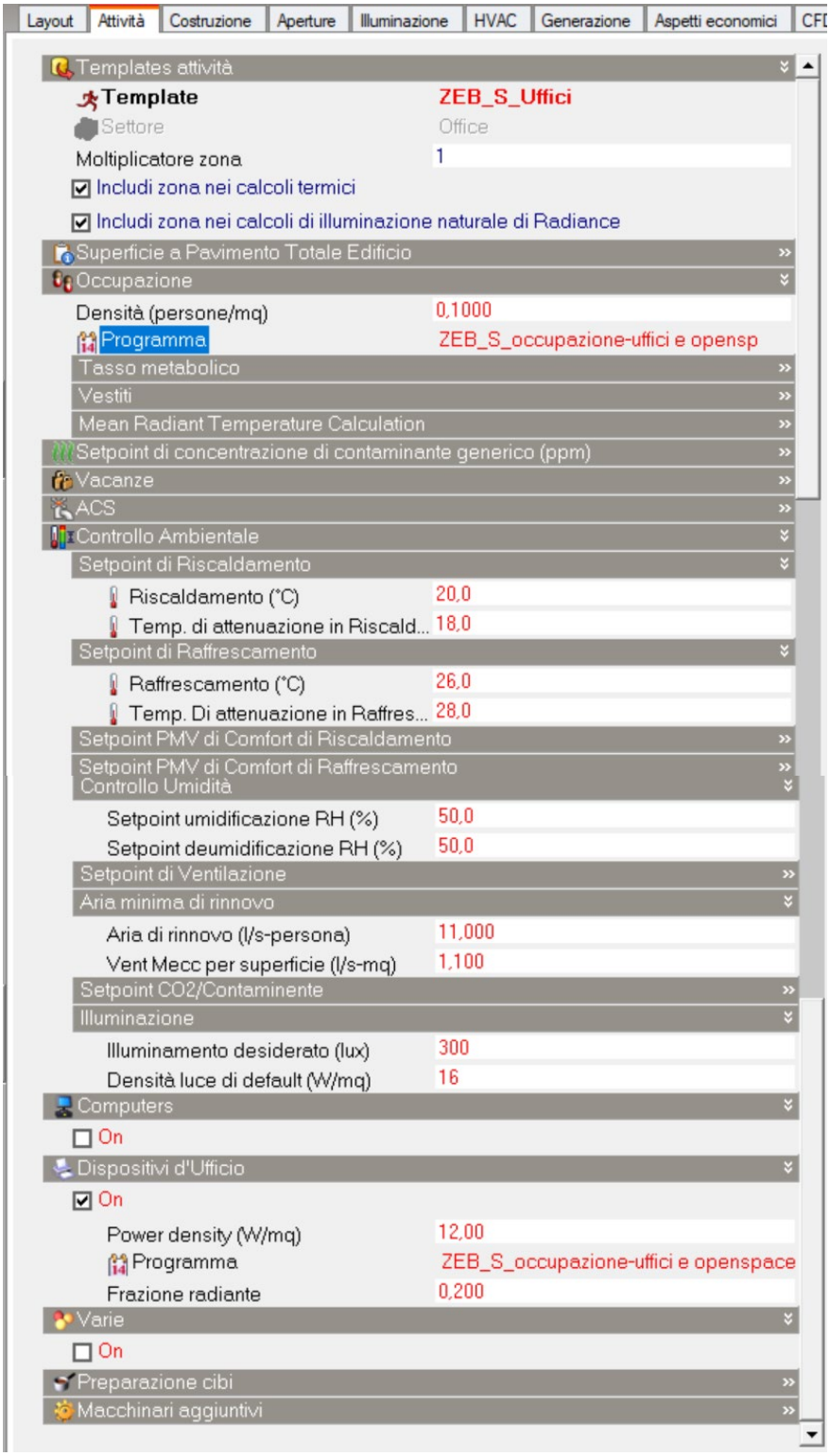


Figura 33. Esempio di template delle attività definito per gli uffici occupati da due persone

Come già citato in precedenza, per valutare la capienza massima di occupanti di ciascuna zona si è deciso di considerare come riferimento la norma UNI 10339 [45] che fornisce gli indici di affollamento convenzionale per i locali in cui è previsto stazionamento di persone (Tabella 9 – Par.5.1.1). A ciascun ambiente è stato inoltre attribuito un profilo di occupazione ispirato al comportamento quanto più verosimile dei fruitori dell'edificio. I profili di occupazione, infatti, influenzano notevolmente i risultati in termini di prestazione energetica ed è pertanto strettamente necessario valutarli a seconda delle diverse tipologie analizzate.

Aspetto da non sottovalutare, inoltre, è dato dalla necessità di tener conto dell'assenza giornaliera dall'attività lavorativa di una certa percentuale di dipendenti per motivi di ferie o malattia e la flessibilità di arrivo e partenza dall'ufficio. Inoltre, non bisogna trascurare eventuali riunioni e le pause pranzo durante la giornata lavorativa [57].
In dettaglio, si è previsto che gli uffici per 2 dipendenti (il cui indice di affollamento è stato settato pari a 0,10 pers/m^2, valore intermedio tra quelli riportati nella UNI 10339 [45]) siano occupati dalle ore 8:00 alle ore 17:00 al pieno della loro capienza (97% con una probabilità di assenza del 3% [57]) senza considerare flessibilità di orari, ma prendendo in considerazione le 8 ore di una giornata lavorativa standard. Inoltre, durante l'ora di pranzo (dalle 12:00 alle 13:00) si è prevista una percentuale del 50% nei singoli uffici, ipotizzando che i lavoratori si allontanino dalle postazioni in maniera alternata. Durante il mese di agosto si è prevista un'affluenza ridotta a causa delle ferie estive (50%), così come è stata settata un'occupazione pari a zero per i giorni festivi durante l'anno, definiti coerentemente con il calendario delle festività italiane.
Per quanto riguarda gli open space ad uso ufficio il profilo impostato risulta analogo con indice di affollamento pari a 0,12 pers/m^2 e 6 persone per zona.
Per le sale d'attesa e aree ristoro per ciascun piano la capienza massima varia da 17 persone al piano terra a 25 persone negli altri piani con un indice di affollamento pari a 0,6 pers/m^2. Le ore di massimo utilizzo e occupazione sono state previste nella fascia oraria del pranzo dalle ore 12:00 alle ore 13:00 (frazione di occupazione pari al 50% [57])
Per le sale riunioni/conferenze presenti, con capienza massima di 43 persone a piano terra e 52 al primo piano, si è previsto l'utilizzo sporadico del 25% del tempo per ogni giorno [57], circa due ore (dalle 9:00 alle 11:00), equivalente a poco più di un meeting a settimana (5 volte al mese) con una percentuale di occupazione media del 50%.
Il tasso metabolico medio per un lavoro sedentario è stato fissato a 1,2 met [58; 59].
Nella tabella di seguito (Tabella 29, Figura 34), si riportano nei dettagli i profili di occupazione a seconda delle diverse destinazioni d'uso dei singoli ambienti, mentre in Figura 35 si illustrano a titolo di esempio i parametri più rilevanti settati per una delle tipologie di ambiente definita (densità, numero di occupanti, tasso metabolico dipendente dal tipo di attività svolta e così via).

Tabella 29. Script dei profili di Occupazione impostati per le principali zone individuate

Uffici doppi e openspace	Sale d'attesa - ristoro	Reception	Sale Riunioni
Schedule:Compact, Office_Occ, Fraction, Through: 31 July, For: Weekdays SummerDesignDay, Until: 8:00, 0, Until: 12:00, 0.97, Until: 13:00, 0.5, Until: 17:00, 0.97, Until: 24:00, 0, For: Weekends Holidays WinterDesignDay, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 8:00, 0, Until: 12:00, 0.97, Until: 13:00, 0.5, Until: 17:00, 0.97, Until: 24:00, 0, Through: 31 Aug, For: Weekdays SummerDesignDay, Until: 8:00, 0, Until: 12:00, 0.5, Until: 13:00, 0.3, Until: 17:00, 0.5, Until: 24:00, 0, For: Weekends Holidays WinterDesignDay, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 8:00, 0, Until: 12:00, 0.97, Until: 13:00, 0.5, Until: 17:00, 0.97, Until: 24:00, 0, Through: 31 Dec, For: Weekdays, Until: 8:00, 0, Until: 12:00, 0.97, Until: 13:00, 0.5, Until: 17:00, 0.97, Until: 24:00, 0, For: Weekends Holidays WinterDesignDay, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 8:00, 0, Until: 12:00, 0.97, Until: 13:00, 0.5, Until: 17:00, 0.97, Until: 24:00, 0;	Schedule:Compact, Office Rest_Occ, Fraction, Through: 31 July, For: Weekdays SummerDesignDay, Until: 8:00, 0, Until: 12:00, 0.1, Until: 13:00, 0.5, Until: 17:00, 0.1, Until: 24:00, 0, For: Weekends Holidays WinterDesignDay, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 8:00, 0, Until: 12:00, 0.1, Until: 13:00, 0.5, Until: 17:00, 0.1, Until: 24:00, 0, Through: 31 Aug, For: Weekdays SummerDesignDay, Until: 8:00, 0, Until: 12:00, 0.1, Until: 13:00, 0.25, Until: 17:00, 0.1, Until: 24:00, 0, For: Weekends Holidays WinterDesignDay, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 8:00, 0, Until: 12:00, 0.1, Until: 13:00, 0.25, Until: 17:00, 0.1, Until: 24:00, 0, Through: 31 Dec, For: Weekdays SummerDesignDay, Until: 8:00, 0, Until: 12:00, 0.1, Until: 13:00, 0.5, Until: 17:00, 0.1, Until: 24:00, 0, For: Weekends Holidays WinterDesignDay, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 8:00, 0, Until: 12:00, 0.1, Until: 13:00, 0.5, Until: 17:00, 0.1, Until: 24:00, 0;	Schedule:Compact, Office Rec_Occ, Fraction, Through: 31 July, For: Weekdays SummerDesignDay, Until: 8:00, 0, Until: 9:00, 1, Until: 12:00, 0.5, Until: 13:00, 0.25, Until: 17:00, 0.5, Until: 24:00, 0, For: Weekends Holidays WinterDesignDay, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 8:00, 0, Until: 9:00, 1, Until: 12:00, 0.5, Until: 13:00, 0.25, Until: 17:00, 0.5, Until: 24:00, 0, Through: 31 Aug, For: Weekdays SummerDesignDay, Until: 8:00, 0, Until: 9:00, 0.5, Until: 17:00, 0.25, Until: 24:00, 0, For: Weekends Holidays WinterDesignDay, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 8:00, 0, Until: 9:00, 0.5, Until: 17:00, 0.25, Until: 24:00, 0, Through: 31 Dec, For: Weekdays SummerDesignDay, Until: 8:00, 0, Until: 9:00, 1, Until: 12:00, 0.5, Until: 13:00, 0.25, Until: 17:00, 0.5, Until: 24:00, 0, For: Weekends Holidays WinterDesignDay, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 8:00, 0, Until: 9:00, 1, Until: 12:00, 0.5, Until: 13:00, 0.25, Until: 17:00, 0.5, Until: 24:00, 0;	Schedule:Compact, Office Meet_Occ, Fraction, Through: 31 July, For: Weekdays SummerDesignDay, Until: 9:00, 0, Until: 11:00, 0.5, Until: 24:00, 0, For: Weekends Holidays WinterDesignDay, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 9:00, 0, Until: 11:00, 0.5, Until: 24:00, 0, Through: 31 Aug, For: Weekdays SummerDesignDay, Until: 9:00, 0, Until: 11:00, 0.25, Until: 24:00, 0, For: Weekends Holidays WinterDesignDay, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 9:00, 0, Until: 11:00, 0.25, Until: 24:00, 0, Through: 31 Dec, For: Weekdays SummerDesignDay, Until: 9:00, 0, Until: 11:00, 0.5, Until: 24:00, 0, For: Weekends Holidays WinterDesignDay, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 9:00, 0, Until: 11:00, 0.5, Until: 24:00, 0;

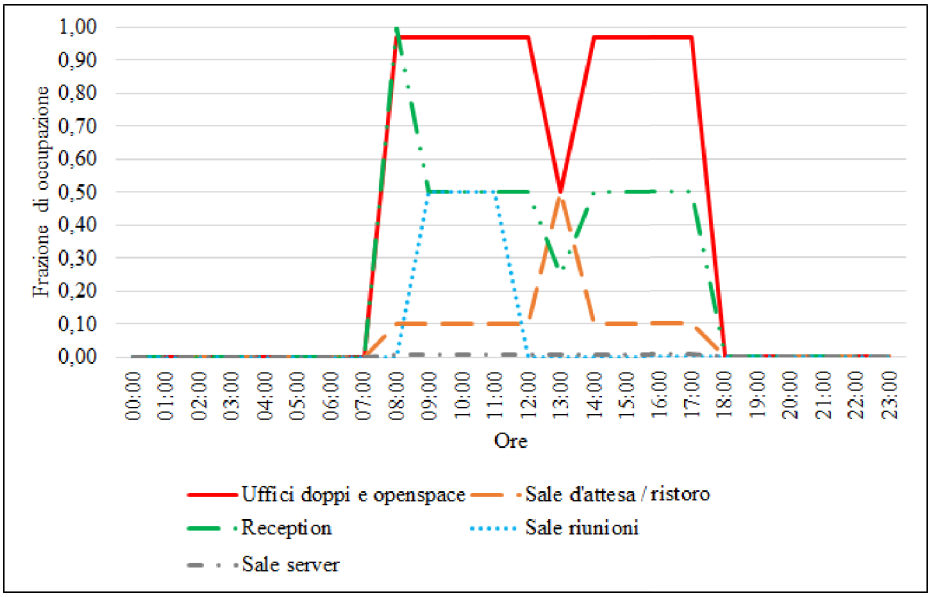
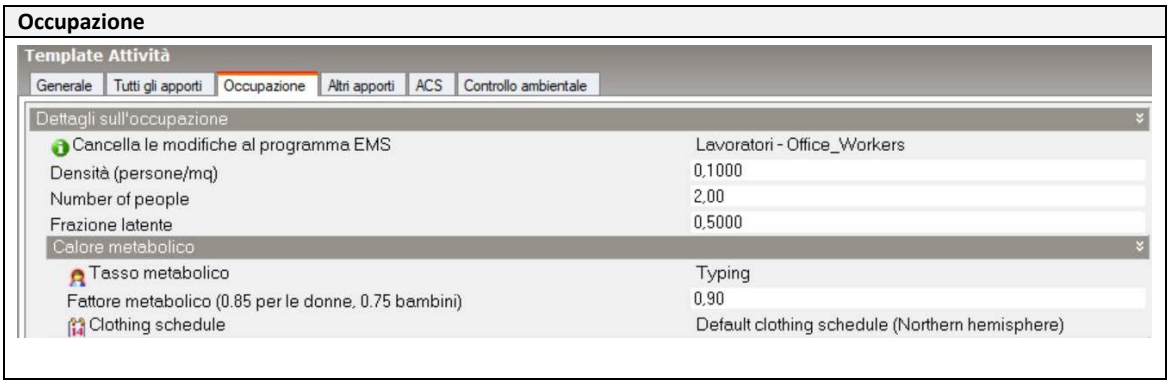


Figura 34. Grafico dei profili di occupazione per le principali zone individuate.



Occupazione

Template Attività

Generale | Tutti gli apporti | Occupazione | Altri apporti | ACS | Controllo ambientale

Dettagli sull'occupazione

Cancella le modifiche al programma EMS	Lavoratori - Office_Workers
Densità (persone/mq)	0,1000
Number of people	2,00
Frazione latente	0,5000

Calore metabolico

Tasso metabolico	Typing
Fattore metabolico (0.85 per le donne, 0.75 bambini)	0,90
Clothing schedule	Default clothing schedule (Northern hemisphere)

Figura 35. Esempio di settaggi dei differenti parametri di occupazione per gli uffici.

5.2.3 Profili di acqua calda sanitaria

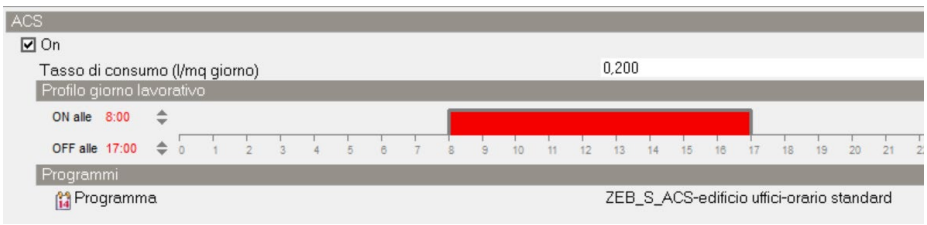
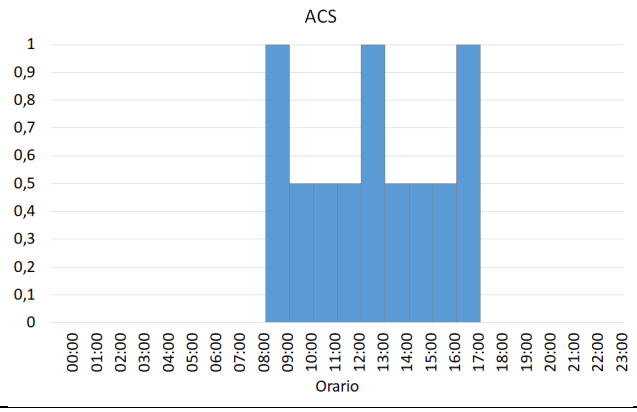
Per quanto riguarda l'acqua calda sanitaria, rispetto al caso di edifici residenziali, l'utilizzo di tale servizio negli edifici ad uso ufficio è sicuramente più limitato e prevalentemente focalizzato su un suo utilizzo sporadico. Per tale motivo, anche sulla base di alcuni studi rivenienti da letteratura [60] è stato previsto un utilizzo maggiore durante l'ora di ingresso, l'ora di pranzo e quella di uscita (indice pari al valore 1) e un uso, invece, più basso (frazione pari a 0,5) e distribuito uniformemente, durante le restanti ore della giornata lavorativa.
Il profilo di utilizzo (
Tabella 30) è stato attribuito alle zone dei servizi igienico-sanitari calcolando il consumo di acqua calda sanitaria. Per tutta la superficie utile si è adottato infatti un tasso di consumo di 0.2 l /m^{2}giorno, riprendendo il dato fornito dalla UNITS11300-parte2, prospetto 12 [51].
Le ore tipiche della giornata di fruizione dell'ufficio risultano pertanto pari a:

$$1 * 1 + 0,5 * 3 + 1 * 1 + 0,5 * 3 + 1 * 1 = 5 \text{ ore}$$

Il consumo giornaliero di acqua in m^3/s sarà pari a:

$$DHW\ (m^3/s) = DHW\ (l/m^2\text{-}day) \times 0.001 \times m^2 / (n.ore\ della\ giornata\ tipo \times 3600) \quad [52]$$

Tabella 30. Esempio di settaggi per l'Acqua Calda Sanitaria

Acqua Calda Sanitaria	Profilo ACS
	Schedule:Compact, DHW_office_schedule, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays WinterDesignDay SummerDesignDay, Until: 08:00, 0, Until: 09:00, 1, Until: 12:00, 0.5, Until: 13:00, 1, Until: 16:00, 0.5, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, For: Weekends Holidays, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 24:00, 0;
	

5.2.4 Profili di controllo ambientale

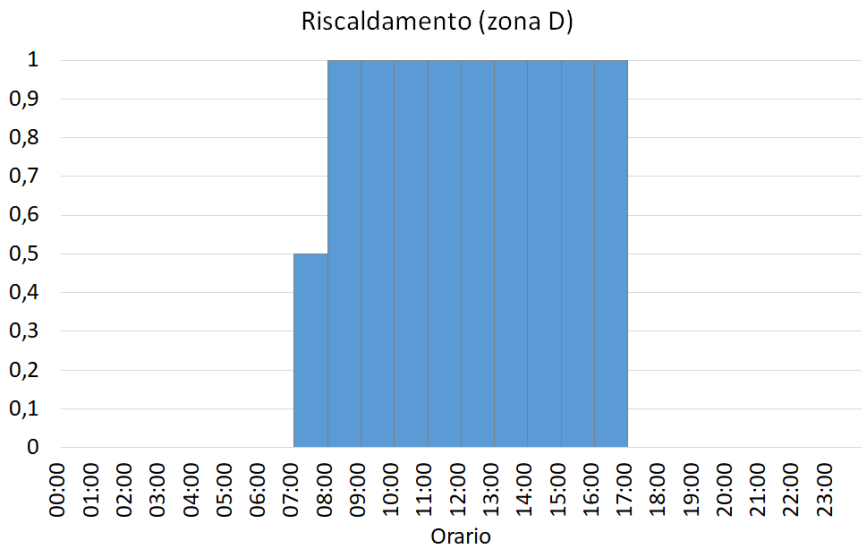
Per quanto riguarda i sistemi di controllo ambientale, sono stati impostati i set-point di temperatura e le temperature di attenuazione sia per il riscaldamento (Tabella 31) che per il raffrescamento (Tabella 35).

Tabella 31. Esempio di settaggi per il Controllo Ambientale: Riscaldamento (zona climatica D)

Controllo ambientale – Riscaldamento

Settaggi

Giornata tipo



Script

```
Schedule:Compact,
Office_Heat,
Temperature,
Through: 15 Apr,
For:  Monday,
Until: 06:00, 0,
Until: 07:00, 0.5,
Until: 17:00, 1,
Until: 24:00, 0,
For: WinterDesignDay Tuesday
Wednesday Thursday Friday,
Until: 07:00, 0,
Until: 08:00, 0.5,
Until: 17:00, 1,
Until: 24:00, 0,
For: Holidays Weekends
AllOtherDays,
Until: 24:00, 0,
Through: 31 Oct,
For:  Weekdays
SummerDesignDay Weekends
Holidays,
Until: 24:00, 0,
For: AllOtherDays,
Until: 24:00, 0,
Through: 31 Dec,
For:  Monday,
Until: 06:00, 0,
Until: 07:00, 0.5,
Until: 17:00, 1,
Until: 24:00, 0,
For: WinterDesignDay Tuesday
Wednesday Thursday Friday,
Until: 07:00, 0,
Until: 08:00, 0.5,
Until: 17:00, 1,
Until: 24:00, 0,
For: Weekends Holidays,
Until: 24:00, 0,
For: AllOtherDays,
Until: 06:00, 0,
Until: 07:00, 0.5,
Until: 17:00, 1,
Until: 24:00, 0;
```

Per la scelta del periodo di riscaldamento è stato preso a riferimento ciò che è previsto da normativa per l'accensione degli impianti in ciascuna zona climatica [41,42]; allo stesso modo è stato impostato il numero di ore di funzionamento nel rispetto del massimo fornito dalla normativa stessa: in zona A-B sono state garantite 8 ore di riscaldamento al massimo, ipotizzandone l'accensione dalle ore 8:00 alle ore 12:00 per la fascia mattutina e dalle 13:00 alle 17:00 per quella pomeridiana, mentre nelle altre zone il funzionamento

dell'impianto è stato garantito durante tutta la giornata lavorativa (8:00-17:00) con eventuale preriscaldamento di un'ora prima dell'inizio dell'orario lavorativo (dalle 7:00 alle 8:00) nelle zone climatiche più fredde (D,E,F). Per maggiori dettagli si vedano Tabella 32, Tabella 33 e Tabella 34.
Il valore dello schedule di riscaldamento è stato settato pari a 1 durante tutte le ore di lavorative da garantire (8:00-17:00),-mentre durante l'orario di preriscaldamento, laddove presente, si è impostato un indice pari a 0,5: ciò vuol dire che l'impianto si accende in base alla temperatura di set-back (18°C) impostata come parametro principale di controllo.
In tal modo l'edificio raggiunge una temperatura accettabile ancor prima dell'inizio della giornata lavorativa, e ciò consente alle ore 8:00 di non avere sovraccarichi o picchi nel funzionamento dell'impianto.
Lo stesso ragionamento è stato fatto in particolare per il lunedì, primo giorno della settimana, in cui l'impianto deve sopperire all'abbassamento della temperatura interna derivante dal fine settimana in cui tutto è spento e l'edificio non viene climatizzato. Per tale motivo, in tutti i profili si è deciso di anticipare l'accensione alle 6:00 della mattina di lunedì e garantire il pre-riscaldamento dalle ore 6:00 alle ore 7:00.
A livello di opzioni di simulazione si è infine scelto di impostare il controllo sulla temperatura dell'aria.
Tali accorgimenti consentono un utilizzo ottimizzato dell'impianto e una riduzione del consumo energetico ad esso legato.

Tabella 32. Periodo di accensione del sistema di riscaldamento fissato da normativa, ore giornaliere di riscaldamento ipotizzate per ciascuna zona climatica e orari di accensione

Zona climatica	Periodo di accensione	Ore massime di riscaldamento	Ore di riscaldamento	Orari di funzionamento	Pre-riscaldamento
B (A)	1 dicembre - 31 marzo	8	8	8:00 – 12:00 13:00 – 17:00	7:00 – 8:00
C	15 novembre - 31 marzo	10	9	8:00 – 17:00	7:00 – 8:00
D	1 novembre - 15 aprile	12	9	8:00 – 17:00	7:00 – 8:00
E	15 ottobre - 15 aprile	14	9	8:00 – 17:00	7:00 – 8:00
F	Fissato come in zona E	Fissato come in zona E	9	8:00 – 17:00	7:00 – 8:00

Tabella 33. Profili di riscaldamento adottati per una giornata lavorativa tipo, a seconda delle zone climatiche

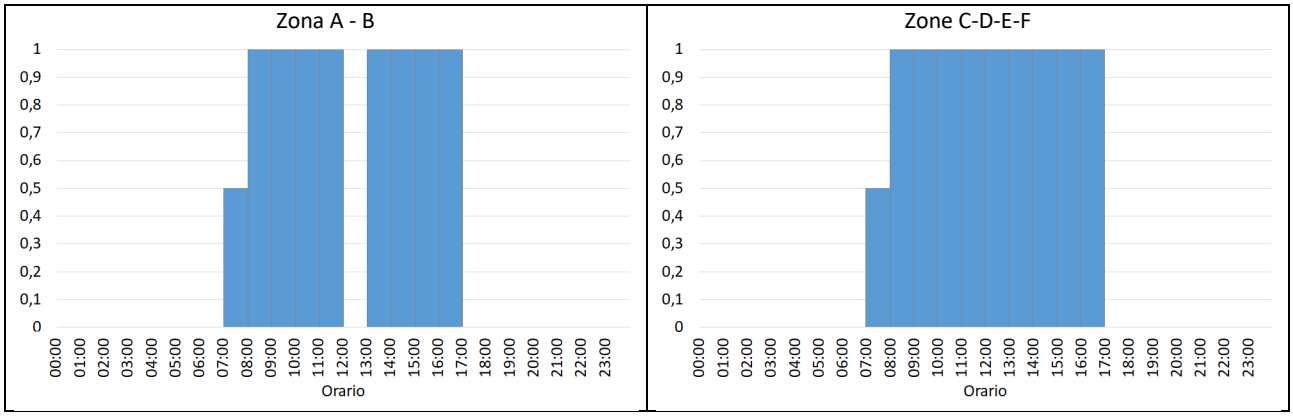


Tabella 34. Script dei Profili di riscaldamento adottati a seconda delle zone climatiche

Zona B(A)	Zona C	Zona D	Zona E	Zona F
Schedule:Compact, Office_Heat, Temperature, Through: 31 Mar, For: Monday, Until: 07:00, 0, Until: 08:00, 0.5, Until: 12:00, 1, Until: 13:00, 0, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, For: WinterDesignDay Tuesday Wednesday Thursday Friday, Until: 07:00, 0, Until: 08:00, 0.5, Until: 12:00, 1, Until: 13:00, 0, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, For: Holidays Weekends AllOtherDays, Until: 24:00, 0, Through: 30 Nov, For: Weekdays SummerDesignDay Weekends Holidays, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 24:00, 0, Through: 31 Dec, For: Monday, Until: 07:00, 0, Until: 08:00, 0.5, Until: 12:00, 1, Until: 13:00, 0, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, For: WinterDesignDay Tuesday Wednesday Thursday Friday, Until: 07:00, 0, Until: 08:00, 0.5, Until: 12:00, 1, Until: 13:00, 0, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, For: Weekends Holidays, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 06:00, 0, Until: 07:00, 0.5, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0;	Schedule:Compact, Office_Heat, Temperature, Through: 31 Mar, For: Monday, Until: 06:00, 0, Until: 07:00, 0.5, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, For: WinterDesignDay Tuesday Wednesday Thursday Friday, Until: 07:00, 0, Until: 08:00, 0.5, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, For: Holidays Weekends AllOtherDays, Until: 24:00, 0, Through: 14 Nov, For: Weekdays SummerDesignDay Weekends Holidays, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 24:00, 0, Through: 31 Dec, For: Monday, Until: 06:00, 0, Until: 07:00, 0.5, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, For: WinterDesignDay Tuesday Wednesday Thursday Friday, Until: 07:00, 0, Until: 08:00, 0.5, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, For: Weekends Holidays, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 06:00, 0, Until: 07:00, 0.5, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0;	Schedule:Compact, Office_Heat, Temperature, Through: 15 Apr, For: Monday, Until: 06:00, 0, Until: 07:00, 0.5, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, For: WinterDesignDay Tuesday Wednesday Thursday Friday, Until: 07:00, 0, Until: 08:00, 0.5, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, For: Holidays Weekends AllOtherDays, Until: 24:00, 0, Through: 31 Oct, For: Weekdays SummerDesignDay Weekends Holidays, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 24:00, 0, Through: 31 Dec, For: Monday, Until: 06:00, 0, Until: 07:00, 0.5, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, For: WinterDesignDay Tuesday Wednesday Thursday Friday, Until: 07:00, 0, Until: 08:00, 0.5, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, For: Weekends Holidays, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 06:00, 0, Until: 07:00, 0.5, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0;	Schedule:Compact, Office_Heat, Temperature, Through: 15 Apr, For: Monday, Until: 06:00, 0, Until: 07:00, 0.5, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, For: WinterDesignDay Tuesday Wednesday Thursday Friday, Until: 07:00, 0, Until: 08:00, 0.5, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, For: Holidays Weekends AllOtherDays, Until: 24:00, 0, Through: 14 Oct, For: Weekdays SummerDesignDay Weekends Holidays, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 24:00, 0, Through: 31 Dec, For: Monday, Until: 06:00, 0, Until: 07:00, 0.5, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, For: WinterDesignDay Tuesday Wednesday Thursday Friday, Until: 07:00, 0, Until: 08:00, 0.5, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, For: Weekends Holidays, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 06:00, 0, Until: 07:00, 0.5, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0;	Schedule:Compact, Office_Heat, Temperature, Through: 15 Apr, For: Monday, Until: 06:00, 0, Until: 07:00, 0.5, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, For: WinterDesignDay Tuesday Wednesday Thursday Friday, Until: 07:00, 0, Until: 08:00, 0.5, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, For: Holidays Weekends AllOtherDays, Until: 24:00, 0, Through: 14 Oct, For: Weekdays SummerDesignDay Weekends Holidays, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 24:00, 0, Through: 31 Dec, For: Monday, Until: 06:00, 0, Until: 07:00, 0.5, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, For: WinterDesignDay Tuesday Wednesday Thursday Friday, Until: 07:00, 0, Until: 08:00, 0.5, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, For: Weekends Holidays, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 06:00, 0, Until: 07:00, 0.5, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0;

In raffrescamento, invece, in assenza di una specifica normativa di riferimento che limiti il periodo e le ore di accensione, è stato previsto il funzionamento dell'impianto per tutti i mesi estivi (da giugno a settembre); il sistema si attiva al bisogno effettivo secondo il controllo tramite temperatura di set-point. Inoltre, l'impianto è attivo durante tutta la giornata lavorativa dalle ore 8:00 alle ore 17:00 con un pre-raffrescamento di un'ora dalle 7:00 alle 8:00 sotto il parametro di controllo della temperatura di set-back impostata (Tabella 35).

Tabella 35. Esempio di settaggi per il Controllo Ambientale: Raffrescamento

Controllo ambientale

Raffrescamento

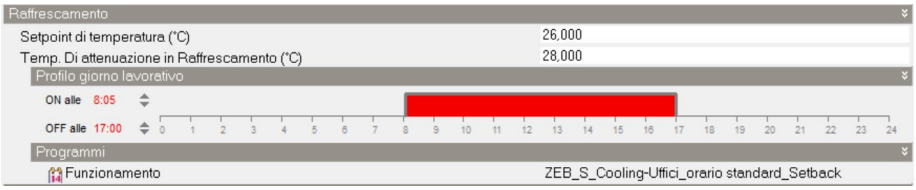
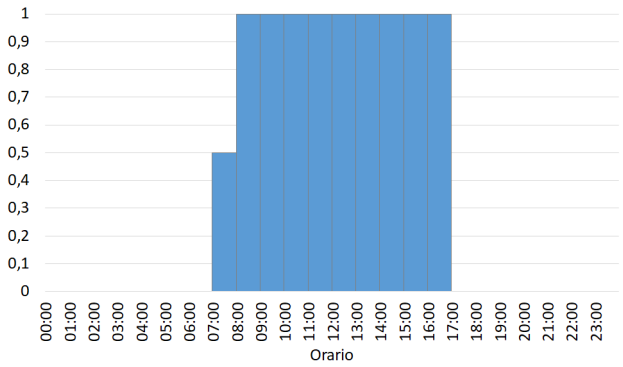


Grafico del profilo di raffrescamento per una giornata tipo



Script del Profilo di Raffrescamento

```
Schedule:Compact,
Office_Cool,
Temperature,
Through: 31 May,
For: Weekends Holidays,
Until: 24:00, 0,
For:  WinterDesignDay
Weekdays,
Until: 24:00, 0,
For: AllOtherDays,
Until: 24:00, 0,
Through: 18 Aug,
For:  Monday,
Until: 06:00, 0,
Until: 07:00, 0.5,
Until: 17:00, 1,
Until: 24:00, 0,
For:  SummerDesignDay
Tuesday Wednesday
Thursday Friday,
Until: 07:00, 0,
Until: 08:00, 0.5,
Until: 17:00, 1,
Until: 24:00, 0,
For: Weekends Holidays,
Until: 24:00, 0,
For: AllOtherDays,
Until: 07:00, 0,
Until: 08:00, 0.5,
Until: 17:00, 1,
Until: 24:00, 0,
Through: 19 Aug,
For: Alldays,
Until: 05:00, 0,
Until: 07:00, 0.5,
Until: 17:00, 1,
Until: 24:00, 0,
Through: 30 Sep,
For:  Monday,
Until: 06:00, 0,
Until: 07:00, 0.5,
Until: 17:00, 1,
Until: 24:00, 0,
For:  SummerDesignDay
Tuesday Wednesday
Thursday Friday,
Until: 07:00, 0,
Until: 08:00, 0.5,
Until: 17:00, 1,
Until: 24:00, 0,
For: Weekends Holidays,
Until: 24:00, 0,
For: AllOtherDays,
Until: 07:00, 0,
Until: 08:00, 0.5,
Until: 17:00, 1,
Until: 24:00, 0,
Through: 31 Dec,
For: Weekends Holidays
Weekdays,
Until: 24:00, 0,
For: AllOtherDays,
Until: 24:00, 0;
```

Infine, per l'edificio ad uso ufficio si è ipotizzato un impianto a ventilazione meccanizzata che garantisca i giusti ricambi d'aria.

Per il settaggio delle portate d'aria esterna e di estrazione da adottare per le diverse destinazioni d'uso degli edifici, si è presa a riferimento la norma UNI10339 [45] che le definisce in determinate condizioni termiche e di pressione atmosferica[6] e per impianti a regime, garantendo i ricambi d'aria. Ai fini del contenimento energetico, è concessa anche la riduzione di tali portate d'aria esterna durante la fase di avvio dell'impianto. La UNI prescrive che gli impianti, al fine di garantire livelli di benessere accettabili per le persone, contemperando le esigenze di contenimento dei consumi energetici, assicurino:

- un'immissione di aria esterna almeno pari a determinati valori minimi in funzione della destinazione d'uso dei locali;
- una filtrazione minima dell'aria;
- una movimentazione dell'aria con velocità entro determinati limiti.

Il tutto per mantenere nel volume convenzionalmente occupato dalle persone, adeguate caratteristiche termiche, igrometriche e di qualità dell'aria. Per tale motivo, si è verificato il rispetto degli indici di affollamento così come indicati dalla norma (Tabella 36).

Tabella 36. Scelta delle portate d'aria esterna in base a destinazione d'uso degli ambienti, superficie utile, numero di occupanti e indici di affollamento.

Destinazione d'uso	N. ambienti per piano	Sup. utile per ambiente [m²]	N. occupanti per ambiente	Indice di Affollamento (UNI 10339)	N. occupanti convenzionali secondo la norma	N. occupanti scelto	Indice di affollamento (pers/m²)	Portata aria esterna [l/s*pers]	VM per superfici [l/s*m²]
Piano terra									
Reception	1,00	42,97	1	0,2	9	4,00	0,09	10,00	0,93
Sala di attesa-ristoro	1,00	27,76	17	0,6	17	max 17	0,60	10,00	6,00
Uffici	7,00	20,18	2	0,06	2	2	0,10	11,00	1,09
Open office	1,00	53,79	20	0,12	6	6,00	0,12	11,00	1,23
Sala riunioni	1,00	62,34	Max 43	0,6	37	Max 37	0,60	10,00	6,00
Server	1,00	63,20	/	/	/	/	0,01	7,00	0,07
Piano 1									
Sala di attesa-ristoro	1,00	41,52	25	0,6	25	max 25	0,60	10,00	6,00
Uffici	8	20,18	2	0,06	2	2	0,10	11,00	1,09
Open office	1,00	53,79	20	0,12	6	6	0,12	11,00	1,23
Sala riunioni	1,00	83,86	Max 52	0,6	50	max 50	0,60	10,00	6,00
Piano tipo									
Sala di attesa-ristoro	1,00	41,52	Max 16	0,6	25	max 25	0,60	10,00	6,00
Uffici	10,00	20,18	2,00	0,06	2	2	0,10	11,00	1,09
Open office 1	1,00	53,79	20,00	0,12	6	6,00	0,12	11,00	1,23
Open office 2	1,00	27,76	8,00	0,12	3	3,00	0,12	12,00	1,30

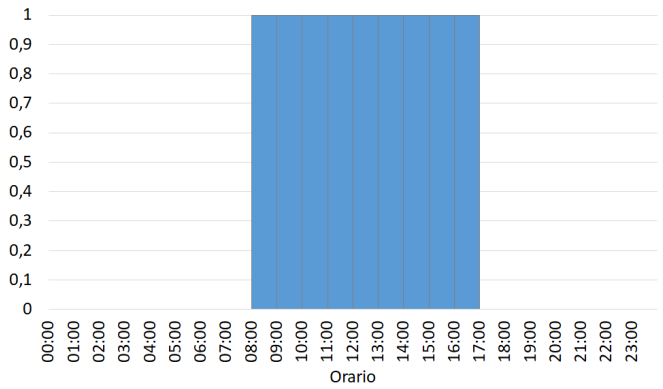
Il profilo di utilizzo (Tabella 37) è stato allineato all'orario lavorativo giornaliero per tutti i mesi in modo da assicurare la qualità e salubrità dell'aria.

[6] Nella norma in vigore sono indicate le condizioni "standard" quali, per il funzionamento invernale, umidità relativa esterna: 60%; temperatura a bulbo secco interna: 20°C; umidità relativa interna: tra 35% e 45%. Per il funzionamento estivo, invece, si considerano temperatura a bulbo secco interna: 26°C; umidità relativa interna: tra 50% e 60%.

Tabella 37. Esempio di settaggi per il Controllo Ambientale: Ventilazione meccanica – schedule compatto (ambiente ufficio)

Ventilazione Meccanica

Settaggi	Script del profilo
Ventilazione meccanica On Metodo di definizione aria esterna: 2-Aria minima di rinnovo (per persona) Funzionamento Programma: ZEB_S_Ventilazione meccanica uffici 24/7 Recupero di Calore On Tipo di recupero di calore: 1-Sensibile Efficienza recupero calore sensibile: 0,700 Ventilatori Tipo di ventilatore: 1-Mandata Prevalenza (Pa): 150,0 Efficienza totale (%): 70,0 Economizzatore (Free cooling) Tipo di free cooling: 1-Nessuno Portata d'aria esterna massima quando l'economizzatore è in funzione (vol/h): 15,0 Recupero di Calore On Tipo di recupero di calore: 1-Sensibile Efficienza recupero calore sensibile: 0,700 Efficienza recupero calore latente: 0,650 Aria di rinnovo per ventilazione Aria minima di rinnovo (l/s-persona): 11,000 Vent Mecc per superficie (l/s-mq): 1,10	Schedule:Compact, Office_AHU, Fraction, Through: 31 Dec, For: WinterDesignDay Monday Tuesday Wednesday Thursday Friday, Until: 08:00, 0, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, For: Holidays Weekends AllOtherDays, Until: 24:00, 0;



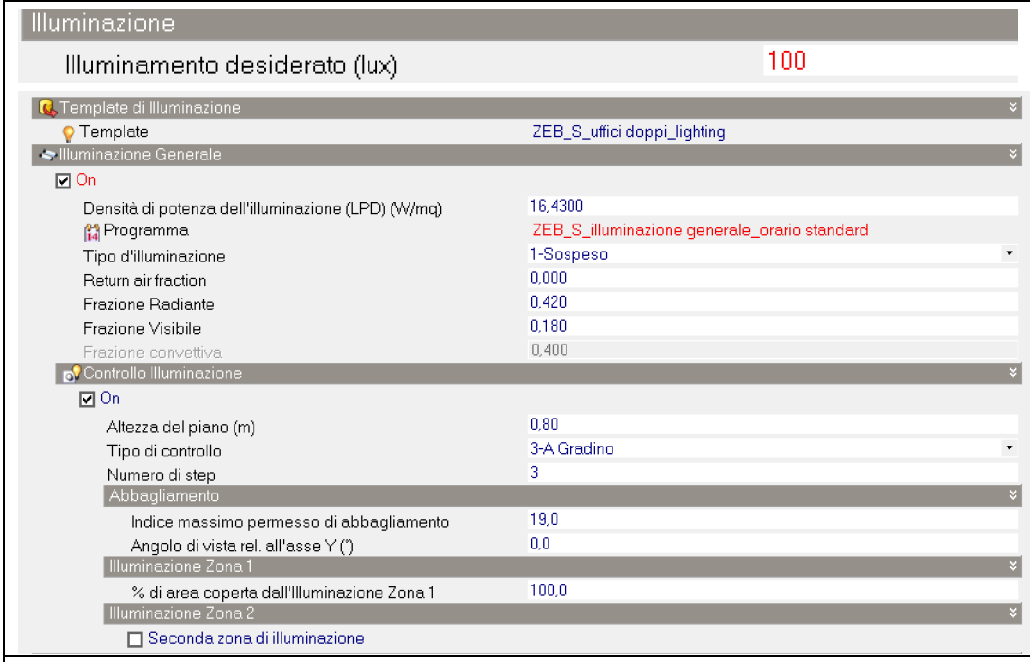
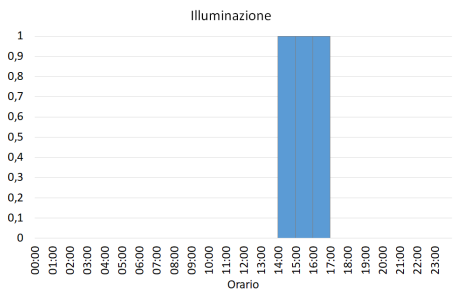
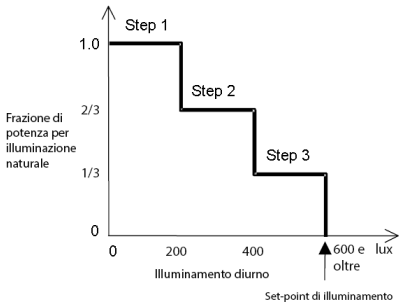
Infine, per quanto riguarda l'illuminazione artificiale, i valori di illuminamento e densità di potenza [Tabella 38] sono stati fissati in base alle differenti tipologie di ambiente secondo le norme UNI EN 12464:2021 [61] e UNI CEN/TR 15193-2:2017 [62].

Tabella 38. Livelli di illuminamento e densità di potenza per ambiente.

Destinazione d'uso	Illuminamento [lux]	Densità di potenza [W/m^2]
Reception	150.00	16.43
Sala di attesa-ristoro	150.00	11.54
Uffici	300.00	16.43
Open office	300.00	10.73
Sala riunioni	300.00	12.37
Server	150.00	7.74
Distribuzione	100.00	7.74

Il profilo di utilizzo dell'illuminazione artificiale è stato impostato a partire dalle 14:00, fino alle 17:00, con controllo del tipo "a gradino" che consente di accendere o spegnere le luci a seconda della disponibilità di illuminazione naturale e della richiesta conseguente di illuminazione elettrica (Tabella 39).

Tabella 39. Esempio di settaggi per l'Illuminazione artificiale – schedule compatto (ambiente ufficio)

Illuminazione artificiale	Script del profilo
	Schedule:Compact, Office_Occ, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays SummerDesignDay, Until: 8:00, 0, Until: 14:00, 0, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0, For: Weekends Holidays WinterDesignDay, Until: 24:00, 0, For: AllOtherDays, Until: 8:00, 0, Until: 14:00, 0, Until: 17:00, 1, Until: 24:00, 0;
 	

5.2.5 Definizione dell'HVAC dettagliato

Il modello è stato implementato con la definizione dei due sistemi HVAC dettagliati al fine di descrivere adeguatamente i due layout ipotizzati nel par. 5.1.3. La Figura 36 riporta i due schemi impiantistici utilizzati relativi ai sistemi centralizzati di climatizzazione ambientale: in Figura 36(a) sono presenti tre generatori a pompa di calore, due per il raffrescamento e uno per il riscaldamento, che alimentano sia i terminali negli ambienti dell'edificio che le batterie di scambio nell'UTA, mentre in Figura 36(b) sono visibili cinque unità VRF esterne al servizio di altrettanti piani e una ulteriore unità VRF al servizio dell'UTA (nonostante la diversa raffigurazione grafica, tutte e sei le unità hanno le stesse caratteristiche funzionali). Per quanto riguarda le pompe di calore, occorre specificare che nell'ambiente software DesignBuilder risulta ottimale la schematizzazione di tali impianti in modo separato per modalità di funzionamento: in altre parole, la stessa pompa di calore reversibile viene modellata due volte, una per la funzione di riscaldamento e una per quella di raffrescamento. Nello schema utilizzato, sono raffigurate due unità di raffrescamento e una di riscaldamento, poiché è sufficiente utilizzare solo una delle due pompe di calore per soddisfare il fabbisogno invernale. In particolare, per le zone climatiche da A a D, l'impianto deputato alla produzione di acqua calda per il riscaldamento è quello di potenza minore (40.4 kW), mentre per la zona E sarà utilizzato l'impianto da 53.7 kW; infine, considerate le specificità climatiche dell'inverno, in zona F è stato previsto l'utilizzo di entrambe le pompe di calore per la stagione di riscaldamento.

In ogni ambiente climatizzato sono presenti delle unità di distribuzione di aria pretrattata, sia di mandata che di aspirazione; inoltre, per il sistema come pompe di calore i terminali utilizzati sono del tipo fan coil, mentre per il sistema VRF si utilizzano delle unità interne a espansione diretta di fluido frigorigeno.

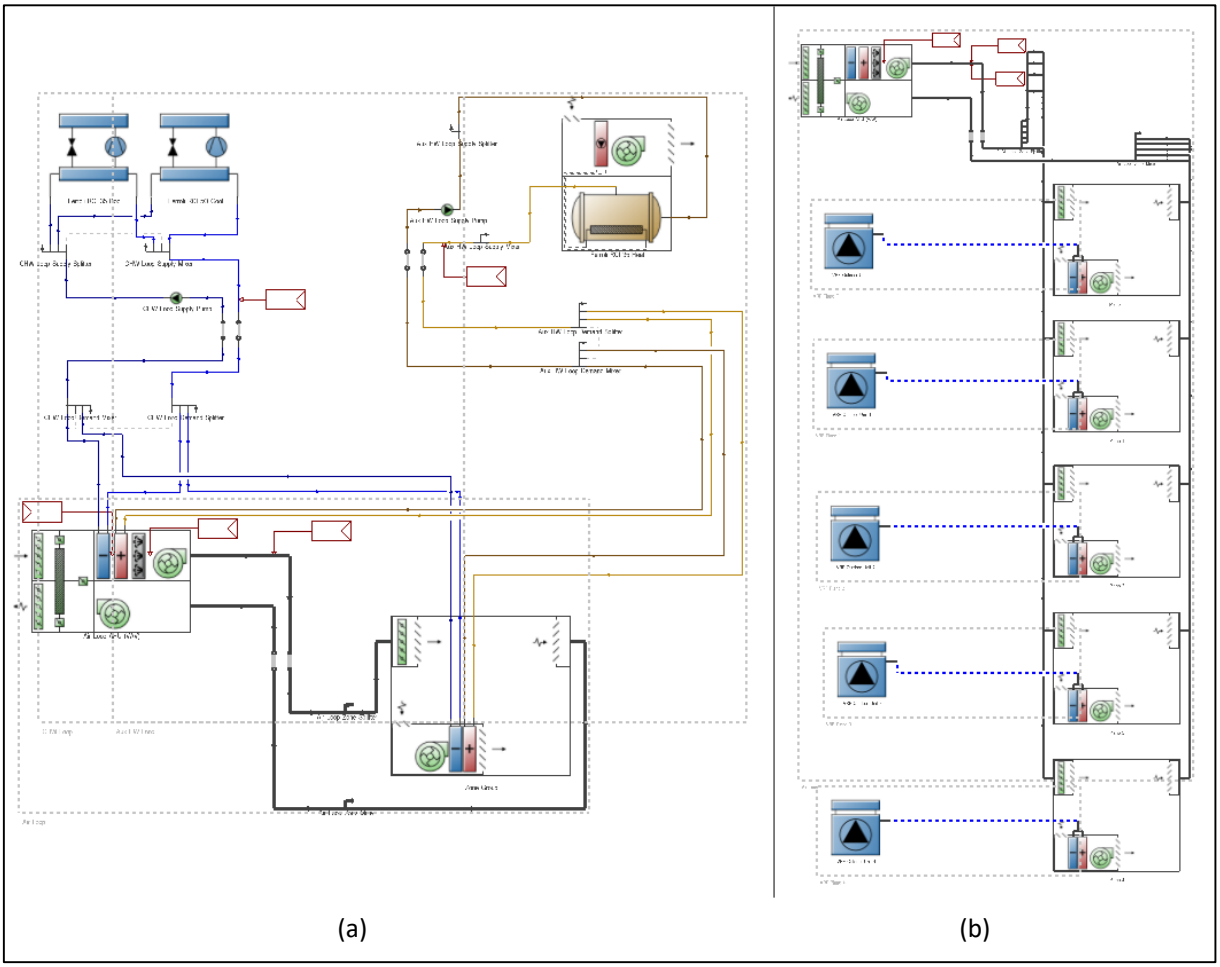


Figura 36. Schemi funzionali delle due configurazioni impiantistiche HP-AHU (a) e VRF-AHU (b).

Per quanto riguarda il dimensionamento di entrambi gli impianti generatori, si è scelto di non procedere utilizzando il criterio del massimo carico, ma si è cercato di ottimizzare la potenza erogata secondi due criteri, il soddisfacimento del carico termico e frigorifero e un regime di parzializzazione che non penalizzasse eccessivamente il rendimento di produzione. Infatti, se gli impianti fossero stati dimensionati sul picco massimo del carico, la maggior parte delle ore di funzionamento avrebbe rivelato un regime di carico parziale estremamente basso, ovvero con rendimenti non accettabili, mentre l'adozione di potenze più basse ha fatto sì che gli impianti lavorassero sempre con coefficienti di prestazione soddisfacenti.
Inoltre, la particolare distribuzione temporale del carico termico e frigorifero dell'utenza uffici, ha fornito una ulteriore possibilità di ottimizzazione della potenza degli impianti: ad esempio, nei lunedì estivi il carico frigorifero raggiunge picchi consistenti, poiché l'impianto è stato spento per più di due giorni e la temperatura esterna è spesso maggiore o uguale a quella di progetto, e l'ingresso dei lavoratori nell'edificio aumenta notevolmente il fabbisogno. Si è scelto, dunque, di anticipare l'accensione degli impianti da 1 a 2 ore prima dell'ingresso dei lavoratori, a seconda della zona climatica, con un duplice obiettivo: ridurre sensibilmente la potenza massima richiesta e abbattere drasticamente le ore necessarie a raggiungere la temperatura di set-point, poiché i lavoratori arrivano nell'edificio con la temperatura di progetto già a regime, e l'impianto ha a quel punto l'unica funzione di mantenerla.
Infine, vale la pena soffermarsi sulla pompa di calore per l'acqua calda sanitaria: come descritto nel paragrafo 0, il fabbisogno di acqua calda sanitaria per una utenza del settore terziario come quella oggetto di studio è

abbastanza contenuto oltre che circoscritto nel tempo. Si è scelta, dunque, una pompa di calore con potenza massima inferiore ai 2 kW e coefficiente di prestazione pari a 3,4, come mostrato in Figura 37; le curve di prestazione sono riportate in Figura 38 per quanto riguarda la variazione della capacità in funzione delle temperature operative e in Figura 39 per il COP al variare della temperatura interna ed esterna.

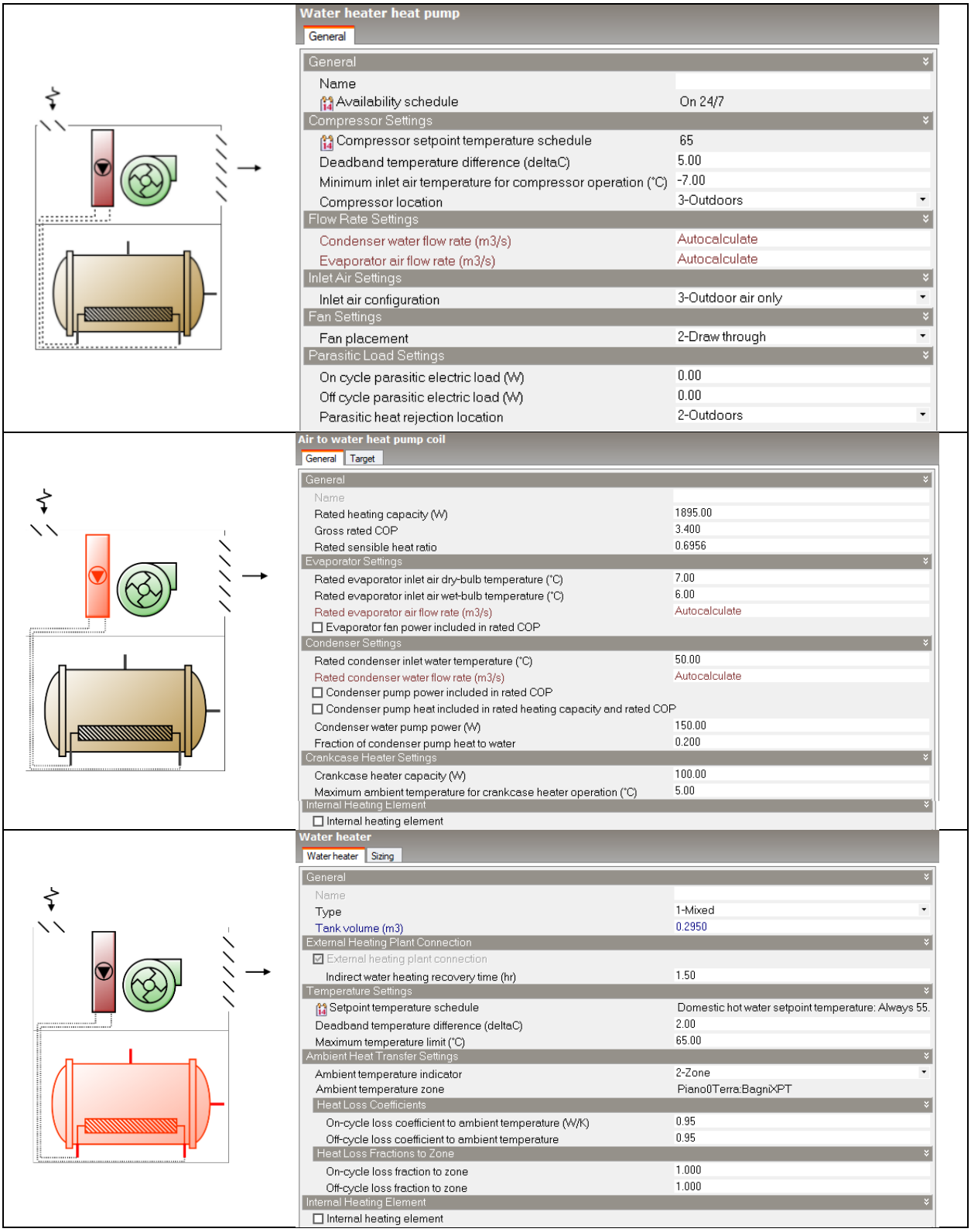


Figura 37. Caratteristiche della pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria, e dettaglio dei dati dei singoli componenti.

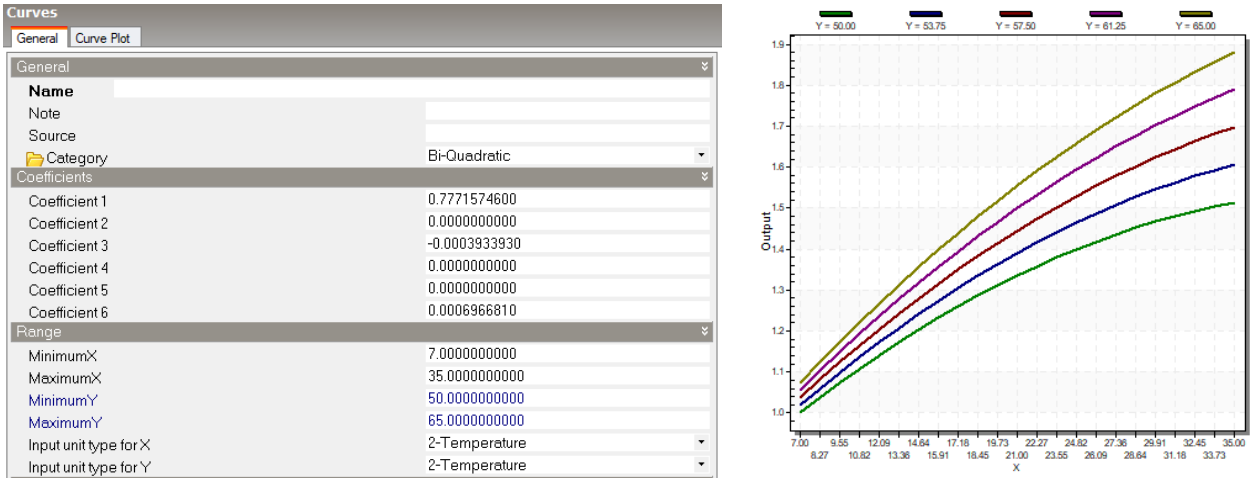


Figura 38. Coefficienti e andamento della curva della capacità in funzione delle temperature caratteristica della pompa di calore per acqua calda sanitaria - uffici

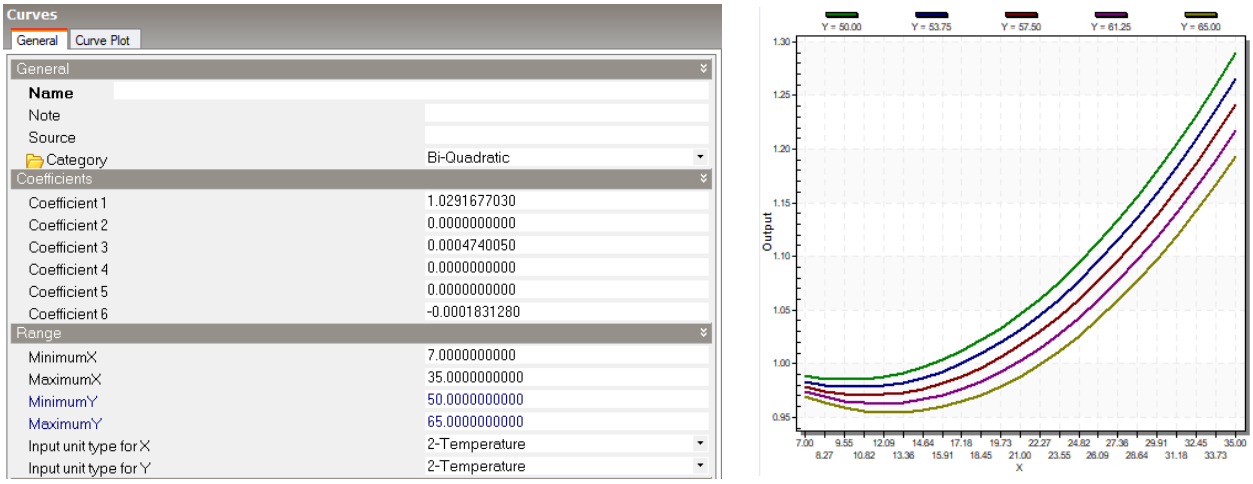


Figura 39. Coefficienti e andamento della curva del COP in funzione delle temperature caratteristiche della pompa di calore per acqua calda sanitaria - uffici

Sistema di tipo pompa di calore

A titolo di esempio, si riportano le schematizzazioni di alcuni componenti utilizzati per la zona D: in Figura 40, sono caratterizzati gli elementi che costituiscono la pompa di calore da 40,4 kW nominali con funzione di riscaldamento. I tre riquadri costituenti la figura forniscono informazioni generiche sulla pompa di calore (riquadro in alto), caratteristiche energetiche (riquadro al centro) e informazioni sul serbatoio (riquadro in basso); occorre notare che quest'ultimo viene specificato solo per quanto concerne le informazioni necessarie ai fini del calcolo e non relative al serbatoio stesso, poiché esso non è presente nel sistema a pompa di calore utilizzato.

Per la schematizzazione delle curve caratteristiche dell'impianto, si è scelto il classico approccio contenuto in EnergyPlus, vale a dire il cosiddetto *Capacity correction factor* (CAPFT) [63]: si tratta di un insieme di curve biquadratiche le cui incognite sono costituite dalle temperature esterna e interna, dai rispettivi quadrati e dal loro prodotto, così come mostrato nell'equazione seguente per il caso invernale.

$$CAPFT = a + b \cdot T_{out} + c \cdot T_{out}^2 + d \cdot T_{in} + e \cdot T_{in}^2 + f \cdot T_{out} \cdot T_{in} \text{ [63;64]}$$

Il CAPFT, dunque, esprime la variazione della potenza termica (o frigorifera) erogata in funzione delle temperature entro cui opera l'impianto. In Figura 41 sono mostrati sia i coefficienti dell'equazione sia la

rappresentazione grafica delle curve. Infine, utilizzando la stessa metodologia, è possibile descrivere l'andamento del coefficiente di prestazione in funzione delle temperature (Figura 42).

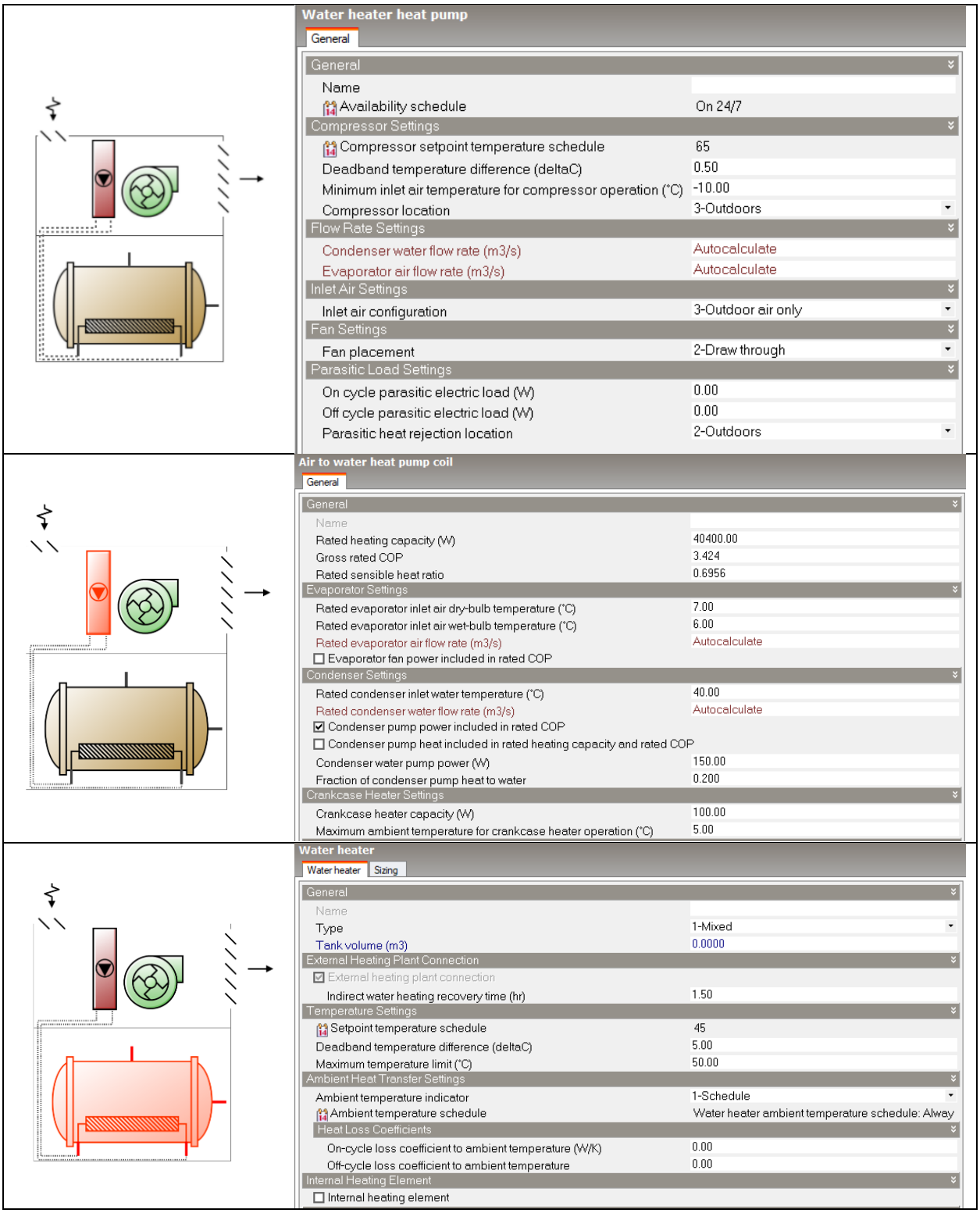


Figura 40: Caratteristiche della pompa di calore per riscaldamento, e dettaglio dati dei singoli componenti

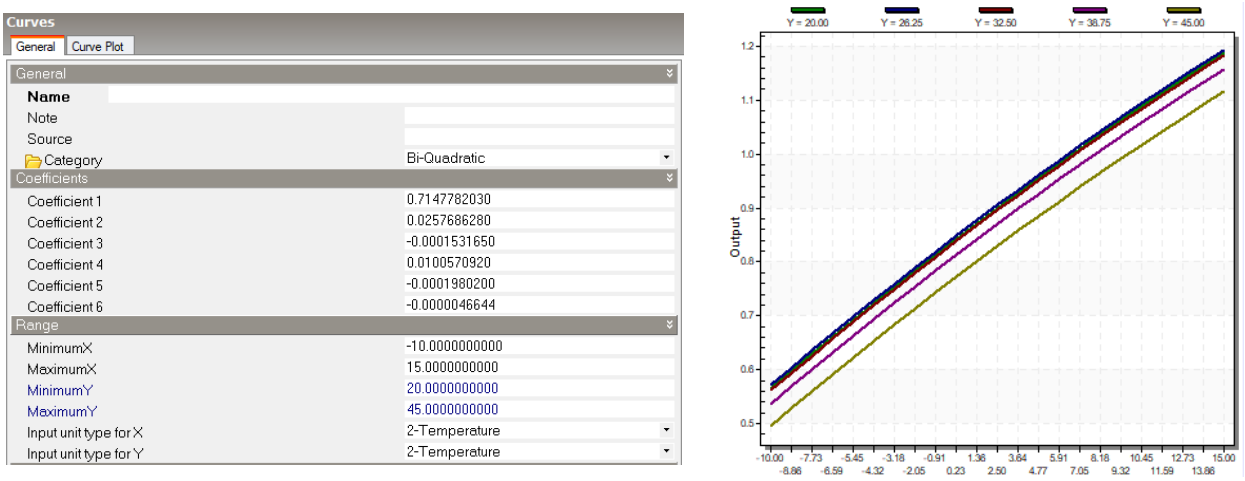


Figura 41. Coefficienti e andamento della curva della capacità in riscaldamento delle pompe di calore in funzione delle temperature – edificio uffici

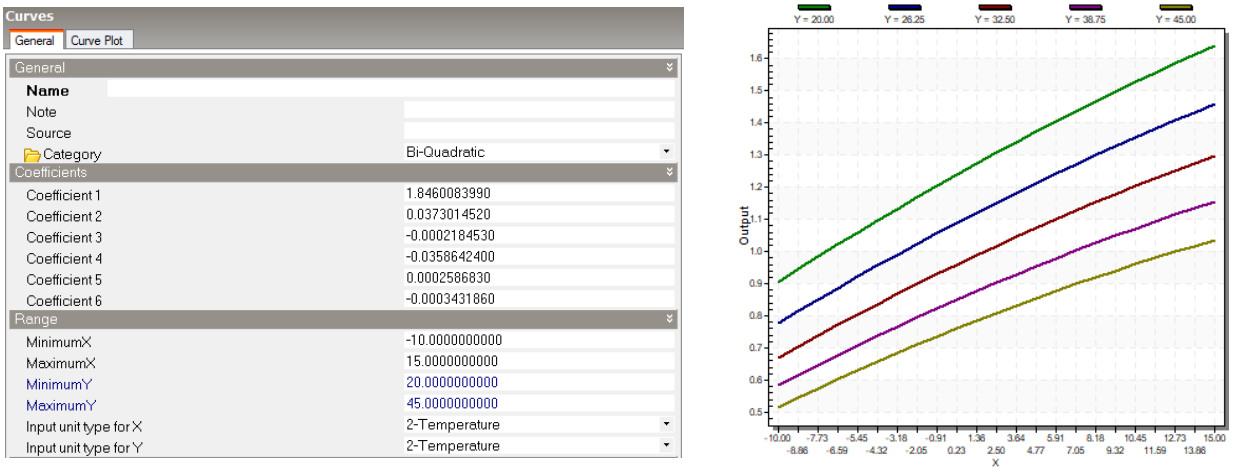


Figura 42. Coefficienti e andamento della curva di variazione del COP in funzione delle temperature – edificio uffici

La stessa pompa di calore, descritta nelle figure precedenti in modalità riscaldamento, viene ora illustrata in funzionamento estivo: la Figura 43 fornisce informazioni generiche sul ciclo energetico, mentre in Figura 44 sono rappresentate le curve di prestazione in funzione delle temperature e in Figura 45 la curva per il coefficiente di prestazione (EER). Per calcolare i gruppi di curve descritti nelle due figure citate, si è adottata la stessa metodologia descritta per il caso invernale.

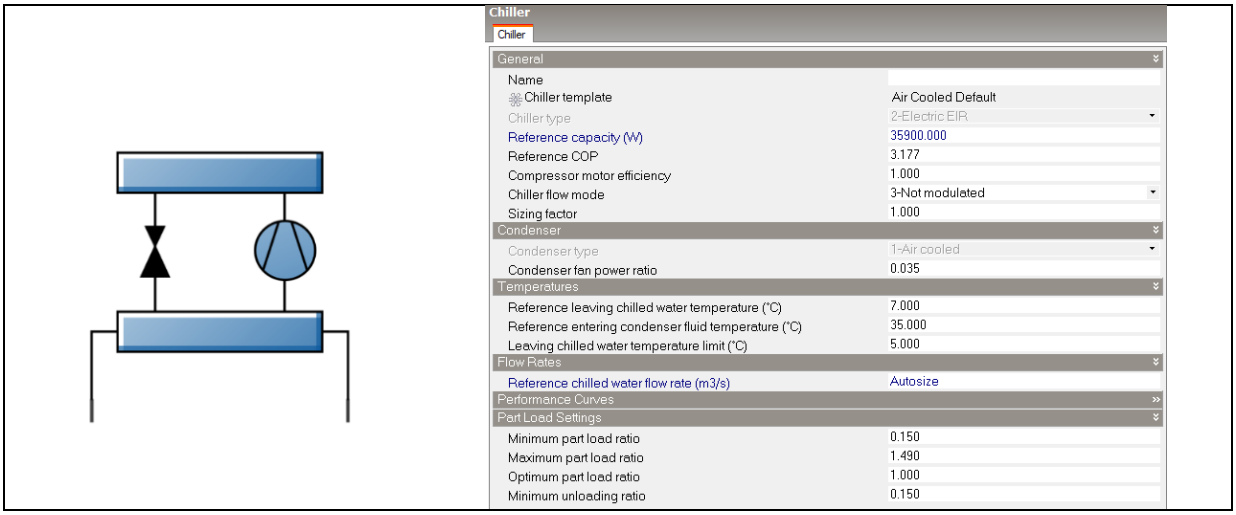


Figura 43. Caratteristiche del refrigeratore

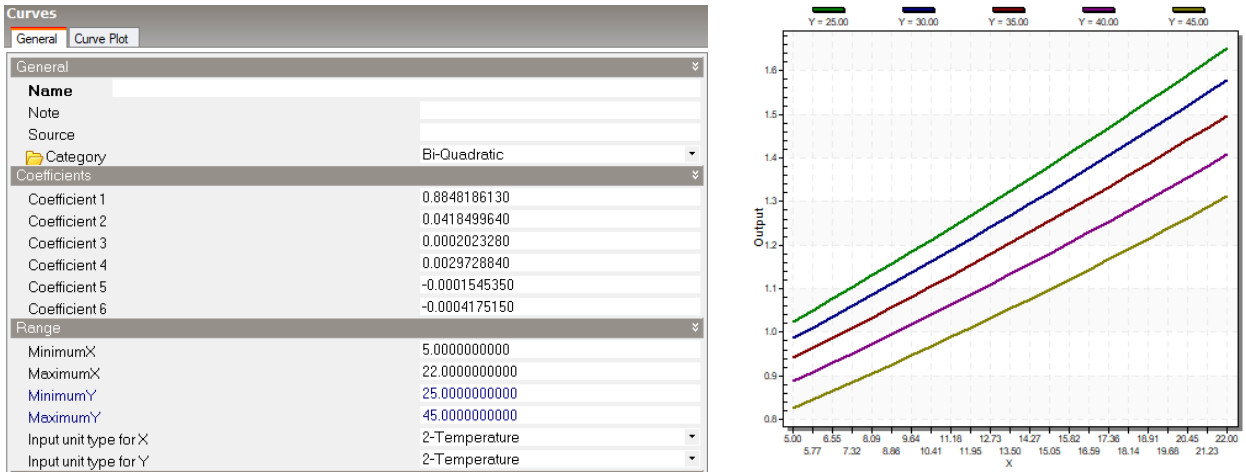


Figura 44. Coefficienti e curva della capacità in raffrescamento in funzione delle temperature caratteristica della pdc in raffrescamento – edificio uffici

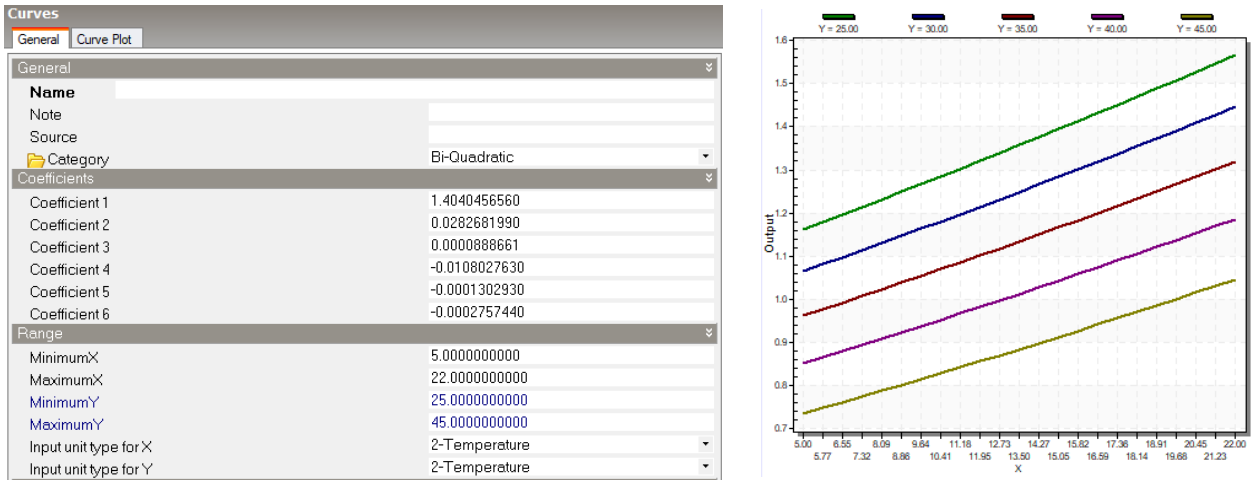


Figura 45. Coefficienti e curva dell'EER in raffrescamento in funzione delle temperature caratteristiche della PdC in raffrescamento – edificio uffici

Sistema di tipo VRF

La configurazione di impianto basata su sistemi a volume di refrigerante variabile utilizzata in zona D è riportata schematicamente nella Figura 46. Al contrario della schematizzazione dei sistemi a pompa di calore, un impianto VRF viene definito, in fase di modellazione, mediante un unico elemento, all'interno del quale si impostano le curve caratteristiche per l'utilizzo invernale ed estivo. Inoltre, tra le informazioni necessarie da immettere figurano anche dei coefficienti correttivi che tengono conto della distanza tra l'unità esterna e i terminali.

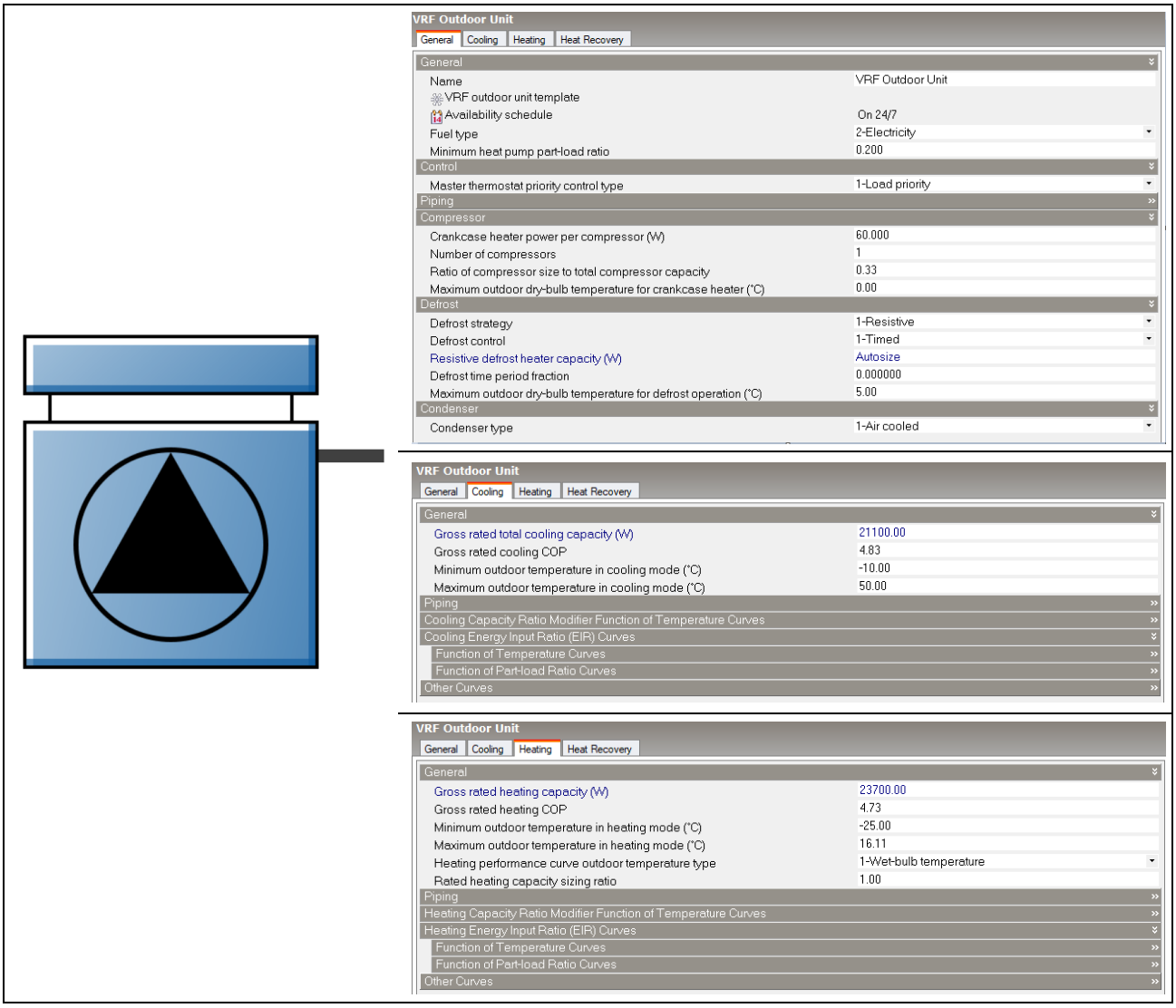


Figura 46. Caratteristiche dell'impianto a volume di refrigerante variabile

Una criticità comune a molti impianti VRF è relativa alla descrizione in modo univoco delle prestazioni al variare della temperatura esterna, e per tale motivo il programma di calcolo offre la possibilità di "dividere" il dominio di funzionamento in bassa e alta temperatura, con l'aggiunta di una ulteriore curva di confine tra le due aree. In Figura 47 sono riportate la curva biquadratica di bassa temperatura (a), la curva cubica di confine (b) e la curva biquadratica di alta temperatura (c) per quanto riguarda la potenza in riscaldamento, mentre nella Figura 48 è visibile lo stesso gruppo di tre curve con riferimento al coefficiente di prestazione (COP). Analogamente, la curva di capacità dell'impianto VRF in raffrescamento e quella relativa all'EER sono raffigurati rispettivamente in Figura 49 e Figura 50.

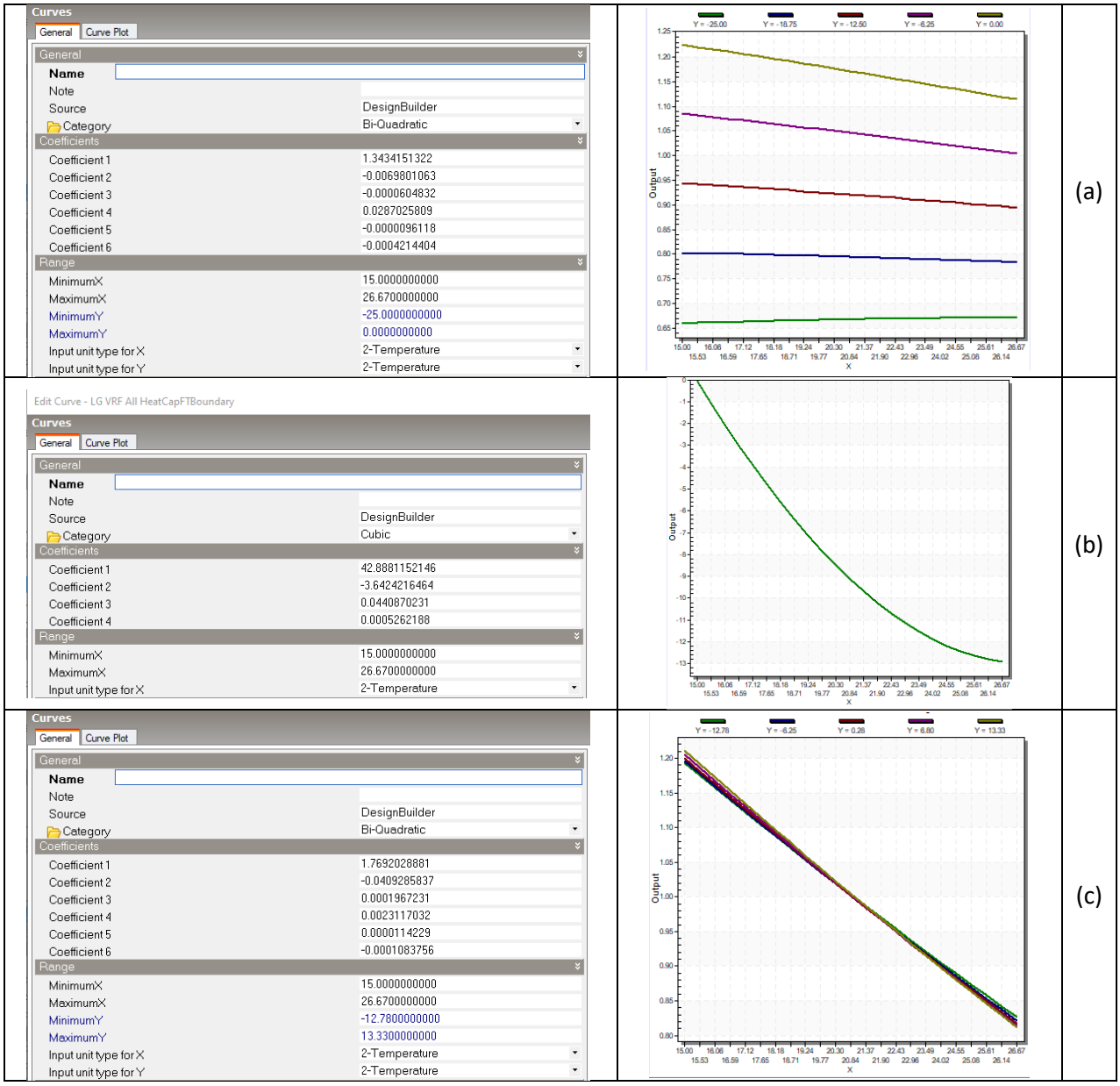


Figura 47. Coefficienti e andamento della curva della capacità in riscaldamento dell'impianto VRF in funzione delle temperature

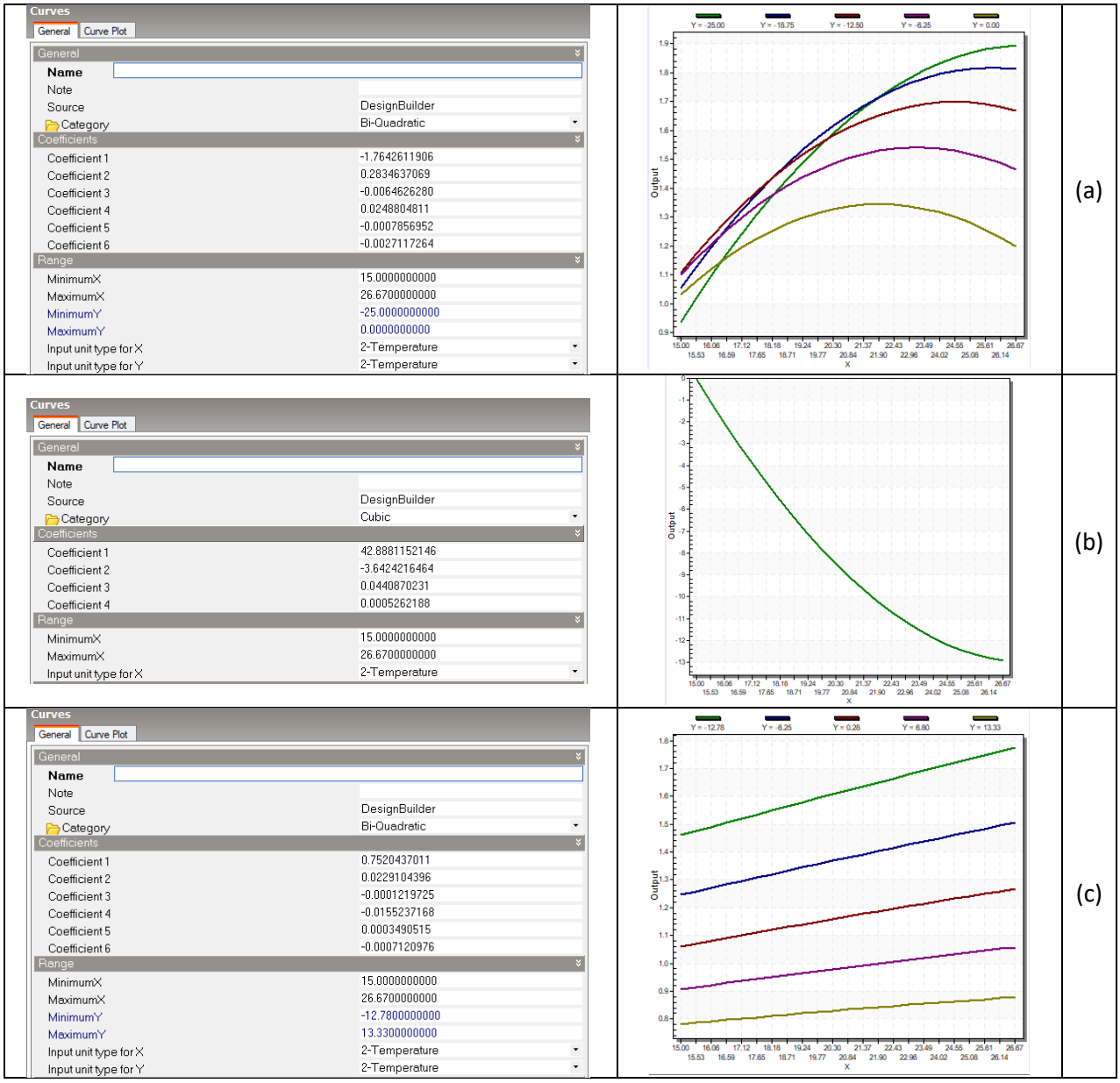


Figura 48. Coefficienti e andamento della curva del COP in riscaldamento dell'impianto VRF in funzione delle temperature

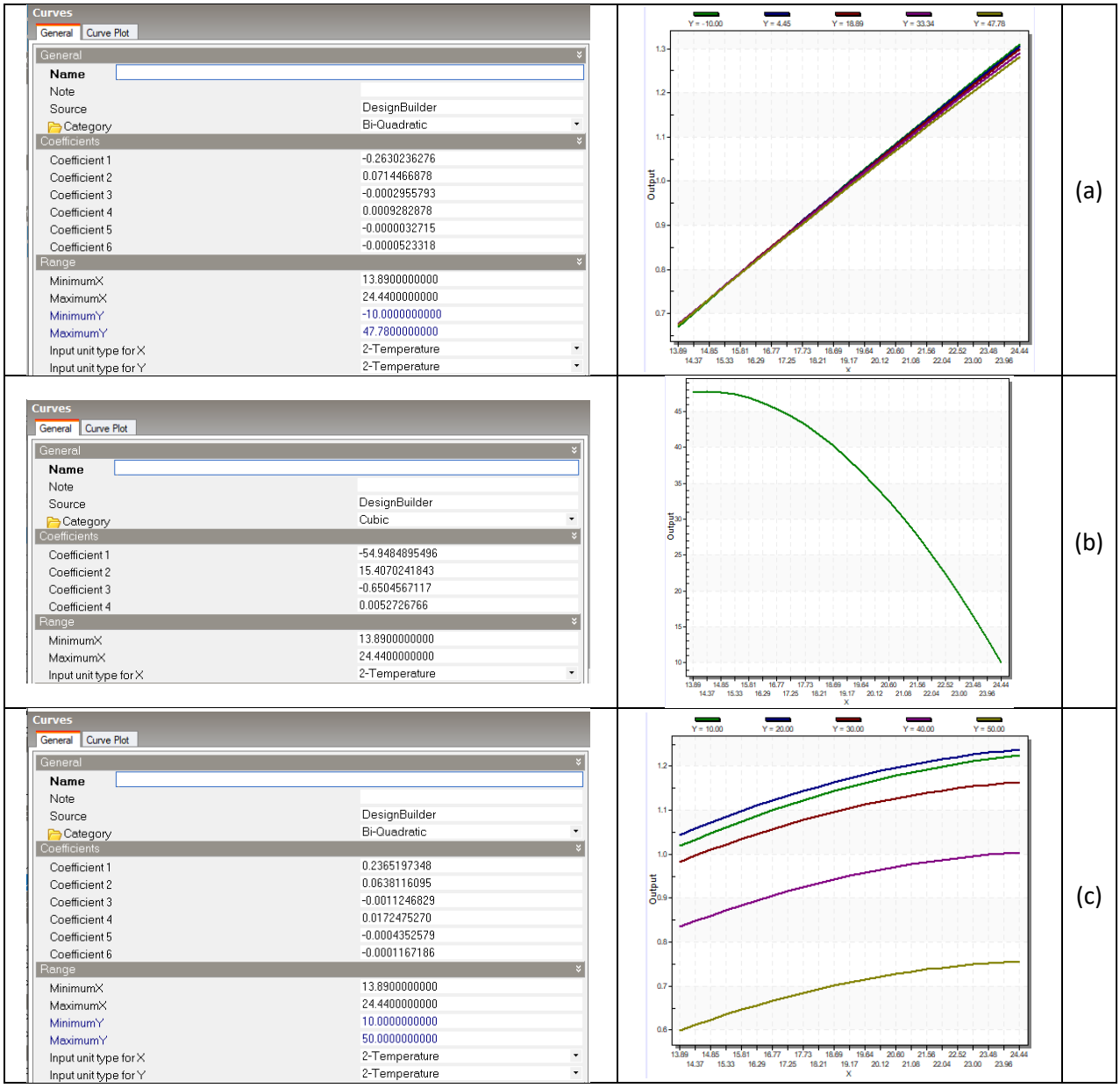


Figura 49. Coefficienti e andamento della curva della capacità in raffrescamento dell'impianto VRF in funzione delle temperature

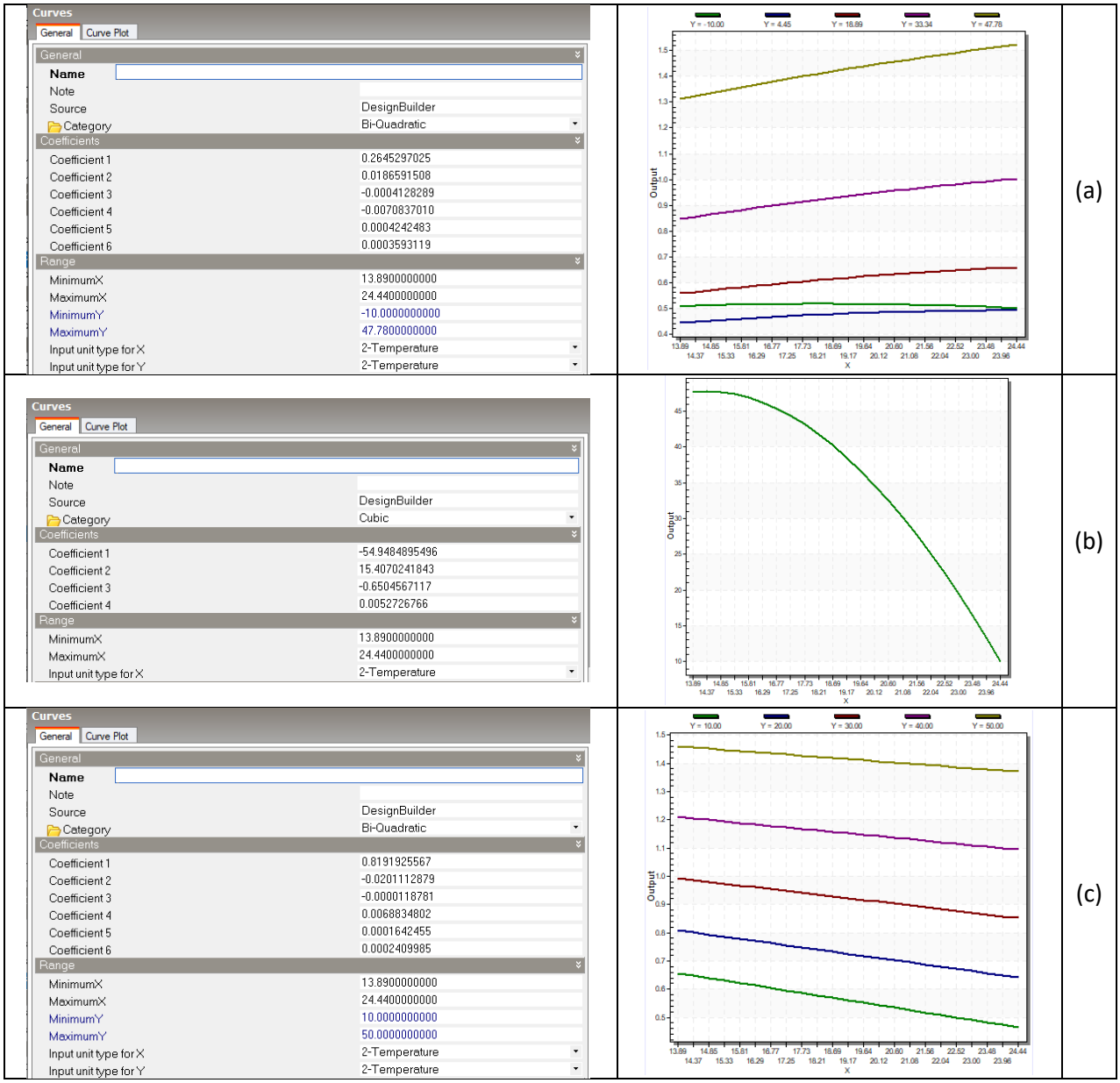


Figura 50. Coefficienti e andamento delle curve di variazione dell'EER in raffrescamento dell'impianto VRF in funzione delle temperature

5.2.6 Definizione dell'impianto fotovoltaico

Per quanto riguarda l'impianto fotovoltaico, esso ha sicuramente un ruolo centrale nell'assolvere al raggiungimento dell'obiettivo *zero* energy, ossia fornire l'energia necessaria alla copertura del fabbisogno attraverso la produzione da fonti rinnovabili.
Anche nel settore non residenziale l'evidente difficoltà nel reperire una superficie congrua alla produzione della quantità di energia che si vuole raggiungere determina la necessità di trovare soluzioni che amplino lo spazio disponibile. Come è stato già descritto nel par. 5.1.3, si è deciso di utilizzare la copertura come superficie per l'installazione dei pannelli, sfruttando nel caso della configurazione 1, la pensilina sopraelevata, soluzione che consente di aumentare la metratura disponibile, e nel caso della configurazione 2 più tradizionale la superficie della copertura piana, al netto dello spazio di alloggiamento delle macchine per la climatizzazione e il trattamento dell'aria (Figura 51); i dati specifici di super superficie occupata potenza massima installata nelle due configurazioni sono riportati in Tabella 40.

Configurazione 1 Configurazione 2

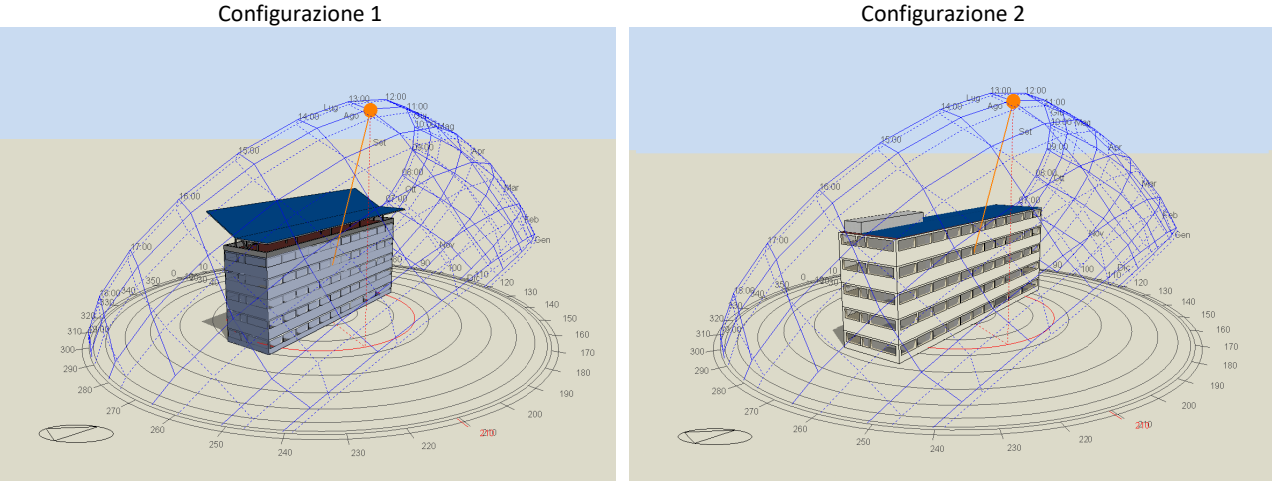


Figura 51. Rappresentazione dei pannelli fotovoltaici (in blu) posti in copertura nelle due configurazioni e diagramma solare e ombreggiamento relativo ad un giorno tipico di agosto (ore 13:00, 3 Agosto, zona climatica D)

Tabella 40. Pannelli fotovoltaici installati nelle due configurazioni

		Configurazione 1	Configurazione 2
Superficie (piana + inclinata)	m^2	825,4 (383 + 442,4)	443,6
Potenza nominale	kW	174,8 (80,8 + 94)	94,1

La definizione del quadro elettrico utilizzato è riportata in Figura 52: si tratta di un sistema a corrente continua a cui sono collegati i pannelli fotovoltaici, una batteria di accumulo elettrico e l'inverter, anch'esso in corrente continua, il tutto governato da un sistema di controllo che si interfaccia, istante per istante, con il fabbisogno elettrico dell'edificio.

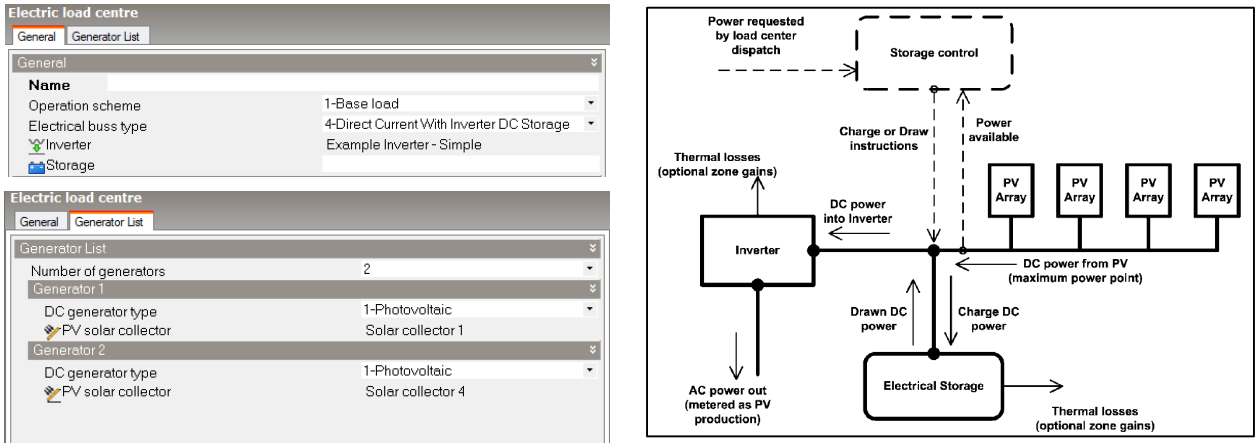
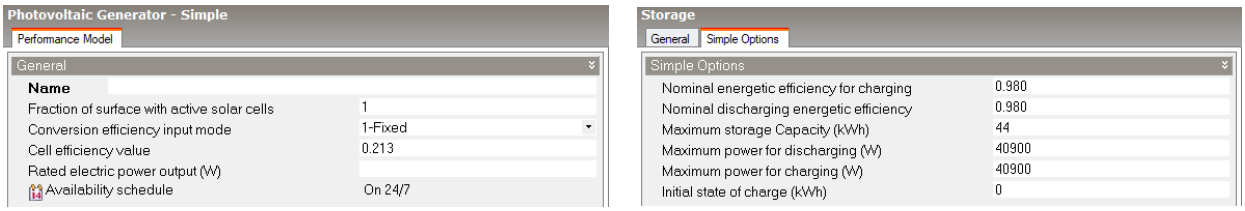


Figura 52. Quadro elettrico e sistemi di generazione utilizzati nell'edificio

Per dettagliare le informazioni riportate nella Tabella 22 e nella Tabella 23 del paragrafo 5.1.3, si riportano le schematizzazioni dei pannelli fotovoltaici in Figura 53(a) e delle batterie in Figura 53(b); così come gli altri componenti dell'involucro e degli impianti, entrambi rispecchiano le caratteristiche di elementi presenti attualmente sul mercato.



(a) (b)

Figura 53. Dati tecnici dei pannelli fotovoltaici e delle batterie di accumulo elettrico

5.3 Analisi degli output di simulazione in dettaglio

Al fine di verificare il corretto funzionamento degli impianti di generazione termica e di distribuzione per l'utenza del settore terziario, sono stati riportati alcuni dei risultati ritenuti particolarmente rilevanti. Si ricorda che la particolare tipologia di utenza è caratterizzata da un'occupazione degli ambienti da climatizzare secondo orari regolari e ben definiti; inoltre, i ricambi d'aria sono stati garantiti dalla presenza dell'impianto di ventilazione meccanica grazie al quale sono stati rispettati i dettami della normativa vigente. Le temperature di progetto sono state fissate su 26 °C per l'estate e 20 °C per l'inverno: la durata della stagione di raffrescamento, non essendo soggetta a vincoli legislativi, è stata fissata nel periodo 1 giugno – 30 settembre, mentre per la stagione di riscaldamento si è osservata la normativa [41,42]. A fronte di tali assunzioni è stato ritenuto necessario, ai fini di una maggiore completezza del lavoro, riportare un esempio dei risultati dettagliati ottenuti dalle simulazioni su uno degli edifici tipo dotato sia di impianti a pompa di calore aria-acqua sia a VRF durante le settimane tipiche delle due stagioni, monitorando la potenza erogata e il rendimento degli impianti, sia giornaliero sia orario. Infine, sono stati individuati due ambienti significativi (Figura 54) per la valutazione dell'efficacia del funzionamento degli impianti, un ufficio con esposizione a sud ed un openspace con esposizione a nord, e ne sono state riportate le temperature dell'aria interna e i volumi di ricambio per le due settimane tipiche.

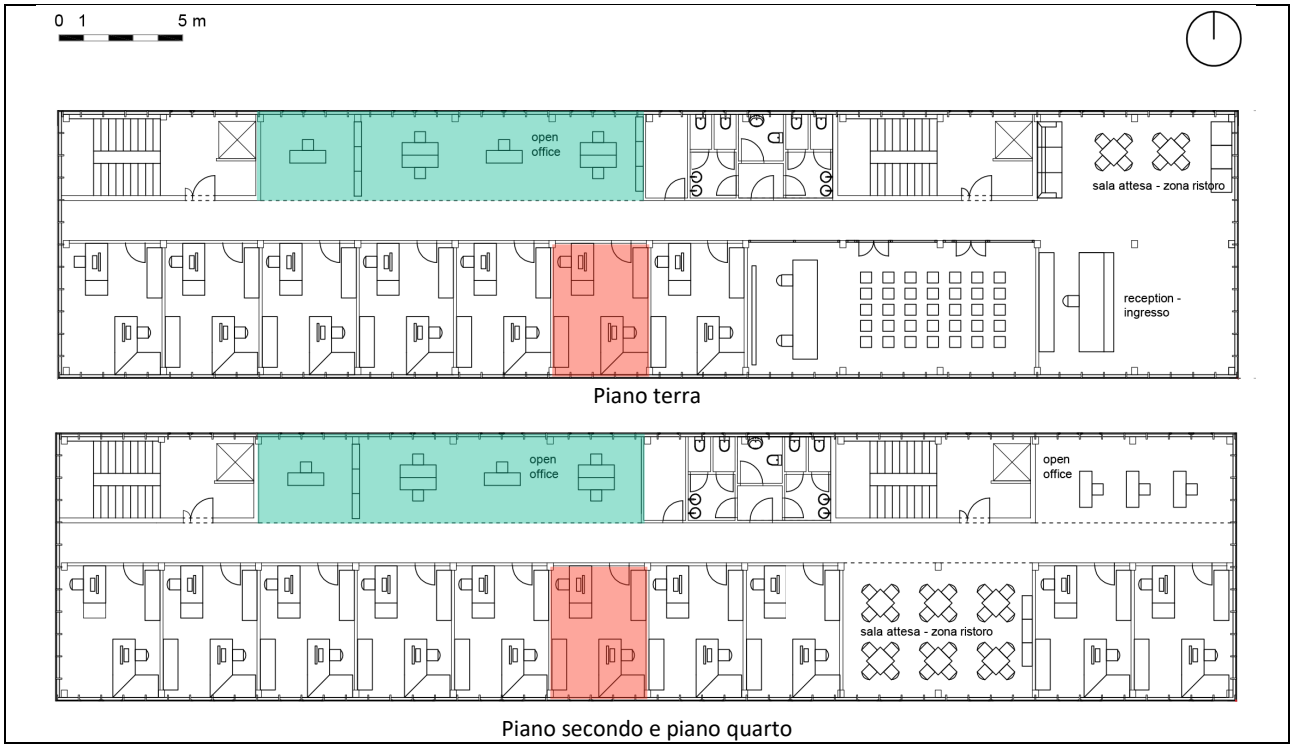


Figura 54. Individuazione degli ambienti a piano terra, piano secondo e piano quarto scelti per lo studio di dettaglio

I risultati mostrati nel presente paragrafo, che costituiscono un esempio della congruenza del modello analizzato, sono relativi alla zona climatica D – configurazione 1-PIR, mentre è possibile consultare l'Allegato 1 per i risultati dettagliati degli altri casi-studio. Soltanto in alcuni casi (ad esempio per la VMC) è stato messo in evidenza il confronto per i differenti modelli in quanto necessario per la descrizione delle verifiche di attendibilità dei modelli e delle conseguenti scelte effettuate.

5.3.1 Comportamento invernale

In Figura 55 sono riportate le prestazioni degli impianti HVAC durante una settimana lavorativa di metà gennaio: si osserva un picco di potenza termica erogata in corrispondenza del lunedì (in data 14 gennaio), dovuto al fatto che gli impianti sono spenti durante il fine settimana precedente. Inoltre, per entrambe le

tipologie di impianto, si registra lo stesso andamento della potenza fornita all'utenza. Su tutti e quattro i grafici, i cerchi di colore nero rappresentano il coefficiente di prestazione medio giornaliero dell'impianto. Tale valore è stato relazionato alla temperatura media esterna (mostrato nei due grafici in basso della Figura 55) mostrando come all'abbassarsi della temperatura esterna diminuisce anche il valore del COP, mentre nella seconda metà della settimana, la stazionarietà della temperatura ed un lieve aumento della potenza erogata contribuiscono all'aumento del valore del rendimento.

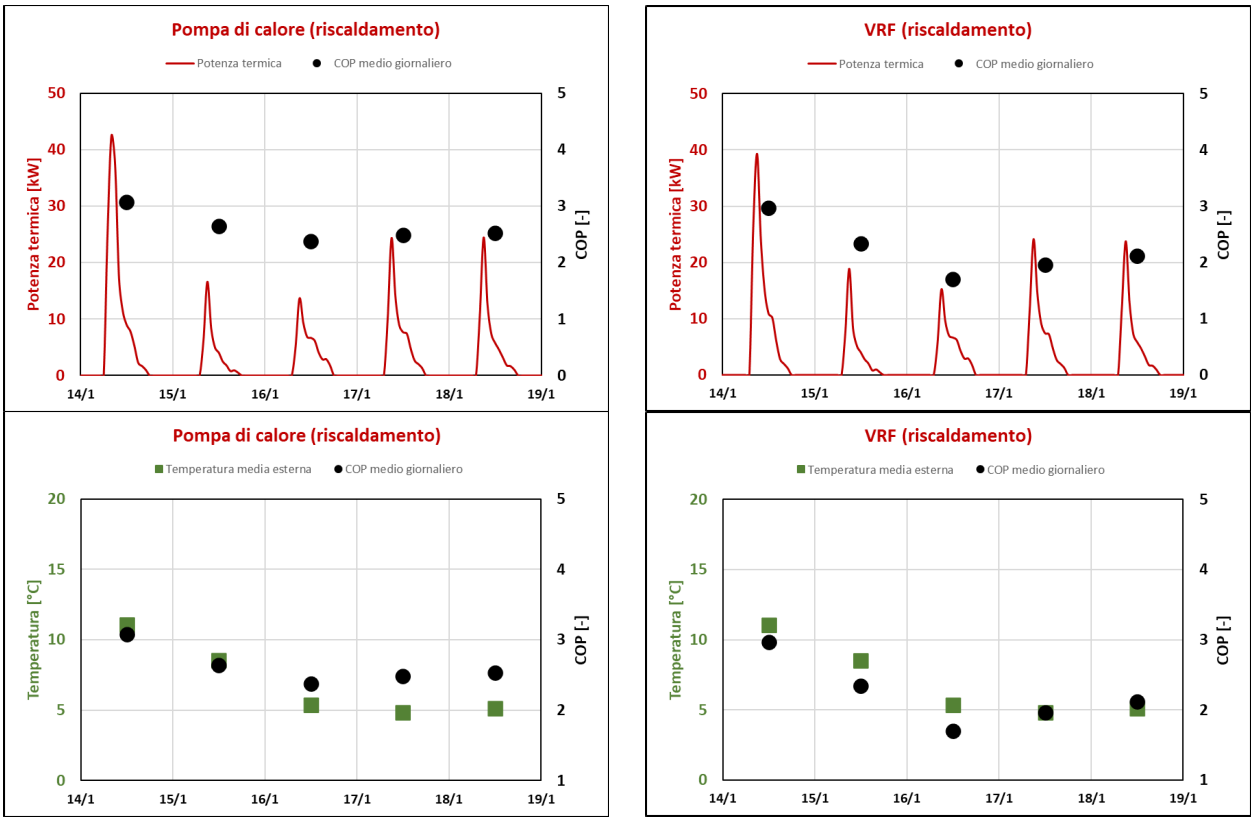


Figura 55. Prestazioni dei due sistemi HVAC durante la settimana invernale di progetto (configurazione 1, zona climatica D)

In Figura 56 e Figura 57 sono mostrati i coefficienti di prestazione di pompa di calore aria-acqua e VRF, rispettivamente, valutati su base oraria, vale a dire che il rapporto tra le energie non è relativo alla somma giornaliera dell'energia erogata diviso la somma giornaliera dell'energia assorbita come in Figura 55, ma si riferisce al rapporto delle energie ora per ora. Per quanto riguarda la pompa di calore (Figura 56), essendo una sola la macchina deputata alla generazione di calore, l'andamento è di facile interpretazione e coerentemente con quanto esposto precedentemente mostra un picco all'inizio della settimana per la maggiore richiesta di riscaldamento a seguito dello spegnimento degli impianti nel fine settimana. Per il sistema VRF (Figura 57) sono visibili i coefficienti di prestazione delle sei unità esterne, a servizio dei differenti piani e dell'UTA, cui si aggiunge il COP medio orario pesato rispetto all'energia erogata dalla singola macchina sul totale. Al netto di specifiche ore, si vede come la curva tratteggiata di colore nero sia rappresentativa del comportamento dell'intero impianto e mostri un leggero decremento durante le ore centrali della giornata, che sono anche quelle più calde e con meno richiesta di riscaldamento.

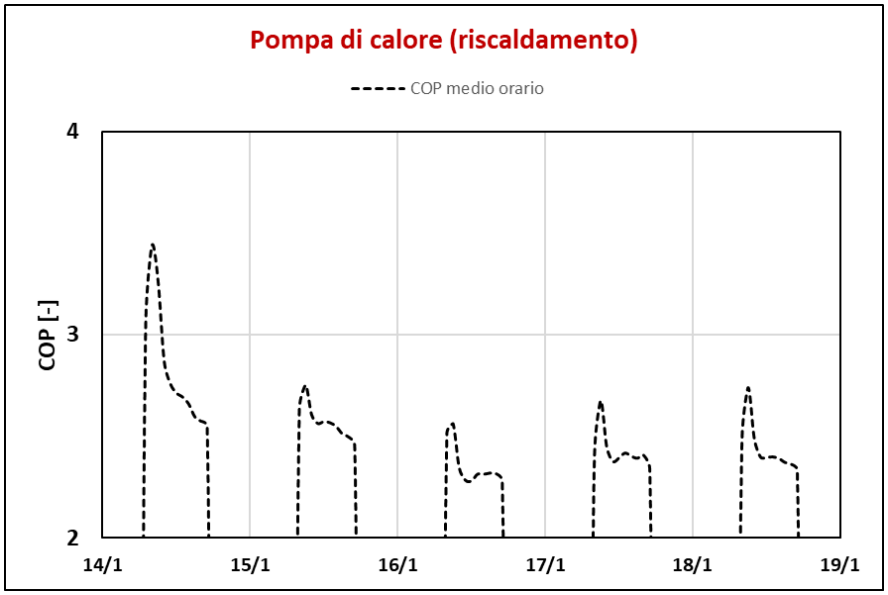


Figura 56. Rendimento orario del sistema a pompa di calore nella tipica settimana invernale (configurazione 1, zona climatica D).

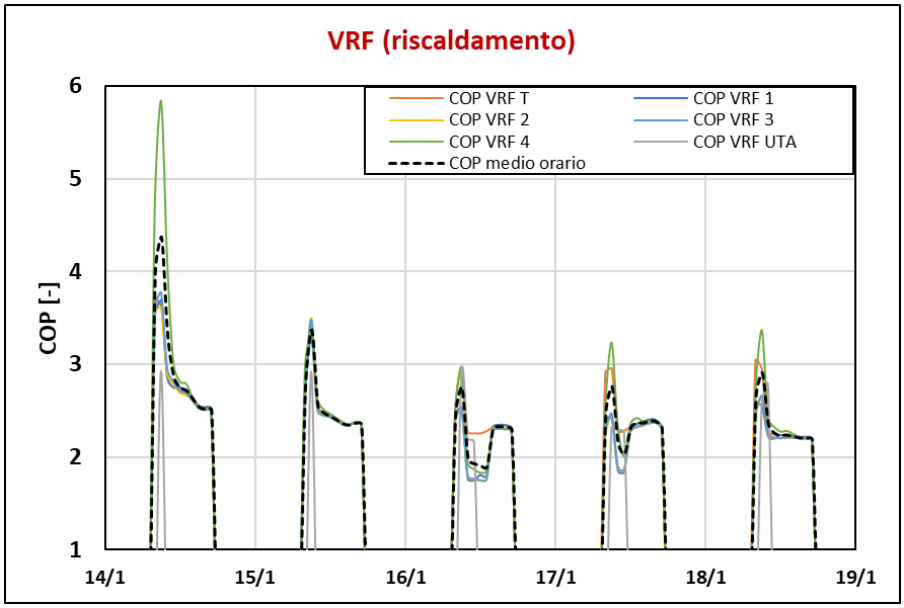


Figura 57. Rendimento orario dei singoli sistemi VRF nella tipica settimana invernale (configurazione 1, zona climatica D).

La Figura 58 mostra le temperature interne e i ricambi d'aria orari per i due ambienti individuati. Per quanto riguarda i ricambi d'aria, occorre ricordare che essi sono funzione dell'affollamento, e dunque il numero di volumi orari di aria di ricambio sono gli stessi per ogni tipologia di stanza, e non dipendono dal piano in cui le stesse si trovano. Anche la temperatura interna dei locali è, ovviamente, influenzata dalla presenza umana: nelle ore in cui gli uffici non sono operativi, la temperatura si abbassa, mentre prima che cominci l'orario di lavoro, essa arriva alla temperatura di progetto (20 °C) e poi aumenta a causa della presenza umana. Questa affermazione è supportata dal confronto dell'andamento delle temperature con la potenza erogata (Figura 55), la quale si riduce sensibilmente dopo l'avvio delle operazioni di riscaldamento, risultando non responsabile dell'aumento fino a circa 24 °C della temperatura interna, dovuto invece ai fattori dell'occupazione e degli apporti solari. Infine, si può notare che la temperatura dei locali all'ultimo piano, rappresentata dalla linea grigia in Figura 58, sia più bassa rispetto a quella degli altri due piani quando l'impianto è spento, in quanto si ha una maggiore superficie disperdente dovuto alla copertura esposta verso

l'esterno, mentre si sovrappongono tutte e tre con gli impianti funzionanti e a regime. Non sono state rilevate ore di discomfort valutate secondo il metodo ASHRAE Standard 55 [65, 66].

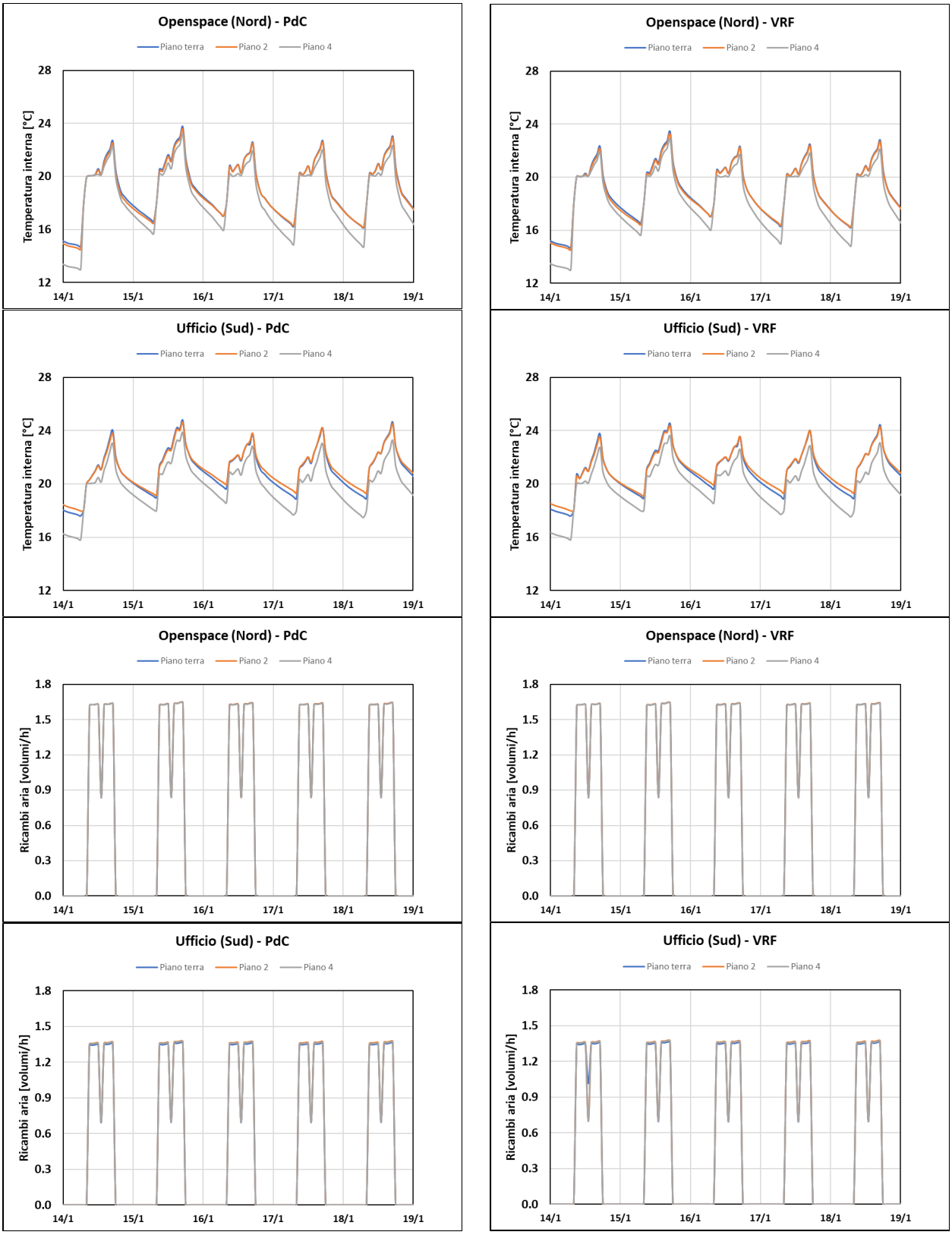


Figura 58. Temperatura media dell'aria e tasso di ricambio dell'aria per gli ambienti più significativi nella tipica settimana invernale (configurazione 1-PIR, zona climatica D).

5.3.2 Comportamento estivo

Analogamente alla stagione invernale, si riportano le prestazioni dei due impianti HVAC per la settimana lavorativa 22 luglio-26 luglio in Figura 59: anche in questo caso, le potenze erogate sono molto paragonabili, mentre il rendimento del sistema basato su VRF è sensibilmente maggiore. In particolare, l'"energy efficiency ratio" (EER) medio giornaliero per le due pompe di calore segue il trend della temperatura esterna, mentre per le sei unità VRF questa corrispondenza non è così immediata poiché il valore globale dell'EER medio è influenzato dalla potenza termica erogata da ogni unità, che viene poi pesata rispetto a quella erogata complessivamente. Si intuisce, dunque, come il funzionamento di una macchina al servizio di uno specifico piano possa variare sia rispetto a quella che condiziona un altro piano sia rispetto a quella associata all'UTA, e di conseguenza l'EER medio giornaliero non sia facilmente prevedibile. Il dettaglio orario dei due sistemi è riportato in Figura 60 (pompa di calore aria-acqua) e Figura 61 (VRF).

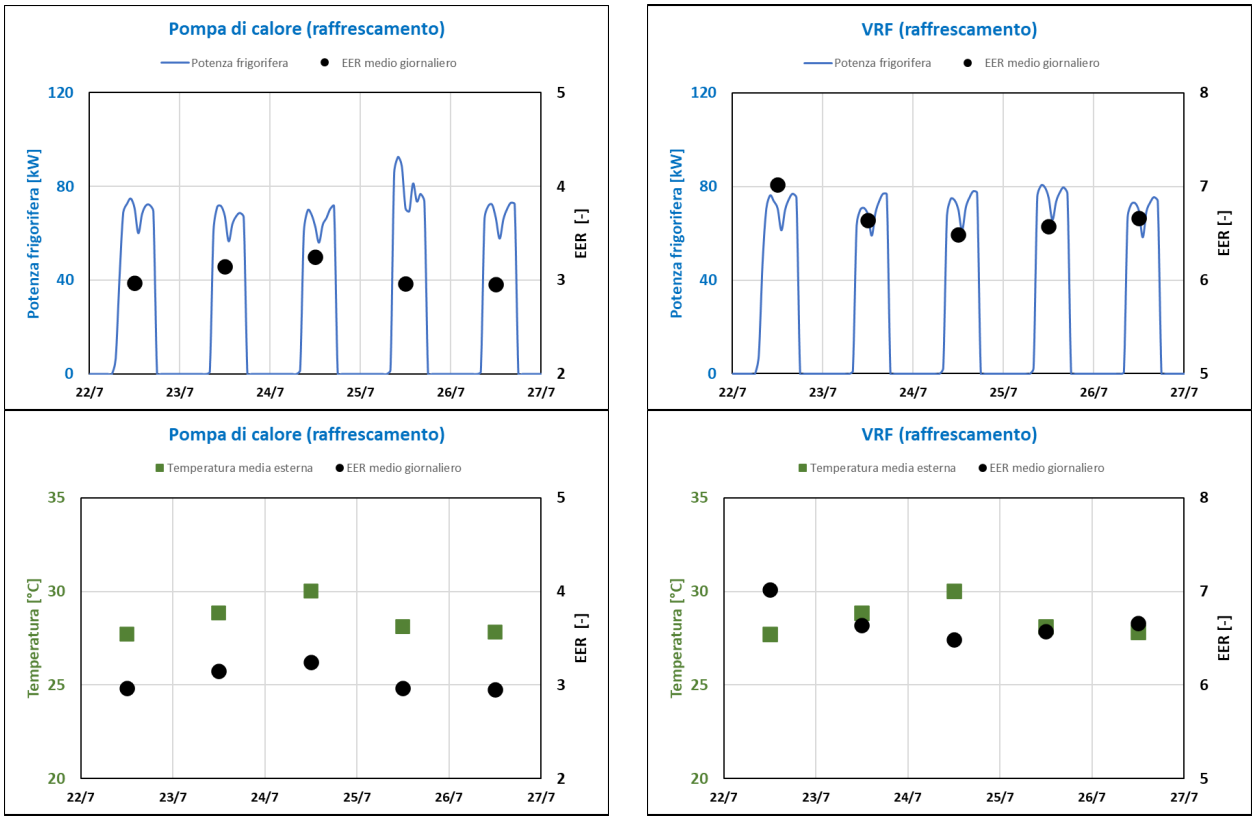


Figura 59. Prestazioni dei due sistemi HVAC durante la settimana estiva di progetto (configurazione 1-PIR, zona climatica D)

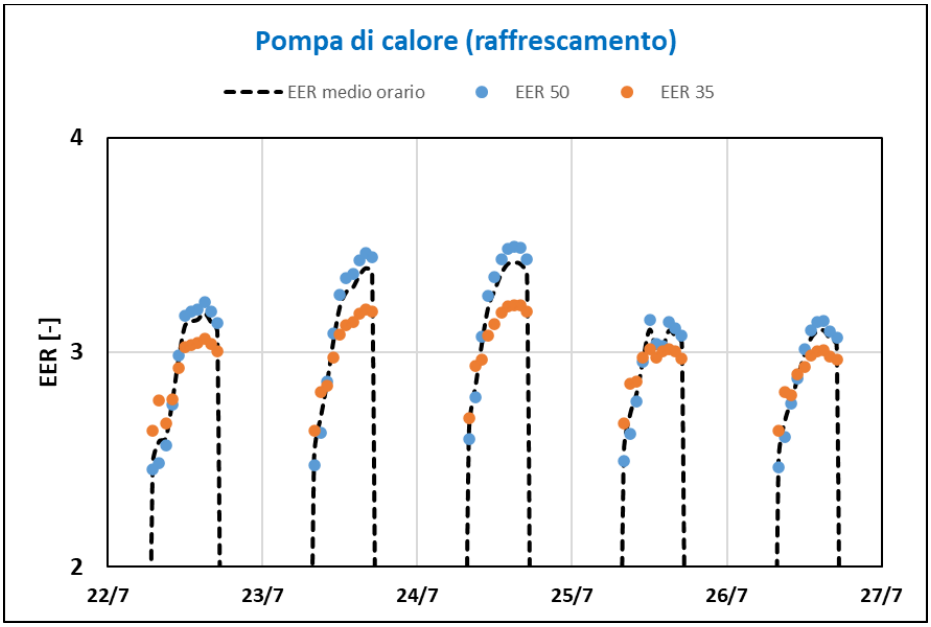


Figura 60. Rendimento orario dei singoli sistemi a pompa di calore nella tipica settimana estiva (configurazione 1-PIR, zona climatica D.

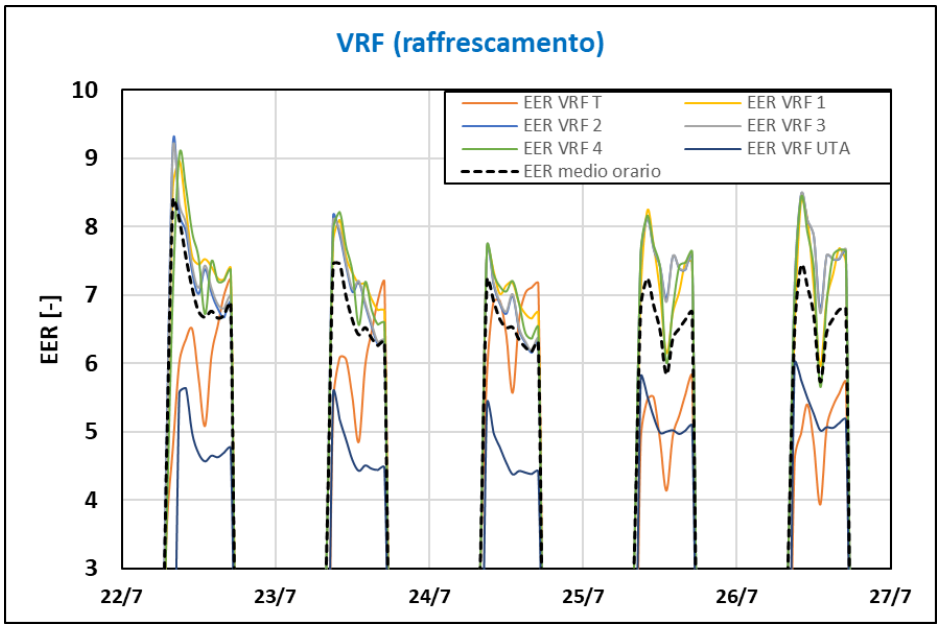


Figura 61. Rendimento orario dei singoli sistemi VRF in una tipica settimana estiva (configurazione 1-PIR, zona climatica D).

Per quanto riguarda le stanze significative, anche per la stagione di raffrescamento mostrata in Figura 62, le considerazioni sono analoghe a quelle relative alla stagione invernale: i ricambi d'aria sono gli stessi per ogni tipologia di stanza analizzata (poiché caratterizzata dalla medesima occupazione), mentre per le temperature, durante le ore in cui l'impianto è spento, si nota che la più bassa è quella del piano terra e la più alta è quella del piano intermedio. La spiegazione di questa distribuzione di temperatura è che il piano centrale è circondato sia sopra che sotto da ambienti climatizzati alla stessa temperatura, mentre piano terra e ultimo piano presentano maggiori superfici disperdenti in quanto confinanti rispettivamente con il terreno (con temperatura quasi costante tutto l'anno e più bassa in estate rispetto a quella dell'edificio) e con l'esterno. Inoltre, il tetto, oltre ad essere elemento disperdente, risulta anche ombreggiato dalla pensilina

dell'impianto fotovoltaico, che contribuisce favorevolmente ad abbassare il fabbisogno di raffrescamento. Non sono state rilevate ore di discomfort valutate secondo il metodo ASHRAE Standard 55 [65, 66].

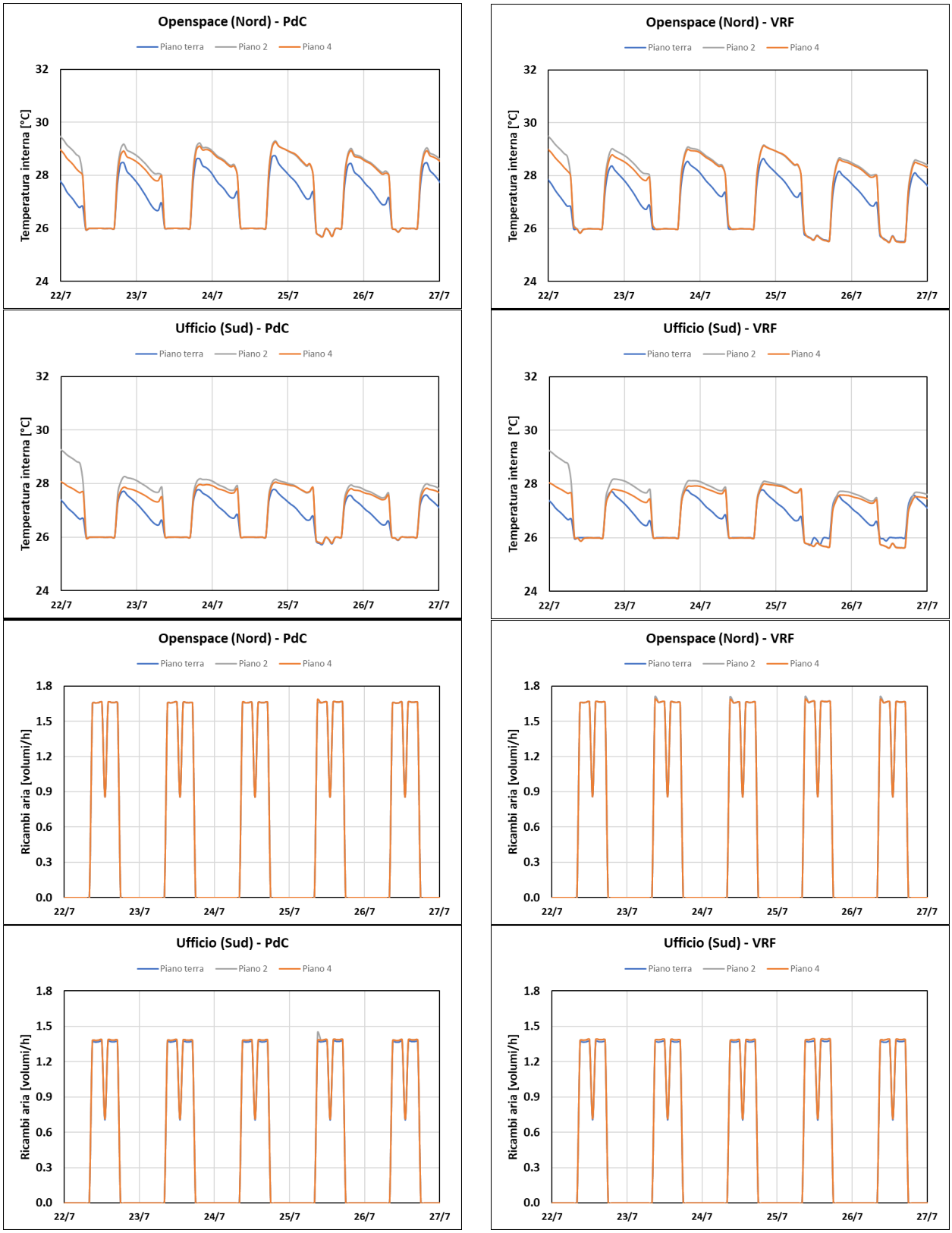
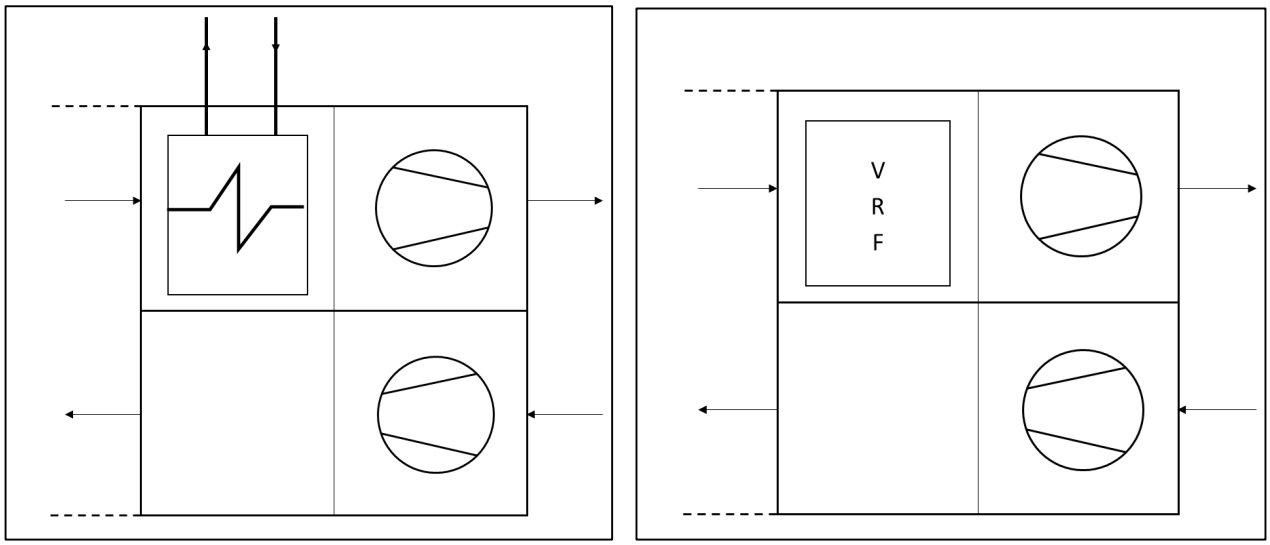


Figura 62. Temperatura media dell'aria e tasso di ricambio dell'aria per gli ambienti più significativi nella tipica settimana estiva (configurazione 1-PIR, zona climatica D).

5.3.3 Ventilazione meccanica e recupero di calore

La necessità di effettuare il ricambio periodico dell'aria negli ambienti climatizzati ha imposto l'utilizzo di una unità di trattamento aria come perno del sistema di ventilazione meccanica controllata.
In Figura 63 sono riportate le sezioni di pretrattamento e movimentazione illustrate in Figura 28 al fine di particolarizzare la prima delle due per i due schemi di impianto adottati: per l'impianto con pompa di calore aria-acqua, nell'UTA è prevista una batteria di scambio alimentata dall'acqua prodotta dalle pompe di calore stesse per riscaldare o raffreddare l'aria. Per quanto riguarda l'impianto a VRF, il pretrattamento dell'aria è affidato ad una unità VRF dedicata, di uguali caratteristiche e prestazioni delle cinque dedicate ai singoli piani.



PdC VRF

Figura 63. Schema funzionale di pretrattamento e movimentazione aria dell'unità di trattamento aria.

A tal proposito, è necessaria una precisazione: nella pratica di progettazione all'interno dell'UTA è sempre presente una batteria di post-riscaldamento. Tuttavia, dai risultati delle simulazioni, si è visto che nell'aria degli ambienti non risultano valori critici di umidità relativa o che superassero il 50%. Con una prova di simulazione fatta con le batterie di post-riscaldamento la deumidificazione incide sull'assorbimento elettrico solo del 7%. Per questi motivi si è ritenuto di non inserire la batteria di post-riscaldamento allo scopo di ottenere una semplificazione accettabile del modello e un conseguente snellimento degli oneri di calcolo e implementazione. All'interno dell'UTA è stata prevista una sezione per il recupero termico finalizzata alla riduzione dell'energia da produrre tramite pompa di calore aria-acqua o VRF e una per il ricircolo, entrambe schematizzate in Figura 64. La quantità di aria esterna in ingresso nell'UTA è fissata dalla normativa [45] e attraversa la sezione del recupero termico: se la temperatura dell'aria di ritorno dagli ambienti occupati è compresa tra quella dell'aria esterna e quella fissata per la mandata, viene attivato il passaggio nello scambiatore di calore, il quale permetterà di "avvicinare" la temperatura dell'aria esterna a quella di mandata, riducendo conseguentemente il carico della batteria di riscaldamento/raffrescamento. Successivamente, la portata d'aria complementare al ricambio viene garantita dal ricircolo e inviata alla batteria di pretrattamento.

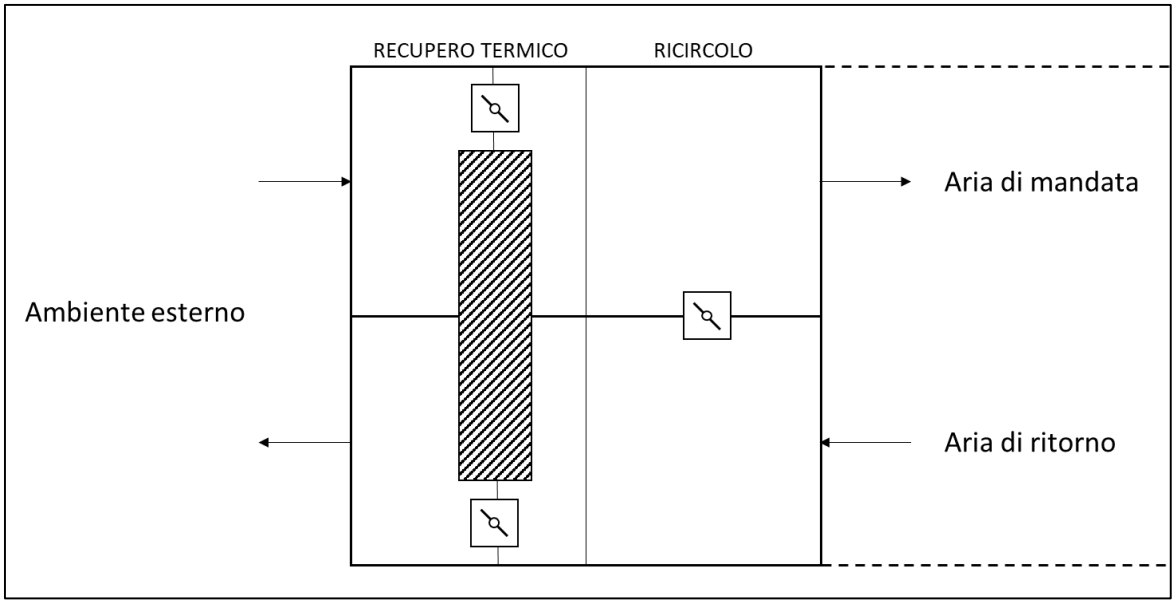


Figura 64. Schema funzionale del recupero termico e del ricircolo dell'unità di trattamento aria.

Inizialmente, è stato previsto il recupero termico per entrambe le stagioni in tutti i casi di studio, e sono stati confrontati di valori di energia termica evitata con e senza recupero, ovvero è stato calcolato il fabbisogno di energia termica per l'edificio e si è valutata l'incidenza percentuale del recupero nel seguente modo:

$$HR_{\%} = \frac{E_{TH,gen} - E_{TH,gen,HR}}{E_{TH,gen}} \times 100$$

In altre parole, si è calcolato il rapporto tra la differenza di energia termica generata da pompa di calore aria-acqua o VRF senza recupero nell'UTA e quella generata con il recupero diviso l'energia termica generata senza recupero. I risultati stagionali sono mostrati in Figura 65 per la configurazione 1 e in Figura 66 per la configurazione 2 in tutte le zone climatiche: oltre all'energia termica risparmiata per il riscaldamento di ogni caso di studio superiore al 50%, si nota anche che nelle zone climatiche E ed F l'apporto del recupero termico nella stagione di raffrescamento risulta negativo e, quindi, non favorevole. Dunque, per i casi relativi alle zone climatiche E ed F si è scelto di limitare l'utilizzo del recupero termico esclusivamente durante la stagione di riscaldamento.

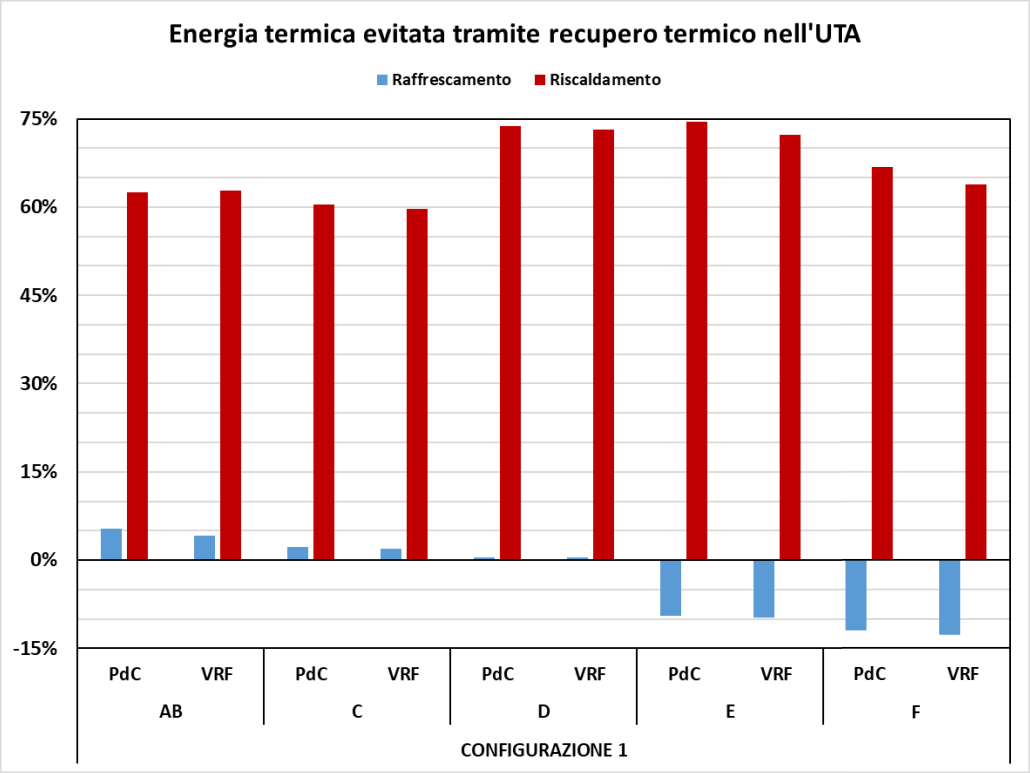


Figura 65. Stima preliminare per le stagioni di riscaldamento e raffrescamento dell'energia termica risparmiata grazie al recupero di calore nell'unità di trattamento aria (configurazione 1).

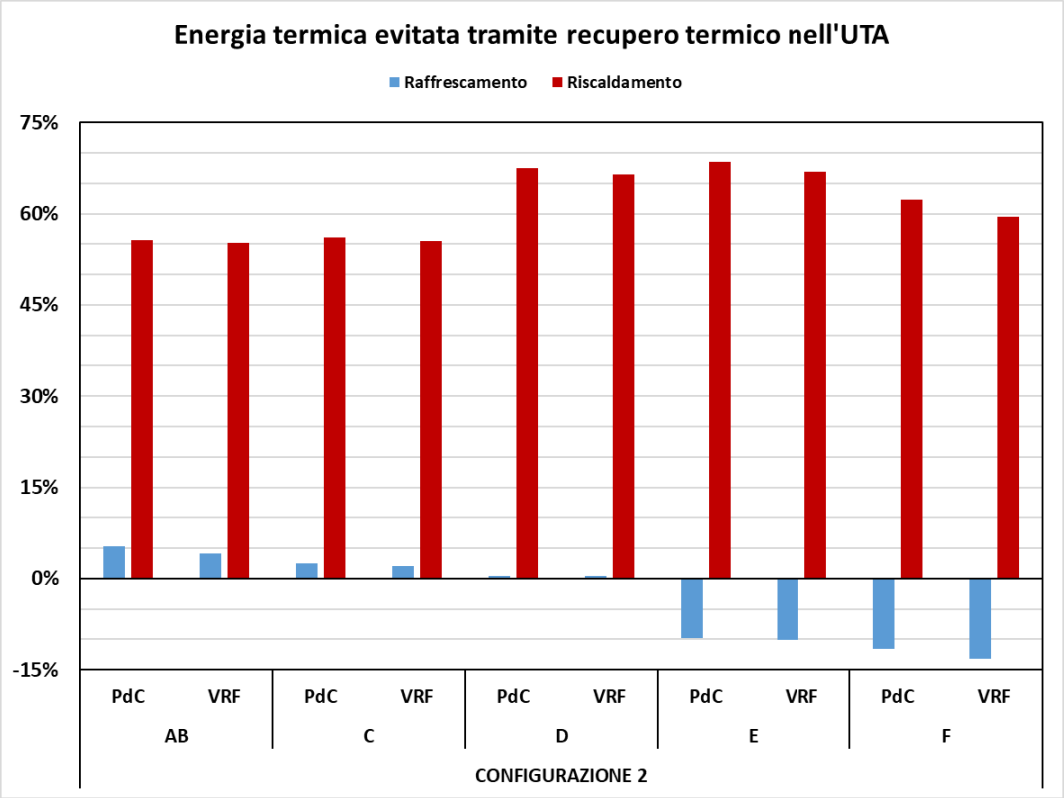


Figura 66. Stima preliminare per le stagioni di riscaldamento e raffrescamento dell'energia termica risparmiata grazie al recupero nell'unità di trattamento aria (configurazione 2)

6 Risultati energetici per l'edificio tipo ad uso ufficio nelle diverse zone climatiche

Dalle simulazioni condotte e dai risultati di dettaglio ottenuti, in seguito alla definizione dei modelli e alla verifica della loro attendibilità, è stato possibile ricavare in forma aggregata, attraverso un processo di elaborazione dei dati, i fabbisogni termici ed energetici degli edifici, oltre ad alcune considerazioni sull'efficienza degli impianti implementati ed alla stima della percentuale di copertura del fabbisogno con i sistemi di produzione da fonti rinnovabili e i sistemi di accumulo installati. Sono state valutate, inoltre, le richieste di integrazione dalla rete e i surplus di energia prodotti per capire se entrambi questi contributi possono essere utili per considerare gli edifici analizzati a tutti gli effetti Zero energy o Net Zero Energy, se non Positive Buildings.

Si è condotta, quindi, l'analisi comparativa di tutti gli scenari analizzati nelle diverse zone climatiche, ottenendo la quantificazione delle prestazioni energetiche degli edifici stessi e verificando o meno il raggiungimento dell'obiettivo ZEB, sia su base mensile che su base annuale, durante le stagioni considerate di riscaldamento e raffrescamento.

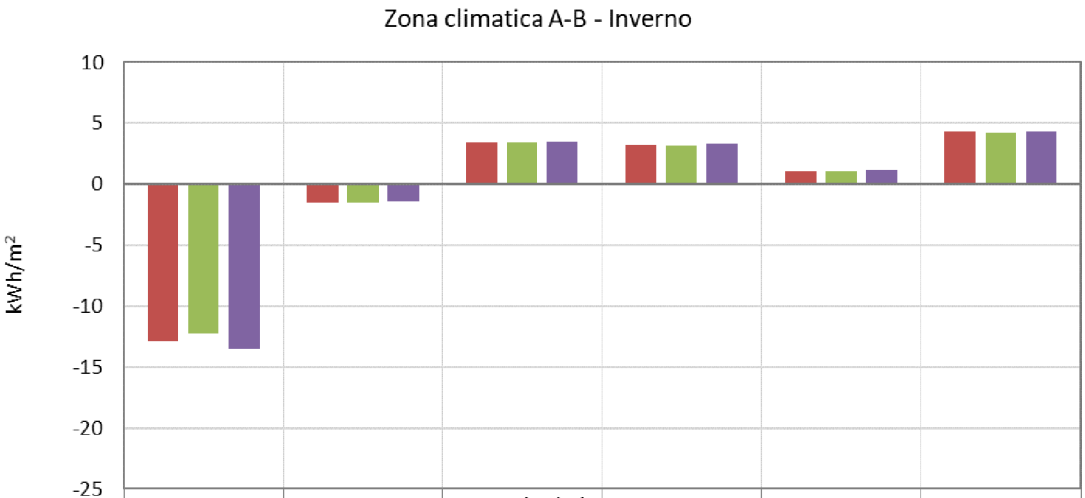
6.1 Valutazione del fabbisogno termico

Di seguito si riportano i risultati ottenuti dalla simulazione delle differenti configurazioni di involucro per i periodi invernale ed estivo. Le configurazioni analizzate, riassunte qui brevemente in quanto riportate già nel par. 5.1 e con riferimento alle strategie di involucro adottate nel par. 5.1.2, presentano sostanzialmente l'utilizzo di una facciata continua vetrata (configurazione 1) e una tamponatura opaca (configurazione 2).
Per la facciata continua vetrata, essendo stata adottata una tecnologia che prevede l'utilizzo di pannelli compositi con rivestimento in vetro e substrati isolanti e opachi per limitare i problemi di dispersione in inverno e surriscaldamento in estate, sono state analizzate due varianti.
La prima configurazione vetrata (1-Var) prevede l'utilizzo di pannelli isolanti di lana di roccia di spessore variabile a seconda delle zone climatiche e delle prescrizioni sui valori di trasmittanza derivanti dai limiti di legge riportati nel Decreto Requisiti Minimi [15]. Come già discusso, tale soluzione non adempie ai requisiti di massa superficiale, ma ai fini dell'analisi risulta interessante riportare i risultati conseguiti per i fabbisogni termici in modo da ottenere una disamina più ampia di tutto ciò che determinano le scelte relative all'involucro effettuate per i casi studio.
La seconda configurazione vetrata (1-PIR) adempie, invece, a tutte le verifiche di legge, compreso il rispetto dei valori prescritti di trasmittanza termica periodica, e propone una stratigrafia di chiusura verticale opaca caratterizzata dalle stesse proprietà termofisiche per tutte le zone climatiche analizzate. Ciò determina, soprattutto per le zone più calde (A-B, C e D) un valore di trasmittanza molto più bassa rispetto ai limiti di legge, influenzando il comportamento dell'involucro nelle stagioni analizzate, come si vedrà di seguito.
Per la configurazione 2, come più volte detto, si è invece adottata una stratigrafia di tipo tradizionale con sistema di isolamento a cappotto, che offre la possibilità di analizzare una tipologia di involucro opaco altamente diffusa sul territorio nazionale.
Altra differenza sostanziale tra le configurazioni di tipo 1 e 2 è data dalla presenza, nell'edificio vetrato, della pensilina aggettante sul tetto, a servizio dell'installazione di una superficie più ampia di fotovoltaico. Ciò è fondamentale anche dal punto di vista degli ombreggiamenti e degli scambi di calore che intercorrono a livello di copertura e, pertanto, influenza i fabbisogni termici dell'intero edificio.

6.1.1 Contributi di bilancio termico in regime estivo e invernale

Le considerazioni appena esposte sono propedeutiche all'analisi dei risultati dei fabbisogni termici di seguito riportata e che, in prima istanza, analizza i singoli contributi del bilancio termico in inverno e in estate dell'edificio, messi a confronto nei tre scenari analizzati e per tutte le zone climatiche, e, successivamente, analizza i fabbisogni termici per riscaldamento e raffrescamento complessivi, oltre ai carichi latenti totali.
Prima di analizzare i risultati nel dettaglio, sono d'obbligo alcune premesse che ne facilitano la comprensione.

Considerazione a livello generale, che accomuna tutte le zone climatiche e tutte le configurazioni, riguarda i contributi di apporti solari, occupazione, illuminazione e apparecchiature elettriche (computer e dispositivi). Tali contributi differiscono di poco in termini percentuali in quanto i modelli analizzati presentano sostanzialmente gli stessi settaggi e profili di utilizzo e sono, quindi, equivalenti in tutti gli input che sostanzialmente influenzano tali grandezze.
Nel dettaglio, per quanto riguarda gli apporti solari, si ricorda che il profilo di ombreggiamento in entrambe le tipologie di facciata adottate è settato in modo tale da adattarsi dinamicamente alla radiazione solare specifica per ciascuna zona e attivarsi durante le ore diurne. Ciò è utile a contrastare gli effetti di un eccessivo irraggiamento all'interno dell'edificio in estate e ottimizzarlo, invece, in inverno. Ciò neutralizza le criticità relative ai guadagni termici da apporti solari, soprattutto nel caso della facciata continua vetrata, rendendola performante e competitiva rispetto a quella opaca. Si ricorda, infatti, che le differenti configurazioni analizzate sono in ogni caso evolute, ideate appositamente per raggiungere l'obiettivo ZEB e, quindi, dotate di tutti gli accorgimenti necessari ad ottenere elevate prestazioni energetiche in entrambe le stagioni (invernale ed estiva).
Per quanto concerne, invece, i contributi derivanti da occupazione e apparecchiature elettriche, per entrambi gli aspetti sono stati fissati profili di utilizzo e schedule appositi, pertanto essi risultano confrontabili con leggeri scostamenti dovuti alle approssimazioni di calcolo e alla normalizzazione degli indici rispetto alla superficie (parametro indispensabile ad ottenere un ordine di grandezza facilmente confrontabile dei singoli contributi e dei fabbisogni totali degli edifici analizzati).
Per il contributo derivante dall'illuminazione, le differenze leggermente più marcate che si riscontreranno nell'analisi sono dovute al fatto che il profilo di accensione e spegnimento delle luci è stato impostato come profilo dinamico dipendente dalla luce naturale effettiva che penetra all'interno dell'edificio, attraverso il controllo "a gradiente" già descritto in precedenza nel par. 0. Inoltre, a causa della sostanziale variazione di spessore delle chiusure verticali esterne e della localizzazione degli infissi tra gli scenari analizzati, soprattutto nella configurazione 2 opaca si avrà un minore tasso di daylighting e, quindi, una maggiore necessità di utilizzare il sistema di illuminazione artificiale con conseguente incremento di tale contributo rispetto alla configurazione 1 vetrata.
Il contributo al bilancio delle infiltrazioni esterne, invece, è tendenzialmente ridotto in quanto in tutti i modelli analizzati sono stati minimizzati i ponti termici, mentre quello della ventilazione è ascritto ai parametri impostati per il ricambio d'aria garantito a monte dall'impianto di ventilazione meccanizzata.
Infine, si deve tener conto del differente periodo di climatizzazione invernale considerato per le varie zone climatiche che determina ulteriori differenze soprattutto in termini di apporti termici da apparecchiature elettriche.
Tuttavia, il contributo che maggiormente varia tra le combinazioni, pertanto, coerentemente con quanto implementato, è sostanzialmente quello relativo all'involucro.
Procedendo, quindi, con una disamina più accurata dei risultati per le singole zone climatiche, in zona A-B, località Palermo (Figura 67), l'involucro rappresenta il fattore che maggiormente influisce sul bilancio termico dell'edificio in regime invernale, mentre i guadagni termici derivanti da apporti solari, occupazione e apparecchiature elettriche sono pressoché reciprocamente confrontabili. L'involucro della configurazione 2 con isolamento a cappotto è meno performante di quello della configurazione 1 vetrata passando da un contributo di 13,50 kWh/m^2 della configurazione 2A-B a 12,92 kWh/m^2 della configurazione 1A-B-Var e 12,28 kWh/m^2 della 1A-B-PIR. Ciò dipende soprattutto dai valori di trasmittanza delle pareti verticali corrispondente a 0,42 W/m^{2}K nel caso 2A-B contro 0,18 W/m^{2}K nel caso 1A-B-PIR.



	Involucro	Infiltrazione esterna	Apporti Solari attraverso Finestre Esterne	Occupazione	Illuminazione Generale	Computer + Dispositivi
1A-B-Var	-12,92	-1,51	3,45	3,27	1,08	4,26
1A-B-PIR	-12,28	-1,53	3,44	3,18	1,06	4,22
2A-B	-13,50	-1,41	3,46	3,35	1,14	4,27

Figura 67. Edificio ad uso ufficio in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di bilancio termico invernale (in kWh/m²)

Le pareti delle configurazioni vetrate disperdono il 43% (1A-B-Var) e il 72% (1A-B-PIR) in meno rispetto alla configurazione 2. Inoltre, in inverno, gli infissi favoriscono le dispersioni nelle configurazioni 1 a facciata continua rispetto alla configurazione 2 opaca, che disperde l'8% e l'11% in meno delle configurazioni 1A-B-Var e PIR; per i solai di copertura, a parità di stratigrafie tra le due configurazioni, si nota che il tetto della configurazione 2 disperde circa il 4% in meno rispetto alla configurazione 1A-B-Var e il 6% in meno rispetto alla 1A-B-PIR (Figura 68).

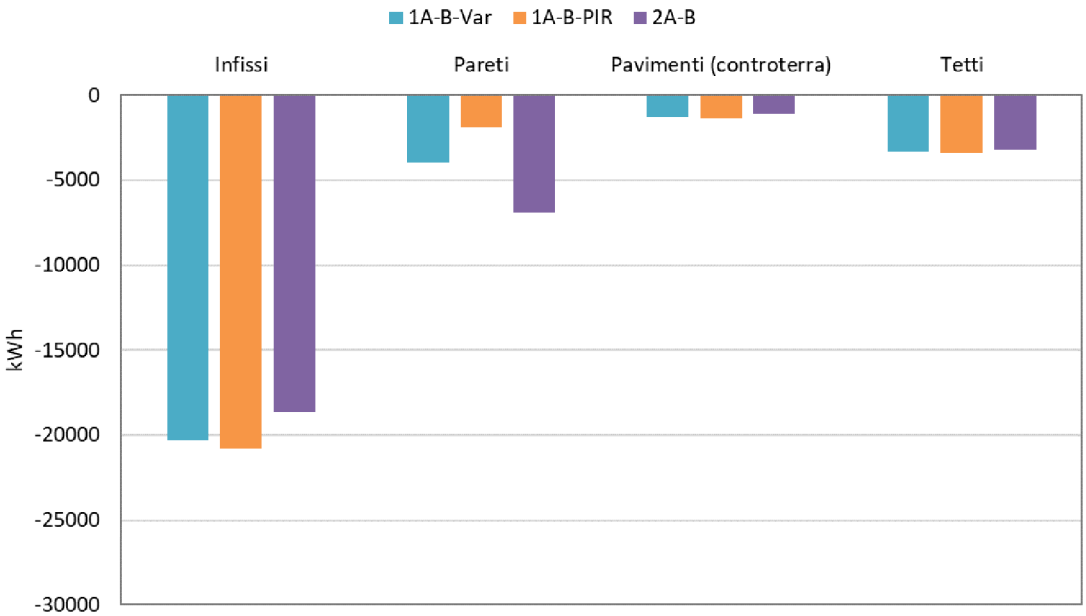
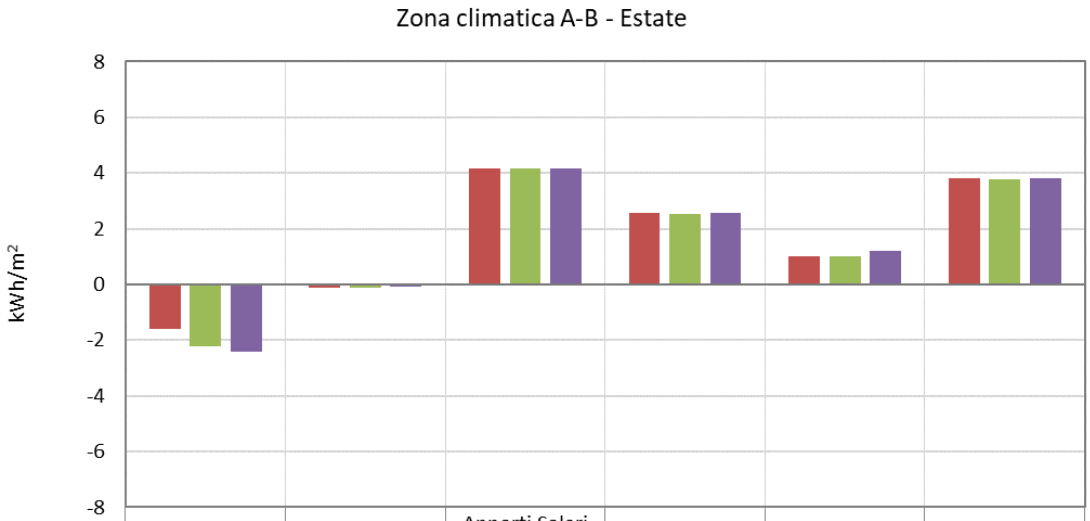


Figura 68. Edificio ad uso ufficio in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di involucro al bilancio termico (in kWh totali per la stagione di riscaldamento)

Durante l'estate, la situazione si inverte e il bilancio si fa più complesso (Figura 69). Gli apporti solari e i guadagni termici dovuti ai dispositivi elettrici rappresentano la maggiore criticità seguiti dal contributo dovuto all'occupazione. L'infiltrazione esterna risulta, invece, un contributo quasi ininfluente in quanto sono minimizzati i ponti termici (condizione questa favorevole in inverno, ma poco favorevole in estate), mentre l'involucro rappresenta l'unico apporto che consente di ridurre il fabbisogno termico per raffrescamento.



	Involucro	Infiltrazione esterna	Apporti Solari attraverso Finestre Esterne	Occupazione	Illuminazione Generale	Computer + Dispositivi
1A-B-Var	-1,62	-0,13	4,16	2,55	1,02	3,81
1A-B-PIR	-2,23	-0,10	4,15	2,52	0,99	3,77
2A-B	-2,40	-0,08	4,16	2,56	1,20	3,81

Figura 69. Edificio ad uso ufficio in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di bilancio termico estivo (in kWh/m²)

In caso di regime estivo, è interessante notare come le chiusure verticali esterne rappresentino un elemento critico nel bilancio (Figura 70). I contributi totali sull'intera stagione di riscaldamento sono il risultato della fluttuazione di flussi entranti e uscenti a seconda delle ore del giorno, delle caratteristiche termofisiche e stratigrafiche scelte e, in particolar modo, della capacità termica delle strutture. Il tutto, verificato sugli andamenti giornalieri e orari, si traduce in un'alternanza di ore in cui l'involucro protegge l'ambiente interno dall'ingresso del calore grazie all'isolante, all'inerzia termica delle strutture e allo sfasamento dell'onda termica, e ore in cui, invece, si ha un effetto gabbia che imprigiona il calore (anche per la presenza di un isolamento così elevato) penetrato all'interno dell'edificio, ad esempio per irraggiamento.
Le pareti verticali delle configurazioni vetrate in zona A-B presentano un apporto di calore all'interno dell'edificio stesso maggiore rispetto alla configurazione 2. Quest'ultima contribuisce infatti al guadagno termico del bilancio in quantità inferiore dell'89% rispetto al caso 1A-B-Var e del 39% rispetto al caso 1A-B-PIR. A ulteriore riprova di tale risultato, si noti che la capacità termica areica delle pareti verticali ha valori intorno a 34 kJ/m²K per la configurazione 1A-B-Var, 17 kJ/m²K per la 1A-B-PIR e 50kJ/m²K per la configurazione 2, con trasmittanza termica periodica pari a 0,36 W/m²K (1A-B-Var), 0,087 W/m²K (1A-B-PIR) e 0,045 W/m²K (2A-B). Per quanto riguarda la copertura, l'ombreggiamento fornito dalla pensilina si rivela un elemento migliorativo nelle configurazioni 1; allo stesso modo, per gli infissi, il contributo è più favorevole in estate nelle stesse configurazioni.

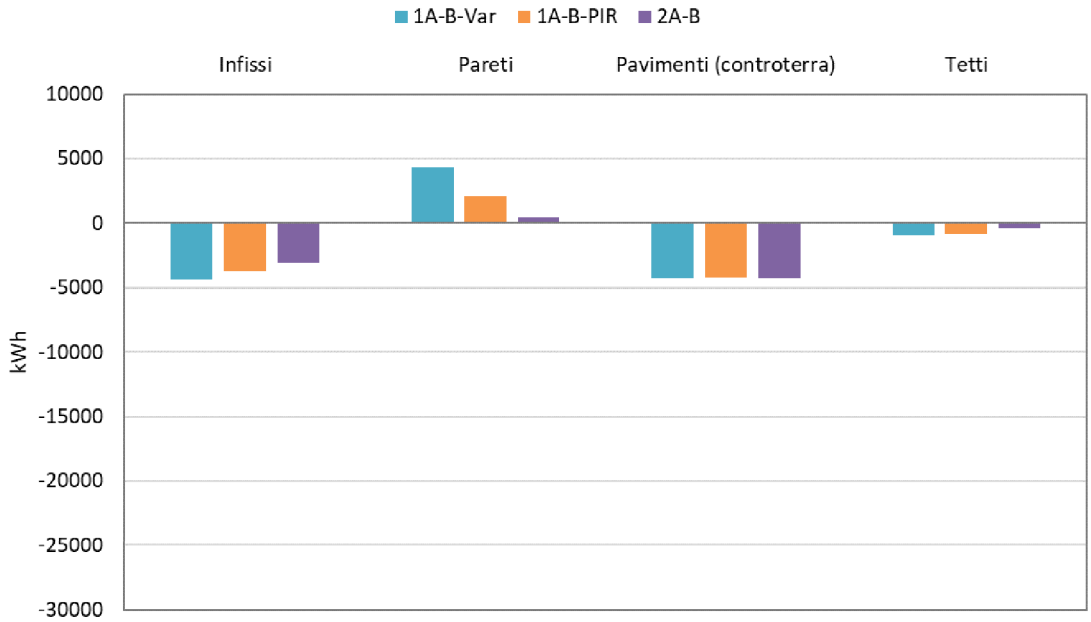
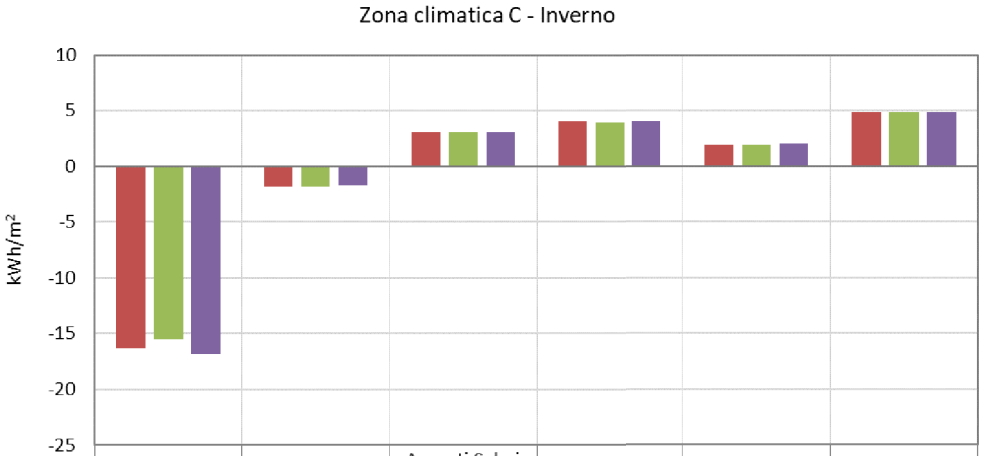


Figura 70. Edificio ad uso ufficio in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di involucro al bilancio termico (in kWh totali per la stagione di raffrescamento)

Anche in zona climatica C, valgono considerazioni simili alle precedenti, ma aumentano tutti i contributi di fabbisogno invernale e diminuiscono quelli di fabbisogno estivo rispetto alla zona A-B, a causa delle differenti condizioni climatiche. L'involucro della configurazione 2 è meno performante rispetto alla configurazione 1 PIR (si passa, infatti, da 16,82 kWh/m^2 a 15,47 kWh/m^2), mentre le differenze tra configurazione 2 e 1Var non sono così evidenti (Figura 71). Ciò è soprattutto dovuto al fatto che il valore di trasmittanza delle pareti verticali è di 0,33 W/m^{2}K in entrambi i casi e questo determina prestazioni alquanto simili tra i due involucri. Ciò che differisce è la capacità di trasmissione, irraggiamento e conduzione dei materiali adottati nelle due configurazioni che determinano un leggero miglioramento in inverno nella configurazione vetrata.



	Involucro	Infiltrazione esterna	Apporti Solari attraverso Finestre Esterne	Occupazione	Illuminazione Generale	Computer + Dispositivi
1C-Var	-16,27	-1,77	3,04	4,00	1,94	4,87
1C-PIR	-15,47	-1,80	3,04	3,94	1,91	4,84
2C	-16,82	-1,72	3,05	4,05	2,02	4,87

Figura 71. Edificio ad uso ufficio in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di bilancio termico invernale (in kWh/m^2)

Attraverso gli infissi, le configurazioni 1 con facciata vetrata disperdono il 3% (1C-PIR) e il 6% (1C-Var) in più rispetto alla configurazione 2C, mentre i solai di copertura si comportano in modo quasi equivalente con uno scostamento dell'1% in configurazione 1C-PIR. Le pareti verticali delle configurazioni 1 disperdono il 38% (1C-Var) e il 72% (1C-PIR) in meno rispetto alla configurazione 2 per le proprietà termofisiche da cui sono contraddistinte (Figura 72).

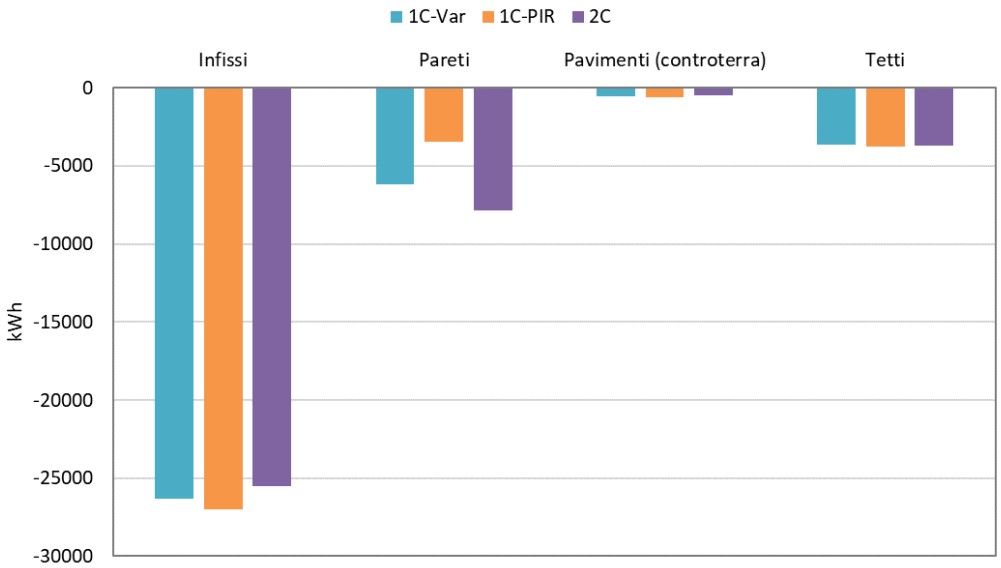
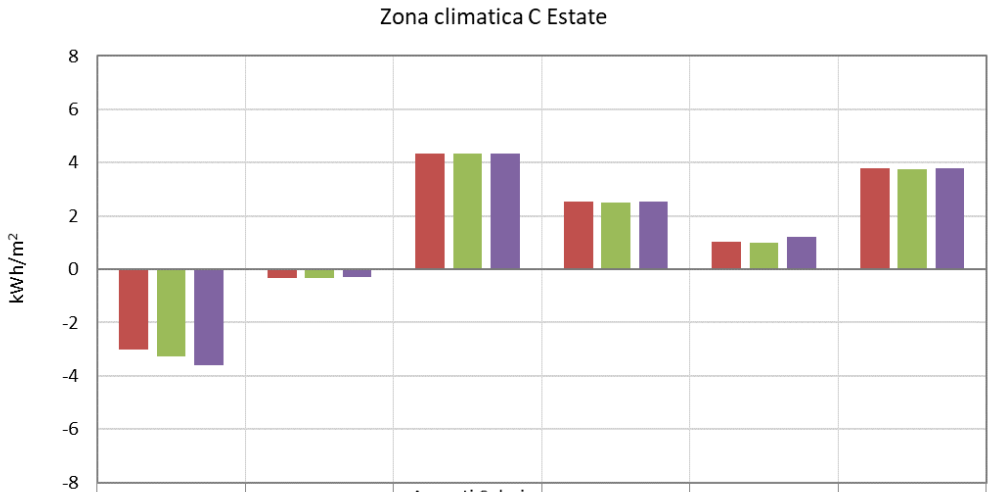


Figura 72. Edificio ad uso ufficio in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di involucro al bilancio termico (in kWh totali per la stagione di riscaldamento)

Durante l'estate, ferme restando le considerazioni già valide per la zona climatica A-B, con apporti solari e contributi dovuti ai dispositivi utilizzati preponderanti, l'involucro ha un'influenza favorevole sul bilancio in termini globali stagionali (Figura 73), in un range che varia da 3,6 a 3 kWh/m^2 rispettivamente per 2C e 1C-Var.



	Involucro	Infiltrazione esterna	Apporti Solari attraverso Finestre Esterne	Occupazione	Illuminazione Generale	Computer + Dispositivi
1C-Var	-3,00	-0,33	4,33	2,53	1,04	3,79
1C-PIR	-3,27	-0,32	4,32	2,51	1,01	3,77
2C	-3,60	-0,30	4,34	2,53	1,23	3,79

Figura 73. Edificio ad uso ufficio in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di bilancio termico estivo (in kWh/m^2)

Tuttavia, a differenza degli altri componenti di involucro, che agiscono d'estate come contributo globale stagionale negativo sul bilancio e, quindi, favorevole, per quanto riguarda le pareti verticali si assiste, nelle configurazioni di tipo 1, ad un'inversione del flusso, risultato della somma dei contributi orari di segno discorde durante le diverse ore della giornata, e, pertanto, ad un apporto complessivo di calore al bilancio del fabbisogno termico in raffrescamento. L'inerzia e la capacità termica delle pareti anche in questo caso contribuiscono, invece, a rendere più performante la prestazione dell'involucro opaco della configurazione 2 che riesce, nel totale stagionale, a garantire un contributo favorevole al bilancio stesso (Figura 74). In questo caso, la capacità termica areica delle pareti verticali è di circa 34,8 kJ/m^{2}K per la configurazione 1C -Var e 50,1 kJ/m^{2}K per la configurazione 2C, con trasmittanza termica periodica pari a 0,29 W/m^{2}K (1C-Var), e 0,03 W/m^{2}K (2C). Come in zona climatica A-B, l'ombreggiamento derivante dalla pensilina sulla copertura e le dispersioni attraverso l'involucro vetrato nelle configurazioni di tipo 1 contribuiscono favorevolmente al bilancio termico estivo dell'edificio.

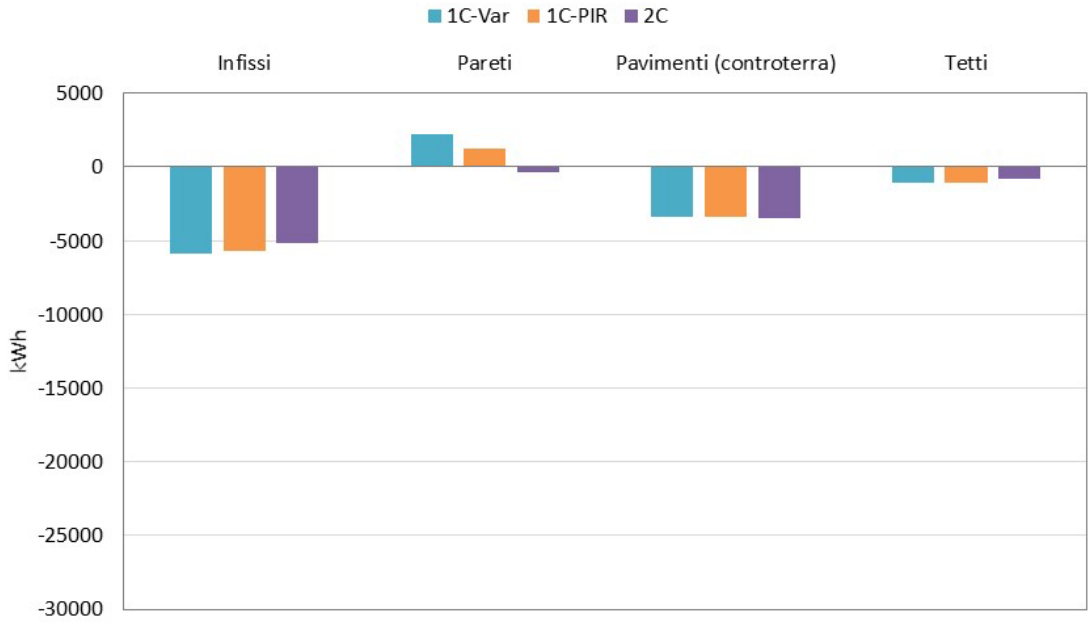


Figura 74. Edificio ad uso ufficio in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di involucro al bilancio termico (in kWh totali per la stagione di raffrescamento)

La zona climatica D mostra un progressivo aumento dei singoli contributi in regime invernale (Figura 75) dovuti alle differenti condizioni climatiche e al periodo più lungo di riscaldamento, che va dal 1° novembre al 15 aprile. Ciò determina un aumento progressivo del contributo dovuto alle apparecchiature elettriche (proporzionale al numero di giorni considerati nel calcolo), che si attesta intorno a 5,28 kWh/m^2. Si assiste anche ad un leggero aumento del contributo di illuminazione generale (1,72 kWh/m^2) rispetto alla zona climatica A-B (1,08 kWh/m^2) e una diminuzione rispetto alla zona C (1,94 kWh/m^2); ciò è legato ai differenti livelli e contributi della radiazione solare nelle diverse zone, in quanto il sistema di illuminazione artificiale si attiva a seconda della necessità effettiva e del daylighting calcolato.
Il contributo di involucro si attesta attorno a 17,99 kWh/m^2 per la 1D-Var, 17,29 kWh/m^2 per la 1D-PIR e 18,70 kWh/m^2 per la 2D, con andamenti simili a quelli già analizzati per le altre zone climatiche. Anche in questo caso, l'involucro della configurazione 2D è leggermente meno performante. Si ricorda che i valori di trasmittanza delle pareti verticali sono pari a 0,279 W/m^{2}K per la configurazione 1D-Var e 0,284 W/m^{2}K per la 2D, mentre il valore per la configurazione 1D-PIR è sempre di 0,18 W/m^{2}K.

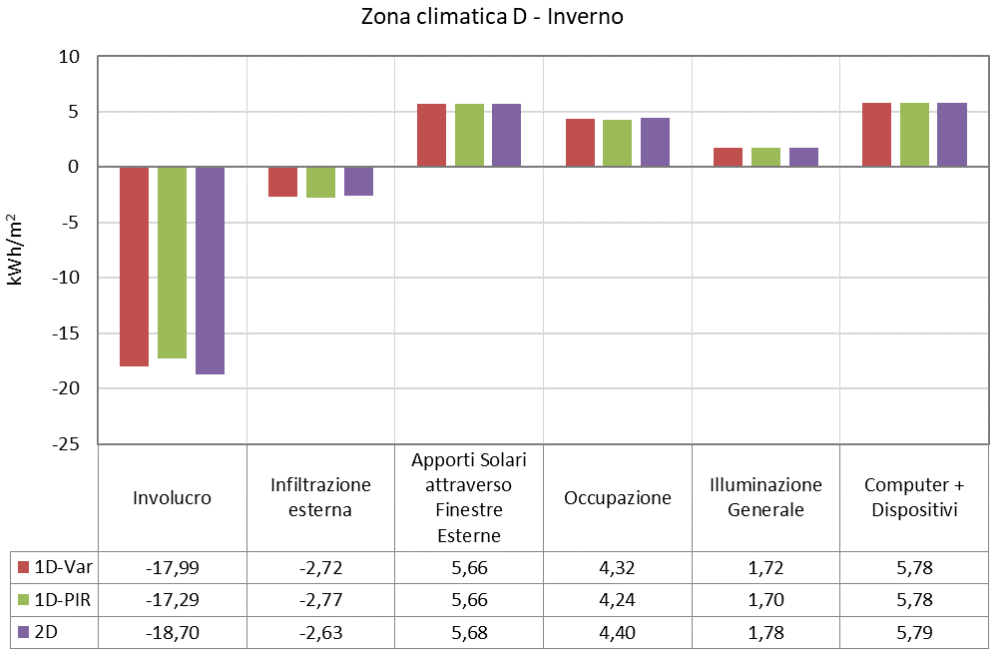


Figura 75. Edificio ad uso ufficio in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di bilancio termico invernale (in kWh/m²)

Anche in zona climatica D, gli infissi delle configurazioni di tipo 1 disperdono il 4% (1PIR) e 6% (1Var) in più rispetto alla configurazione 2, così come i solai di copertura si comportano in modo quasi equivalente in tutte e tre le configurazioni. Le pareti verticali delle configurazioni 1 disperdono il 21% (1Var) e il 56% (1PIR) in meno rispetto alla configurazione 2 (Figura 76).

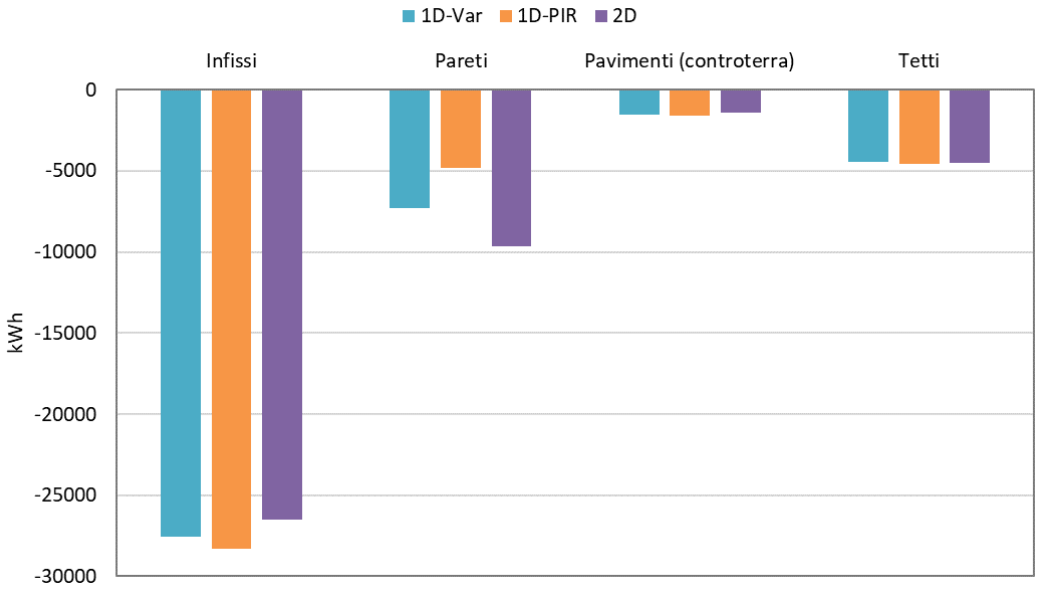


Figura 76. Edificio ad uso ufficio in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di involucro al bilancio termico (in kWh totali per la stagione di riscaldamento)

Durante l'estate, si nota come gli apporti solari siano maggiori rispetto alle altre zone climatiche con un contributo pari circa a 6,2 kWh/m², mentre il contributo favorevole dell'involucro è estremamente ridotto raggiungendo un massimo (in valore assoluto) di 1,24 kWh/m² per la configurazione 2D (Figura 77).

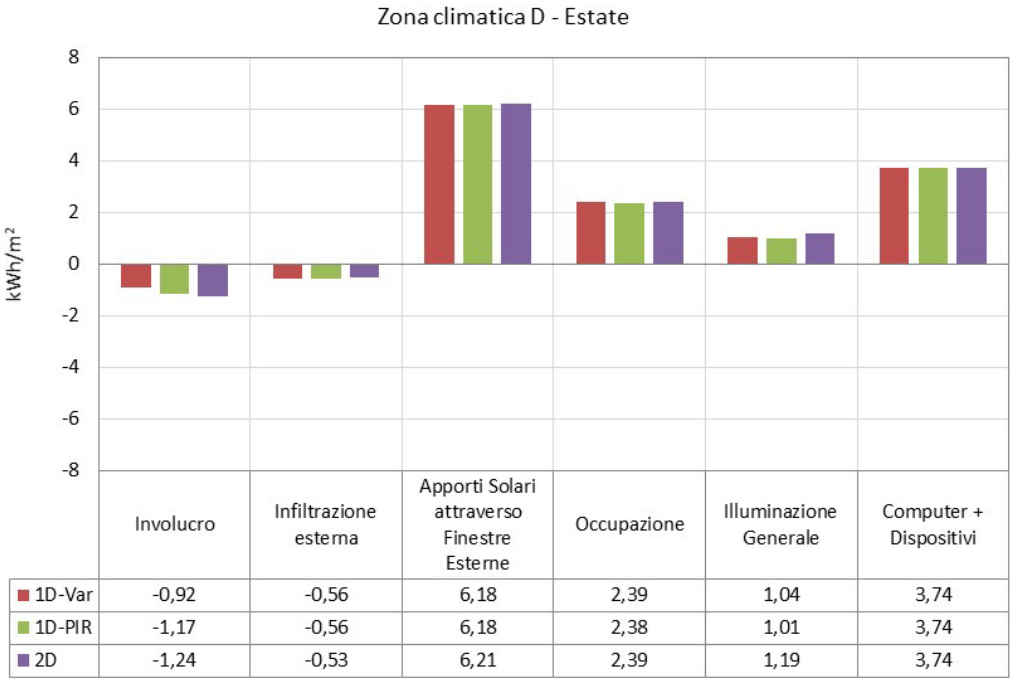


Figura 77. Edificio ad uso ufficio in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di bilancio termico estivo (in kWh/m²)

Come si può vedere in Figura 78, ciò è dovuto al fatto che i contributi disperdenti (quindi favorevoli in condizioni estive) dovuti agli infissi e alla chiusura orizzontale di base per le tre configurazioni in zona D si riducono, mentre il totale stagionale del contributo delle chiusure verticali è sempre positivo (quindi apporta calore all'edificio) anche nella configurazione 2, con le dovute differenze dettate soprattutto dalle differenti caratteristiche termofisiche dei tre pacchetti costruttivi applicati (trasmittanza termica periodica pari a 0,233 W/m²K per la configurazione 1D-Var e 0,022 W/m²K per la configurazione 2D).
I risultati ottenuti per la zona D sono, quindi, estremamente influenzati dai dati climatici utilizzati, che soprattutto in regime estivo rivelano una condizione media di temperature abbastanza elevate ed alti livelli di radiazione solare. In questo caso, quindi, l'utilizzo di stratigrafie con trasmittanze più basse (configurazione 1D-PIR) non acuiscono di molto il problema del surriscaldamento estivo, mentre sono determinanti per un fabbisogno minore in regime invernale.

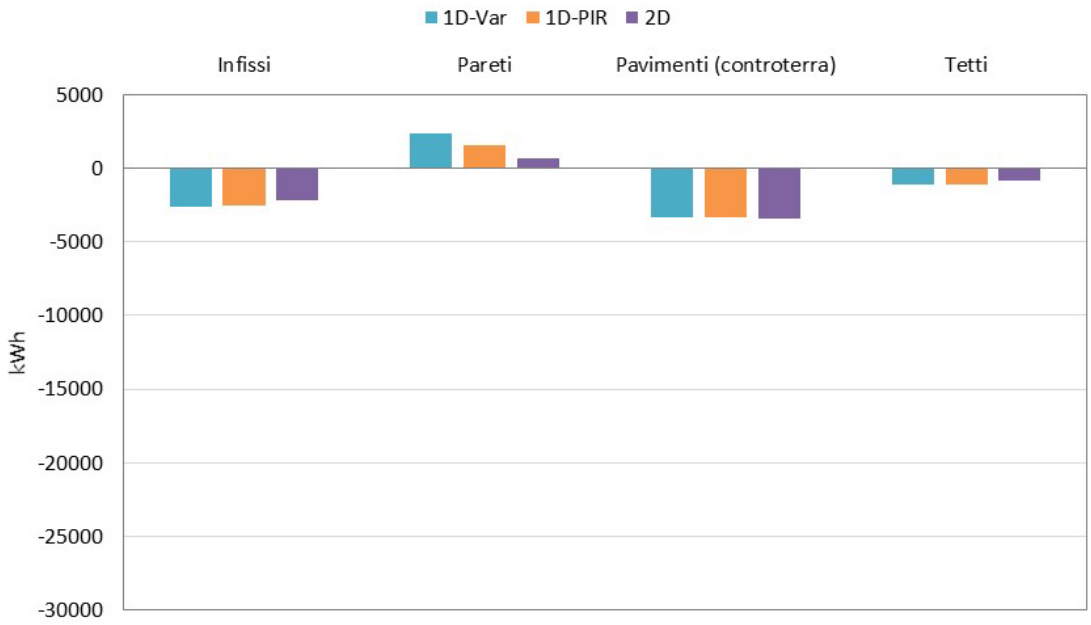
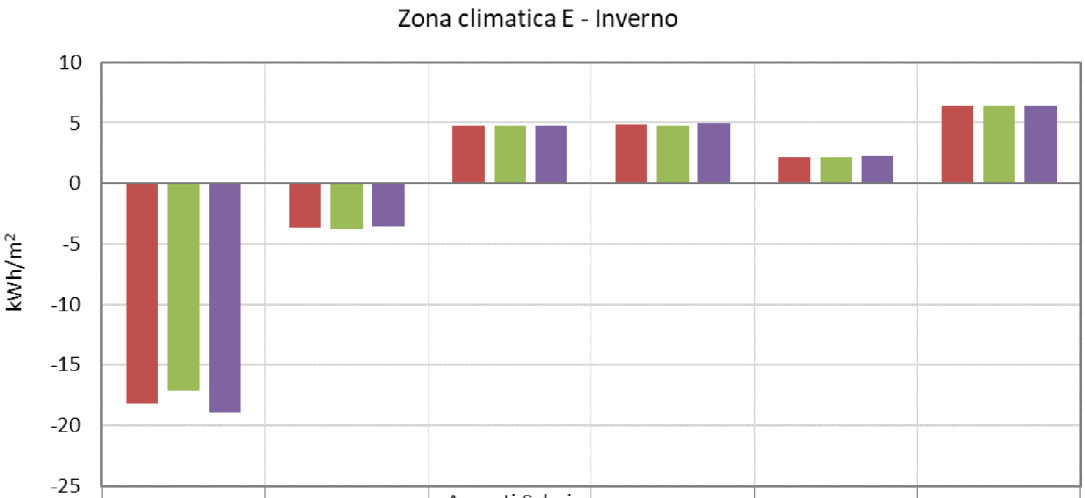


Figura 78. Edificio ad uso ufficio in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di involucro al bilancio termico (in kWh totali per la stagione di raffrescamento)

In zona climatica E (Figura 79), durante la stagione di riscaldamento (dall'1 ottobre al 15 aprile), si nota come il contributo degli apporti solari (4,8 kWh/m^2) diminuisca rispetto alla zona D mentre aumenta rispetto alle zone A-B e C. Ciò è dovuto al fatto che il sistema di controllo solare impostato dipende dal valore soglia della radiazione solare, e quindi le schermature durante tutto il periodo si attivano meno rispetto alle altre zone climatiche consentendo un maggiore apporto all'interno dell'edificio stesso che viene in aiuto in termini di fabbisogno termico invernale. Coerentemente, l'illuminazione generale aumenta (2,2 kWh/m^2) in quanto i livelli di radiazione solare sono inferiori al valore soglia, così come definito in input, e così come non riescono a determinare l'attivazione delle schermature, allo stesso modo determinano il bisogno di illuminazione artificiale per più ore durante la stagione invernale.
Le apparecchiature elettriche presentano, invece, un contributo maggiore rispetto alle altre zone (6,4 kWh/m^2), in quanto la stagione di riscaldamento è più lunga in termini di durata.
Come ci si aspetta, l'involucro della configurazione 1E-PIR (17,14 kWh/m^2) risulta migliore in regime invernale rispetto al caso 1E-Var (18,18 kWh/m^2) e al caso 2E (18,91 kWh/m^2).



	Involucro	Infiltrazione esterna	Apporti Solari attraverso Finestre Esterne	Occupazione	Illuminazione Generale	Computer + Dispositivi
1E-Var	-18,18	-3,65	4,78	4,89	2,15	6,39
1E-PIR	-17,14	-3,75	4,78	4,79	2,14	6,40
2E	-18,91	-3,58	4,80	4,96	2,26	6,39

Figura 79. Edificio ad uso ufficio in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di bilancio termico invernale (in kWh/m²)

In dettaglio (Figura 80), i contributi derivanti dagli infissi e dalle pareti sono i più significativi in termini di dispersione e seguono le stesse tendenze riscontrate nelle altre zone climatiche.
Gli infissi delle configurazioni di tipo 1 disperdono il 3% (1E-Var) e il 6% (1E-PIR) in più rispetto alla configurazione 2, mentre le pareti verticali disperdono rispettivamente il 16% (1E-Var) e il 44% (1E-PIR) in meno. Nelle zone più fredde, ancora una volta l'adozione di pacchetti di involucro caratterizzati da basso valore di trasmittanza (0,258 W/m²K per 1E-Var, 0,18 W/m²K per 1E-PIR e 0,244 W/m²K per 2E) diventa fondamentale per ridurre il fabbisogno termico, tanto che la configurazione 1E-PIR determina un decremento delle dispersioni di involucro pari al 6% rispetto alla 1E-Var e al 10% rispetto alla 2E.

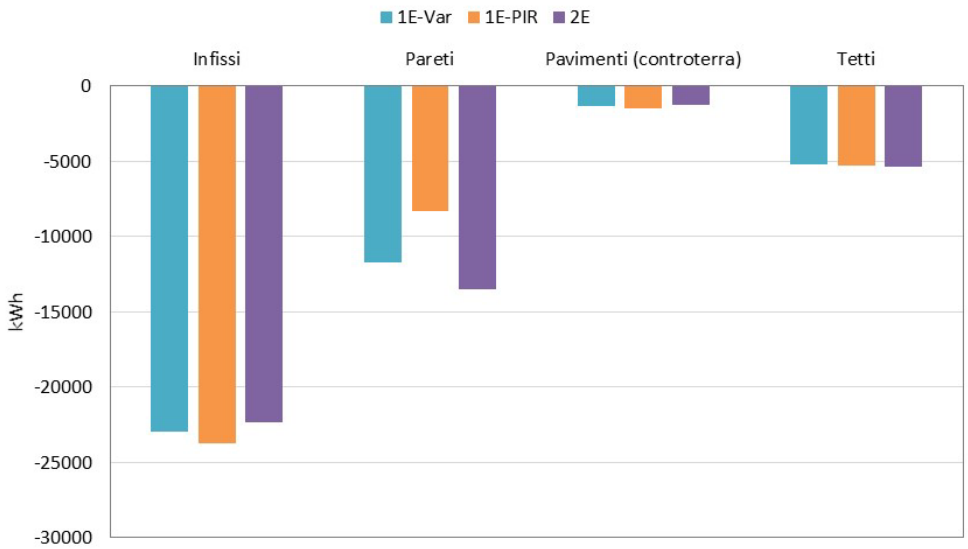
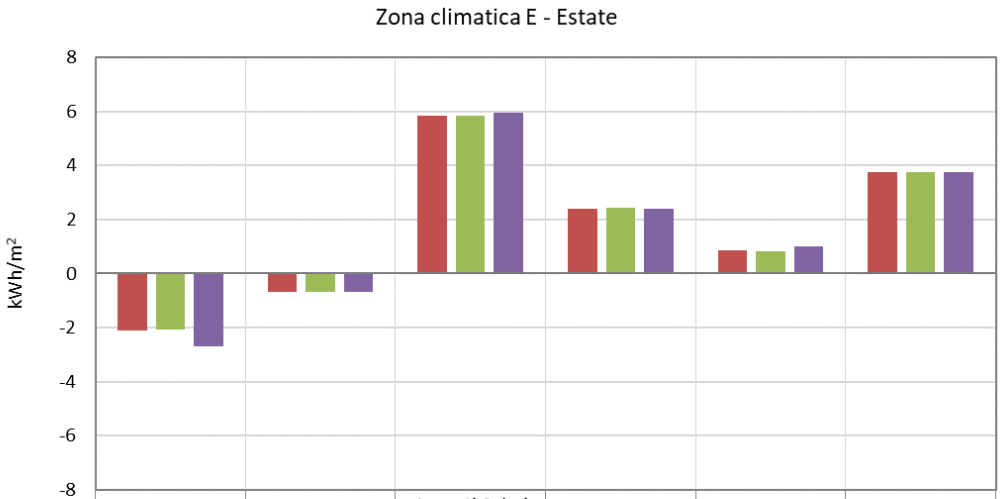


Figura 80. Edificio ad uso ufficio in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di involucro al bilancio termico (in kWh totali per la stagione di riscaldamento)

Per quanto riguarda la stagione estiva (Figura 81), gli apporti solari rivestono un ruolo significativo nel bilancio totale con 5,9 kWh/m², così come le apparecchiature elettriche con 3,8 kWh/m². L'involucro contribuisce positivamente a ridurre il fabbisogno termico estivo, soprattutto nella configurazione 2E (-2,68kWh/m²).



	Involucro	Infiltrazione esterna	Apporti Solari attraverso Finestre Esterne	Occupazione	Illuminazione Generale	Computer + Dispositivi
1E-Var	-2,10	-0,69	5,85	2,41	0,84	3,76
1E-PIR	-2,06	-0,69	5,85	2,42	0,82	3,77
2E	-2,68	-0,66	5,94	2,41	0,99	3,76

Figura 81. Edificio ad uso ufficio in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di bilancio termico estivo (in kWh/m²)

In particolare (Figura 82), si nota in questo caso come i contributi delle pareti si annullino quasi nelle configurazioni di tipo 1 vetrate, mentre la configurazione 2 presenta dei contributi favorevoli delle componenti d'involucro, che contribuiscono tutte a disperdere il calore a livello globale stagionale. Per gli infissi si rileva circa il 7% di dispersioni in più nelle configurazioni di tipo 1 rispetto al tipo 2, mentre per la copertura circa il 14% in più, grazie all'ombreggiamento della pensilina.

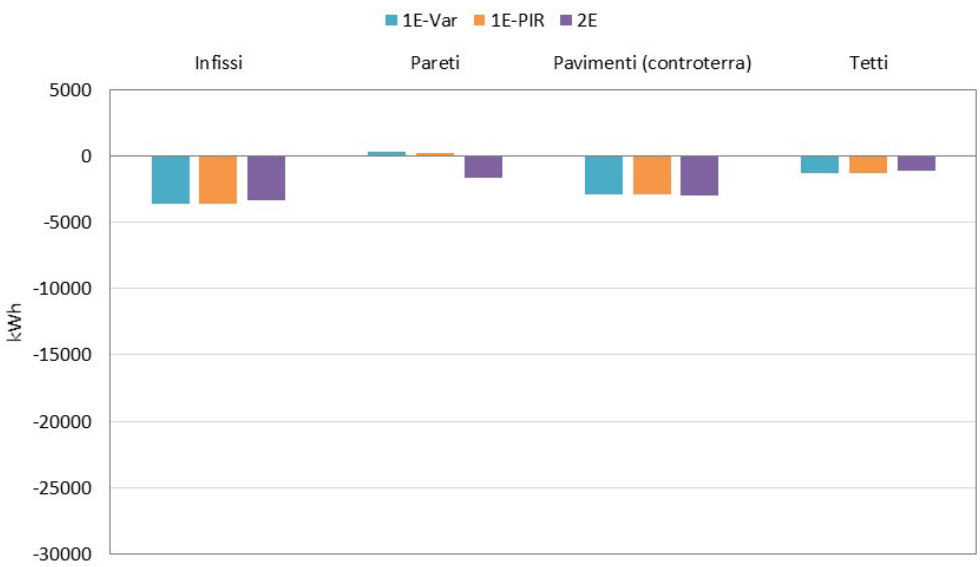
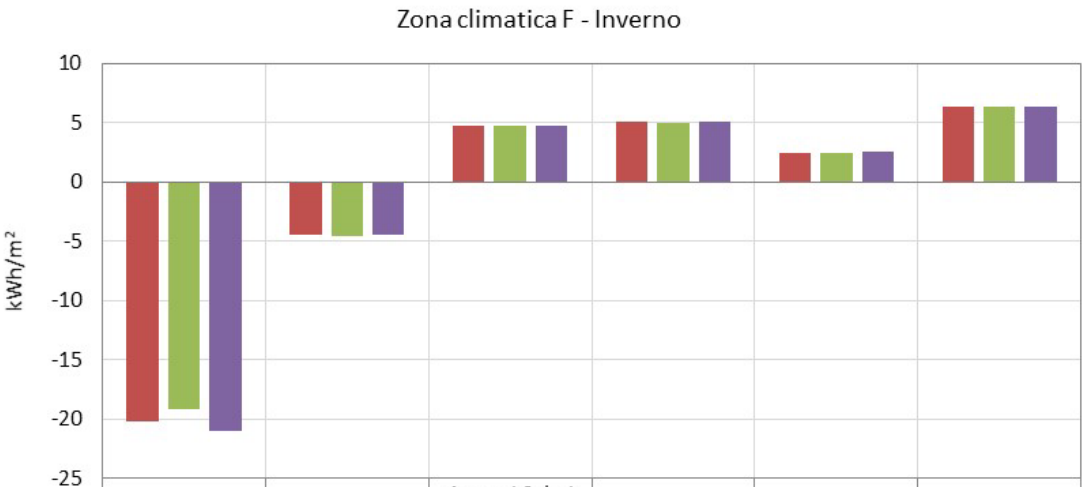


Figura 82. Edificio ad uso ufficio in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di involucro al bilancio termico (in kWh totali per la stagione di raffrescamento)

In zona climatica F (Figura 83), il fabbisogno invernale si rivela ancor più elevato, soprattutto per la componente involucro, che i contributi derivanti da apporti solari, occupazione, illuminazione e apparecchiature elettriche non riescono a compensare. Diventa rilevante anche il contributo di infiltrazione esterna che si attesta circa intorno a 4,5 kWh/m^2. Gli apporti da apparecchiature elettriche risultano confrontabili con quelli in zona climatica E, in quanto la durata del periodo di riscaldamento è la stessa per le due zone climatiche (1 ottobre - 15 aprile), mentre l'illuminazione generale aumenta con valori tra 2,4 e 2,5 kWh/m^2 per le motivazioni già viste in precedenza per la zona E, ossia minore radiazione solare e conseguente attivazione delle lampade per garantire l'illuminamento richiesto all'interno degli ambienti.
A livello di involucro, si passa da 19,18 kWh/m^2 per la configurazione 1F-PIR a 20,21 kWh/m^2 per la configurazione 1F-Var e 21,04 kWh/m^2 per la 2F, con un incremento percentuale totale della configurazione 2F pari al 4% rispetto al caso 1F-Var e al 9% rispetto all'1F-PIR.



	Involucro	Infiltrazione esterna	Apporti Solari attraverso Finestre Esterne	Occupazione	Illuminazione Generale	Computer + Dispositivi
1F-Var	-20,21	-4,50	4,74	5,07	2,44	6,38
1F-PIR	-19,18	-4,58	4,75	5,02	2,43	6,40
2F	-21,04	-4,43	4,76	5,12	2,55	6,37

Figura 83. Edificio ad uso ufficio in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di bilancio termico invernale (in kWh/m^2)

Anche in questo caso (Figura 84), gli infissi delle configurazioni di tipo 1 disperdono il 2% (1F-Var) e il 4% (1F-PIR) in più rispetto alla configurazione 2F, mentre le pareti verticali disperdono rispettivamente il 13% (1F-Var) e il 35% (1F-PIR) in meno, quest'ultima grazie soprattutto alla bassa trasmittanza delle strutture.

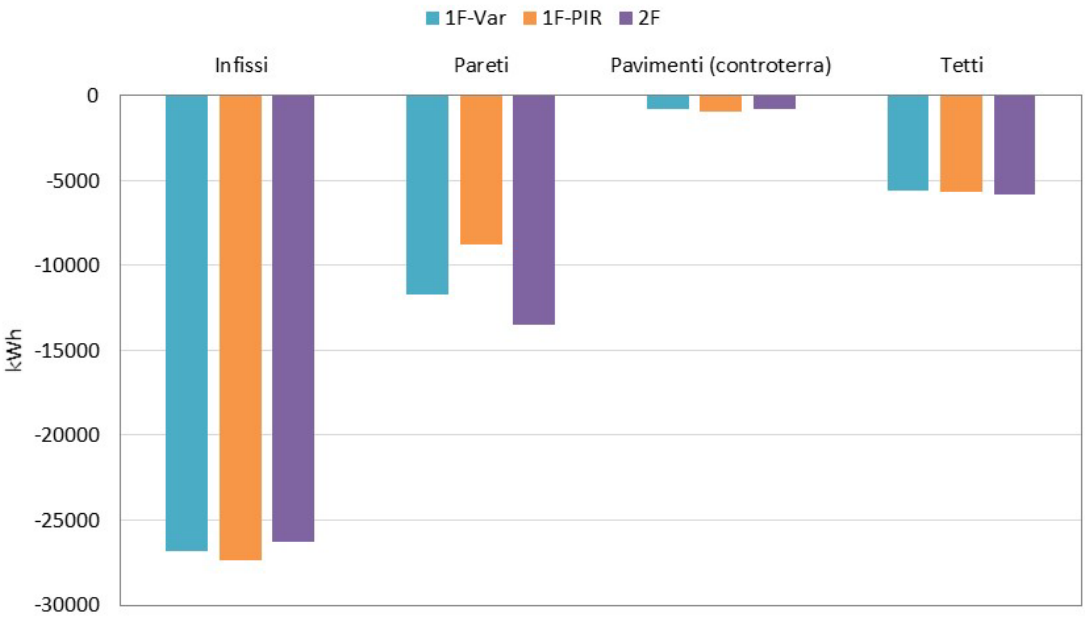
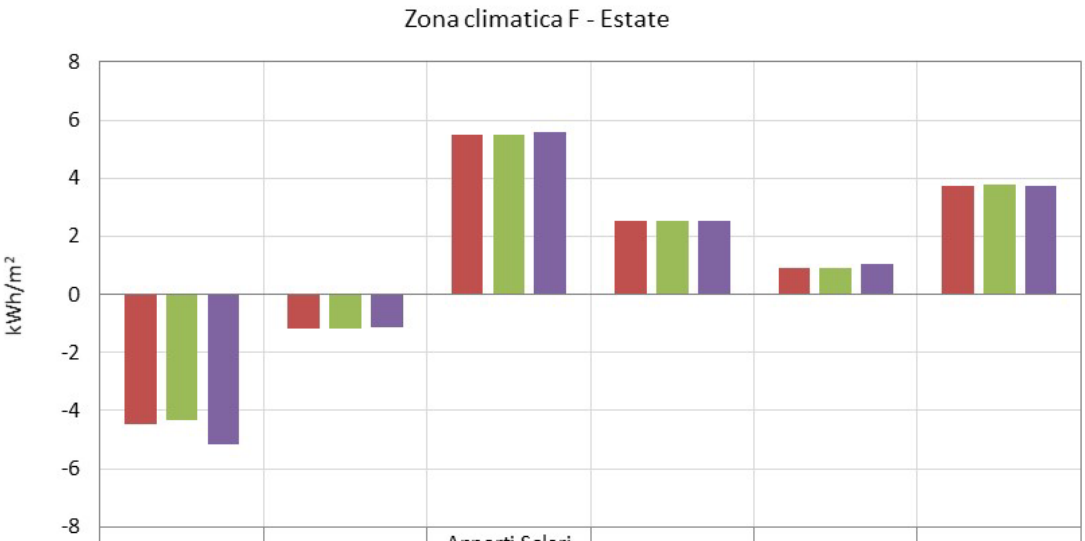


Figura 84. Edificio ad uso ufficio in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di involucro al bilancio termico (in kWh totali per la stagione di riscaldamento)

In estate (Figura 85), gli apporti solari diventano il contributo più elevato sul bilancio in zona F, ma comunque inferiore rispetto alla zona E e D, con 5,48kWh/m^2. Le schermature, infatti, si attivano meno frequentemente in quanto il valore soglia della radiazione solare non viene raggiunto con la stessa frequenza delle altre zone climatiche. L'involucro riesce a disperdere calore in tutte le configurazioni con dispersioni che variano da 4,35 kWh/m^2 (1F-PIR) a 5,15 kWh/m^2 (2F).



	Involucro	Infiltrazione esterna	Apporti Solari attraverso Finestre Esterne	Occupazione	Illuminazione Generale	Computer + Dispositivi
1F-Var	-4,45	-1,19	5,47	2,52	0,91	3,75
1F-PIR	-4,35	-1,20	5,48	2,52	0,90	3,77
2F	-5,15	-1,14	5,58	2,51	1,03	3,74

Figura 85. Edificio ad uso ufficio in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di bilancio termico estivo (in kWh/m^2)

In zona F, i contributi delle pareti sono tutti favorevoli con segno negativo (Figura 86), e in particolar modo nella configurazione 2, così come quelli di tutti gli altri componenti di involucro con differenze poco significative tra le configurazioni per gli infissi, le chiusure orizzontali di base e di copertura.

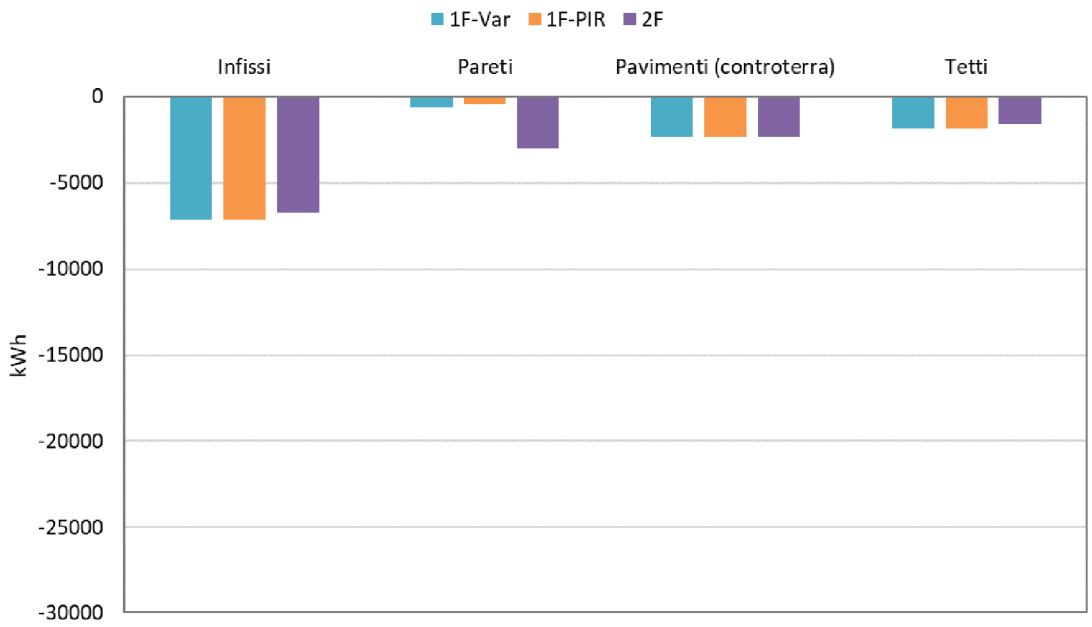


Figura 86. Edificio ad uso ufficio in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di involucro al bilancio termico (in kWh totali per la stagione di raffrescamento)

6.1.2 Fabbisogni termici estivi e invernali

Dalle considerazioni derivanti dall'analisi dei singoli contributi al bilancio termico invernale ed estivo, derivano consequenzialmente le differenze di fabbisogno termico sull'intera stagione di riscaldamento e raffrescamento tra le differenti configurazioni analizzate.
In zona climatica A-B, il fabbisogno termico invernale complessivo, calcolato sul periodo 1 dicembre – 31 marzo, subisce l'influenza delle stratigrafie scelte come ampliamente analizzato nel paragrafo precedente. Tra le due configurazioni vetrate si evidenzia come la più performante sia la 1A-B-PIR con un fabbisogno pari a 2,38 kWh/m^2, rispetto alla 1A-B-Var con 2,80 kWh/m^2. Stessa considerazione vale per il regime estivo in cui la configurazione 1A-B-PIR presenta un fabbisogno termico estivo pari a 9,31 kWh/ m^2 rispetto ai 10 kWh/m^2 della 1A-B-var. Ulteriore aspetto interessante è la confrontabilità dei risultati delle due tipologie di involucro (vetrato - 1PIR e opaco): gli accorgimenti adottati nella configurazione vetrata e, in particolare, nella 1PIR, che verifica tutti i requisiti di legge e adotta sistemi dinamici di ombreggiamento e controllo della radiazione solare, oltre ad elevato isolamento dei componenti, consente, infatti, di ottenere risultati in termini di fabbisogni termici pressoché simili in regime estivo e migliori in regime invernale rispetto alla configurazione 2 (con fabbisogno termico in inverno di 3,08 kWh/m^2 e in estate di 9,57 kWh/m^2) (Figura 87).

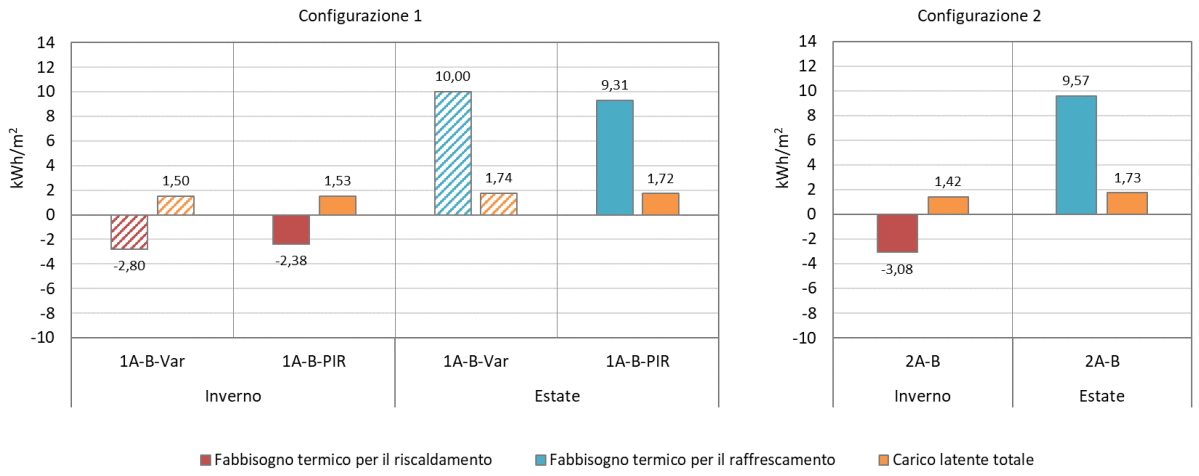


Figura 87. Edificio ad uso ufficio in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, fabbisogni termici invernale ed estivo (in kWh/m²)

Si nota anche come, nella zona climatica più calda, il fabbisogno di raffrescamento sia preponderante in tutte le configurazioni e richieda l'utilizzo di sistemi impiantistici idonei per sopperire al fabbisogno estivo.

Anche in zona climatica C (località Napoli, Figura 88), il fabbisogno termico estivo si attesta attorno a 8,78 kWh/m² per la configurazione 1C-Var, 8,43 kWh/m² per la configurazione 1C-PIR e, infine, 8,50 kWh/m² per la configurazione 2C. Le tre configurazioni tra loro risultano, quindi, equivalenti in estate, mentre più marcate differenze si notano sul fabbisogno termico invernale, calcolato sul periodo dal 15 novembre al 31 marzo: la prestazione migliore è, infatti, raggiunta dalla configurazione 1C-PIR con 3,76 kWh/m², seguito dalla configurazione 1C-Var con 4,34 kWh/m² e dalla configurazione 2C con 4,66 kWh/m². Il contributo del carico latente si mantiene, invece, pressoché costante in estate e inverno.

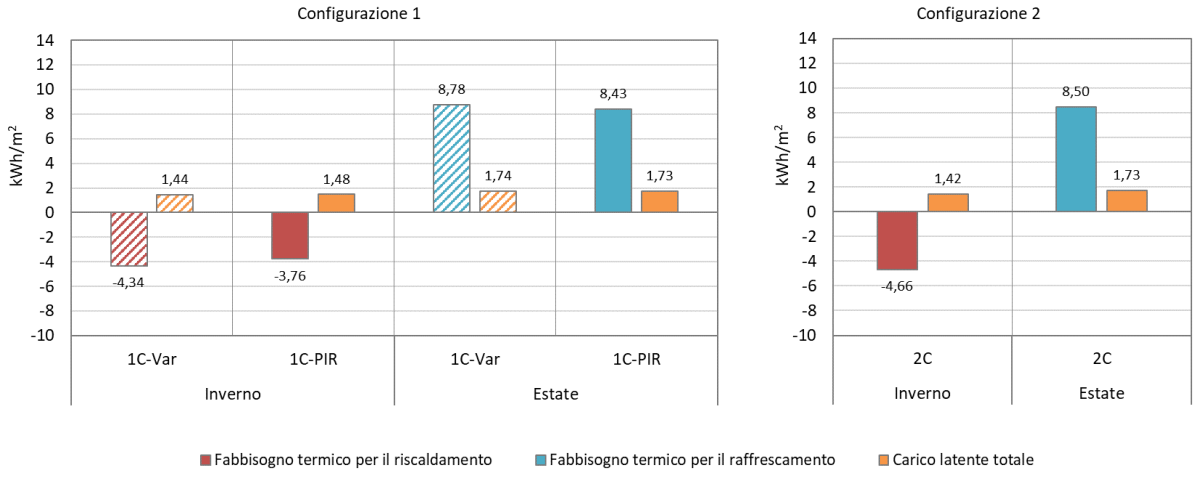


Figura 88. Edificio ad uso ufficio in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, fabbisogni termici invernale ed estivo (in kWh/m²)

Per la zona climatica D (Roma), tutti i fabbisogni risultano più elevati rispetto alle zone A-B e C, fondamentalmente per le caratteristiche dei dati climatici utilizzati, che mostrano inverni meno miti ed estati caratterizzate da valori di temperatura e radiazione solare più elevati.
In particolare (Figura 89), in regime invernale (1 novembre - 15 aprile) e tra i tre diversi scenari analizzati, la configurazione 1D-PIR risulta più performante con 2,97 kWh/m², seguita dalla 1D-Var (3,43 kWh/m²) e dalla 2D (3,82 kWh/m²). In regime estivo, invece, il fabbisogno termico per il raffrescamento è equiparabile per le

configurazioni 1D-Var (12,46 kWh/m^2) e 2D (12,48 kWh/m^2) e leggermente inferiore per la 1D-PIR (12,17 kWh/m^2).

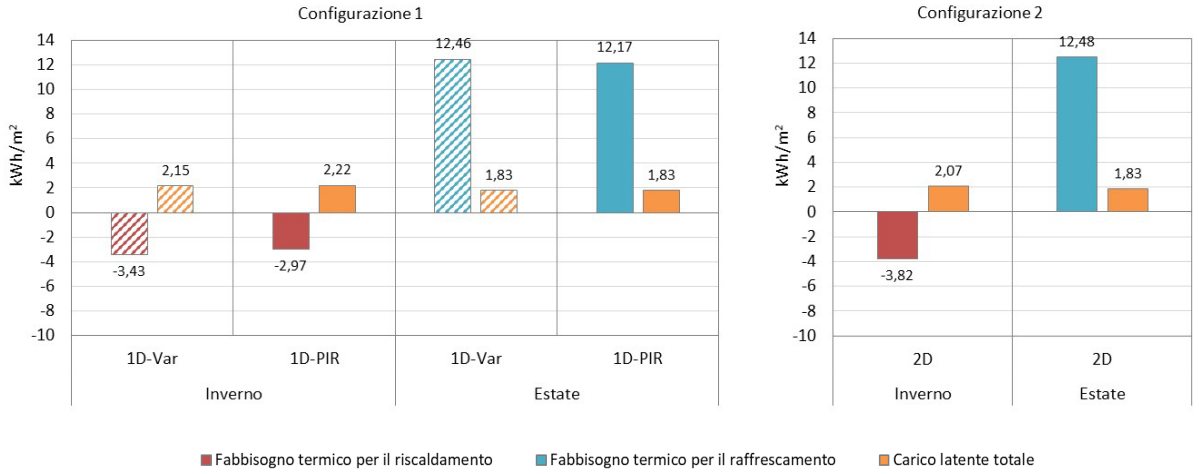


Figura 89. Edificio ad uso ufficio in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, fabbisogni termici invernale ed estivo (in kWh/m^2)

In zona climatica E (Milano), coerentemente con un clima più freddo e con il periodo di riscaldamento considerato (1 ottobre al 15 aprile), aumentano i fabbisogni termici totali invernali (Figura 90) e la configurazione più performante si rivela la 1E-PIR con 3,84 kWh/m^2, seguita dalla 1E-Var (4,50 kWh/m^2) e dalla 2E (4,89 kWh/m^2). In regime estivo si ha, invece, un fabbisogno equiparabile in tutte le configurazioni, pari circa a 10,5 kWh/m^2, che, tuttavia, dimostra come in città come Milano, collocata in zona E, non sia affatto sottovalutabile il problema del raffrescamento estivo degli edifici, nonostante ci si aspetti un'estate più mite.

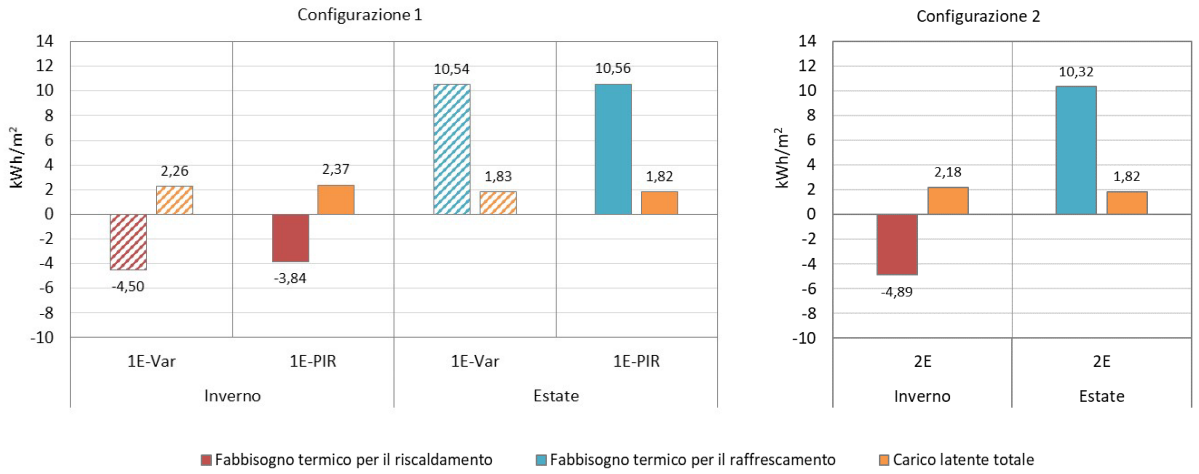


Figura 90. Edificio ad uso ufficio in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, fabbisogni termici invernale ed estivo (in kWh/m^2)

Infine, per quanto riguarda i fabbisogni termici (Figura 91), la zona F risulta essere la più critica in inverno con fabbisogni più bassi per le configurazioni di tipo 1 (6,14 kWh/m^2 per la 1F-PIR e 6,91 kWh/m^2 per la 1F-Var) rispetto alla configurazione 2 (7,44 kWh/m^2). In estate, nonostante la zona climatica sia la più fredda tra quelle italiane, si riscontra, tuttavia, una necessità di raffrescamento, in particolare nella configurazione 1F-PIR (7,47 kWh/m^2) seguita dalla 1F-Var (7,39 kWh/m^2) e, infine, dalla 2F (7,03 kWh/m^2). I tre fabbisogni risultano, tuttavia, i più bassi fra le zone climatiche e tra loro equiparabili.

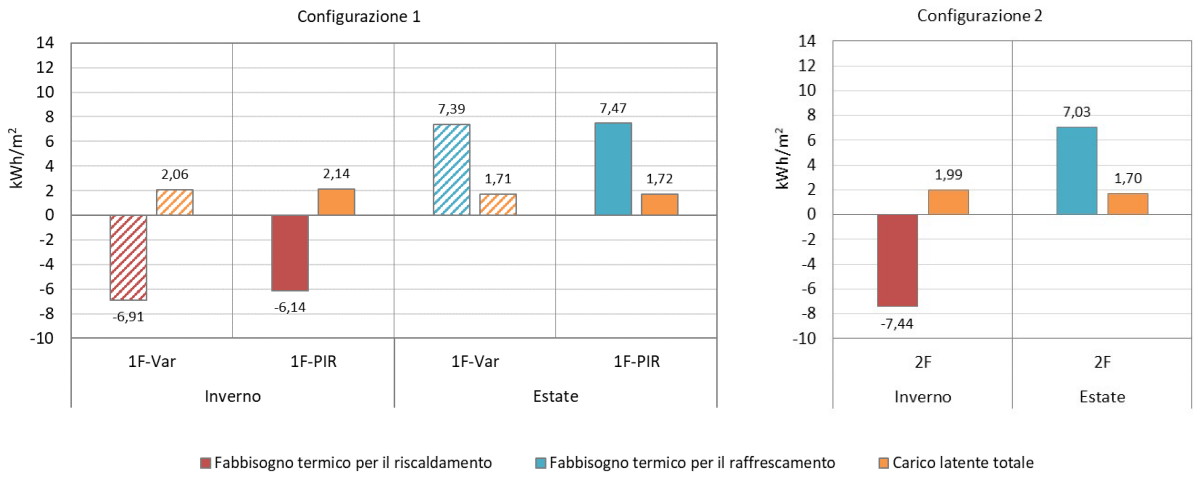


Figura 91. Edificio ad uso ufficio in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, fabbisogni termici invernale ed estivo (in kWh/m²)

In conclusione, come si evince dalla Figura 92 che riassume quanto detto e mette a confronto i fabbisogni totali invernali ed estivi tra le diverse zone climatiche, durante l'inverno la configurazione 1PIR risulta la migliore in quanto presenta il minore fabbisogno in tutti i casi, grazie alla scelta di chiusure verticali altamente isolate.

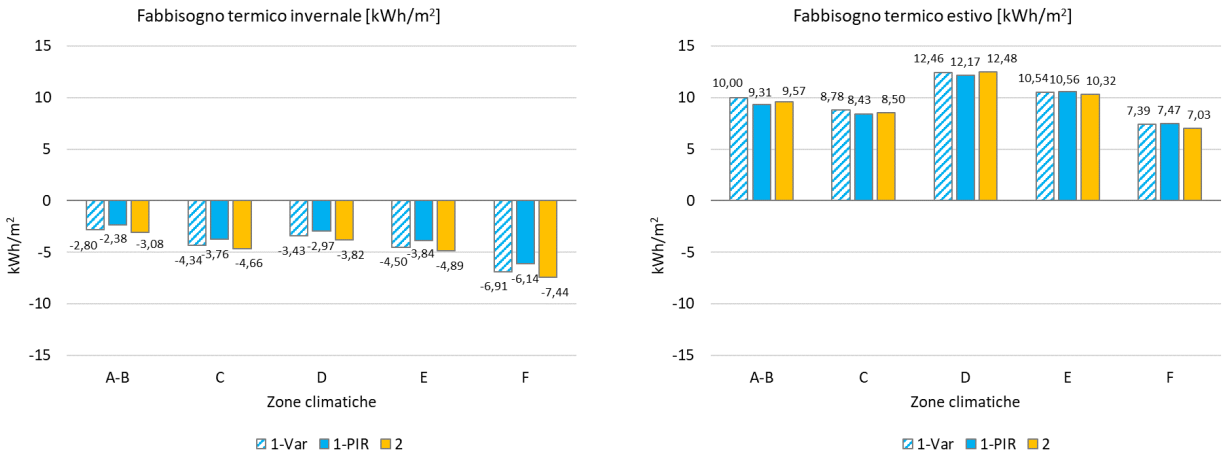


Figura 92. Edificio ad uso ufficio - Fabbisogni termici invernale ed estivo nelle due configurazioni di involucro in tutte le zone climatiche.

Inoltre, i fabbisogni aumentano progressivamente dalla zona A-B alla F, coerentemente con i dati climatici utilizzati. Durante l'estate, al contrario il fabbisogno decresce nelle varie zone climatiche. L'unica criticità si riscontra nella zona D, nella quale il fabbisogno invernale si colloca tra la zona climatica A-B e la zona C, mentre il fabbisogno estivo risulta maggiore rispetto alle altre zone. Ciò è dovuto alle condizioni climatiche della località di Roma, rappresentativa della zona D, caratterizzate da dati di radiazione solare e temperatura più elevate. Anche il fabbisogno estivo in zona climatica E risulta paragonabile a quello della zona climatica A-B: in questo caso, ciò dipende sia dai dati climatici specifici della città di Milano, caratterizzata da estati calde, sia dai particolari profili di controllo dinamico impostati per le schermature solari. Esse, infatti, entrano in funzione superata determinato valore di "solar setpoint" (120W/m²), che in zona E non viene sempre raggiunta; ne consegue che le schermature si attivano per meno ore rispetto ad altre zone climatiche, permettendo alla radiazione solare di penetrare all'interno dell'edificio per un periodo più prolungato.

Per avvalorare tale tesi e a titolo esemplificativo, dal confronto tra zona E e zona AB in estate nelle settimane di riferimento per la configurazione 1-PIR, gli apporti solari sono maggiori in zona E (8-14 kW) rispetto alla zona AB (6-8 kW). Le vetrate in zona E disperdono fino a 6 kW di notte mentre in zona AB arrivano anche a 10 kW. Di giorno il guadagno dalle vetrate in zona E è tra 2 e 6 kW mentre in zona AB supera i 10 kW (Figura 93).

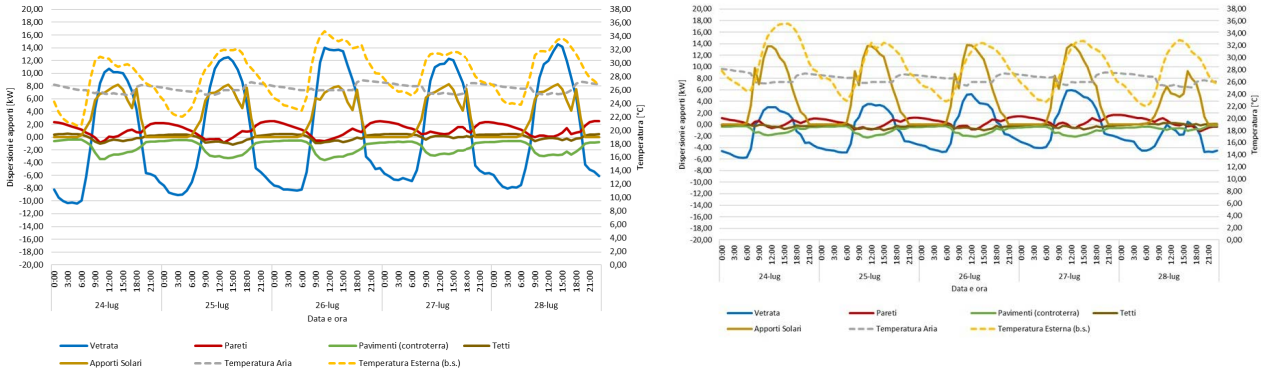


Figura 93. Confronto su base oraria tra apporti solari e dispersioni di involucro in zona B e zona E nelle settimane estive di riferimento per la configurazione 1-PIR.

Ciò determina un guadagno termico riveniente dagli apporti solari e dalla trasmittanza più bassa in zona E e un bilancio estivo più elevato (si ricordi, in aggiunta, che il fabbisogno termico è valutato al netto degli impianti e delle ore di funzionamento degli stessi).

I fabbisogni estivi delle differenti configurazioni all'interno di ciascuna zona climatica sono, invece, tra loro confrontabili.
Tutto ciò porta a concludere che:

- In inverno, l'adozione di una trasmittanza particolarmente bassa (configurazione 1PIR) influenza positivamente il fabbisogno invernale riducendolo, ma non determina sostanziali peggioramenti nel fabbisogno estivo e, quindi, risulta preferibile;
- In estate, l'adozione di sistemi di controllo dinamico delle schermature, la cui attivazione dipende da valori soglia della radiazione solare, deve essere attentamente calibrata anche nelle zone climatiche più fredde, per evitare problemi di surriscaldamento interno;
- In estate, l'adozione di pensiline ombreggianti sul tetto adeguatamente progettate e di schermature idonee e dinamiche determina la possibilità di utilizzare involucri vetrati efficienti e compensare in parte l'effetto favorevole mancante dell'inerzia termica, che invece le configurazioni opache massive possono sfruttare a pieno.

A valle di tali risultati, si è deciso di continuare la trattazione analizzando esclusivamente le due configurazioni 1PIR (involucro vetrato) e 2 (involucro opaco), sia a livello impiantistico sia per la prestazione globale dei modelli analizzati come sistema edificio-impianto. La configurazione 1PIR è stata preferita alla 1Var sia poiché assolve tutti i requisiti di legge, sia in quanto è risultata la più performante dal punto di vista dei fabbisogni termici, considerazione utile, quest'ultima, nell'ottica di perseguire l'obiettivo finale del lavoro, ossia il raggiungimento dello "zero energy building".

6.2 Valutazione dei fabbisogni energetici e produzione da fonti rinnovabili

Dopo aver descritto nel dettaglio il fabbisogno termico dell'edificio, nel presente paragrafo saranno illustrate le prestazioni dei due impianti per il condizionamento ambientale per entrambe le configurazioni di involucro e per ogni zona climatica. Si mostrerà l'andamento del coefficiente di prestazione per la produzione di acqua calda sanitaria, per il riscaldamento e il raffrescamento, sia per gli impianti con pompa di calore aria-acqua,

sia per gli impianti VRF, nonché il dato aggregato su base mensile. Infine, si analizzerà la produzione di energia elettrica da pannelli fotovoltaici, con annessi i bilanci energetici relativi alla copertura del fabbisogno totale dell'edificio a uso ufficio.

6.2.1 Climatizzazione invernale

Di seguito vengono mostrati i risultati ottenuti dalle due tipologie di impianto adottate per soddisfare il fabbisogno di riscaldamento, in entrambe le configurazioni di involucro e per tutte le zone climatiche. Si ritiene opportuno ricordare che, in entrambe le configurazioni e per le zone climatiche A, B, C e D, è stata usata la pompa di calore aria-acqua da 40,4 kW termici nominali, mentre per la zona E si è scelta la pompa di calore aria-acqua da 53,7 kW e per la zona F sono state utilizzate entrambe in parallelo secondo una gestione ottimizzata in termini di carico parziale. Queste diversi assetti impiantistici nelle zone E ed F sono risultati necessari per soddisfare il conseguimento delle condizioni di progetto per il riscaldamento, vale a dire una temperatura media dell'aria nei locali occupati pari a 20 °C. Per quanto riguarda gli impianti a portata di refrigerante variabile non è stata riscontrata la medesima necessità, ragion per cui non sono state apportate variazioni né ai componenti né al layout degli impianti, che prevede una unità VRF esterna per ogni piano e una unità VRF dedicata al preriscaldamento e al pretrattamento dell'aria immessa dall'UTA.
Nelle figure che seguono (Figura 94-Figura 98) illustrative dei risultati per ogni configurazione di involucro per ogni tipologia di impianto, sono riportati la temperatura media giornaliera dell'aria esterna (linea continua verde), il coefficiente di prestazione stagionale dell'impianto (linea tratteggiata nera), dato dal rapporto tra la somma dell'energia fornita e la somma dell'energia assorbita sull'intero periodo di riscaldamento, e il COP medio giornaliero (punti di colore nero), dato sempre dal citato rapporto tra le energie, in questo caso sommate per il solo periodo giornaliero[7]. Si può notare come, nella configurazione 1, i COP della pompa di calore aria-acqua diminuiscano al ridursi della temperatura media esterna, passando dai 3 delle zone A-B (Figura 94) e C (Figura 95), ai 2,4 della zona F (Figura 98). Anche per l'impianto VRF si registra la stessa tendenza, con il coefficiente di prestazione complessivo che varia tra 3,2 (zone A-B e C) a 2,7 (zona F), passando per 2,9 (zona D) e 2,8 (zona E). Per la configurazione 2, il COP dell'impianto PdC ha lo stesso intervallo di variazione visto nella configurazione 1, da 3 (A-B, C) a 2,4 (F), mentre l'impianto VRF registra il massimo per le zone A-B e C di 3,2 e il minimo di 2,8 per la zona F.
In Figura 99 i coefficienti di prestazione sono stati raggruppati per meglio mettere in evidenza la tendenza appena descritta.

[7] Dal punto di vista matematico i due coefficienti di prestazione (COP medio stagionale e COP medio giornaliero) non coincidono in quanto incorrono nelle approssimazioni numeriche dovute al tipo di calcolo adottato. Per tale motivo generalmente il COP medio stagionale risulta leggermente più elevato rispetto a quello giornaliero.

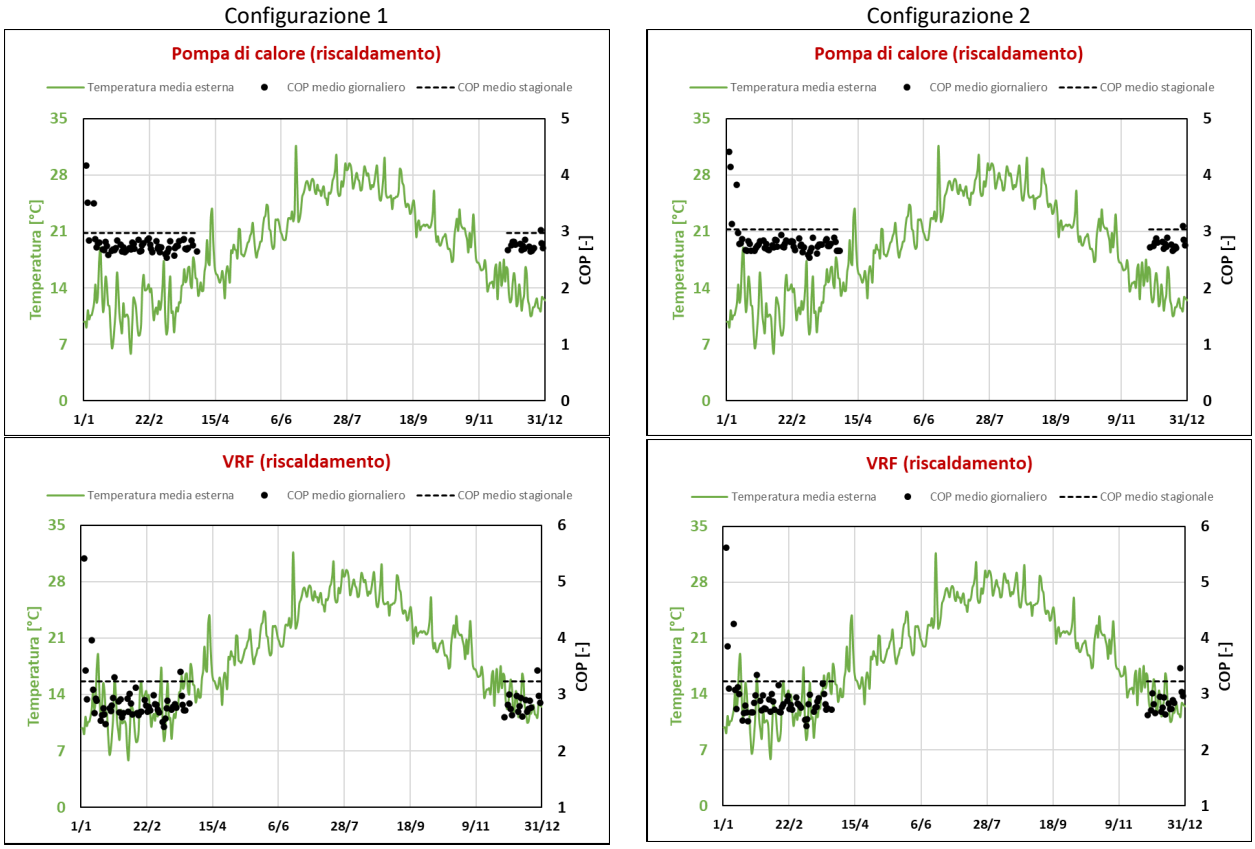


Figura 94. Andamento medio giornaliero del COP in riscaldamento, zona climatica A-B

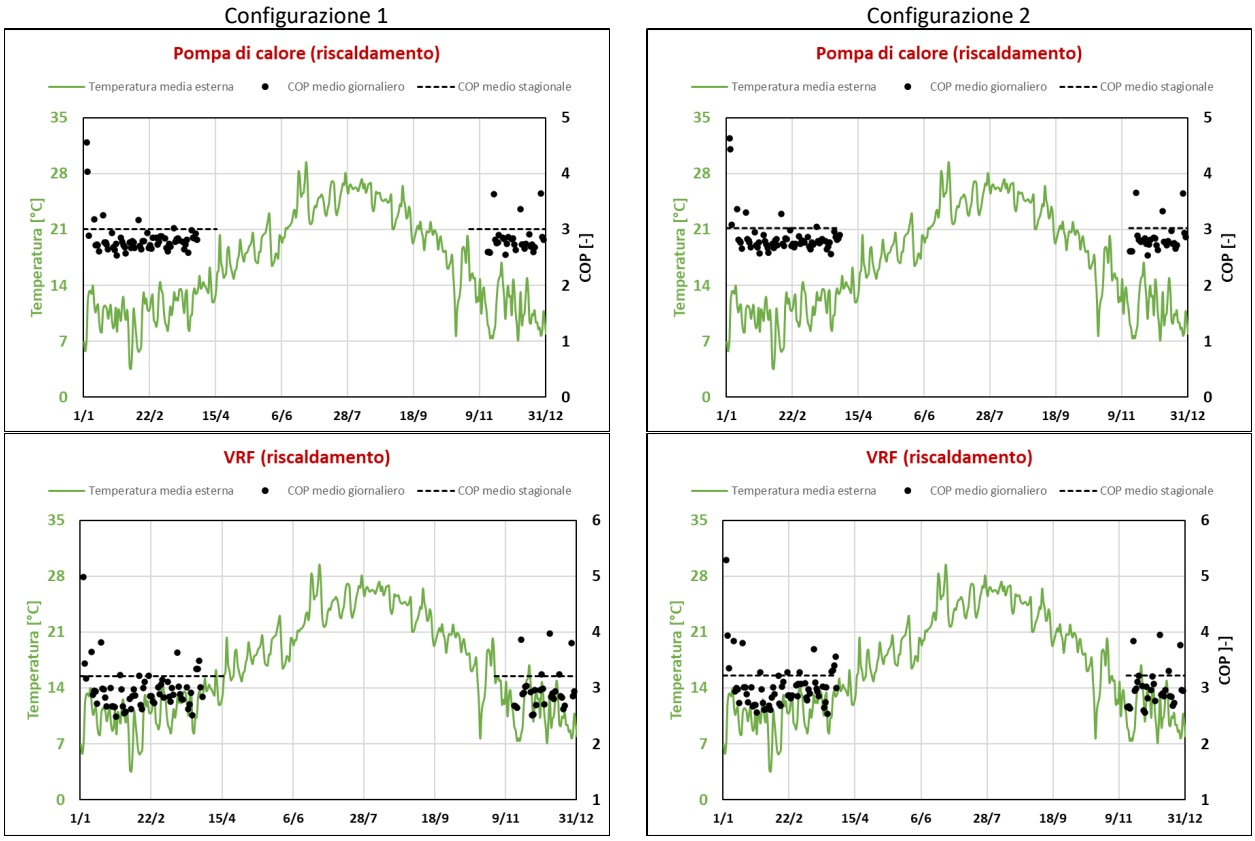


Figura 95. Andamento medio giornaliero del COP in riscaldamento, zona climatica C

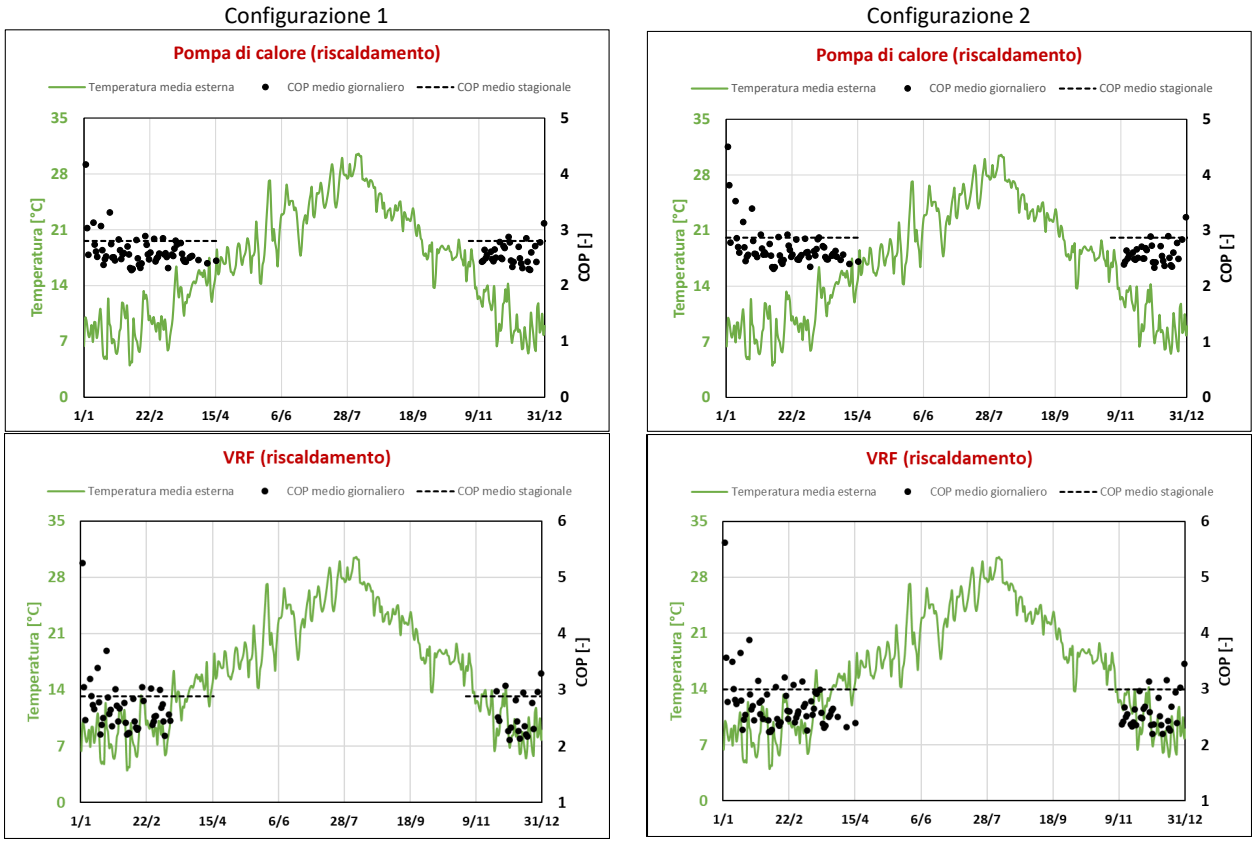


Figura 96. Andamento medio giornaliero del COP in riscaldamento, zona climatica D

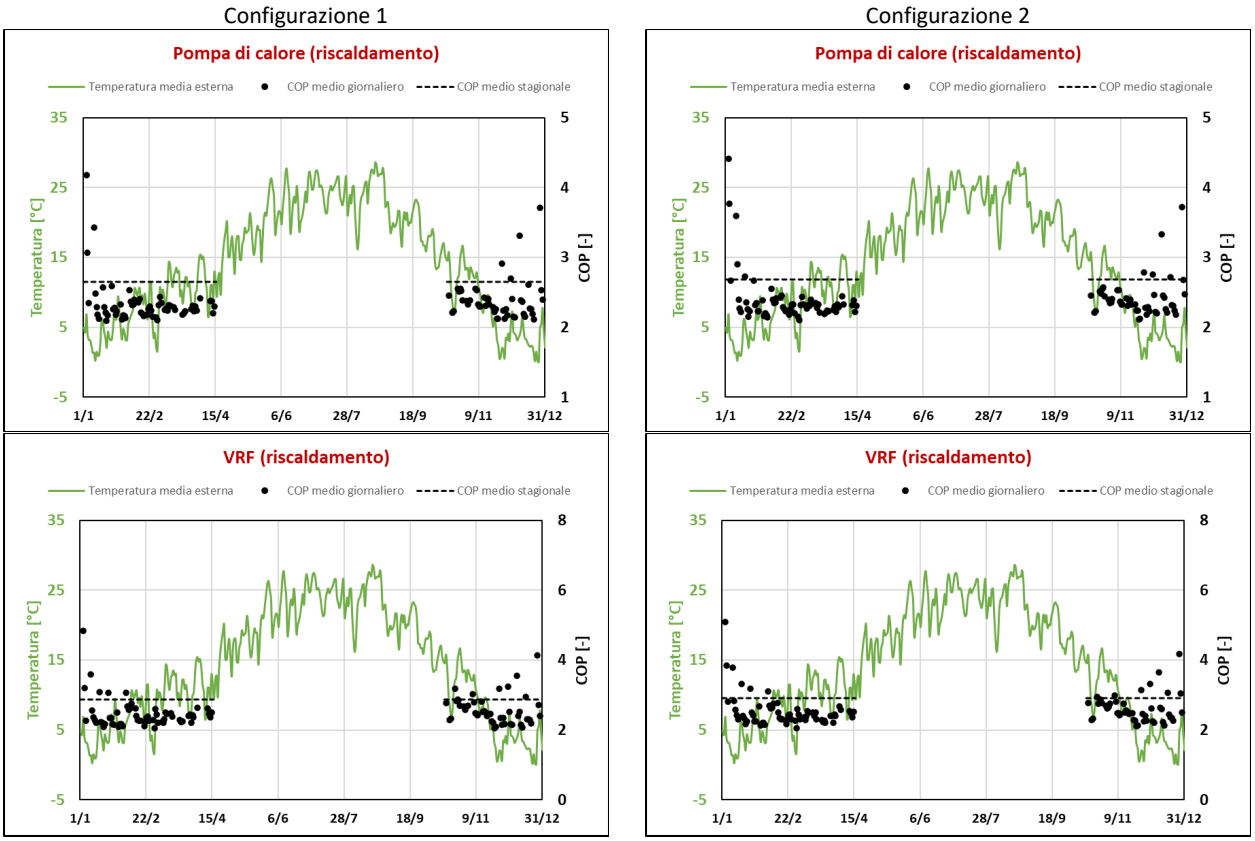


Figura 97. Andamento medio giornaliero del COP in riscaldamento, zona climatica E

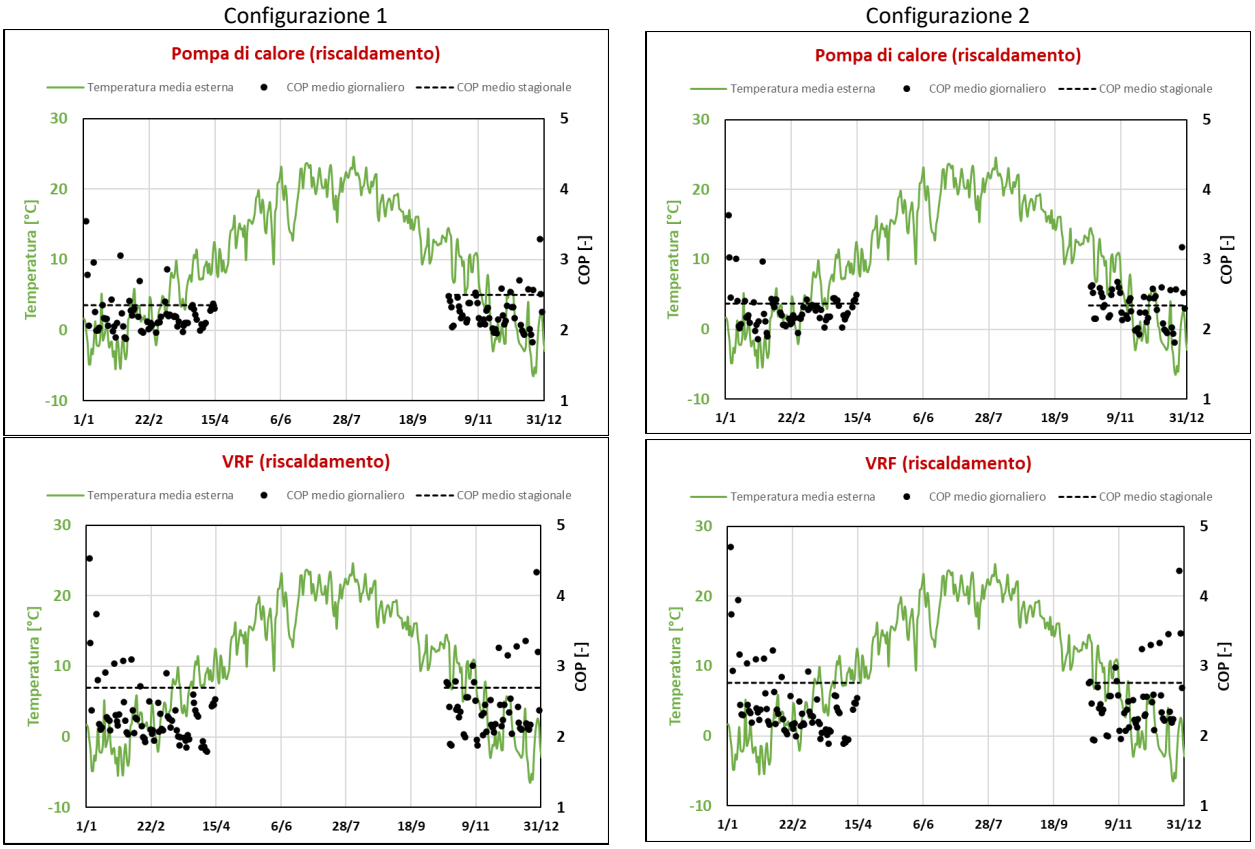


Figura 98. Andamento medio giornaliero del COP in riscaldamento, zona climatica F

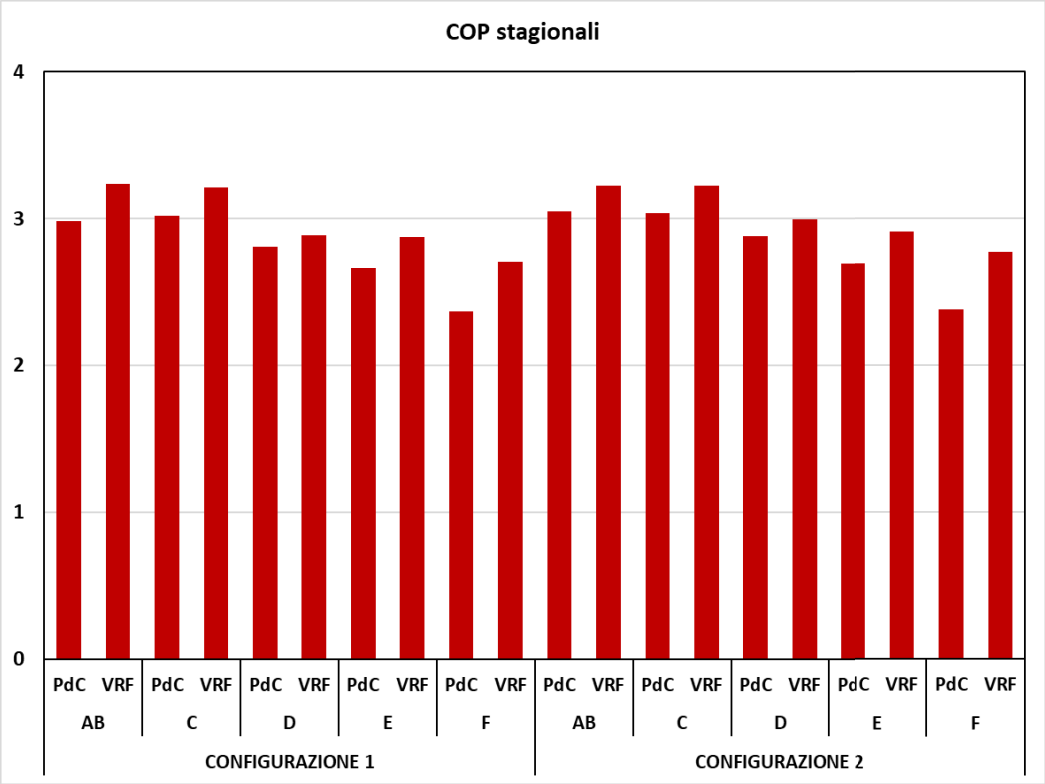


Figura 99. Grafico riassuntivo dei coefficienti di prestazione stagionali per il riscaldamento degli impianti HVAC, divisi per configurazione di involucro e zona climatica

La somma mensile dell'energia erogata per il riscaldamento e di quella assorbita per il funzionamento delle macchine è mostrata nella Figura 100 per la zona A-B, in Figura 101 per la zona C, Figura 102 per la zona D, in Figura 103 per la zona E, e in Figura 104 per la zona F. Per ogni zona climatica, l'asse delle ordinate, ovvero quello delle energie, è stato uniformato per rendere più immediato il confronto dei diversi casi di studio. Si nota che, a parità di zona climatica, l'energia erogata mensilmente nella configurazione 2 è sempre maggiore di quella erogata nella configurazione 1 per la stessa tipologia di impianto. In dettaglio, come era lecito aspettarsi, il massimo dell'energia termica annuale erogata si registra per l'edificio in zona F con configurazione 2 di involucro (16,5 e 16,6 MWh per PdC e VRF, rispettivamente) mentre il minimo si verifica per la zona A-B, configurazione 1 (3,1 MWh per entrambi i sistemi di climatizzazione). Per dare una misura di quanto la zona climatica più calda sia avvantaggiata durante la stagione invernale, basti pensare che l'intero fabbisogno annuale della zona A-B, configurazione 1, di 3.1 MWh è pari a meno della metà del solo mese di gennaio della zona F, configurazione 2, ovvero 6.7 MWh (sia per PdC che per VRF).

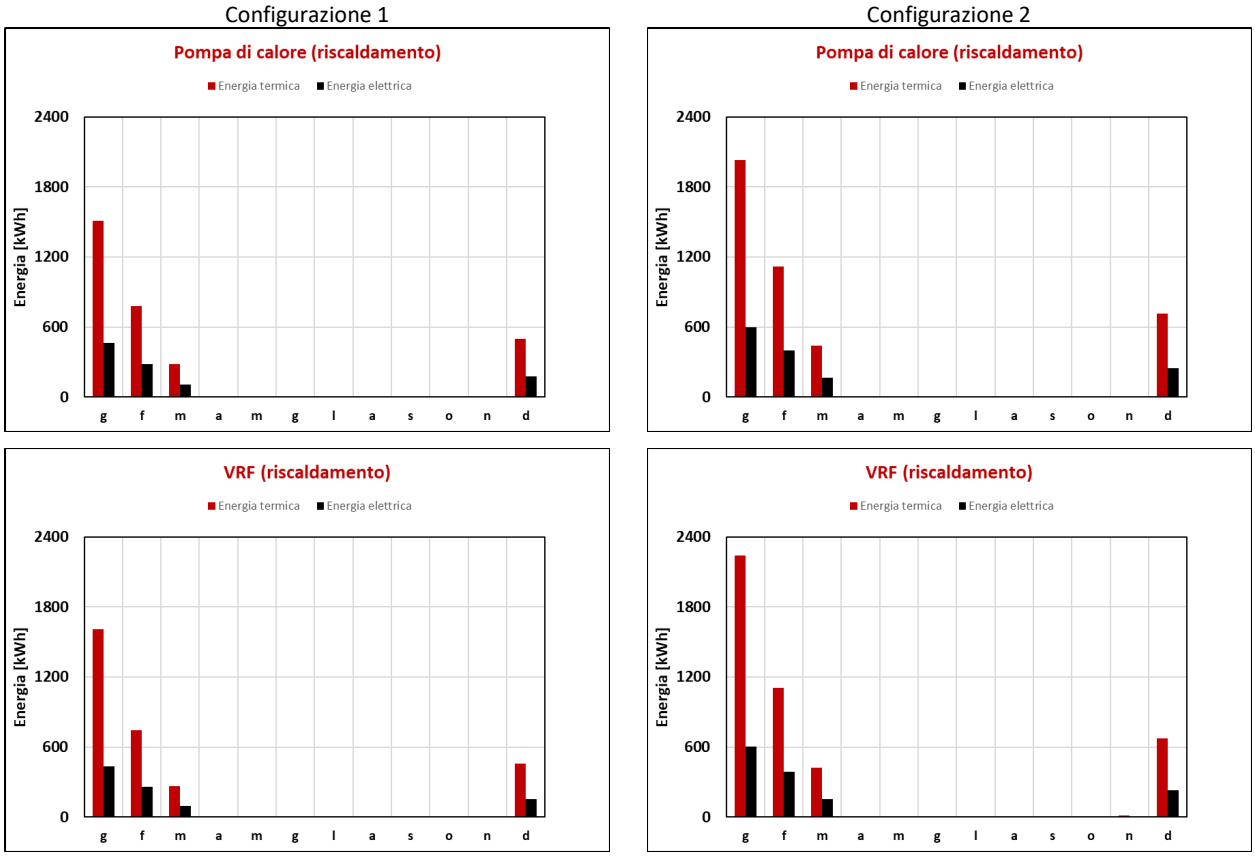


Figura 100. Zona A-B - Confronto tra configurazione 1 e 2, fabbisogni termici ed elettrici (riscaldamento)

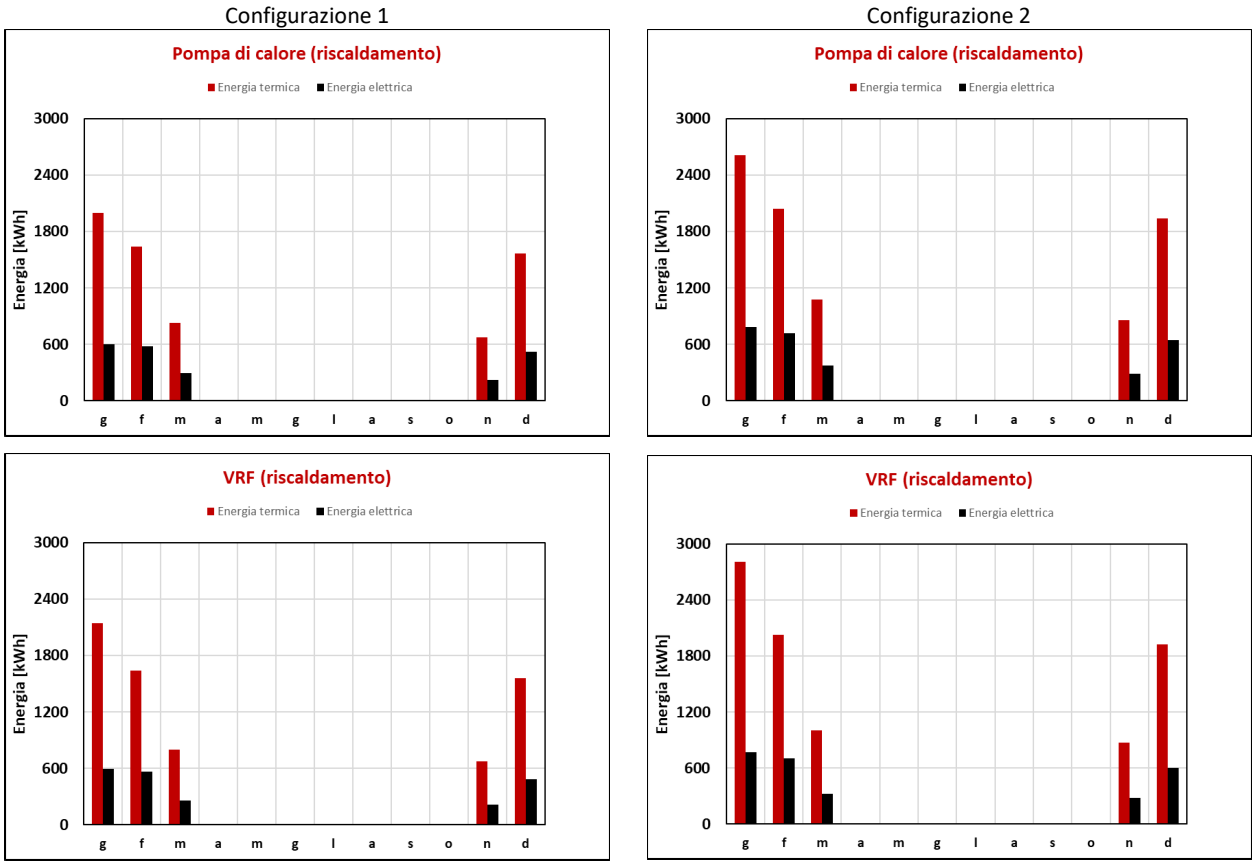


Figura 101. Zona C - Confronto tra configurazione 1 e 2, fabbisogni termici ed elettrici (riscaldamento)

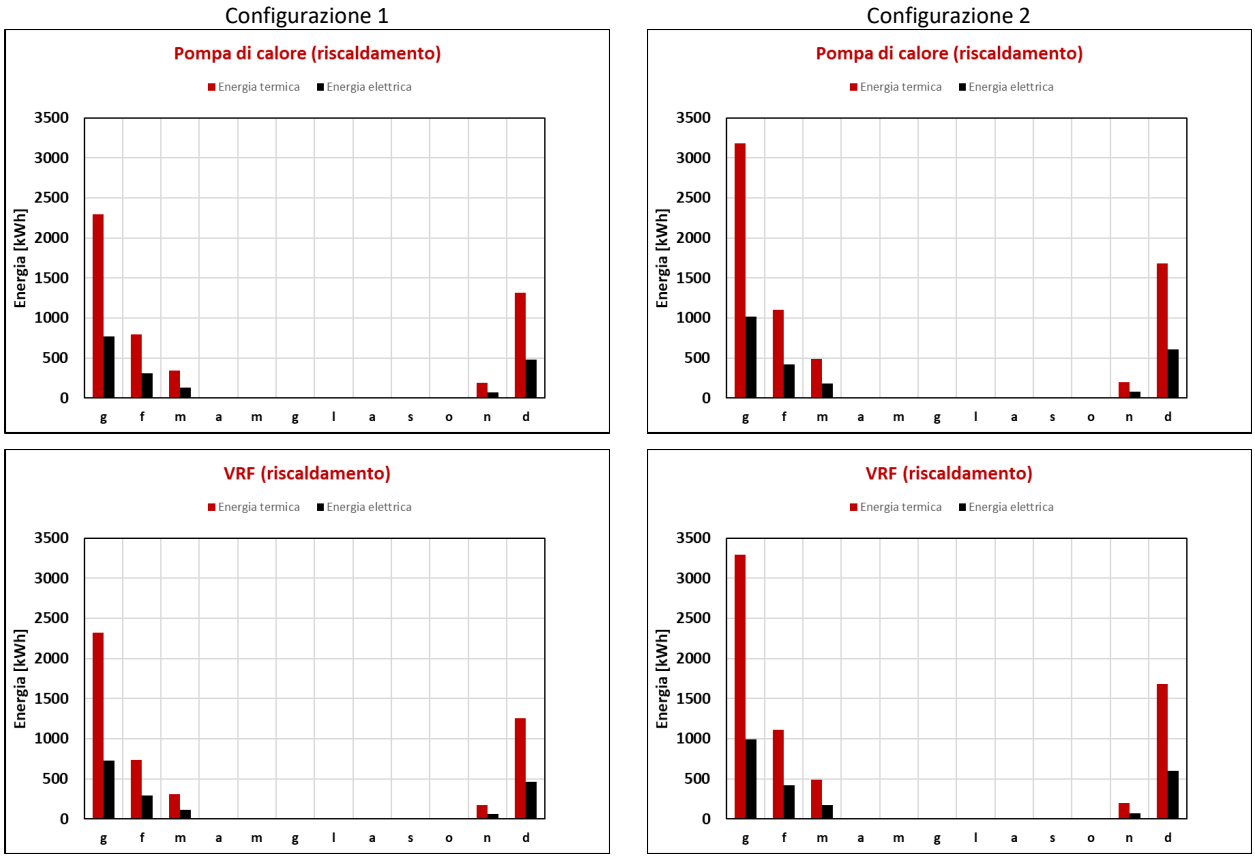


Figura 102. Zona D - Confronto tra configurazione 1 e 2, fabbisogni termici ed elettrici (riscaldamento)

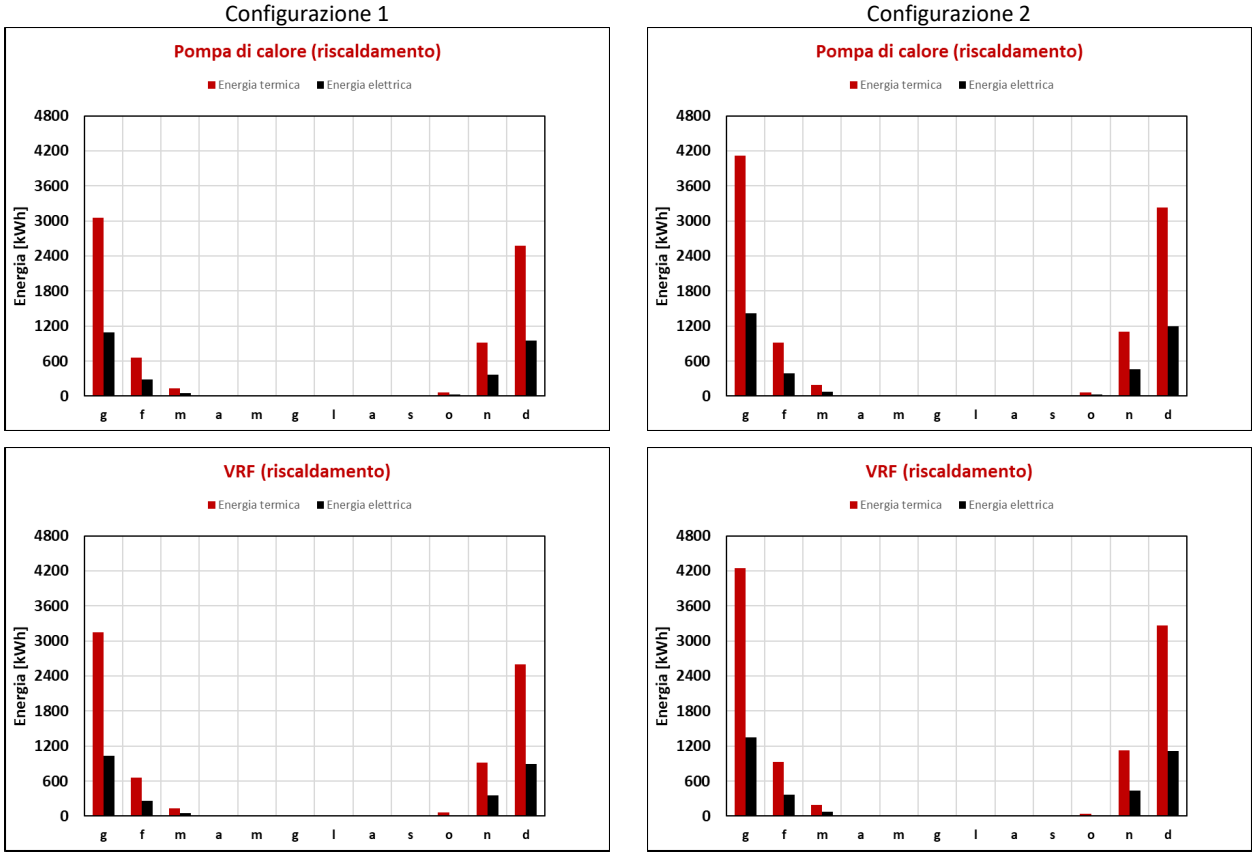


Figura 103. Zona E - Confronto tra configurazione 1 e 2, fabbisogni termici ed elettrici (riscaldamento)

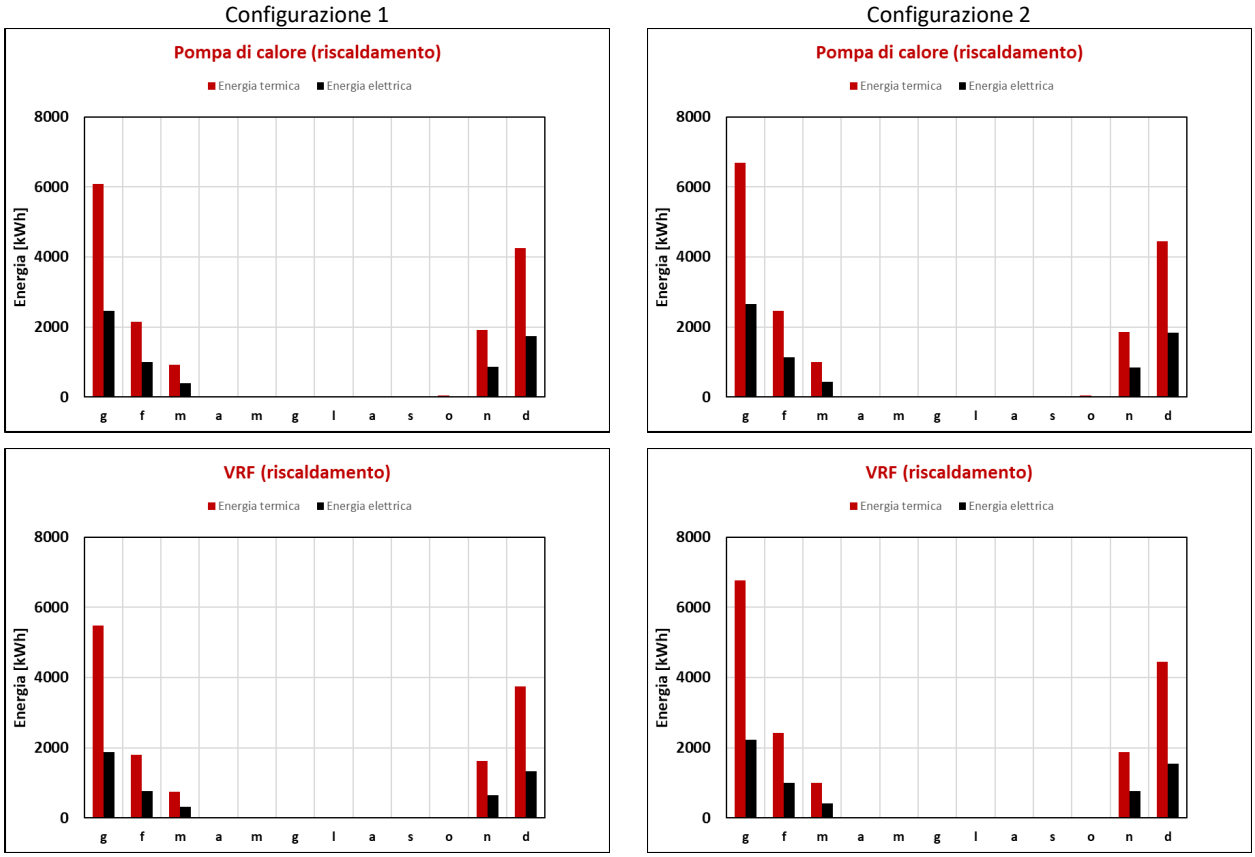


Figura 104. Zona F - Confronto tra configurazione 1 e 2, fabbisogni termici ed elettrici (riscaldamento)

Per completezza, sono riportate in forma tabellare le energie termiche fornite per la configurazione 1 (Tabella 41) e la configurazione 2 (Tabella 42), e le relative energie elettriche in Tabella 43 e Tabella 44, rispettivamente.

Tabella 41. Energia termica mensile e annuale fornita per il riscaldamento nelle differenti configurazioni di impianto e zone climatiche nella configurazione 1

Energia termica [kWh]										
	zona AB		zona C		zona D		zona E		zona F	
	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF
Gen	1511,4	1609,8	1994,3	2145,6	2299,3	2319,9	3051,4	3146,6	6083,6	5488,7
Feb	778,0	742,3	1639,2	1639,1	792,5	736,3	656,4	661,9	2159,5	1810,3
Mar	283,0	263,5	831,6	797,2	348,2	310,7	128,5	132,5	917,4	744,3
Apr	0	0	0,0	0	0,5	0,0	5,1	4,7	22,1	13,9
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	0	0,0	0	61,4	62,7	48,0	37,6
Nov	0	0	675,7	674,3	194,3	175,0	912,2	922,4	1915,3	1630,7
Dic	500,5	459,58	1569,4	1562,4	1314,9	1253,2	2570,9	2602,1	4254,8	3754,0
Anno	**3072,9**	**3075,2**	**6710,2**	**6818,5**	**4949,8**	**4795,1**	**7386,0**	**7532,8**	**15400,7**	**13479,5**

Tabella 42. Energia termica mensile e annuale fornita per il riscaldamento nelle differenti configurazioni di impianto e zone climatiche nella configurazione 2

Energia termica [kWh]										
	zona AB		zona C		zona D		zona E		zona F	
	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF
Gen	2028,7	2243,1	2608,1	2809,5	3183,8	3296,9	4115,9	4251,0	6691,4	6763,7
Feb	1119,6	1108,5	2042,4	2027,3	1105,9	1115,0	921,7	933,7	2460,4	2426,0
Mar	442,5	421,2	1075,9	1003,5	489,3	486,2	187,7	188,4	997,1	1002,4
Apr	0	2,0	0,0	10,8	0,7	0,7	5,2	4,6	21,7	19,6
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	0	0	0	58,2	42,1	49,1	34,3
Nov	0	14,2	857,1	869,2	201,7	199,4	1109,6	1129,8	1851,8	1885,1
Dic	713,1	672,4	1941,3	1924,2	1683,9	1686,6	3235,1	3260,5	4440,5	4441,3
Anno	**4303,9**	**4461,4**	**8524,8**	**8644,6**	**6665,3**	**6784,8**	**9633,5**	**9810,0**	**16512,1**	**16572,5**

Tabella 43. Energia elettrica mensile e annuale assorbita per il riscaldamento nelle differenti configurazioni di impianto e zone climatiche nella configurazione 1

Energia elettrica [kWh]										
	zona AB		zona C		zona D		zona E		zona F	
	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF
Gen	463,6	437,89	604,9	597,3	768,5	726,5	1091,6	1035,2	2454,2	1884,7
Feb	282,6	260,86	581,8	568,3	306,4	290,8	281,3	260,9	1007,3	764,3
Mar	105,4	96,86	292,7	257,7	130,9	115,1	55,2	54,5	402,9	312,3
Apr	0	0	0	0	0,2	0,0	2,1	1,8	9,9	6,2
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	0	0	0	24,1	20,5	21,6	17,1
Nov	0	0	223,8	212,1	73,2	65,2	370,3	353,7	865,9	657,0
Dic	177,9	155,2	519,7	486,6	482,8	462,6	949,4	895,3	1746,5	1335,8
Anno	**1029,6**	**950,8**	**2222,9**	**2122,0**	**1762,1**	**1660,2**	**2773,9**	**2621,9**	**6508,3**	**4977,4**

Tabella 44. Energia elettrica mensile e annuale assorbita per il riscaldamento nelle differenti configurazioni di impianto e zone climatiche nella configurazione 2

Energia elettrica [kWh]										
	zona AB		zona C		zona D		zona E		zona F	
	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF
Gen	598,3	604,0	782,9	768,2	1020,9	989,9	1419,0	1345,8	2654,7	2225,1
Feb	399,7	389,6	717,8	702,0	422,1	424,6	392,8	367,2	1131,3	998,6
Mar	163,4	154,8	379,0	325,3	183,2	176,1	80,5	77,3	432,9	418,0
Apr	0,0	0,7	0	3,9	0,3	0,3	2,2	1,8	9,6	9,0
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	0	0	0	23,1	14,7	21,1	15,5
Nov	0	5,4	284,5	278,8	77,2	74,7	459,0	440,0	843,0	759,9
Dic	250,9	228,1	643,1	603,7	609,4	600,6	1195,8	1119,7	1845,7	1554,3
Anno	**1412,4**	**1382,5**	**2807,3**	**2681,8**	**2313,0**	**2266,1**	**3572,3**	**3366,6**	**6938,4**	**5980,4**

6.2.2 Climatizzazione estiva

Il carico termico per la climatizzazione estiva dell'utenza considerata nel presente report è nettamente più significativo rispetto alla climatizzazione invernale. Il layout impiantistico basato su pompa di calore prevede, per tutte le zone climatiche, il funzionamento di due generatori, con capacità pari a 49,9 e 35,9 kW, operanti in parallelo secondo una gestione ottimizzata in termini di carico parziale. È ben noto che in un'utenza del settore terziario l'indice di affollamento è ben superiore rispetto ad un'utenza residenziale, ragion per cui il carico termico da bilanciare nei mesi estivi risulta più consistente. Seguendo la rappresentazione utilizzata nel paragrafo 6.2.1 per le prestazioni invernali degli impianti, le figure seguenti (Figura 105-Figura 109) mostrano la temperatura media esterna, l'EER medio giornaliero e l'EER medio stagionale per ogni caso di studio. Per la stagione estiva, la differenza di prestazioni tra pompa di calore aria-acqua e pompa di calore aria-aria ad espansione diretta è molto più marcata rispetto al caso invernale: a fronte di un quantitativo di energia termica erogata dello stesso ordine di grandezza, come si vedrà successivamente, l'energy efficiency ratio annuale del sistema PdC varia tra 2,6 (zone E ed F per entrambe le configurazioni di involucro) e 2,8 (zona A-B) mentre per il sistema VRF ci si trova tra 4,8 (zona C) e 6,4 (zona D).
Gli *energy efficiency ratio* di tutti i casi di studio sono rappresentati nella Figura 110.

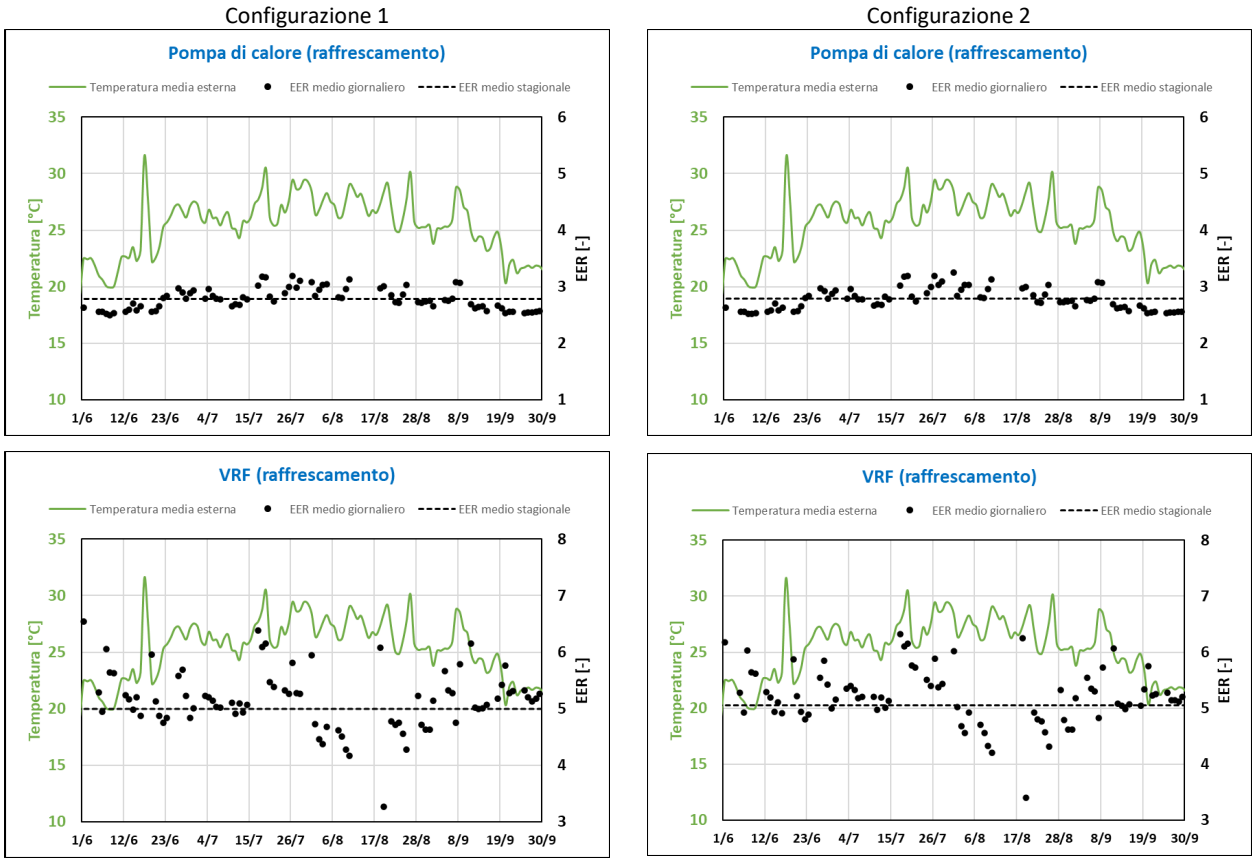


Figura 105. Andamento dell'EER in raffrescamento, zona climatica AB

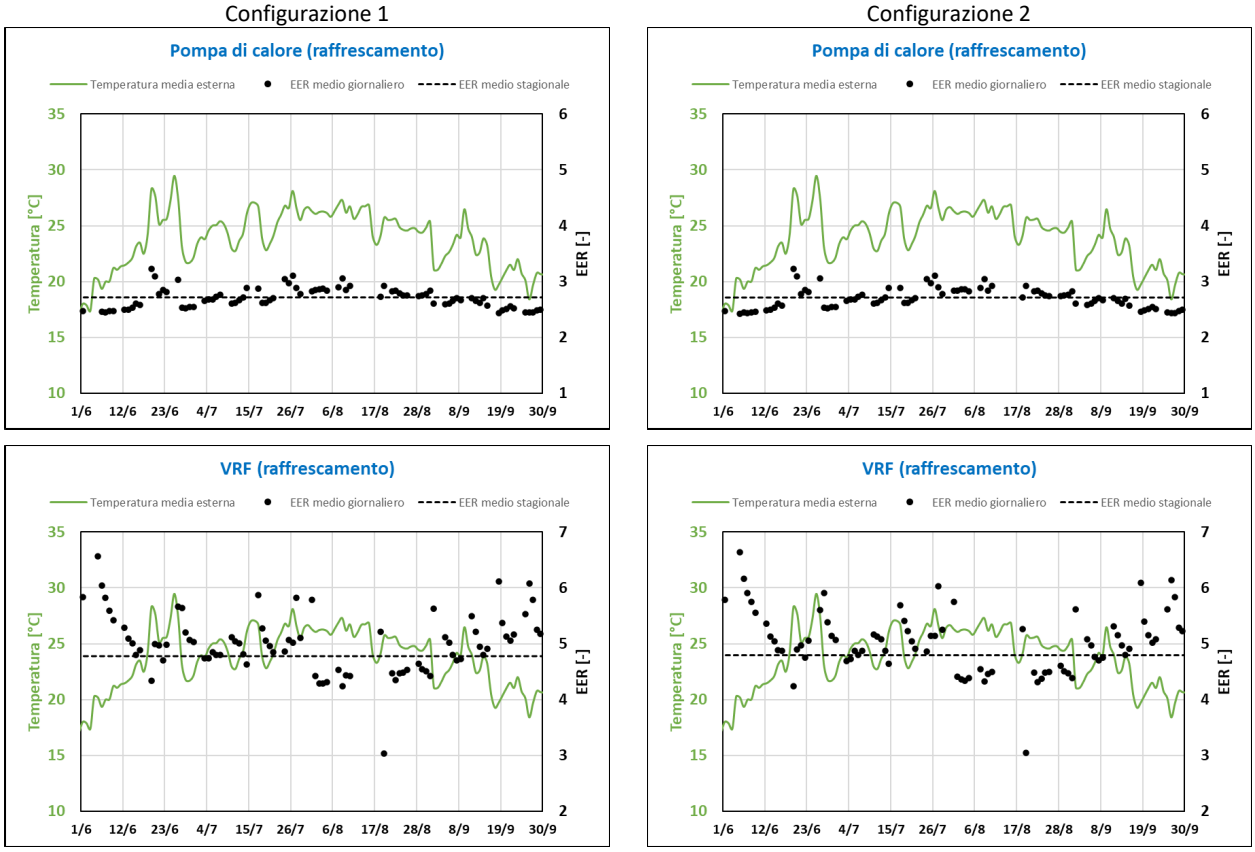


Figura 106. Andamento dell'EER in raffrescamento, zona climatica C

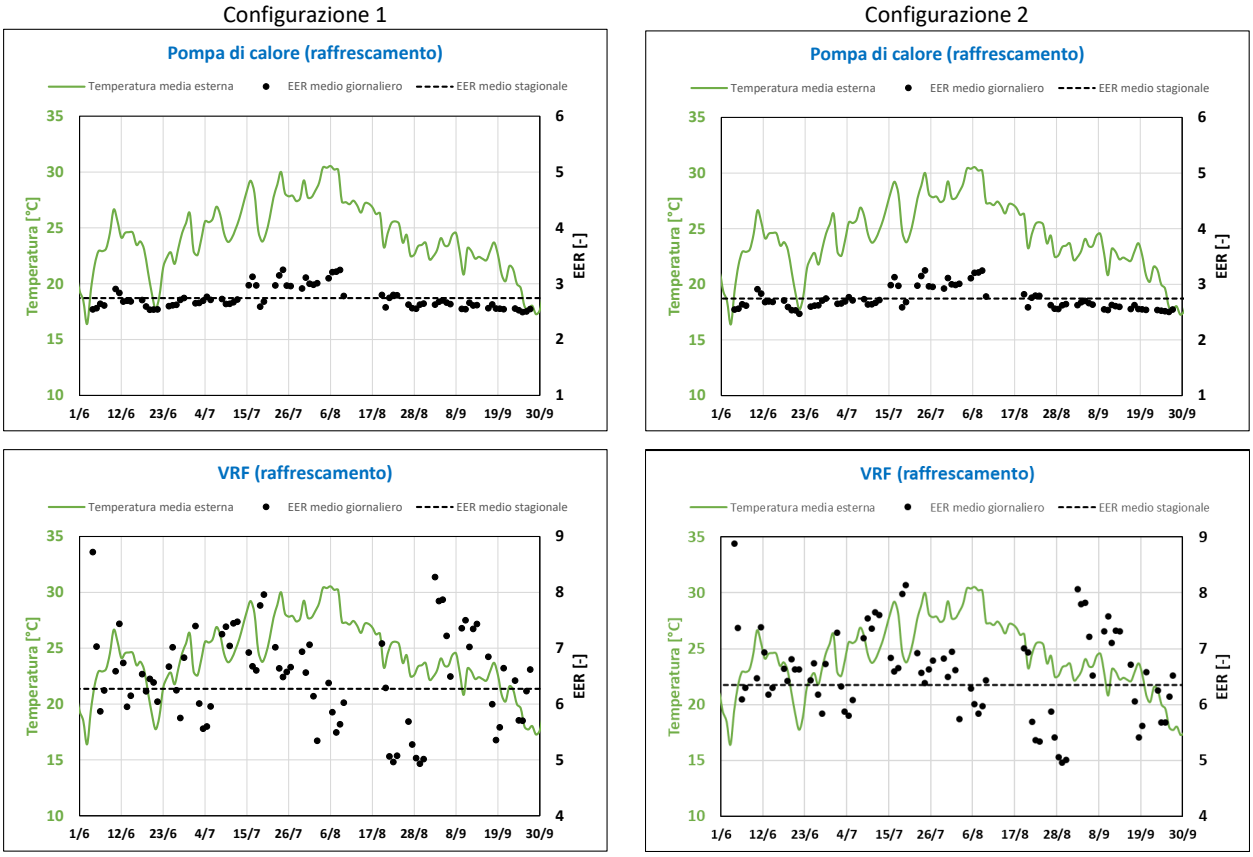


Figura 107. Andamento dell'EER in raffrescamento, zona climatica D

Configurazione 1 | Configurazione 2

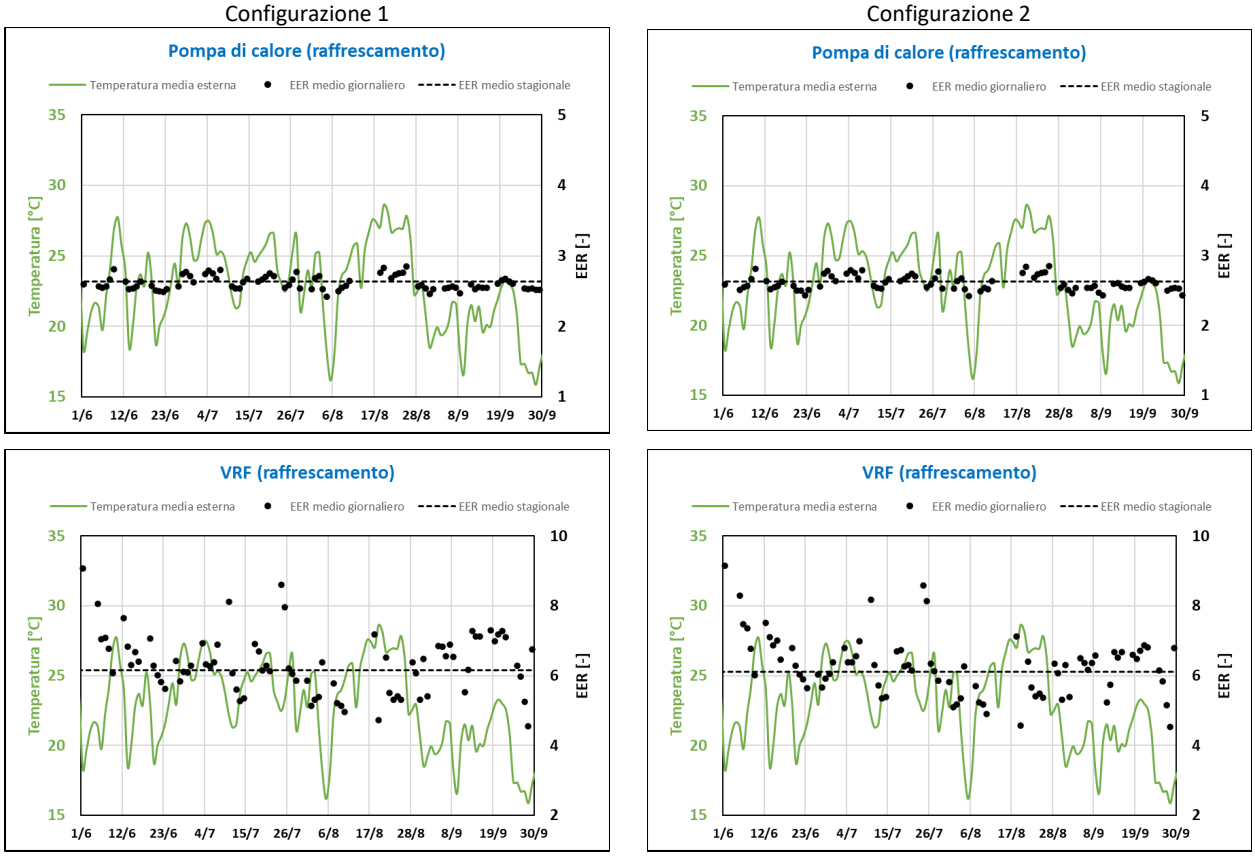


Figura 108. Andamento dell'EER in raffrescamento, zona climatica E

Configurazione 1 | Configurazione 2

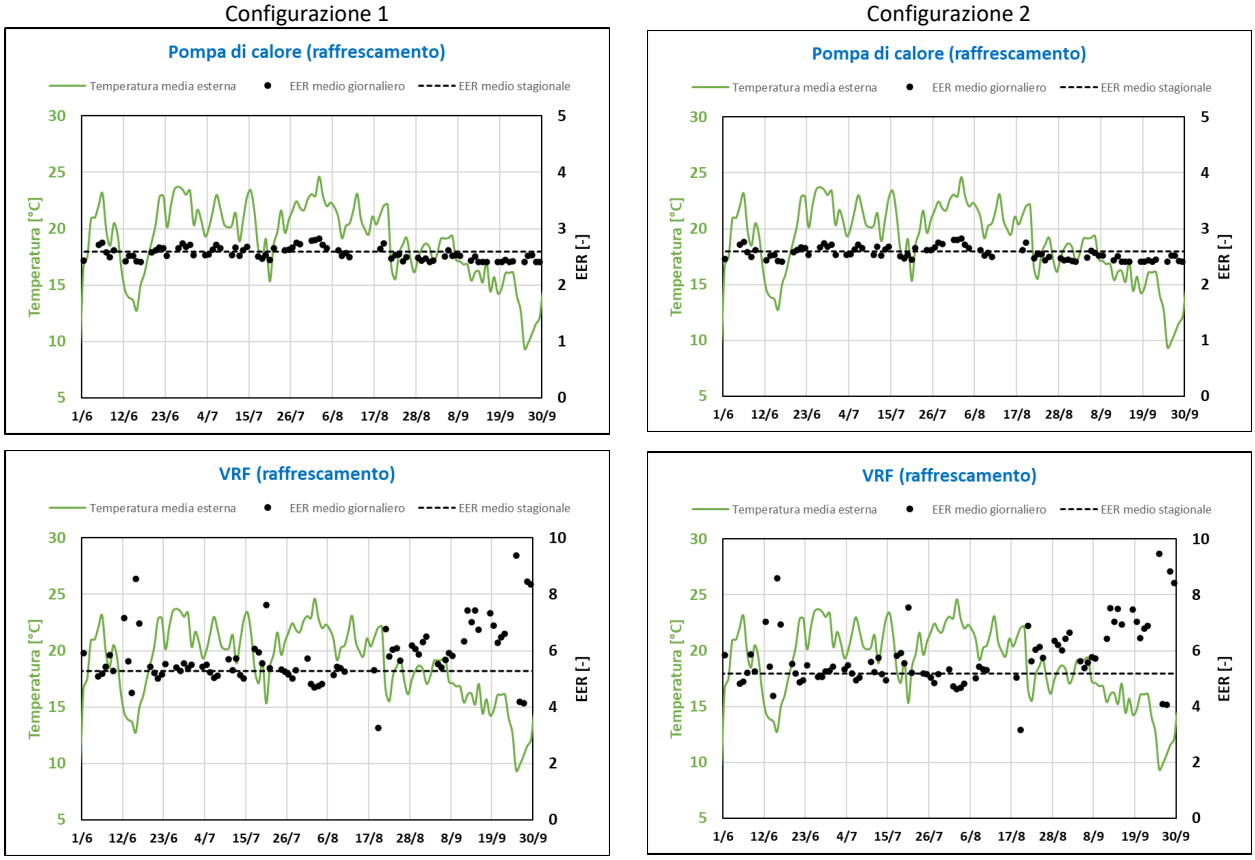


Figura 109. Andamento dell'EER in raffrescamento, zona climatica F

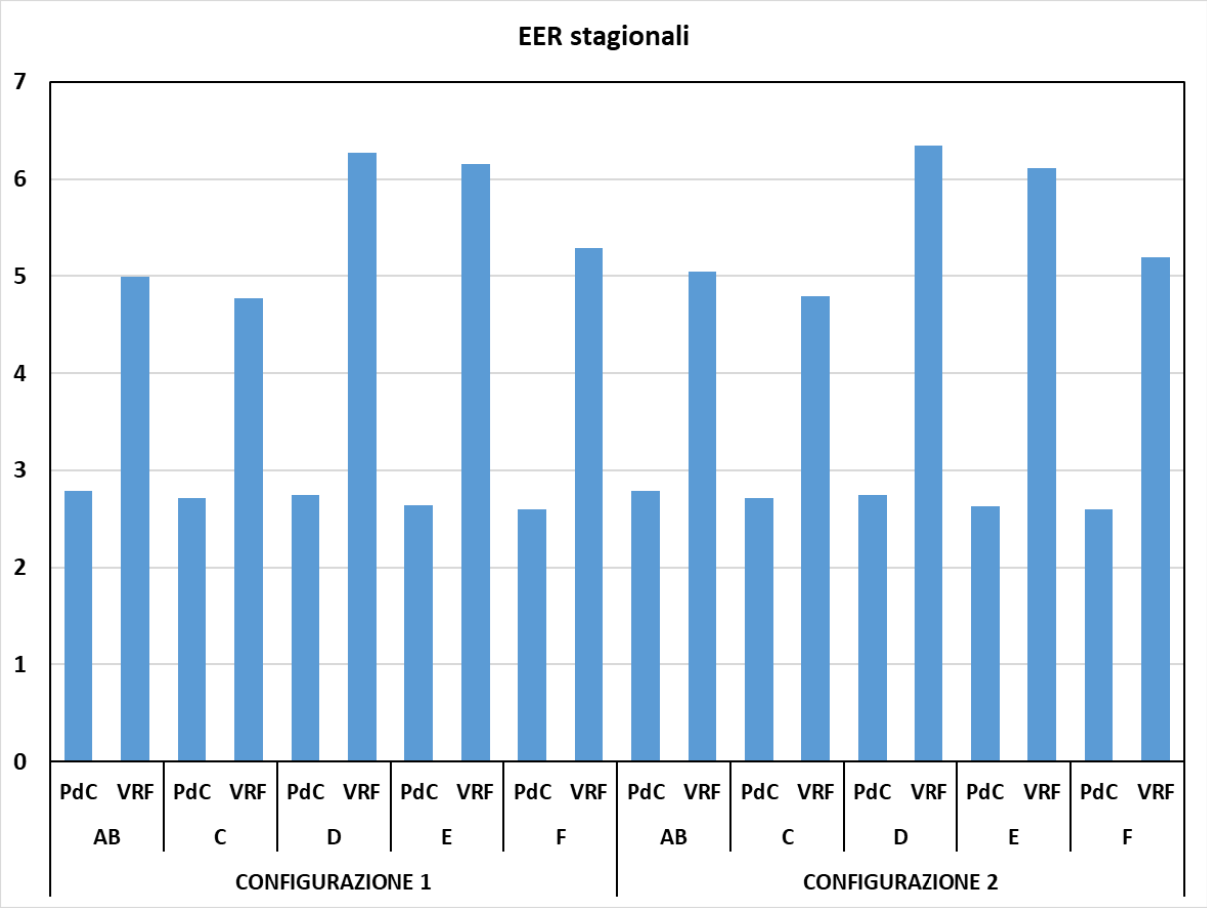


Figura 110. Panoramica degli EER stagionali degli impianti HVAC, divisi per configurazione di involucro e zona climatica

La somma mensile dell'energia erogata e dell'energia assorbita dagli impianti HVAC per la climatizzazione estiva è riportata nelle figure seguenti per le zone A-B (Figura 111), C (Figura 112), D (Figura 113), E (Figura 114) ed F (Figura 115); al contrario della stagione invernale, l'energia necessaria per il raffrescamento della configurazione 2, a parità di impianto e di zona climatica, è paragonabile a quella relativa alla configurazione 1. Le considerazioni già svolte nel paragrafo 6.1.1 concernenti il file climatico utilizzato per la zona D costituiscono la base per comprendere il maggiore fabbisogno energetico in raffrescamento per la zona D (42 MWh/anno, configurazione 2) rispetto alla zona A-B, ovvero quella con più gradi giorno (39 MWh, PdC, configurazione 2). Il mese con esigenze maggiori di raffrescamento è luglio, che può superare i 14 MWh per la zona D, mentre agosto non arriva a 10 MWh, complice la settimana di vacanza nel periodo di Ferragosto.

Configurazione 1 | Configurazione 2

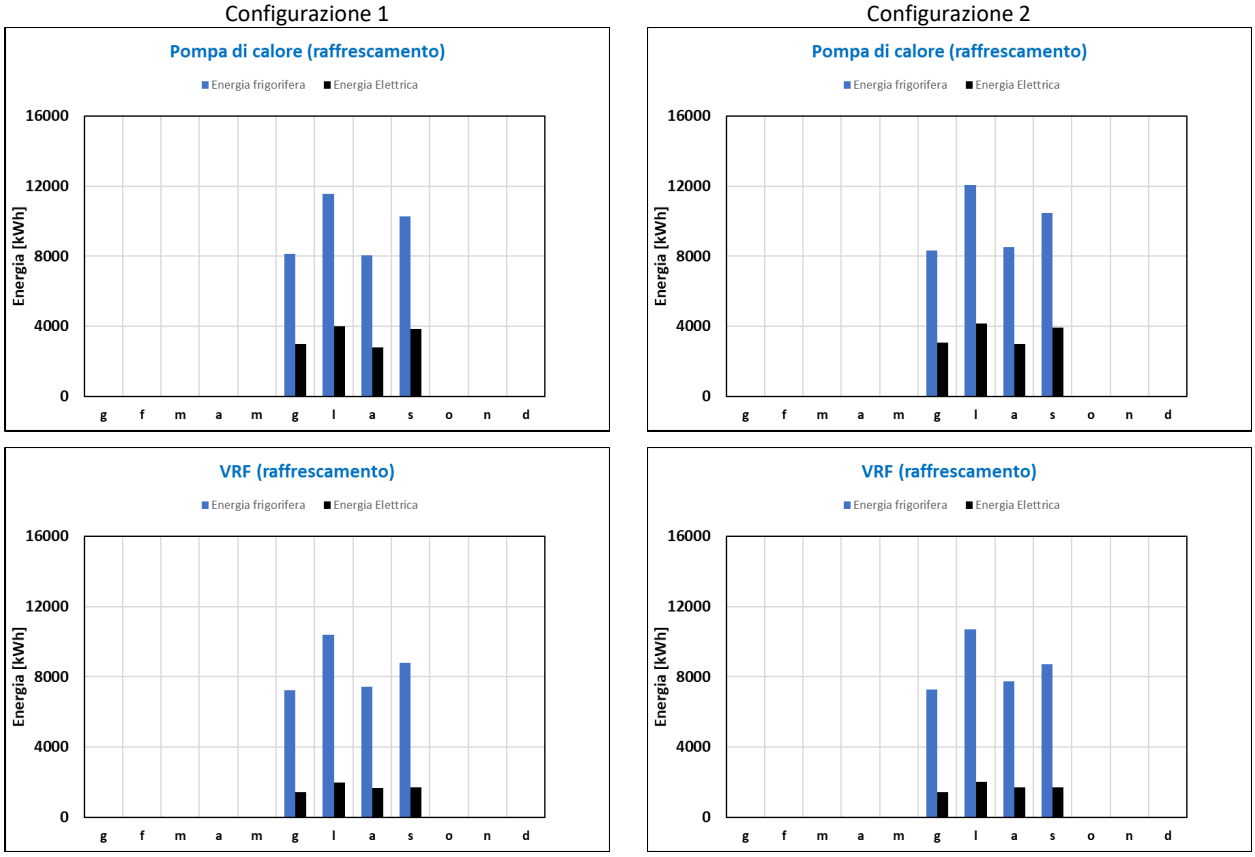


Figura 111. Zona A-B - Confronto tra configurazione 1 e 2, fabbisogni termici ed elettrici (raffrescamento)

Configurazione 1 | Configurazione 2

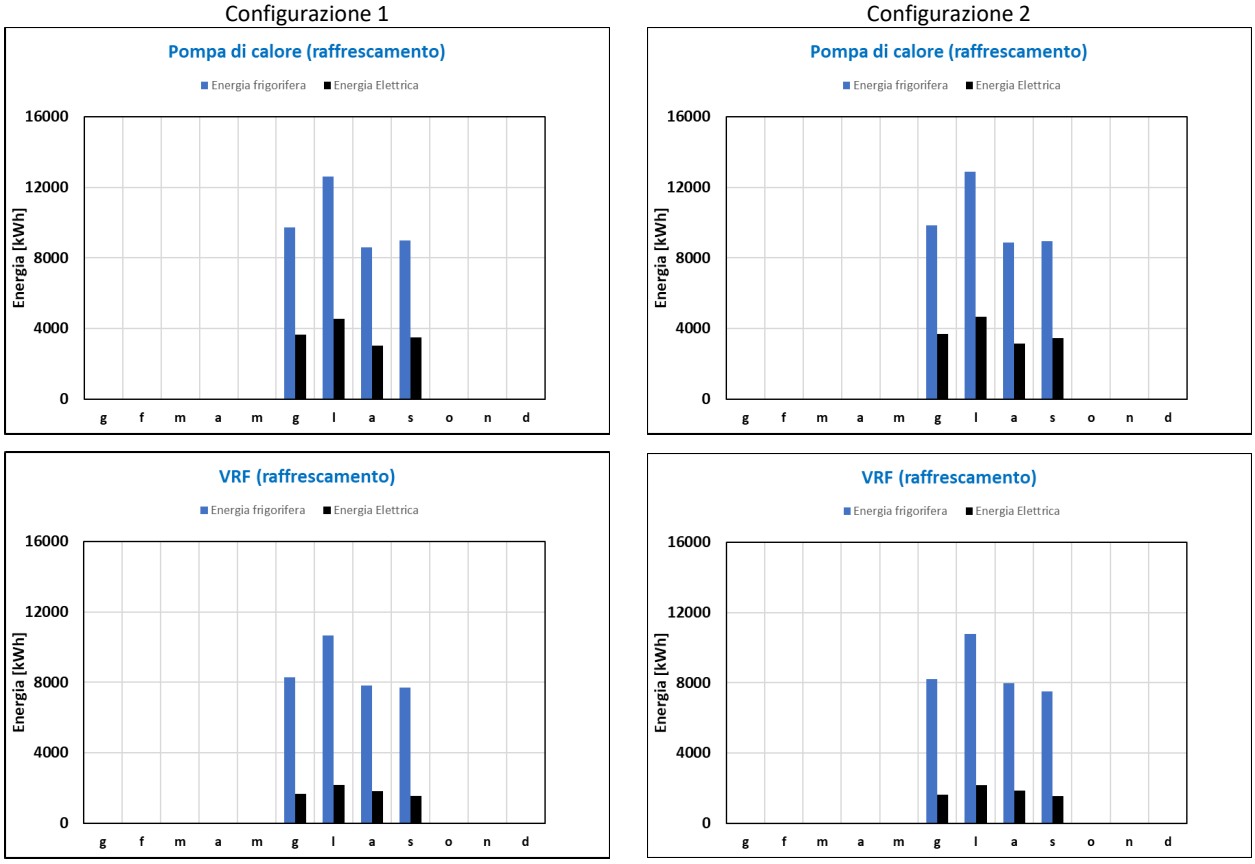


Figura 112. Zona C - Confronto tra configurazione 1 e 2, fabbisogni termici ed elettrici (raffrescamento)

Configurazione 1 | Configurazione 2

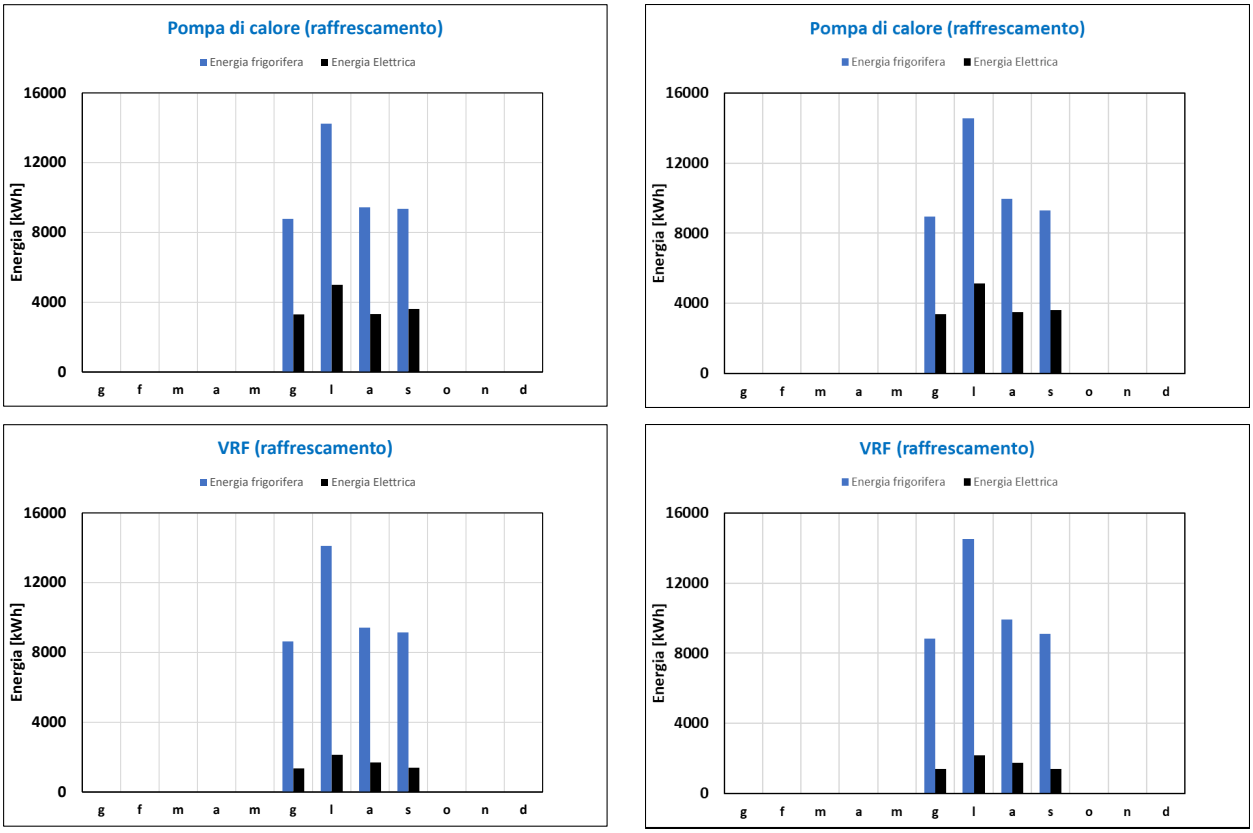


Figura 113. Zona D - Confronto tra configurazione 1 e 2, fabbisogni termici ed elettrici (raffrescamento)

Configurazione 1 Configurazione 2

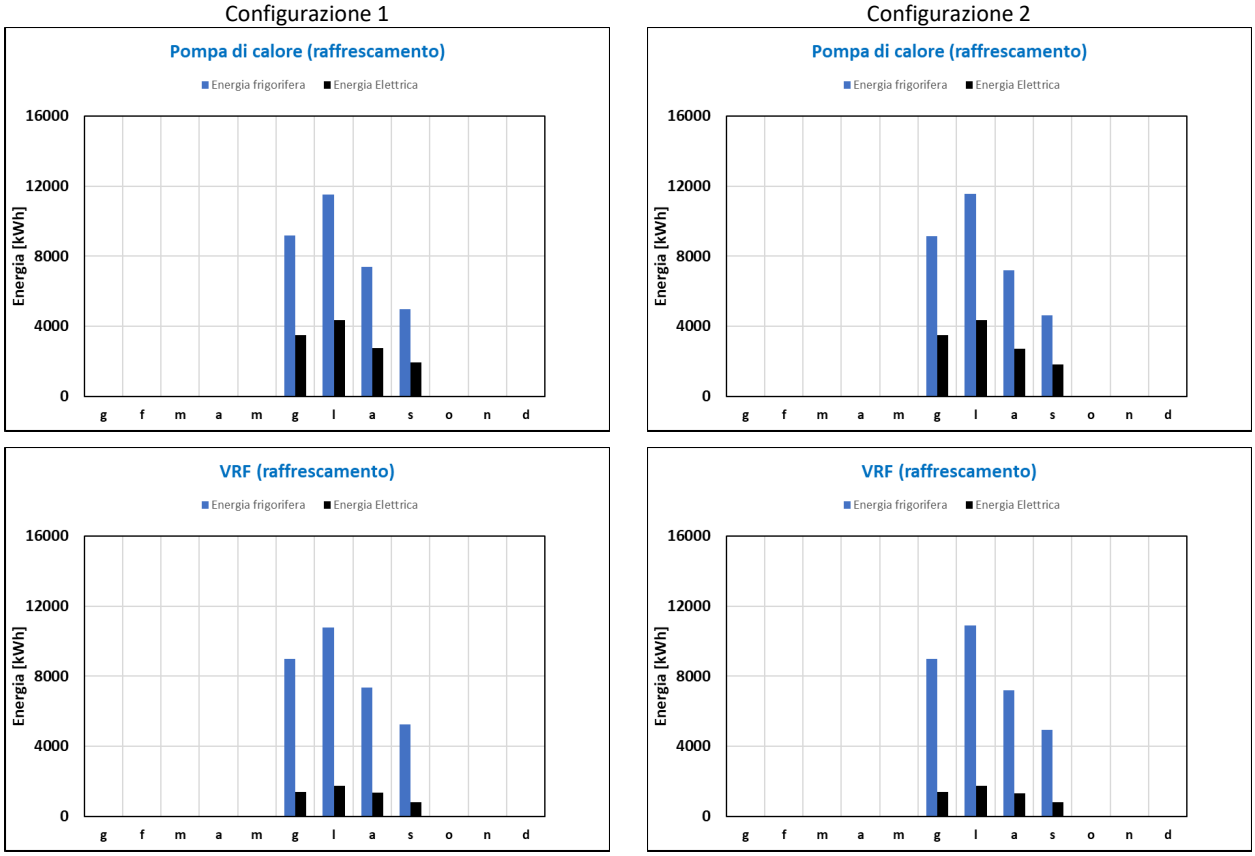


Figura 114. Zona E - Confronto tra configurazione 1 e 2, fabbisogni termici ed elettrici (raffrescamento)

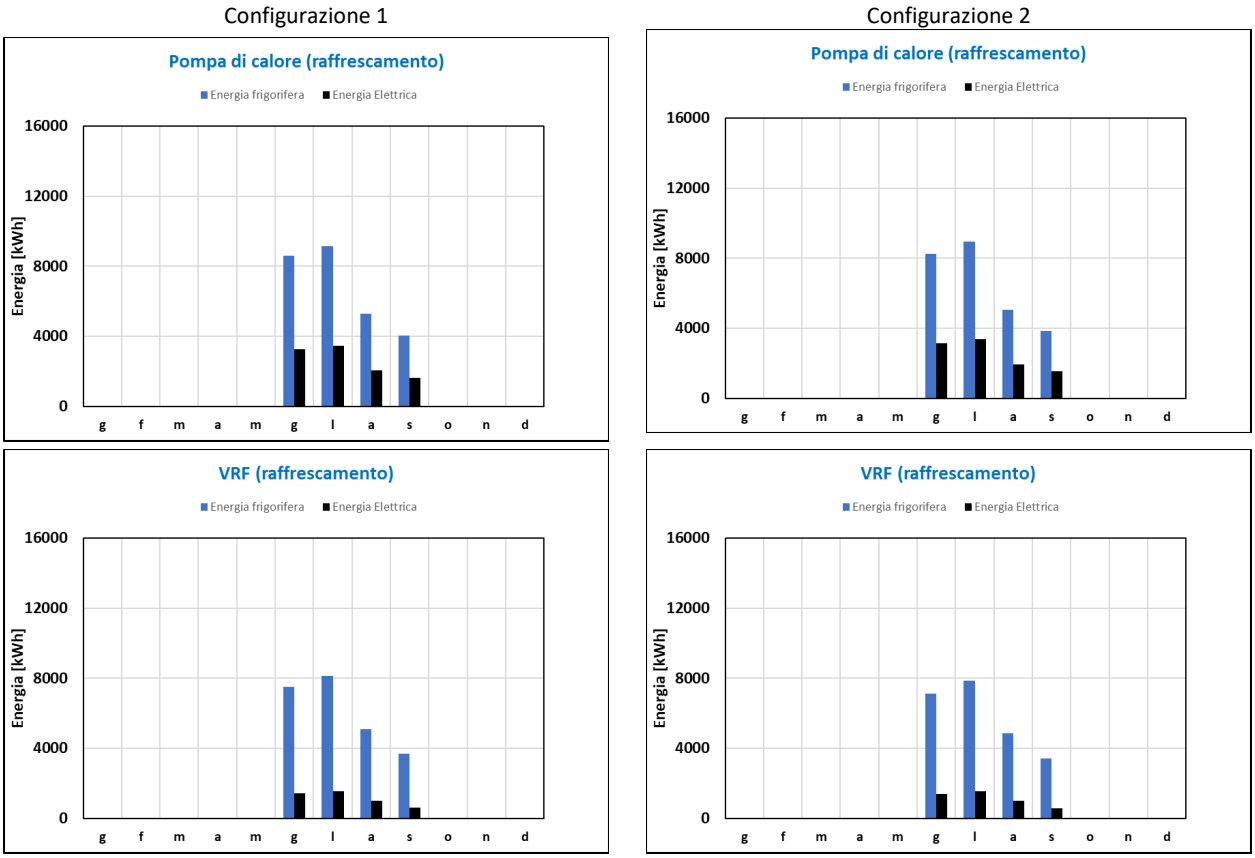


Figura 115. Zona F - Confronto tra configurazione 1 e 2, fabbisogni termici ed elettrici (raffrescamento)

Per completezza, sono riportate in forma tabellare le energie termiche fornite per la configurazione 1 (Tabella 45) e la configurazione 2 (Tabella 46), e le relative energie elettriche in Tabella 47 e Tabella 48, rispettivamente.

Tabella 45. Energia termica mensile e annuale fornita per il raffrescamento nelle differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche nella configurazione 1

Energia termica [kWh]										
	zona AB		zona C		zona D		zona E		zona F	
	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF
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	8117,4	7247,9	9741,7	8282,4	8778,5	8628,2	9165,1	8968,6	8610,5	7511,5
Lug	11555,9	10366,3	12591,2	10677,6	14233,3	14103,4	11530,8	10780,7	9131,0	8129,4
Ago	8036,5	7409,3	8590,8	7811,7	9445,3	9418,4	7372,4	7337,7	5278,8	5069,5
Set	10280,8	8797,6	8992,3	7689,2	9352,8	9144,0	4966,8	5247,8	4025,7	3688,2
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	**37990,7**	**33821,2**	**39915,9**	**34460,8**	**41809,9**	**41294,1**	**33035,1**	**32334,9**	**27046,1**	**24398,6**

Tabella 46. Energia termica mensile e annuale fornita per il raffrescamento nelle differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche nella configurazione 2

Energia termica [kWh]										
	zona AB		zona C		zona D		zona E		zona F	
	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF
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	8321,8	7251,9	9847,3	8207,6	8951,3	8844,5	9139,2	8980,6	8252,6	7099,8
Lug	12062,2	10686,2	12893,9	10793,6	14558,6	14528,1	11541,9	10875,5	8941,9	7859,7
Ago	8519,0	7747,6	8859,9	7956,0	9952,2	9934,0	7202,9	7190,9	5063,1	4856,1
Set	10456,3	8704,3	8933,3	7520,1	9294,7	9089,8	4632,0	4912,4	3848,6	3425,6
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	**39359,3**	**34390,0**	**40534,4**	**34477,4**	**42756,9**	**42396,3**	**32515,9**	**31959,4**	**26106,3**	**23241,2**

Tabella 47. Energia elettrica mensile e annuale fornita per il raffrescamento nelle differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche nella configurazione 1

Energia elettrica [kWh]										
	zona AB		zona C		zona D		zona E		zona F	
	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF
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	3001,1	1422,6	3635,8	1666,0	3303,8	1356,9	3501,0	1382,3	3273,6	1421,6
Lug	3984,8	1977,0	4542,7	2159,6	5004,1	2133,5	4328,9	1725,5	3463,2	1558,1
Ago	2799,9	1655,8	3032,3	1828,1	3321,9	1696,0	2767,7	1334,5	2029,0	1013,7
Set	3853,0	1714,5	3481,7	1559,1	3615,2	1397,4	1931,3	811,3	1624,2	618,5
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	**13638,8**	**6769,9**	**14692,6**	**7212,9**	**15245,0**	**6583,7**	**12529,0**	**5253,5**	**10390,1**	**4611,9**

Tabella 48. Energia elettrica mensile e annuale assorbita per il raffrescamento nelle differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche nella configurazione 2

Energia elettrica [kWh]										
	zona AB		zona C		zona D		zona E		zona F	
	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF
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	3076,0	1414,5	3681,9	1639,0	3374,1	1368,8	3503,7	1381,9	3137,8	1390,4
Lug	4139,4	1995,9	4654,5	2162,7	5116,0	2183,4	4337,0	1729,5	3391,4	1540,8
Ago	2970,6	1688,5	3131,6	1854,6	3497,4	1723,5	2717,5	1318,0	1948,0	976,8
Set	3921,4	1708,1	3463,2	1534,5	3597,8	1399,7	1810,2	802,1	1553,7	569,4
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	**14107,4**	**6806,9**	**14931,3**	**7190,8**	**15585,3**	**6675,5**	**12368,4**	**5231,5**	**10030,9**	**4477,3**

6.2.3 Ventilazione meccanica e recupero di calore

La ventilazione meccanica controllata è un elemento fondamentale per la progettazione di un impianto di condizionamento ambientale, in particolare per un'utenza come quella oggetto di studio che è soggetta a vincoli normativi su ricambio e ricircolo dell'aria. Come è noto, tra i carichi elettrici, la ventilazione meccanica controllata costituisce una consistente aliquota tutt'altro che trascurabile. Infatti, l'azionamento dei ventilatori di mandata e di estrazione di una portata d'aria che può arrivare a 30.000 m^3/h richiede una notevole quantità di energia, i cui valori sono stati riportati per entrambe le configurazioni di impianto e per entrambi i sistemi di generazione in Figura 116 per la zona A-B, in Figura 117 per la zona C, in Figura 118 per la zona D, in Figura 119 per la zona E ed in Figura 120 per la zona F. Sull'asse orizzontale si trovano i mesi dell'anno, mentre su quello verticale c'è l'energia elettrica assorbita. Infine, nella Figura 121 sono stati aggregati i valori annuali dell'energia elettrica assorbita, dettagliati insieme ai valori mensili in Tabella 49 per la configurazione 1 e in Tabella 50 per la configurazione 2. Il ristretto intervallo di variazione del fabbisogno annuale per ogni configurazione e zona climatica si assesta su valori compresi da 12 e 15,5 MWh/anno; dal punto di vista mensile, al netto del mese di agosto, in cui l'occupazione registra una settimana di assenza, il fabbisogno di energia elettrica per la VMC è piuttosto stabile, con dei valori lievemente superiori per la configurazione 2 a parità di zona climatica considerata; questa differenza tra le configurazioni è chiaramente visibile nella Figura 121 dei valori annuali.

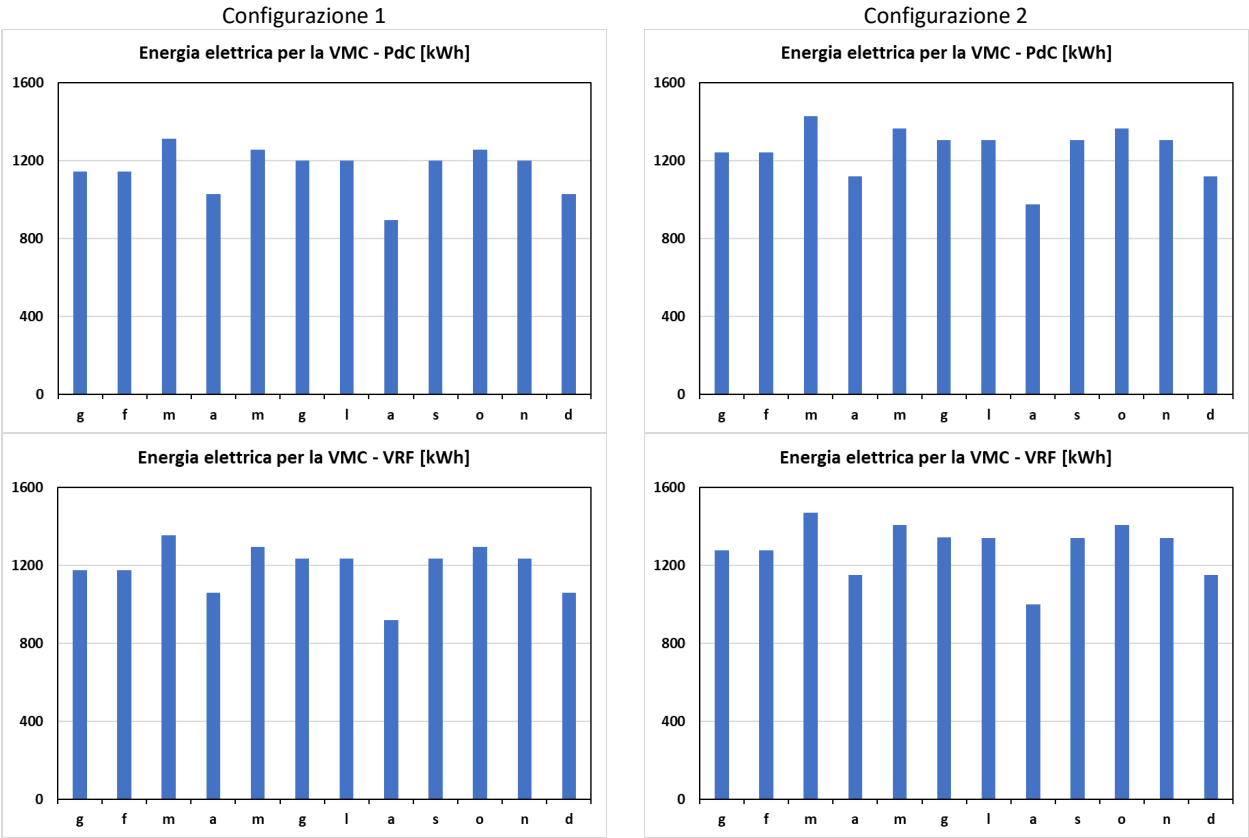


Figura 116. Edificio uffici in zona climatica A-B – Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2 del fabbisogno di energia elettrica mensile per la ventilazione meccanica controllata

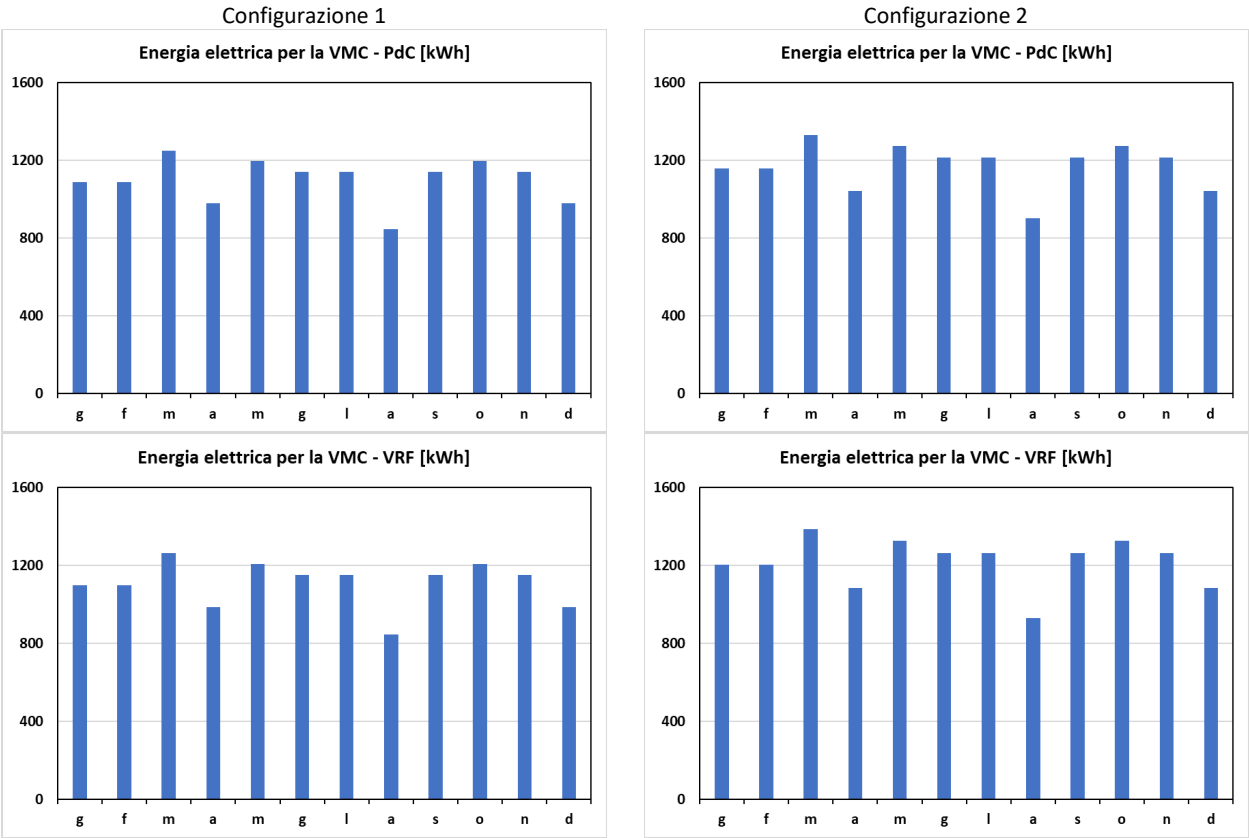


Figura 117. Edificio uffici in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2 del fabbisogno di energia elettrica mensile per la ventilazione meccanica controllata

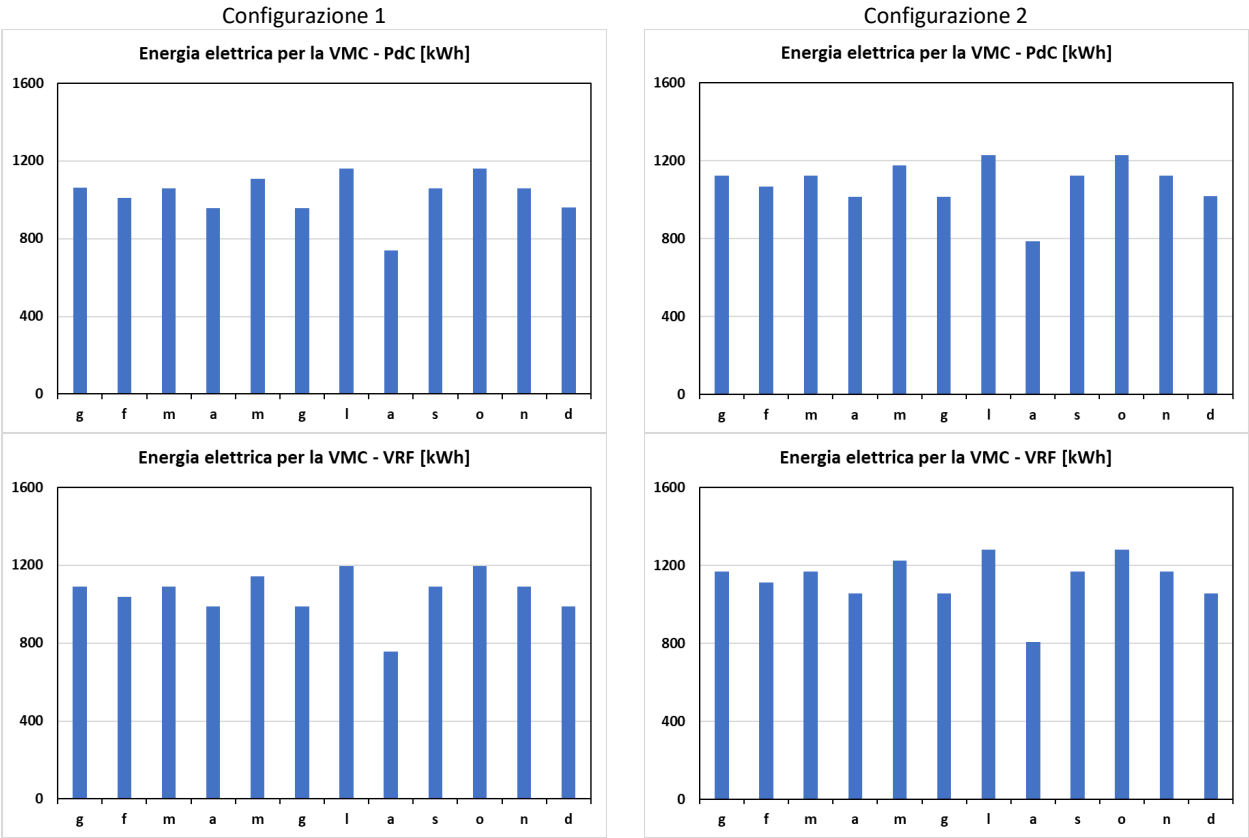


Figura 118. Edificio uffici in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2 del fabbisogno di energia elettrica mensile per la ventilazione meccanica controllata

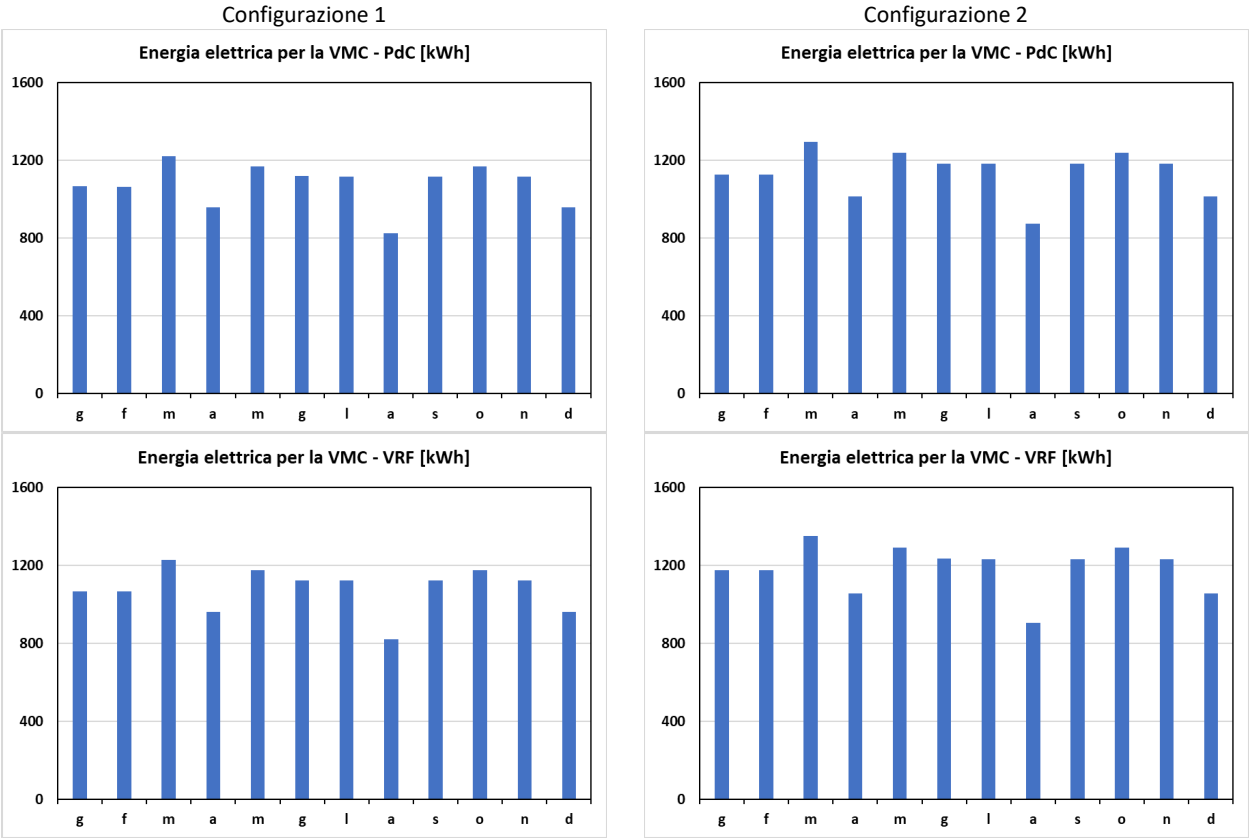


Figura 119. Edificio uffici in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2 del fabbisogno di energia elettrica mensile per la ventilazione meccanica controllata

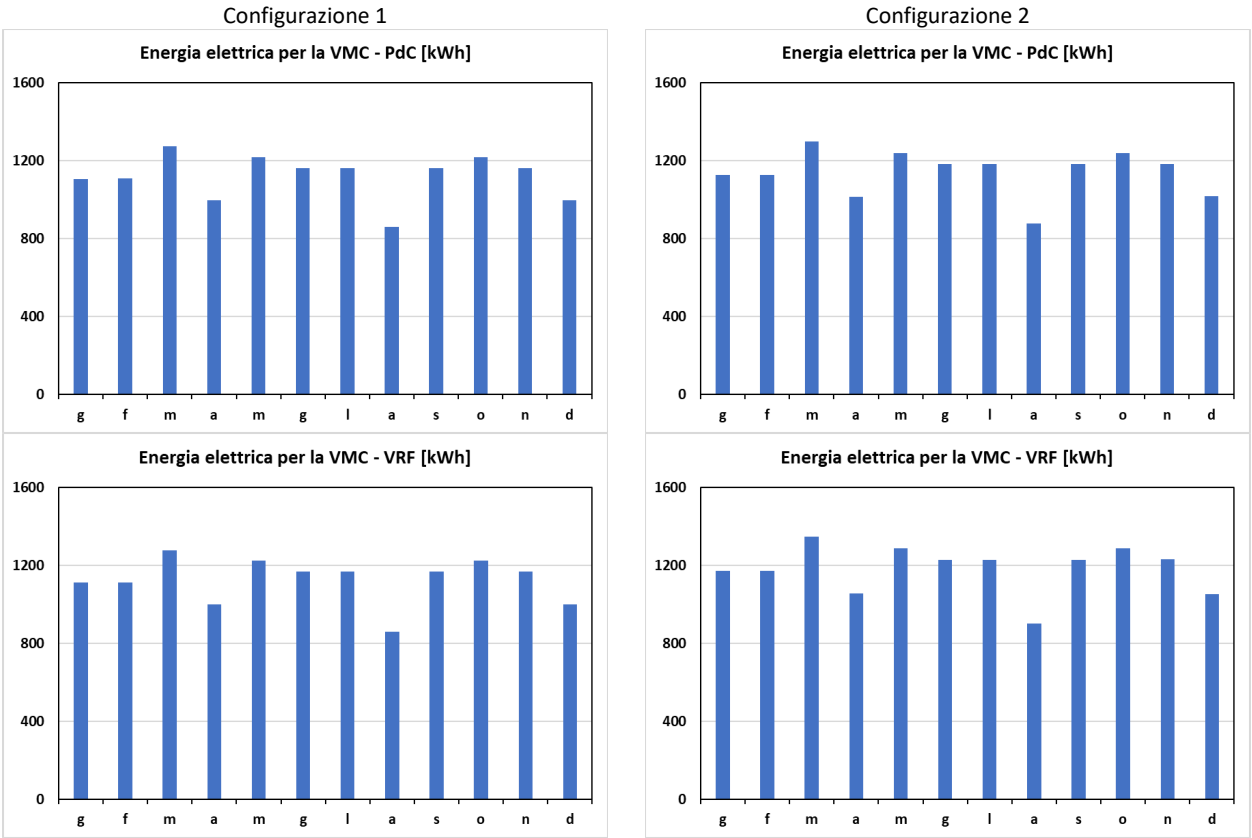


Figura 120. Edificio uffici in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2 del fabbisogno di energia elettrica mensile per la ventilazione meccanica controllata

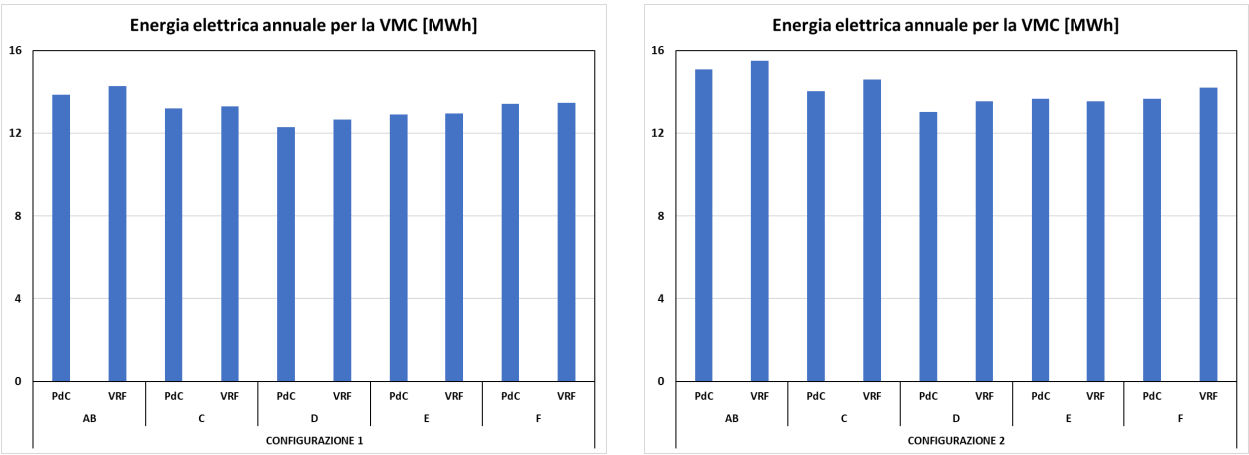


Figura 121. Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2 del fabbisogno di energia elettrica annuale per la ventilazione meccanica controllata

Tabella 49. Energia elettrica mensile e annuale fornita per la ventilazione meccanica controllata nelle differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche nella configurazione 1

Energia elettrica [kWh]										
	zona AB		zona C		zona D		zona E		zona F	
	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF
Gen	1142,8	1177,1	1087,9	1096,9	1061,6	1090,6	1067,2	1067,9	1107,1	1111,7
Feb	1142,8	1177,0	1087,9	1096,9	1007,9	1038,7	1065,3	1068,0	1108,6	1111,8
Mar	1314,3	1353,6	1251,0	1261,5	1058,3	1090,6	1223,3	1228,1	1274,7	1278,6
Apr	1028,6	1059,5	979,1	987,2	957,5	986,7	957,4	961,1	996,1	1000,5
Mag	1257,1	1294,9	1196,7	1206,8	1108,7	1142,5	1170,1	1174,5	1217,4	1222,9
Giu	1200,2	1235,8	1142,3	1151,6	958,0	986,8	1118,7	1123,0	1162,1	1167,2
Lug	1200,0	1235,8	1142,3	1151,6	1160,0	1196,1	1117,3	1121,5	1162,1	1167,2
Ago	894,7	918,4	845,5	846,9	739,9	756,8	825,7	822,1	860,9	858,4
Set	1200,0	1235,8	1142,5	1151,6	1058,5	1090,4	1117,5	1121,1	1162,2	1167,2
Ott	1257,1	1294,9	1196,7	1206,7	1159,1	1194,5	1170,1	1174,6	1217,4	1222,9
Nov	1200,0	1236,0	1142,3	1151,8	1058,3	1090,6	1117,8	1121,3	1162,1	1167,4
Dic	1028,6	1059,3	979,4	987,3	959,6	986,7	957,7	961,1	997,0	1000,6
Anno	**13866,3**	**14278,1**	**13193,3**	**13296,9**	**12287,4**	**12651,0**	**12908,2**	**12944,3**	**13427,7**	**13476,4**

Tabella 50. Energia elettrica mensile e annuale assorbita per la ventilazione meccanica controllata nelle differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche nella configurazione 2

Energia elettrica [kWh]										
	zona AB		zona C		zona D		zona E		zona F	
	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF
Gen	1243,2	1278,1	1157,6	1204,6	1124,2	1168,4	1128,2	1174,5	1128,1	1171,3
Feb	1242,9	1278,0	1157,6	1204,6	1068,8	1112,8	1128,3	1174,7	1127,8	1171,3
Mar	1429,4	1469,8	1331,2	1385,3	1122,2	1168,4	1295,0	1350,9	1297,5	1347,2
Apr	1118,6	1150,3	1041,8	1084,1	1015,3	1057,2	1013,5	1057,1	1014,2	1054,5
Mag	1367,2	1406,0	1273,3	1325,1	1175,6	1224,2	1238,7	1292,1	1239,6	1288,5
Giu	1305,5	1342,5	1215,5	1264,7	1015,9	1057,4	1183,0	1234,6	1183,3	1229,7
Lug	1305,3	1342,1	1215,5	1264,6	1229,7	1281,6	1182,5	1233,3	1183,3	1229,8
Ago	976,0	1000,8	901,7	930,4	784,9	808,3	875,6	903,6	877,2	902,5
Set	1305,1	1341,8	1216,0	1264,7	1122,5	1168,5	1182,9	1233,4	1183,3	1229,8
Ott	1367,2	1406,0	1273,3	1325,1	1229,1	1280,0	1238,7	1292,1	1239,6	1288,7
Nov	1305,1	1342,0	1215,5	1264,8	1122,2	1168,6	1182,4	1233,3	1183,4	1229,9
Dic	1118,6	1150,3	1042,0	1084,2	1017,9	1057,3	1016,2	1057,1	1017,0	1054,2
Anno	**15084,3**	**15507,6**	**14041,0**	**14602,3**	**13028,4**	**13552,8**	**13664,8**	**14236,6**	**13674,2**	**14197,6**

Seguendo le considerazioni illustrate nel paragrafo 5.3.3, ovvero l'utilità di sfruttare il recupero termico nell'unità di trattamento aria in estate e inverno per le zone A, B, C e D e solo in inverno per le zone E ed F, si riportano le figure e le tabelle con i risultati finali per la configurazione 1 (Figura 122 e Tabella 51) e per la configurazione 2 (Figura 123 e Tabella 52). A fronte di un valore massimo del 5% recuperato durante il raffrescamento, il valore minimo del 55% di energia risparmiata in regime di riscaldamento premia la scelta del recupero di calore in un'ottica di riduzione e razionalizzazione dell'uso dell'energia.

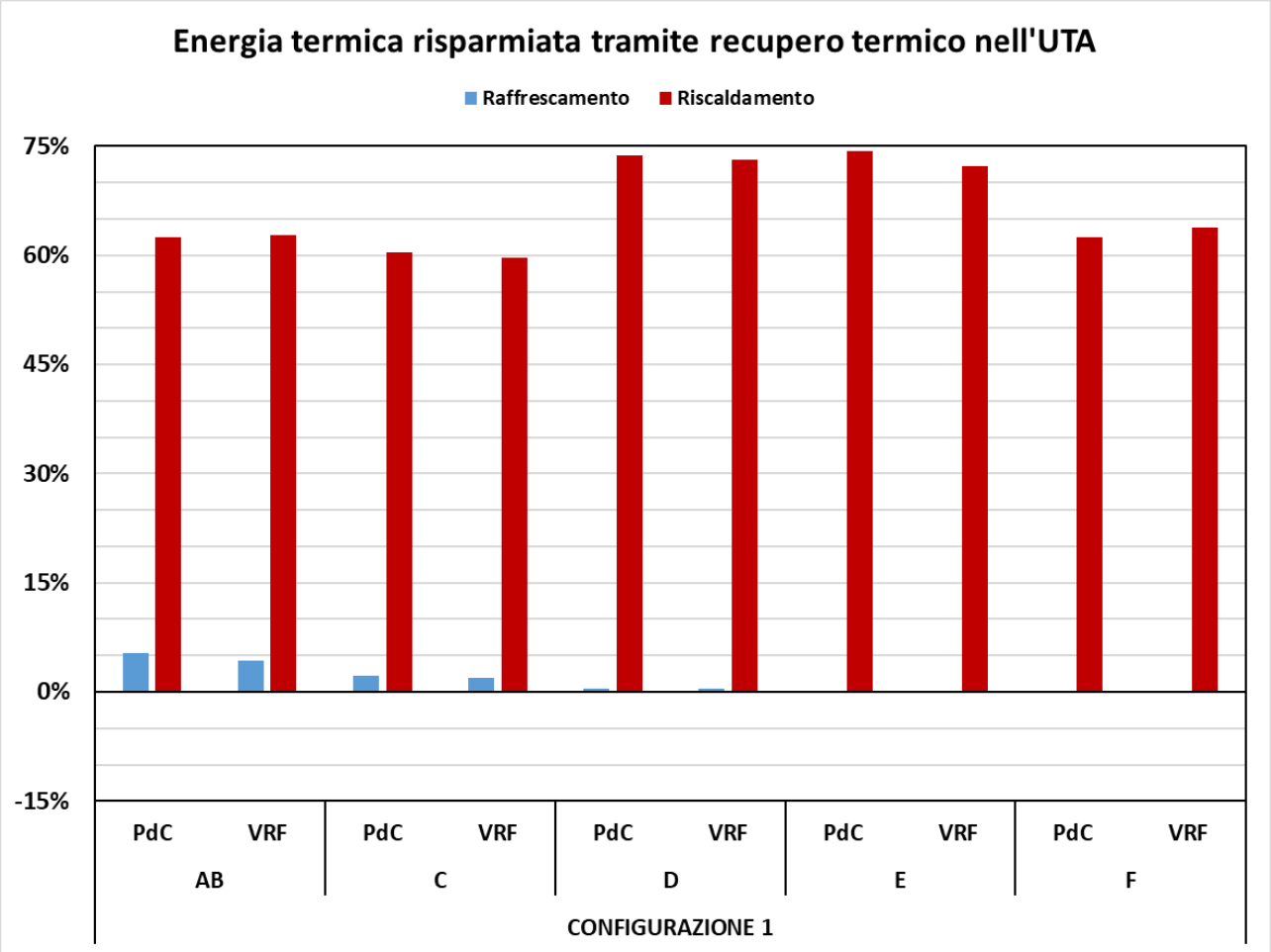


Figura 122. Stima dell'energia termica risparmiata grazie al recupero nell'unità di trattamento aria (configurazione 1)

Tabella 51. Valore percentuale dell'energia termica risparmiata grazie al recupero nell'unità di trattamento aria (configurazione 1)

	Energia termica evitata [%]									
	zona AB		zona C		zona D		zona E		zona F	
	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF
Raffrescamento	5,3	4,2	2,2	1,9	0,4	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Riscaldamento	62,4	62,8	60,4	59,6	73,8	73,2	74,4	72,2	62,5	63,7

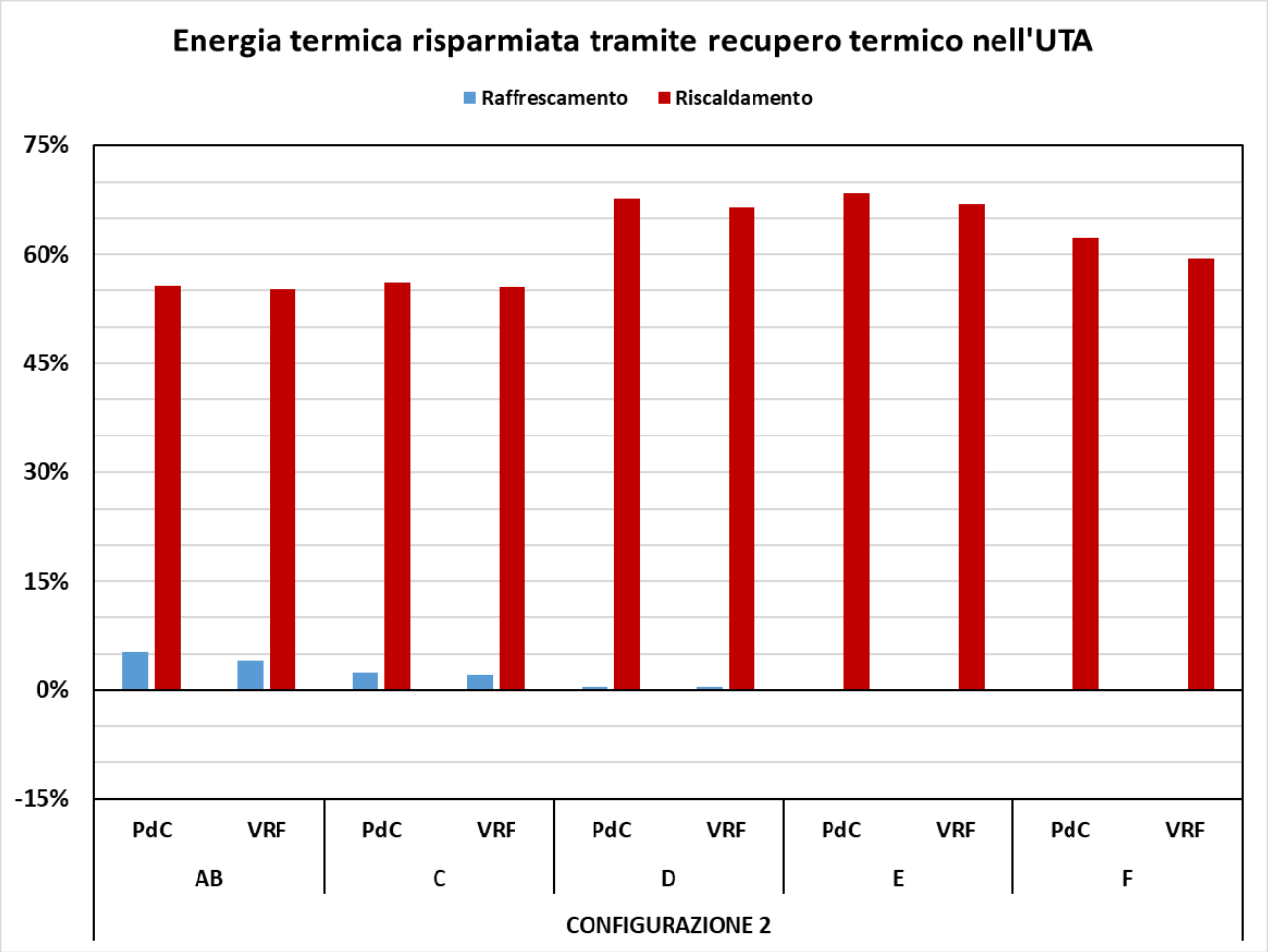


Figura 123. Stima definitiva dell'energia termica risparmiata grazie al recupero nell'unità di trattamento aria (configurazione 2)

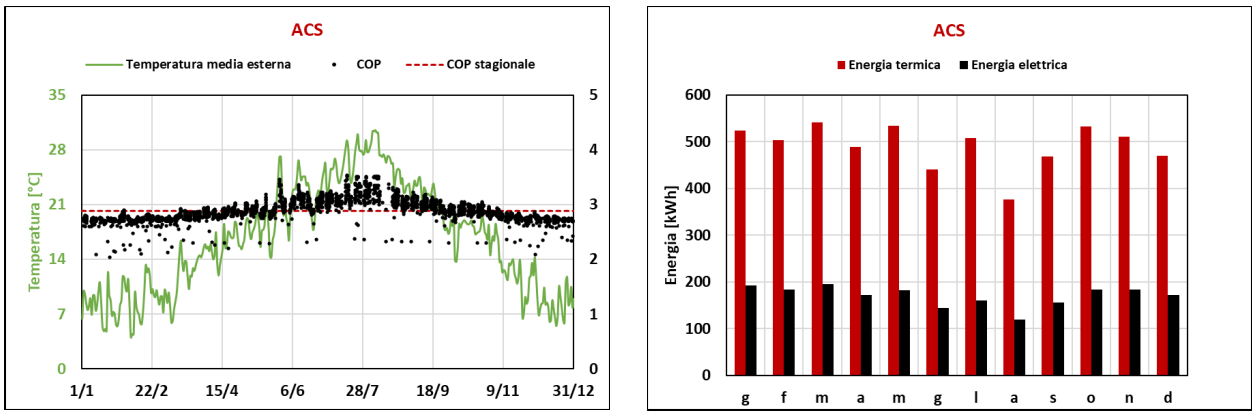
Tabella 52. Valore percentuale dell'energia termica risparmiata grazie al recupero nell'unità di trattamento aria (configurazione 2)

	Energia termica evitata [%]									
	zona AB		zona C		zona D		zona E		zona F	
	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF
Raffrescamento	5,3	4,1	2,4	2,0	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
Riscaldamento	55,6	55,2	56,1	55,4	67,5	66,5	68,5	66,9	62,3	59,4

6.2.4 Acqua calda sanitaria

La produzione di acqua calda sanitaria è affidata ad una pompa di calore aria-acqua associata ad un serbatoio da 295 litri; il coefficiente di prestazione stagionale effettivo è pari a 2.9. La Figura 124 illustra il funzionamento della pompa di calore su scala annuale, riportando con una linea rossa tratteggiata il COP stagionale, dato dal rapporto tra la somma dell'energia termica fornita all'acqua e la somma dell'energia elettrica assorbita, mentre i punti di colore nero rappresentano il COP orario della macchina, ovvero il valore del rapporto tra le due energie valutati per ogni ora di funzionamento; infine, la linea verde continua rappresenta la temperatura media dell'aria esterna. Come ci si poteva attendere, il COP orario aumenta quando la temperatura esterna è maggiore e diminuisce quando l'aria ambiente è più fredda. Dal momento che il fabbisogno di acqua calda sanitaria per gli uffici è costante per le differenti zone climatiche si riportano a titolo esemplificativo le prestazioni relative al modello in zona climatica D (Figura 124), il cui fabbisogno mensile oscilla intorno ai 500 kWh e quello annuale sfiora 5,9 MWh, per la cui produzione occorrono circa 2

MWh di energia elettrica. La variazione delle prestazioni su scala annuale per tutte le zone climatiche risulta infatti trascurabile.



(a) (b)

Figura 124. Andamento del COP giornaliero (a) e bilancio mensile (b) della pompa di calore per la produzione di ACS

6.2.5 Contributi dei carichi elettrici

Come si è visto i carichi energetici di un'utenza del settore terziario, in particolare di un edificio ad uso ufficio, sono composti da tre tipologie: illuminazione, attrezzature e dispositivi elettrici, climatizzazione.

Il contributo di attrezzature e dispositivi elettrici è relativo all'utilizzo di computer, schermi, stampanti, telefoni ed altre periferiche necessarie allo svolgimento dell'attività lavorativa e, a differenza delle altre due tipologie di consumo energetico, è costante in tutte le zone climatiche e le configurazioni di involucro ed è lievemente superiore ai 3 MWh eccetto i mesi di aprile, agosto e dicembre in cui è inferiore. Infatti, la variabilità del contributo degli impianti di climatizzazione è stata mostrata nei paragrafi precedenti (6.2.1 e 6.2.2), mentre quella dell'illuminazione è una conseguenza della diversa incidenza dei raggi solari dovuta alla diversa posizione geografica. Le immagini seguenti sono rappresentative dei tre contributi elettrici mensili per ogni zona climatica, dalla zona A-B (Figura 125) alla zona F (Figura 129), divisi per configurazione di involucro e tipologia di impianto di climatizzazione. Si è scelto, anche in questo caso, di uniformare la scala dell'asse delle ordinate che quantifica l'energia elettrica, in modo tale da rendere evidente la differenza dei valori assoluti per tutti i casi di studio.

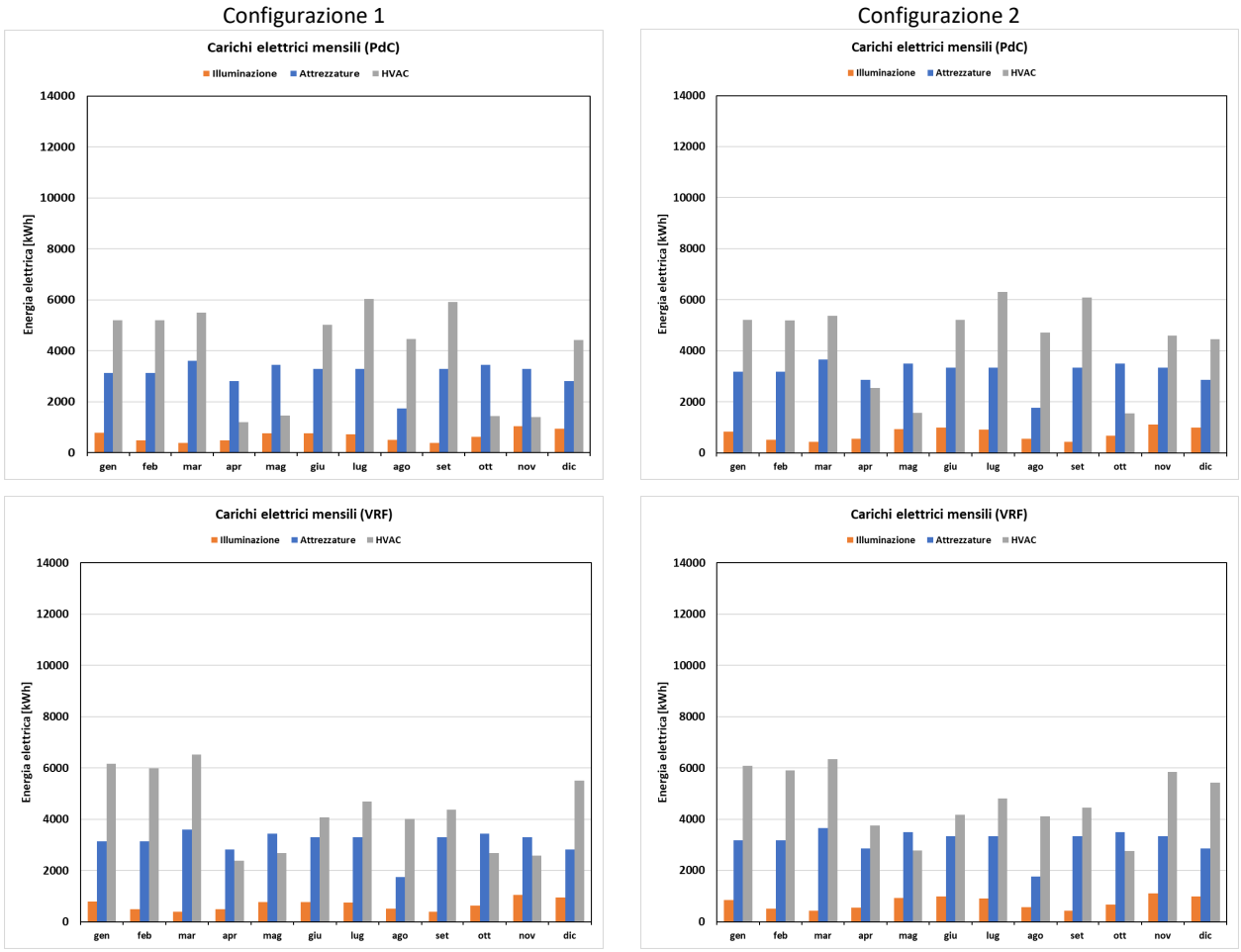


Figura 125. Edificio uffici in zona climatica A-B – Composizione del fabbisogno elettrico mensile per le due configurazioni

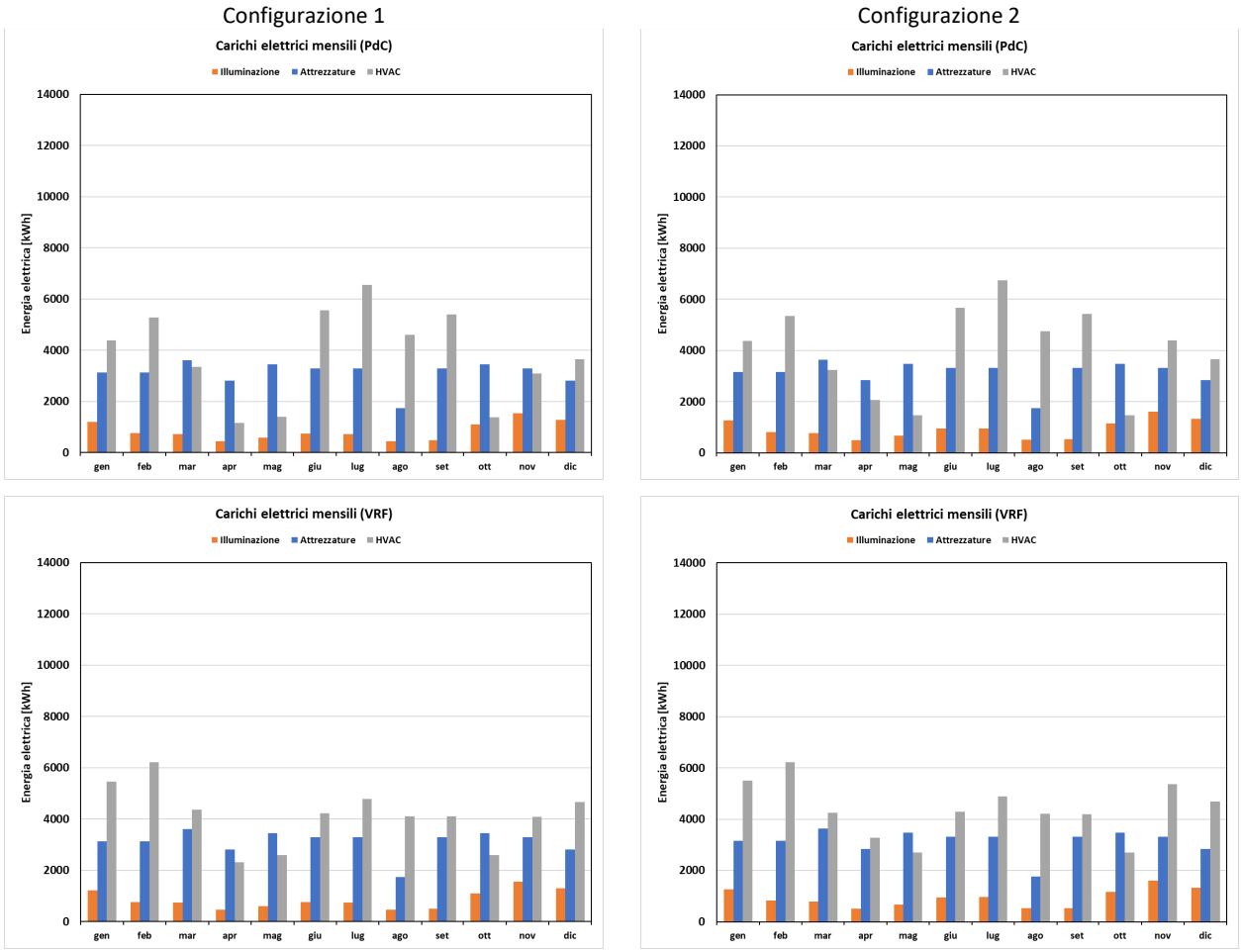


Figura 126. Edificio uffici in zona climatica C - Composizione del fabbisogno elettrico mensile per le due configurazioni

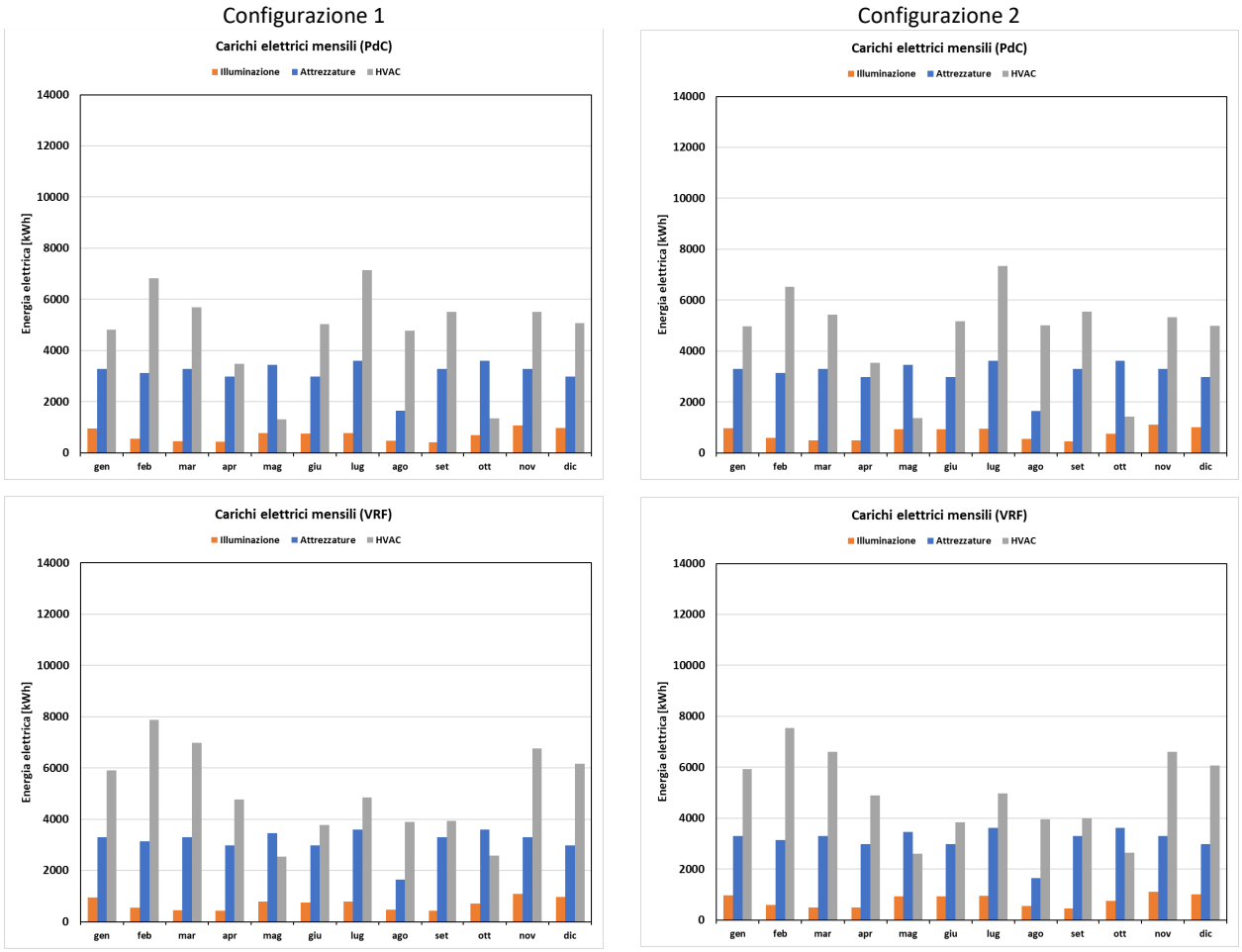


Figura 127. Edificio uffici in zona climatica D - Composizione del fabbisogno elettrico mensile per le due configurazioni

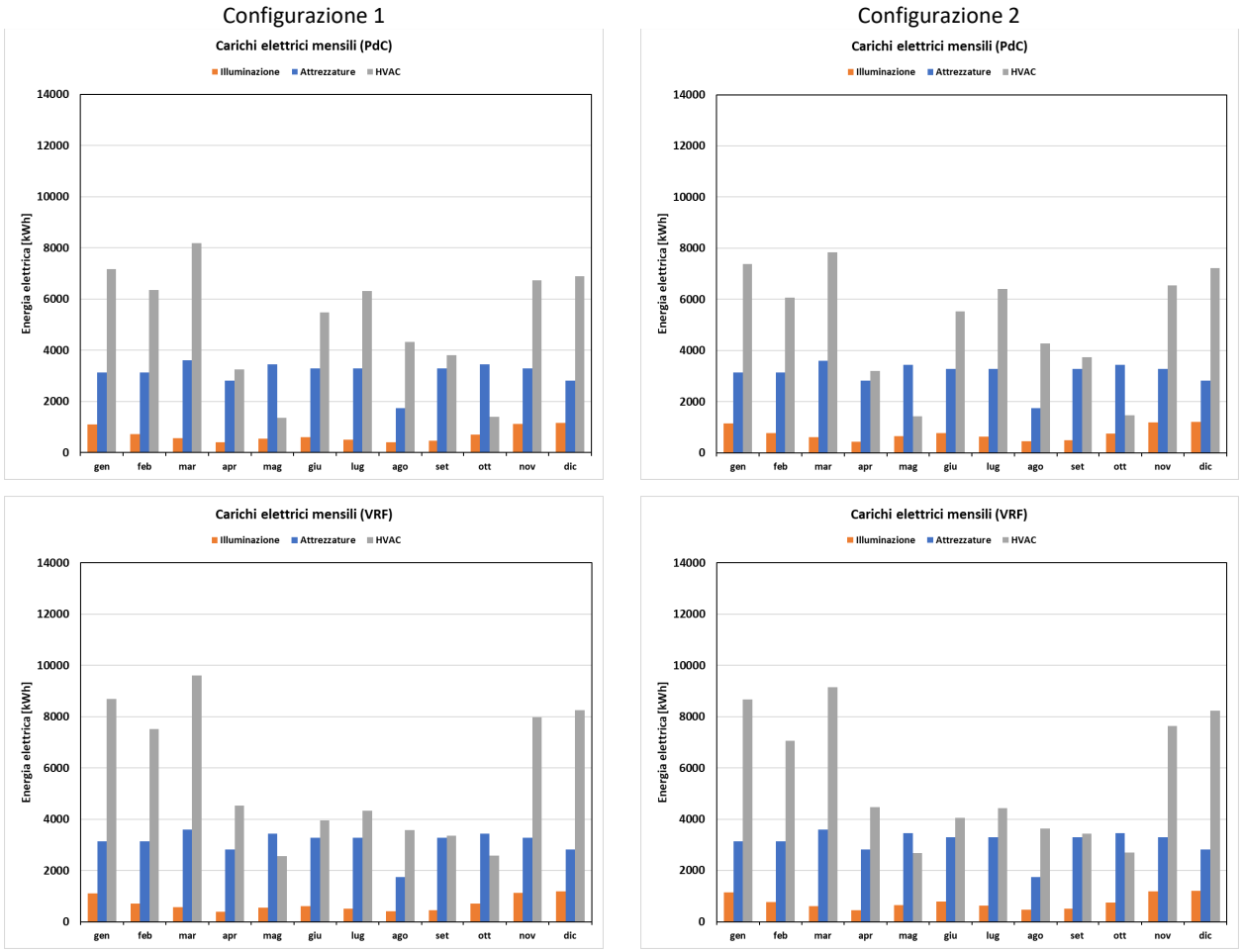


Figura 128. Edificio uffici in zona climatica E - Composizione del fabbisogno elettrico mensile per le due configurazioni

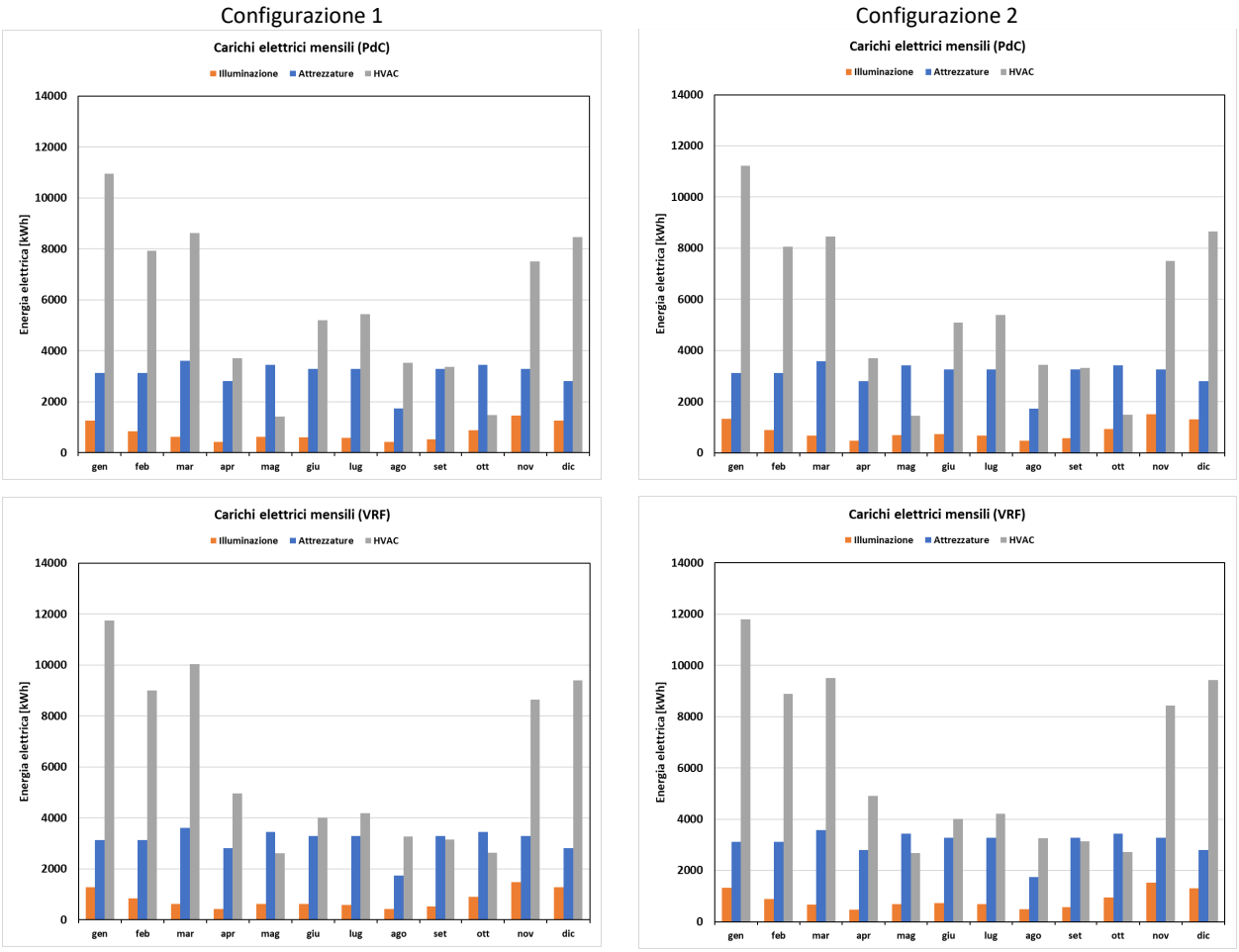


Figura 129. Edificio uffici in zona climatica F - Composizione del fabbisogno elettrico mensile per le due configurazioni

Inoltre, la misura percentuale della composizione del fabbisogno elettrico è stata riportata in forma grafica e tabellare sia per la configurazione 1 (Figura 130 e Tabella 53) che per la configurazione 2 (Figura 131 e Tabella 54): si nota come il peso delle attrezzature vari tra il 30 e il 40% del totale nonostante il valore assoluto sia costante in tutti casi di studio. Il contributo percentuale degli impianti di climatizzazione, il cui valore assoluto subisce importanti variazioni tra una zona climatica e l'altra, oscilla tra il 49 e il 61% del totale; infine, l'illuminazione varia tra il 7 e l'11%. Queste osservazioni, oltre a mostrare la composizione del fabbisogno tra le diverse aliquote, possono risultare cruciali per l'individuazione di misure finalizzate alla sensibilizzazione dell'utenza sul tema dell'efficientamento e del risparmio energetico.

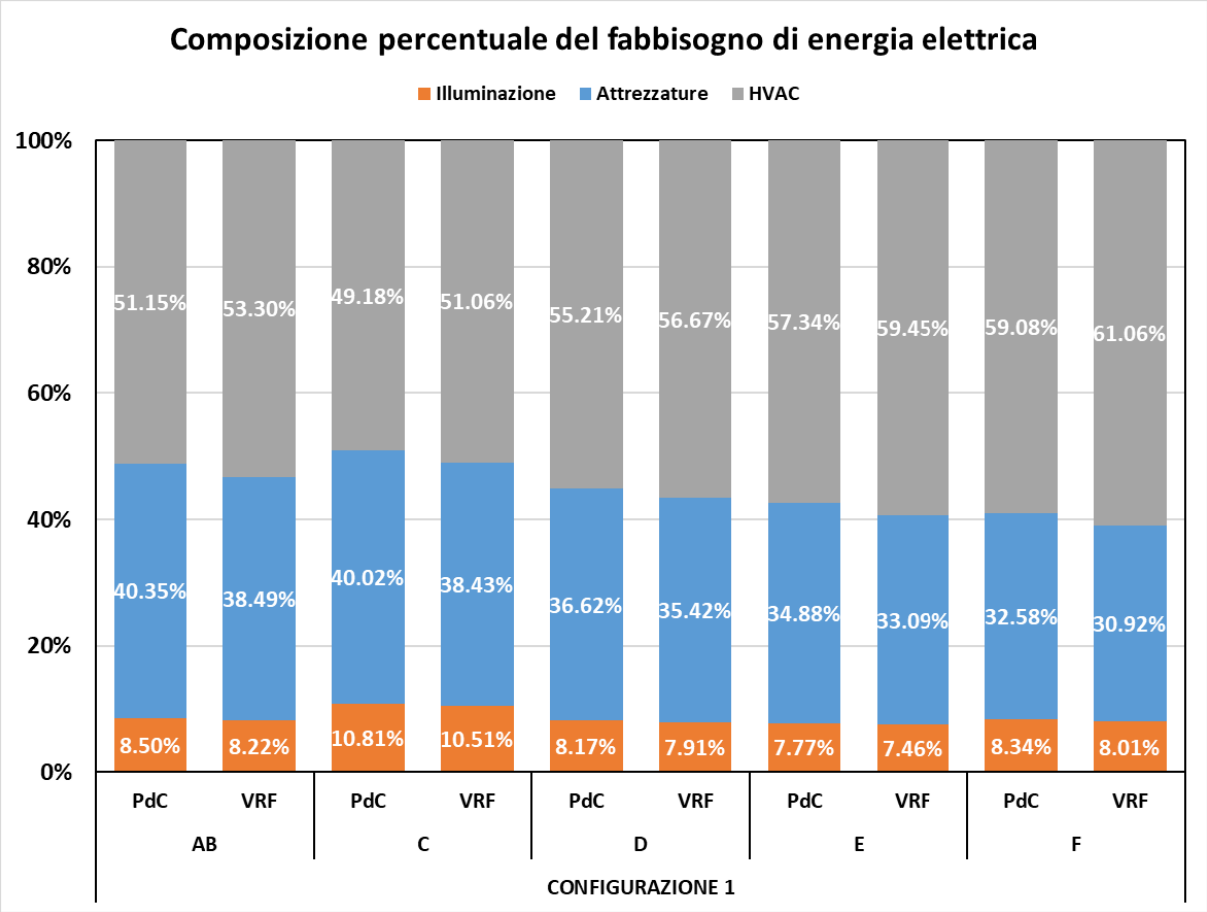


Figura 130. Composizione percentuale del fabbisogno di energia elettrica nelle differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche per la configurazione 1

Tabella 53. Composizione percentuale del fabbisogno di energia elettrica nelle differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche per la configurazione 1

	Copertura percentuale [%]									
	zona AB		zona C		zona D		zona E		zona F	
	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF
HVAC	51,1	53,3	49,2	51,1	55,2	56,7	57,3	59,4	59,1	61,1
Attrezzature	40,3	38,5	40,0	38,4	36,6	35,4	34,9	33,1	32,6	30,9
Illuminazione	8,5	8,2	10,8	10,5	8,2	7,9	7,8	7,5	8,3	8,0

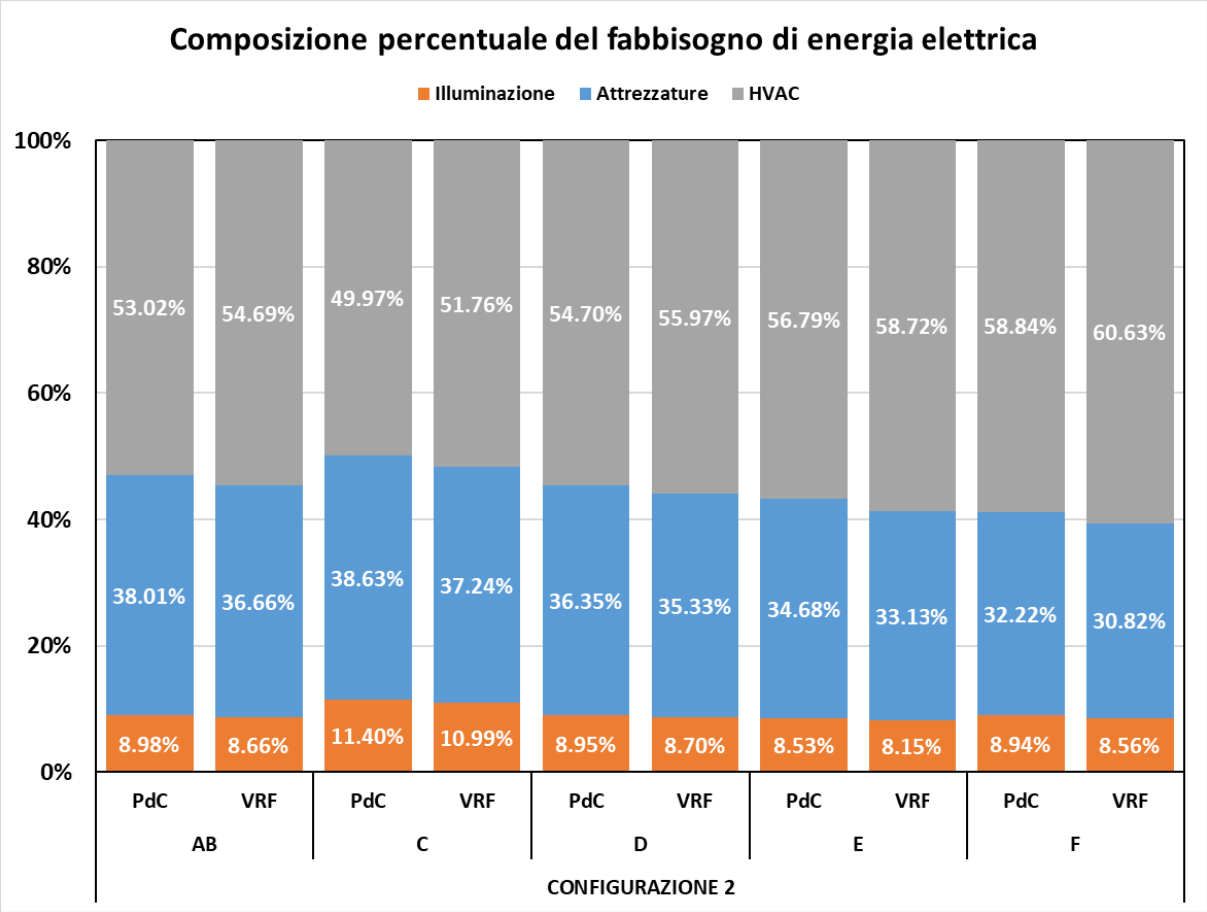


Figura 131. Composizione percentuale del fabbisogno di energia elettrica nelle differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche per la configurazione 2

Tabella 54. Composizione percentuale del fabbisogno di energia elettrica nelle differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche per la configurazione 2

	Copertura percentuale [%]									
	zona AB		zona C		zona D		zona E		zona F	
	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF
HVAC	53,0	54,7	50,0	51,8	54,7	56,0	56,8	58,7	58,8	60,6
Attrezzature	38,0	36,7	38,6	37,2	36,3	35,3	34,7	33,1	32,2	30,8
Illuminazione	9,0	8,7	11,4	11,0	9,0	8,7	8,5	8,1	8,9	8,6

6.2.6 Produzione da fonti rinnovabili

Per conseguire l'obiettivo dello Zero Energy Building, la produzione di energia da fonti rinnovabili è un elemento necessario e imprescindibile nella progettazione di edifici di nuova costruzione. Nelle due configurazioni di involucro analizzate, alla luce della scelta progettuale di sistemi impiantistici *all electric*, si è scelto di destinare gran parte delle superfici disponibili all'installazione di pannelli fotovoltaici per la captazione della radiazione solare per la produzione di energia elettrica. Come illustrato nei paragrafi 5.1.3 e 5.2.6, per la configurazione 1 si è scelto di realizzare una pensilina sul tetto dell'edificio per aumentare la superficie utile e ottenere una maggiore producibilità elettrica, mentre nella configurazione 2 ci si è limitati ad utilizzare esclusivamente la superficie di copertura per i pannelli fotovoltaici, ad eccezione di una piccola porzione destinata all'alloggiamento degli impianti HVAC.

Valutare la copertura del fabbisogno da fonti rinnovabili, nel caso di edifici nel settore terziario non è immediato, se non ci si limita al considerare soltanto la producibilità da fotovoltaico. Per come è stato definito il caso di studio è infatti imprescindibile considerare le diverse aliquote che concorrono al soddisfacimento del fabbisogno elettrico, ossia:

- energia prodotta da fotovoltaico e direttamente autoconsumata;
- energia erogata dalle batterie di accumulo precedentemente caricate da fotovoltaico;
- energia integrata dalla rete;
- energia prodotta da fotovoltaico in eccedenza rispetto al fabbisogno.

Dalla Figura 132 (zona A-B) alla Figura 136 (zona F) sono illustrati i bilanci elettrici mensili per le due configurazioni di involucro e per i due layout impiantistici dando ampia visibilità a tali contributi, imprescindibili se si vuole valutare il raggiungimento dello standard ZEB.

La linea nera tratteggiata nei grafici riporta il fabbisogno elettrico dell'intera struttura, comprendente gli impianti di condizionamento ambientale centralizzati e le unità di distribuzione negli ambienti interni, le apparecchiature elettriche degli uffici e l'illuminazione. Per ogni figura, ovvero per ogni zona climatica, i grafici sono riportati con la stessa scala in ordinata al fine di un immediato confronto.

La presenza contemporanea di integrazioni ed eccedenze, sebbene non intuitiva, trova giustificazione nell'analisi oraria del bilancio elettrico: come è noto, la produzione di energia elettrica da fotovoltaico, essendo la fonte di energia non programmabile ed anzi estremamente variabile, è indipendente dalle necessità dell'utenza e spesso si verifica la condizione per cui c'è produzione di energia in assenza di richiesta o, viceversa, c'è richiesta di energia in assenza di produzione. Nel primo caso, l'energia elettrica prodotta è destinata allo stoccaggio e, una volta che le batterie sono totalmente cariche, l'eccedenza viene reimmessa in rete, contribuendo positivamente al bilancio energetico dell'edificio. Nel secondo caso, invece, al fine di garantire il corretto funzionamento dell'utenza, è necessario prelevare energia elettrica dalla rete.

Nei risultati aggregati, ovviamente, tali sfasamenti temporali non sono direttamente visibili. Tuttavia, le stime mensili ed annuali mostrano chiaramente come, in lassi di tempo più estesi, possano coesistere integrazioni ed eccedenze nel bilancio elettrico di un edificio, e di conseguenza come l'obiettivo di riduzione/azzeramento del fabbisogno energetico e di copertura totale dello stesso da energia prodotta da fonte rinnovabile debba considerare inevitabilmente anche questi due contributi.

Una prima considerazione macroscopica riguarda la differenza in termini di produzione di energia totale tra la due configurazioni di involucro: la superficie destinata all'installazione dei pannelli fotovoltaici della configurazione 1, essendo sia di gran lunga più estesa rispetto a quella della configurazione 2 che ottimizzata in quanto è presente una sezione inclinata a 30° rispetto all'asse orizzontale, è caratterizzata da una produzione nettamente superiore, come si vede soprattutto dalle eccedenze ma anche dal maggiore autoconsumo.

In Figura 137 è mostrata la producibilità mensile per ogni zona climatica per le due configurazioni di involucro.

In generale, al netto di quattro casi studio che verranno dettagliati nel paragrafo 6.2.7 , il bilancio elettrico risulta sempre positivo su scala annuale, vale a dire che la produzione di energia da fonte rinnovabile è maggiore del fabbisogno complessivo dell'edificio.

La produzione lorda annuale di energia elettrica da fotovoltaico per la configurazione 1 è sempre maggiore di 200 MWh anno, partendo da un minimo di 222 MWh in zona F fino ad arrivare ad un massimo di 289 MWh in zona D. Mensilmente, come si vede anche nella Figura 137, per ogni zona climatica c'è il minimo di

producibilità a dicembre (da 6,5 MWh in zona F a 12 MWh in zona D) e il massimo a luglio per tutte le zone (da 32 MWh in zona E a 40 MWh in zona D) ad eccezione della zona F, in cui il mese di giugno risulta quello più produttivo (28 MWh). Per quanto riguarda la configurazione 2, qualitativamente le considerazioni sono analoghe a quelle appena fatte per la configurazione 1, mentre dal punto di vista quantitativo, i valori sono all'incirca dimezzati.

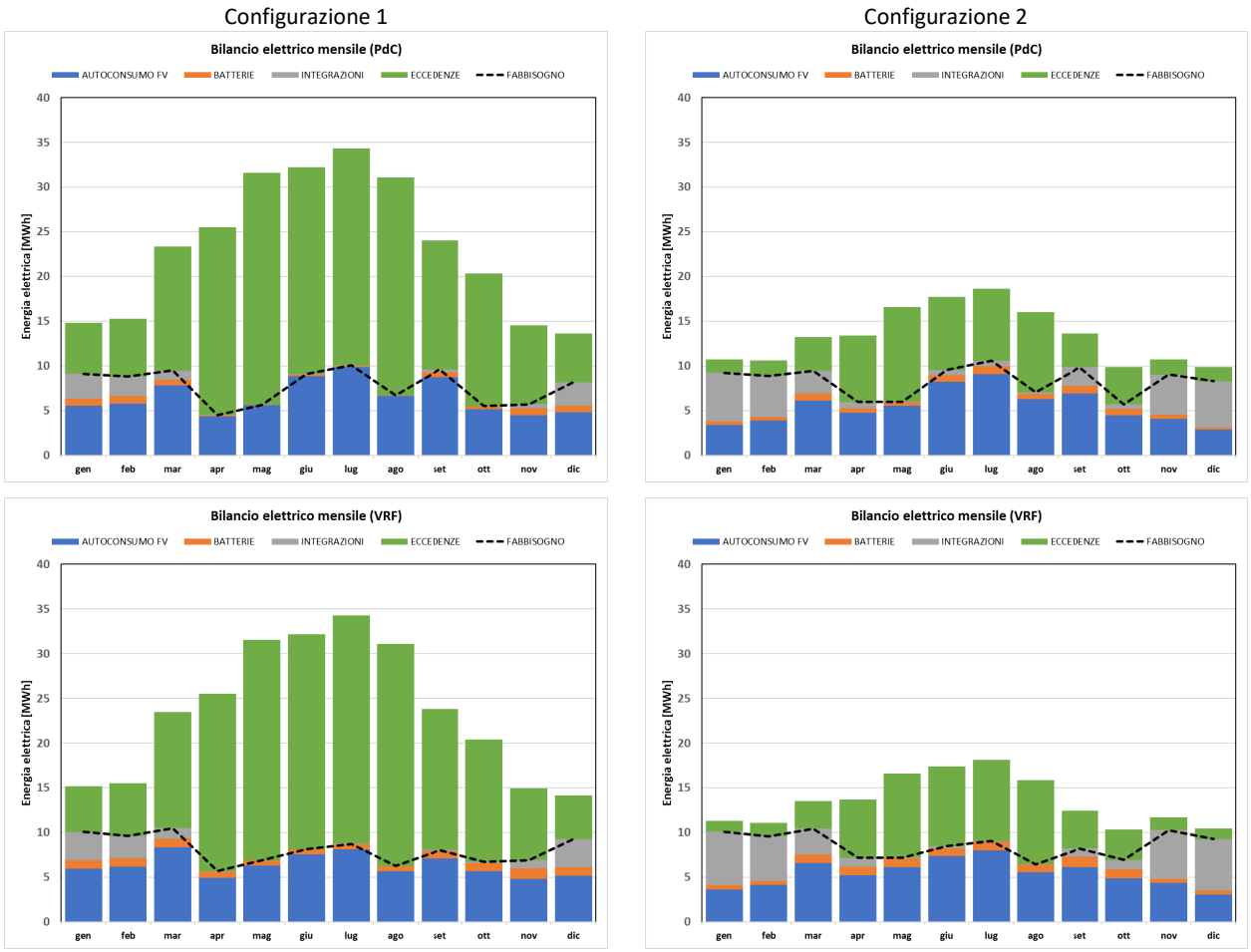


Figura 132. Edificio uffici in zona climatica A-B - Confronto del bilancio elettrico mensile tra configurazione 1 e configurazione 2

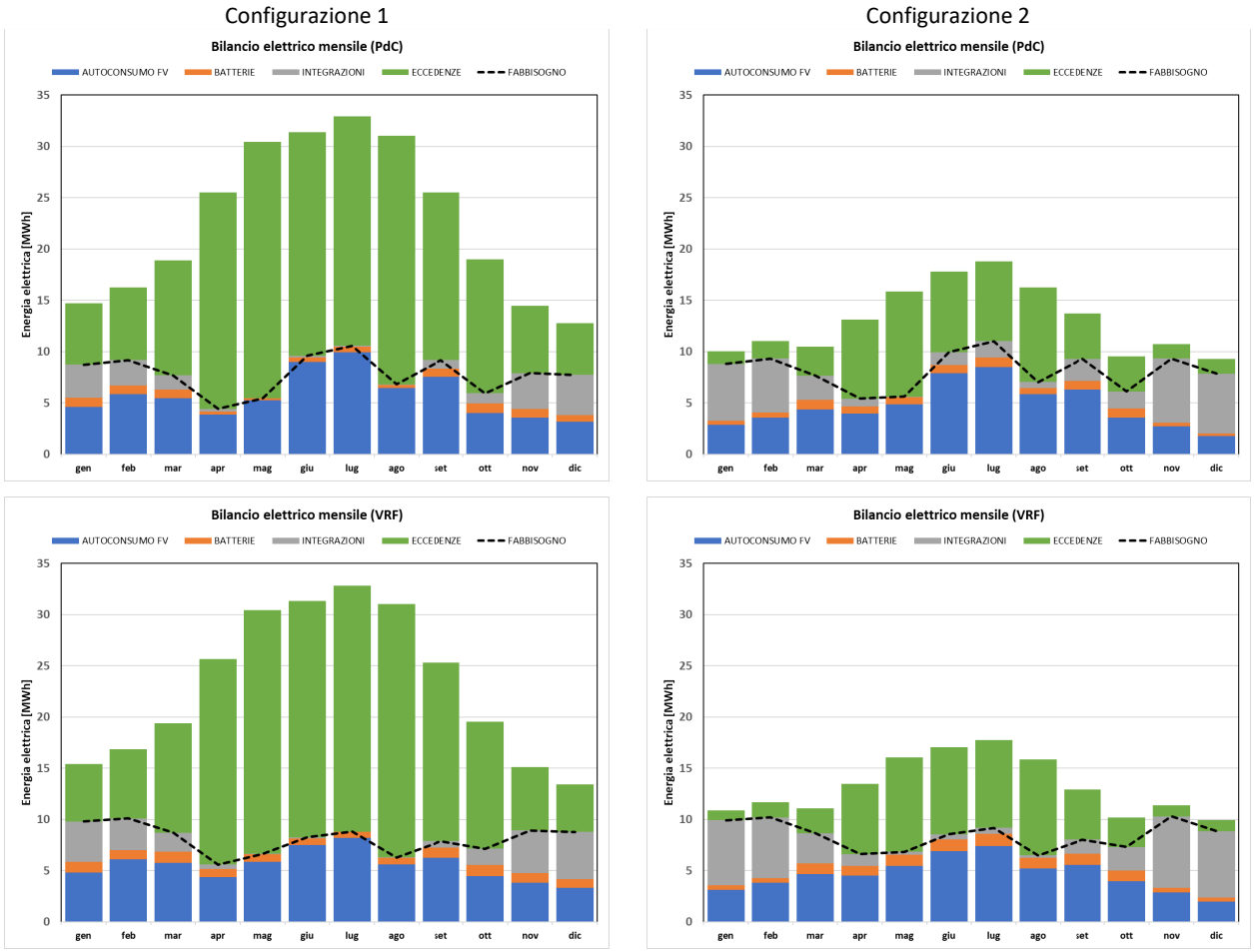


Figura 133. Edificio uffici in zona climatica C - Confronto del bilancio elettrico mensile tra configurazione 1 e configurazione 2

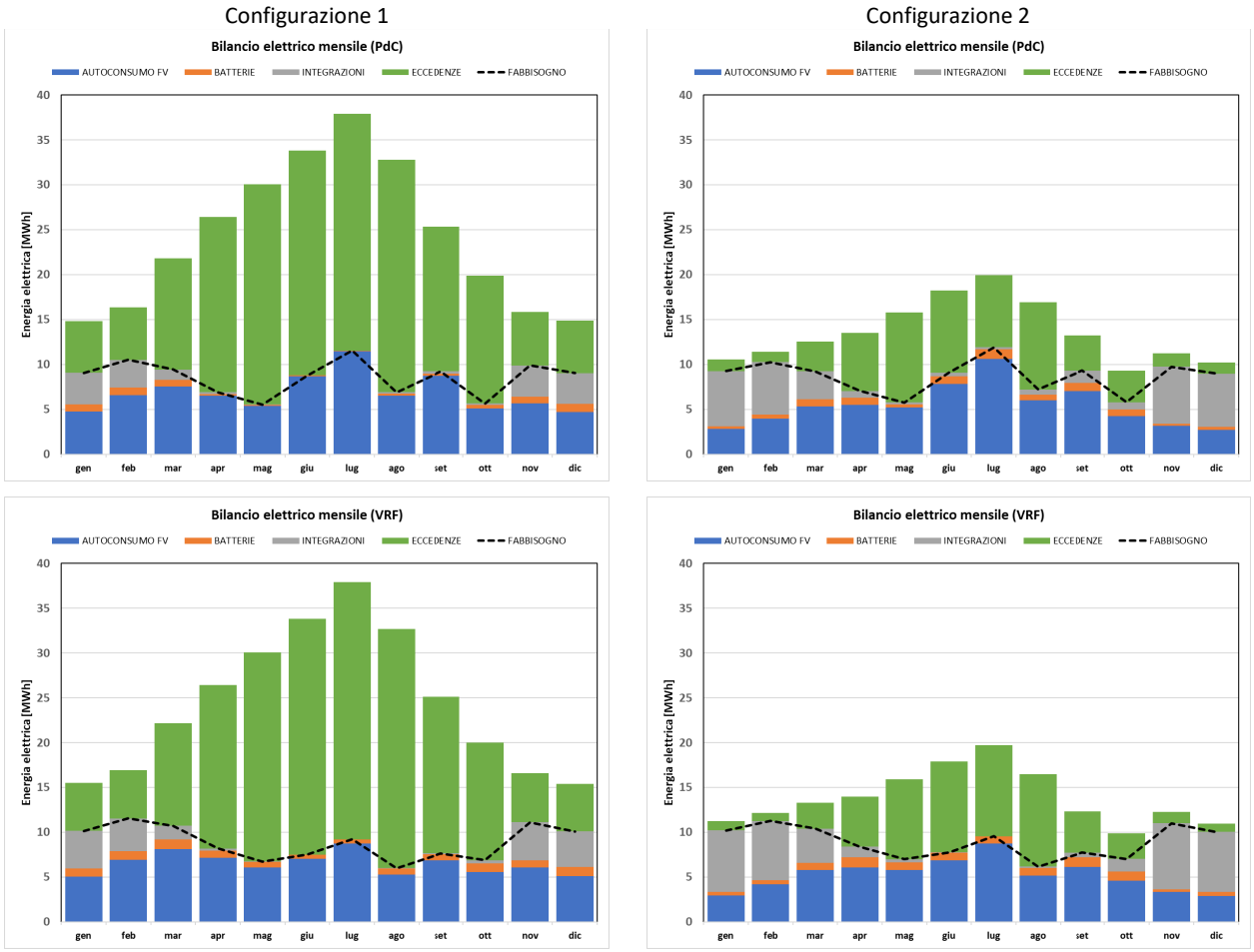


Figura 134. Edificio uffici in zona climatica D - Confronto del bilancio elettrico mensile tra configurazione 1 e configurazione 2.

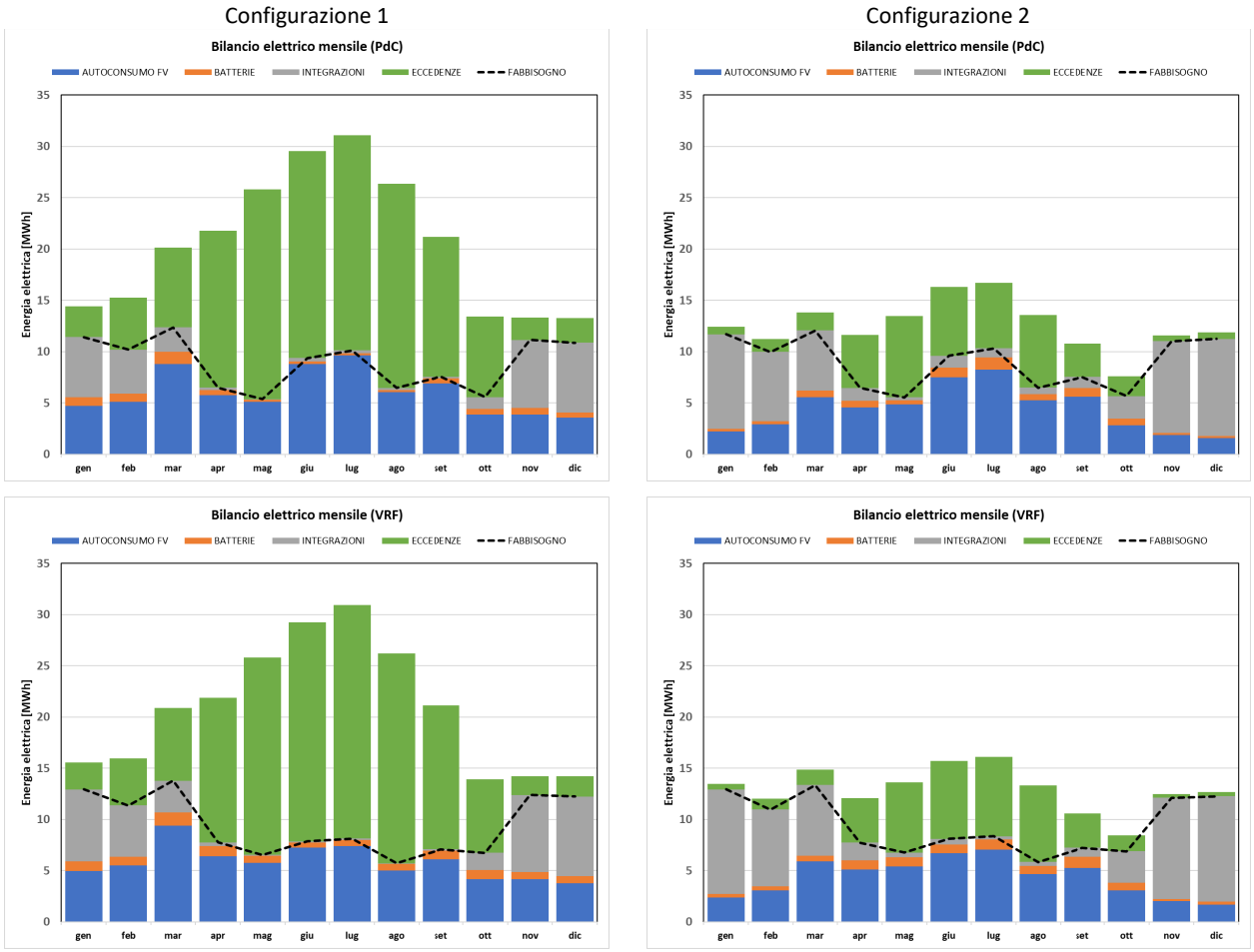


Figura 135. Edificio uffici in zona climatica E - Confronto del bilancio elettrico mensile tra configurazione 1 e configurazione 2

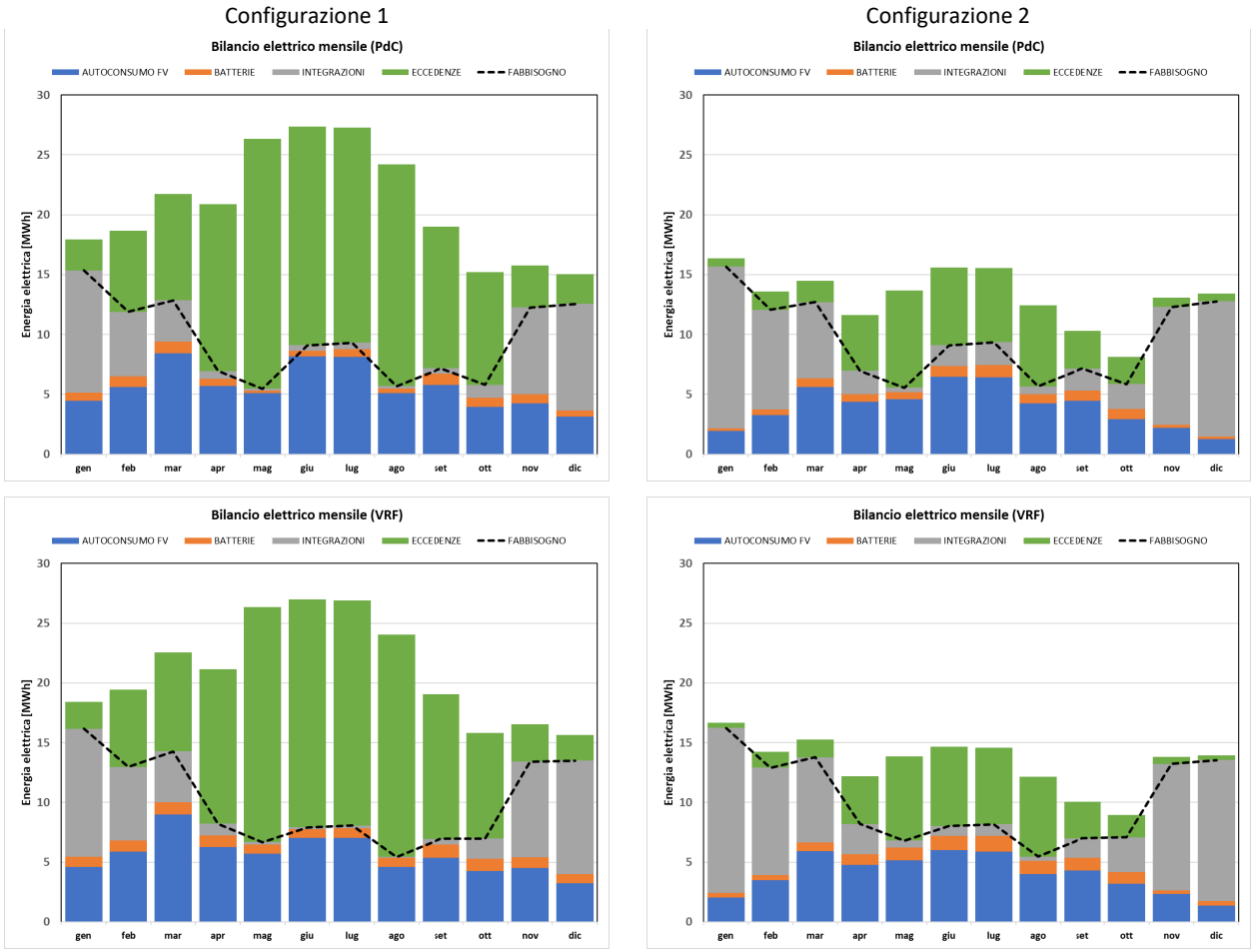


Figura 136. Edificio uffici in zona climatica F - Confronto del bilancio elettrico mensile tra configurazione 1 e configurazione 2

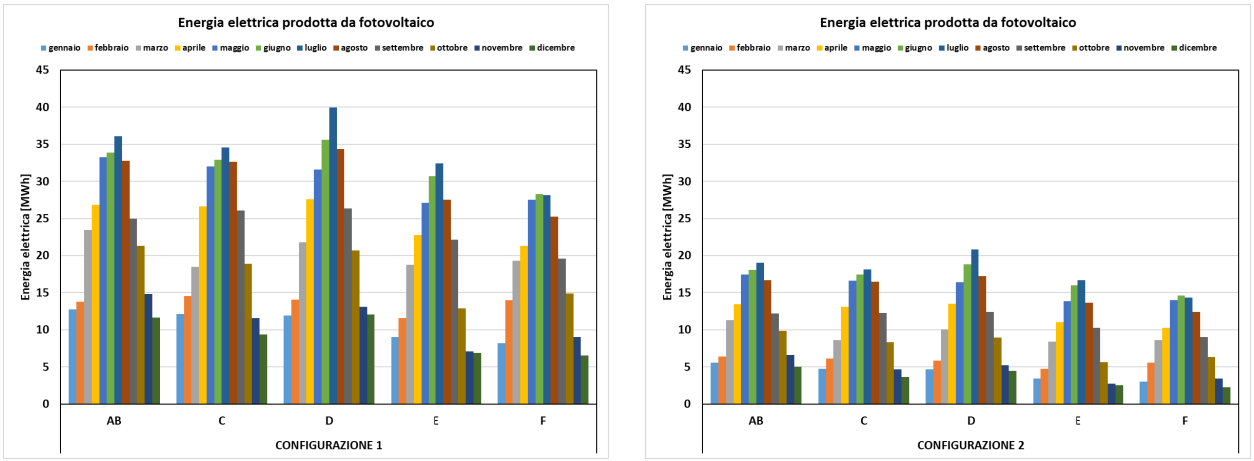


Figura 137. Energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico delle due configurazioni nelle diverse zone climatiche

Un'altra interessante considerazione discende dal confronto tra la Figura 138 e la Figura 139, le quali riportano l'aliquota di energia elettrica prodotta da fotovoltaico e direttamente autoconsumata: nonostante la produzione di energia più che doppia della configurazione 1 rispetto alla configurazione 2, come dettagliato

nella Tabella 55, l'energia autoconsumata si assesta sullo stesso ordine di grandezza per entrambe le configurazioni, come ci si aspetta.
Tale risultato è l'occasione per dimostrare come in caso si abbia la possibilità di adottare scelte progettuali libere da vincoli si possono ottenere superfici più ampie da destinare a fotovoltaico e superare l'obiettivo zero energy rendendo l'edificio un "positive building". In contesti più tradizionali, invece, la semplice superficie di copertura adibita a fotovoltaico può risultare insufficiente per raggiungere l'obiettivo ZEB, soprattutto in zone climatiche fredde.
La Tabella 56 riporta l'energia autoconsumata per zona climatica e tipologia di impianto per la configurazione 1, mentre la Tabella 57 si riferisce agli stessi casi per la configurazione 2.

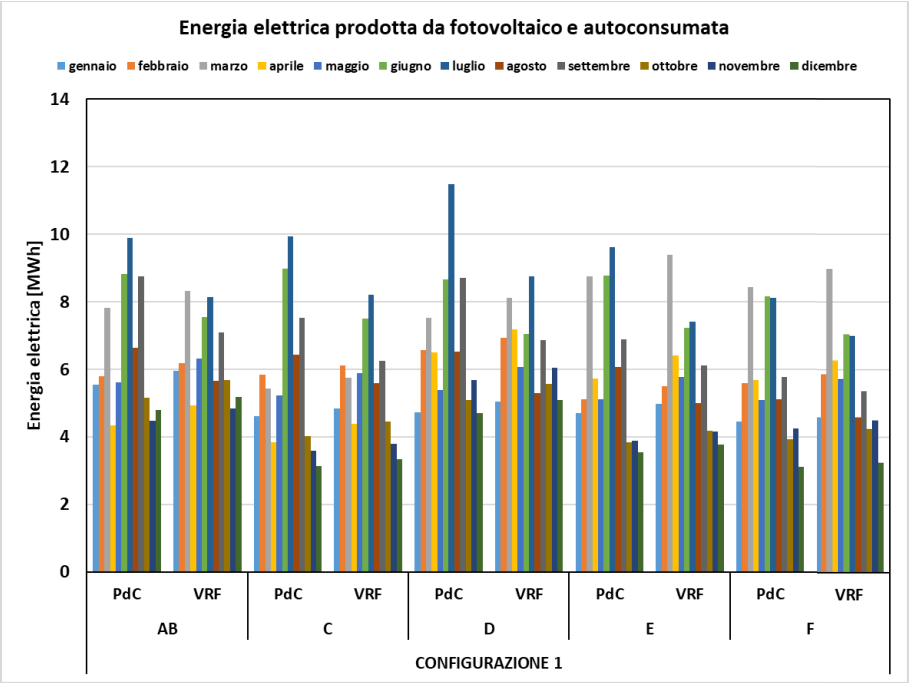


Figura 138. Energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico della configurazione 1 e direttamente autoconsumata nelle diverse zone climatiche e per tipo di impianto HVAC

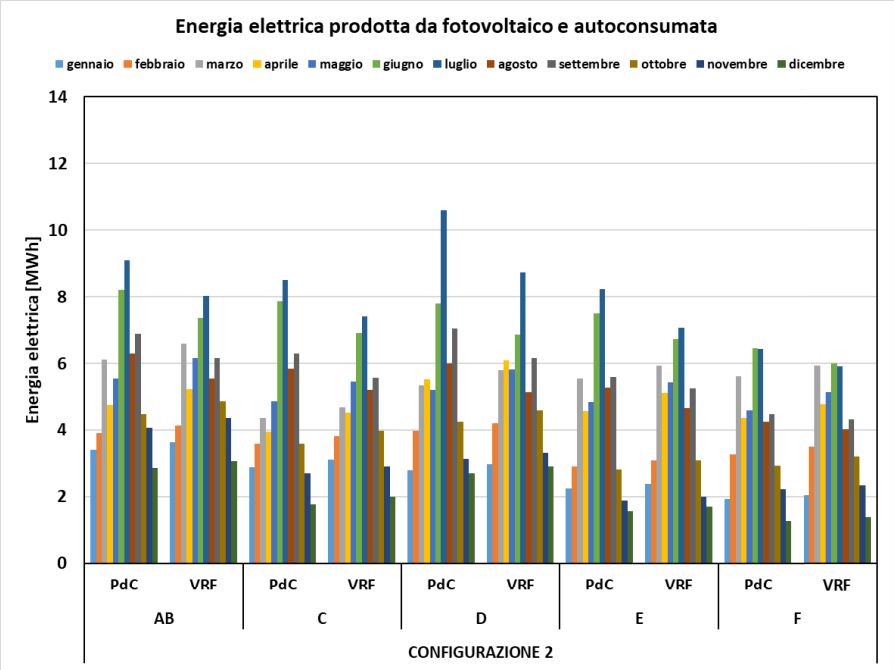


Figura 139. Energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico della configurazione 2 e direttamente autoconsumata nelle diverse zone climatiche e per tipo di impianto HVAC

Tabella 55. Energia elettrica mensile e annuale prodotta dal solare fotovoltaico nelle differenti configurazioni e zone climatiche

Energia elettrica [kWh]										
	Configurazione 1					Configurazione 2				
	zona AB	zona C	zona D	zona E	zona F	zona AB	zona C	zona D	zona E	zona F
Gen	12746	12159	11955	9042	8184	5603	4774	4658	3409	3025
Feb	13802	14537	14077	11568	14023	6388	6103	5851	4762	5560
Mar	23483	18496	21815	18746	19313	11298	8618	10049	8422	8596
Apr	26826	26615	27590	22747	21348	13445	13089	13498	11007	10263
Mag	33267	32025	31625	27129	27559	17419	16625	16423	13890	13998
Giu	33887	32890	35606	30710	28309	18068	17430	18807	15980	14621
Lug	36086	34575	39927	32433	28169	19032	18129	20813	16676	14372
Ago	32743	32637	34397	27546	25268	16686	16491	17258	13640	12428
Set	24987	26046	26382	22178	19585	12213	12258	12437	10268	8994
Ott	21336	18933	20708	12899	14873	9838	8306	8981	5651	6341
Nov	14831	11552	13089	7087	9027	6608	4692	5203	2774	3418
Dic	11619	9381	12049	6875	6541	5004	3670	4478	2555	2292
Anno	**285614**	**269847**	**289219**	**228959**	**222198**	**141601**	**130184**	**138456**	**109033**	**103908**

Tabella 56. Energia elettrica mensile e annuale prodotta dal solare fotovoltaico della configurazione 1 e direttamente autoconsumata per le differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche

Energia elettrica [kWh]										
	zona AB		zona C		zona D		zona E		zona F	
	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF
Gen	5551	5949	4619	4837	4736	5055	4705	4972	4462	4583
Feb	5800	6194	5851	6108	6582	6934	5117	5503	5599	5875
Mar	7812	8333	5432	5756	7534	8114	8764	9391	8441	8986
Apr	4351	4930	3839	4394	6500	7186	5738	6416	5681	6280
Mag	5620	6318	5239	5886	5396	6080	5122	5778	5090	5727
Giu	8828	7549	8975	7515	8666	7047	8785	7236	8154	7049
Lug	9881	8147	9936	8206	11487	8756	9623	7417	8128	7012
Ago	6645	5662	6443	5594	6516	5302	6068	5000	5120	4595
Set	8761	7088	7526	6242	8718	6861	6881	6106	5782	5362
Ott	5166	5676	4022	4458	5100	5575	3845	4192	3943	4261
Nov	4477	4843	3582	3804	5688	6054	3882	4162	4254	4508
Dic	4805	5183	3145	3335	4701	5087	3541	3775	3120	3241
Anno	**77699**	**75873**	**68609**	**66134**	**81623**	**78050**	**72073**	**69947**	**67774**	**67476**

Tabella 57. Energia elettrica mensile e annuale prodotta dal solare fotovoltaico della configurazione 2 e direttamente autoconsumata per le differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche

Energia elettrica [kWh]										
	zona AB		zona C		zona D		zona E		zona F	
	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF
Gen	3404	3626	2888	3116	2796	2967	2246	2387	1942	2048
Feb	3920	4133	3589	3819	3986	4196	2914	3093	3274	3494
Mar	6128	6587	4369	4684	5338	5790	5537	5923	5608	5942
Apr	4755	5239	3962	4524	5519	6083	4569	5108	4367	4770
Mag	5558	6151	4876	5459	5198	5810	4837	5431	4584	5148
Giu	8211	7371	7872	6917	7799	6858	7515	6720	6449	6012
Lug	9087	8018	8506	7423	10594	8742	8231	7078	6426	5901
Ago	6290	5556	5838	5214	6013	5144	5270	4658	4254	4017
Set	6901	6158	6309	5568	7044	6161	5583	5253	4483	4320
Ott	4484	4858	3588	3975	4248	4604	2828	3095	2939	3202
Nov	4073	4369	2695	2904	3141	3329	1887	2009	2216	2334
Dic	2866	3077	1780	1995	2710	2902	1561	1704	1270	1381
Anno	**65676**	**65143**	**56271**	**55599**	**64387**	**62586**	**52978**	**52460**	**47814**	**48569**

La Tabella 58 e Tabella 59 riportano le percentuali di copertura del fabbisogno da fotovoltaico per ogni mese dell'anno, evidenziando come i mesi più critici risultino quelli invernali, ossia gennaio, novembre e dicembre in zona climatica E ed F per la configurazione 1 e gennaio, febbraio, novembre e dicembre in tutte le zone climatiche per la configurazione 2.

Tabella 58. Copertura percentuale del fabbisogno mensile da parte del solare fotovoltaico nella configurazione 1, per le differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche

Energia elettrica [%]										
	zona AB		zona C		zona D		zona E		zona F	
	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF
Gen	140	126	139	124	132	118	79	70	53	51
Feb	157	144	158	144	134	122	113	102	118	108
Mar	247	224	241	212	231	204	152	136	150	135
Apr	596	471	601	476	401	337	351	293	307	260
Mag	588	482	590	482	572	468	506	414	503	412
Giu	373	416	342	397	406	474	328	391	311	358
Lug	359	414	327	392	346	432	321	399	303	349
Ago	489	523	480	517	499	573	426	480	444	464
Set	261	310	284	330	286	345	293	312	273	281
Ott	388	317	319	265	366	301	232	191	257	213
Nov	259	214	146	129	132	118	64	57	74	67
Dic	142	125	121	107	133	119	63	56	52	48

Tabella 59. Copertura percentuale del fabbisogno mensile da parte del solare fotovoltaico nella configurazione 2, per le differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche

Energia elettrica [%]										
	zona AB		zona C		zona D		zona E		zona F	
	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF
Gen	61	55	54	48	50	46	29	26	19	19
Feb	72	67	65	60	57	52	48	43	46	43
Mar	120	108	112	99	109	97	70	63	68	62
Apr	226	187	242	197	192	161	170	142	147	125
Mag	291	242	296	243	285	235	251	205	251	206
Giu	189	213	175	203	207	242	167	197	161	182
Lug	180	210	164	198	175	218	161	199	154	176
Ago	237	259	234	254	239	280	210	233	219	227
Set	124	148	132	153	134	160	136	142	126	129
Ott	172	142	136	113	155	128	100	82	108	90
Nov	73	64	50	46	53	47	25	23	28	26
Dic	60	54	47	41	50	45	23	21	18	17

6.2.7 Fabbisogni complessivi e copertura da fonti rinnovabili

Il bilancio annuale per ogni configurazione di involucro e tipologia di impianto è riportato nei grafici successivi per ogni zona climatica (Figura 140 per la zona A-B, Figura 141 per la zona C, Figura 142 per la zona D, Figura 143 per la zona E e Figura 144 per zona F). In ogni immagine, la colonna di sinistra riporta la composizione del fabbisogno con le differenti aliquote di autoconsumo diretto da fotovoltaico (blu), energia erogata dalla batteria di accumulo (arancione) e integrazioni dalla rete elettrica (grigio), mentre la colonna di destra rappresenta le eccedenze di produzione elettrica (giallo). La colonna delle eccedenze parte graficamente in corrispondenza del contributo delle batterie, vale a dire dal punto finale dell'autoconsumo, poiché la produzione di energia elettrica a partire dalla fonte solare che non viene autoconsumata viene utilizzata per caricare l'accumulo elettrico e, una volta conseguita la massima capacità, viene immessa in rete (eccedenze). La rappresentazione grafica delle eccedenze a partire dalla percentuale dell'autoconsumo serve a sovrapporre idealmente le colonne arancione-grigia e gialla e valutare in modo immediato quale delle due risulti maggiore dell'altra. Nel caso di eccedenze maggiori della somma di batteria e integrazioni, l'edificio ha un comportamento energeticamente virtuoso su scala annuale e diventa positive buildings, viceversa il bilancio dell'edificio non è tipico di uno ZEB. Le percentuali mostrate nelle figure sono riportate in Tabella 60 per la configurazione 1 e in Tabella 61 per la configurazione 2.

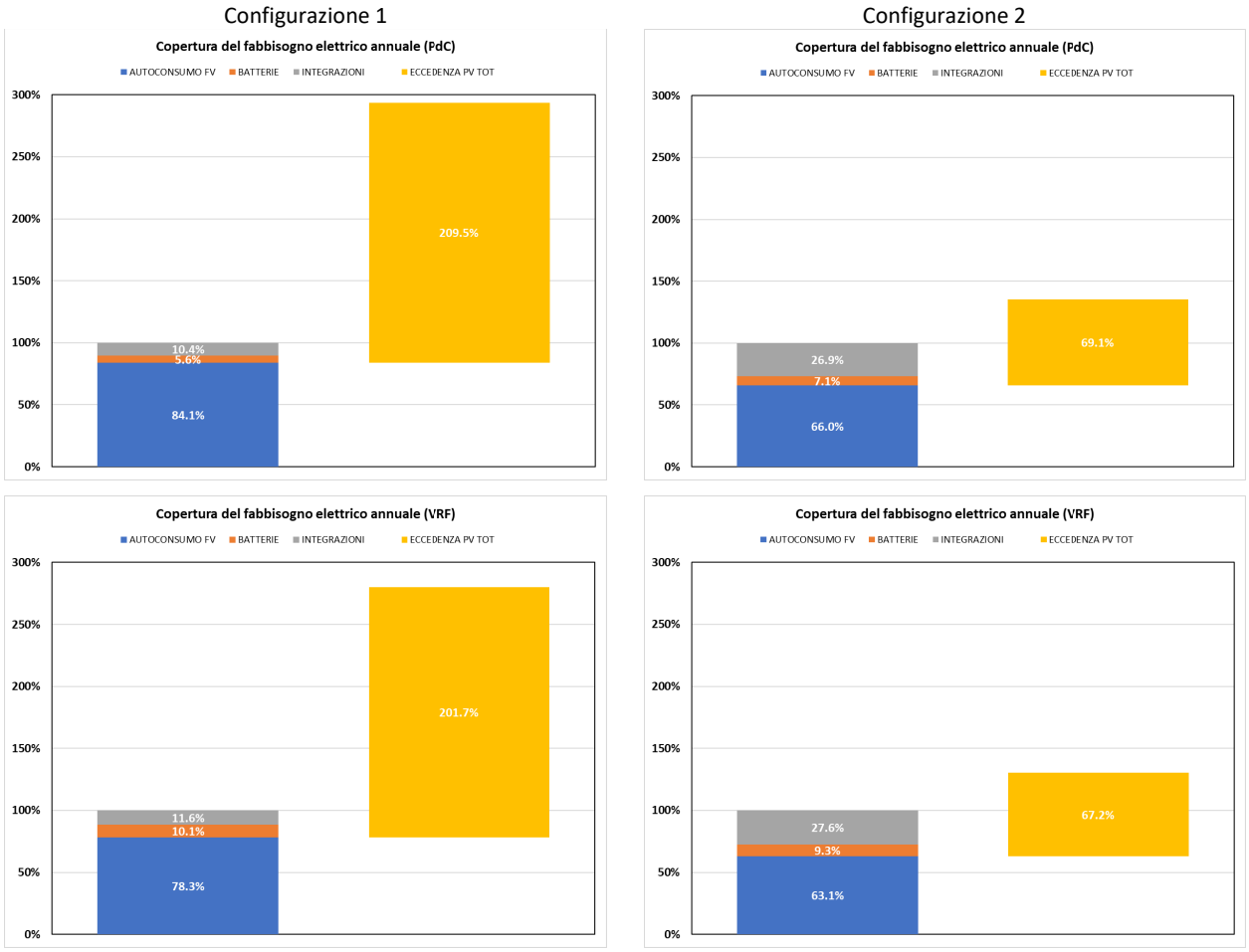


Figura 140. Edificio uffici in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, grafico riepilogativo dei fabbisogni elettrici e produzione da fonte rinnovabile

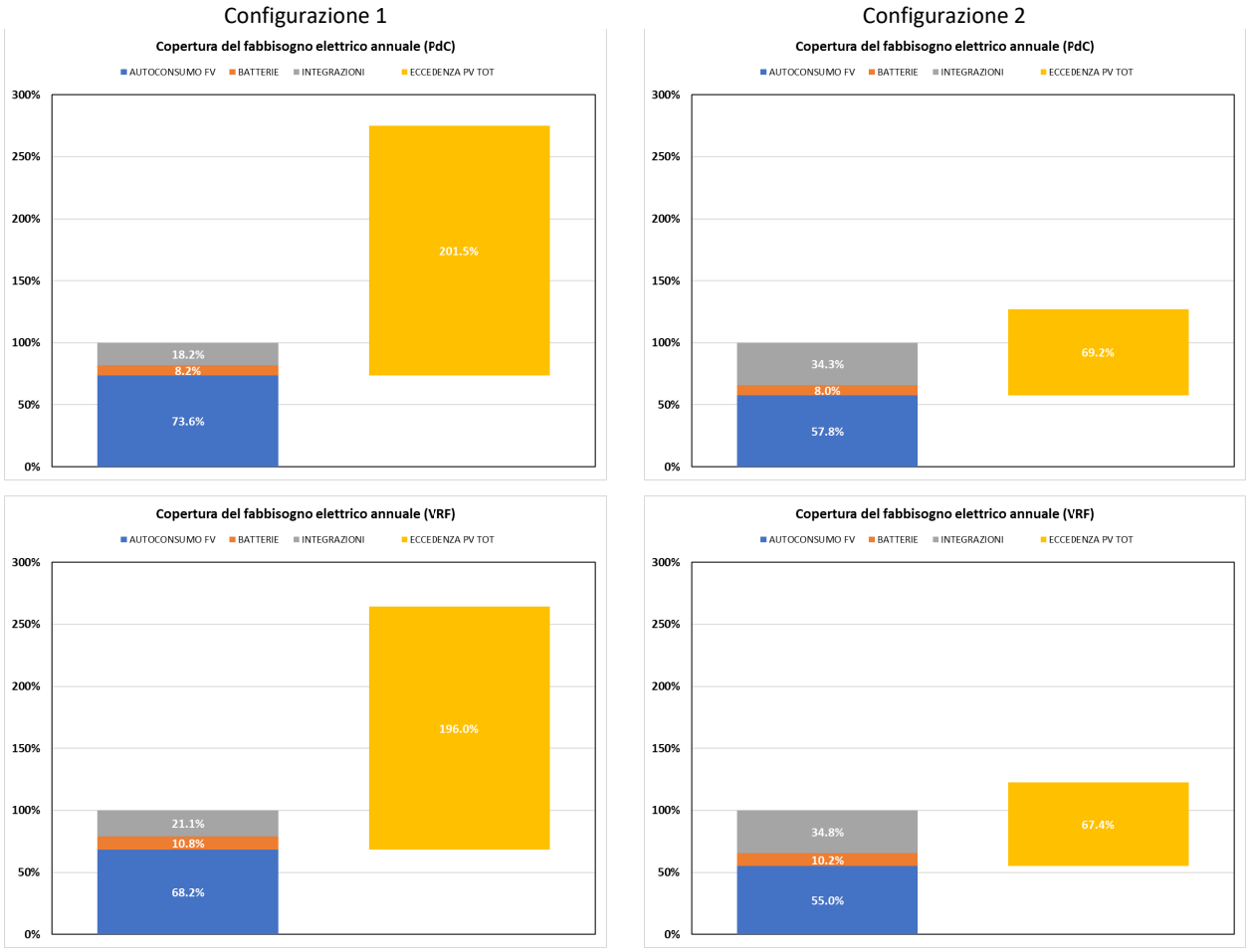


Figura 141. Edificio uffici in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, grafico riepilogativo dei fabbisogni elettrici e produzione da fonte rinnovabile

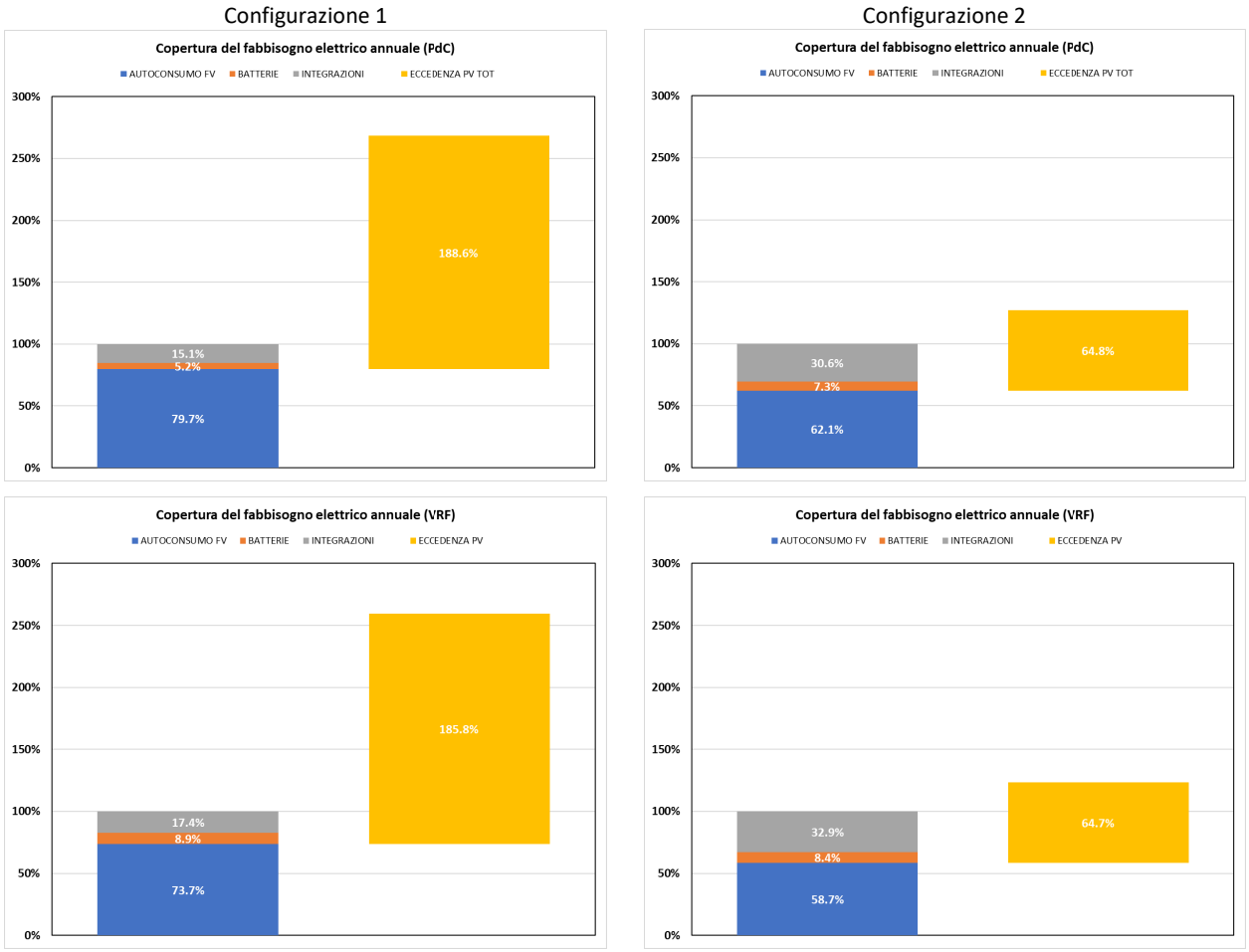


Figura 142. Edificio uffici in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, grafico riepilogativo dei fabbisogni elettrici e produzione da fonte rinnovabile

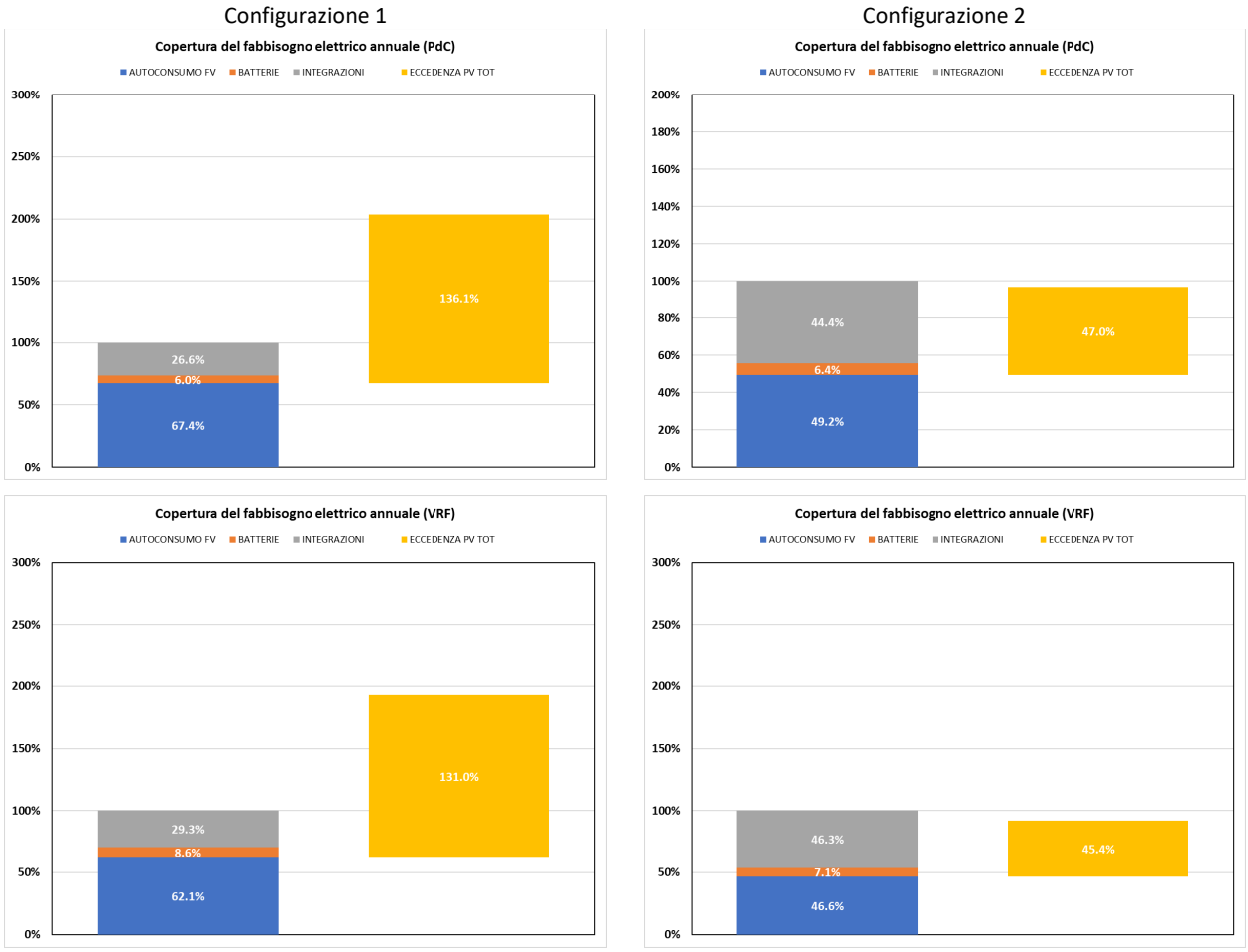


Figura 143. Edificio uffici in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, grafico riepilogativo dei fabbisogni elettrici e produzione da fonte rinnovabile

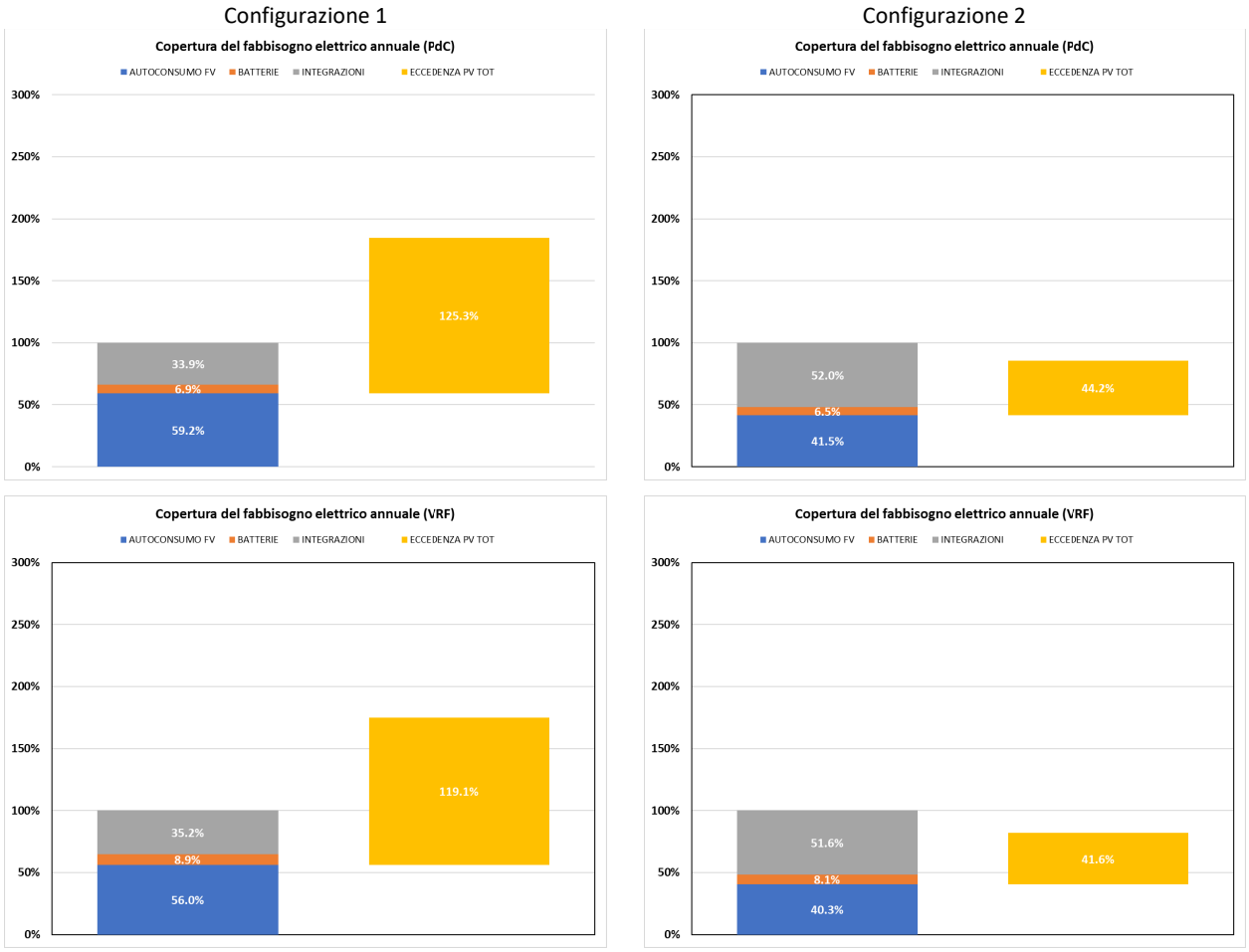


Figura 144. Edificio uffici in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, grafico riepilogativo dei fabbisogni elettrici e produzione da fonte rinnovabile

Tabella 60. Copertura percentuale del fabbisogno di energia elettrica nelle differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche per la configurazione 1

Copertura percentuale [%]										
	zona AB		zona C		zona D		zona E		zona F	
	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF
Autoconsumo PV	84,1	78,3	73,6	68,2	79,7	73,7	67,4	62,1	59,2	56,0
Batterie	5,6	10,1	8,2	10,8	5,2	8,9	6,0	8,6	6,9	8,9
Integrazioni	10,4	11,6	18,2	21,1	15,1	17,4	26,6	29,3	33,9	35,2
Eccedenze	209,5	201,7	201,5	196,0	188,6	185,8	136,1	131,0	125,3	119,1
	193,6	180,0	175,1	164,2	168,3	159,5	103,5	93,0	84,5	75,0

Tabella 61. Copertura percentuale del fabbisogno di energia elettrica nelle differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche per la configurazione 2

Copertura percentuale [%]										
	zona AB		zona C		zona D		zona E		zona F	
	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF	PdC	VRF
Autoconsumo PV	66,0	63,1	57,8	55,0	62,1	58,7	49,2	46,6	41,5	40,3
Batterie	7,1	9,3	8,0	10,2	7,3	8,4	6,4	7,1	6,5	8,1
Integrazioni	26,9	27,6	34,3	34,8	30,6	32,9	44,4	46,3	52,0	51,6
Eccedenze	69,1	67,2	69,2	67,4	64,8	64,7	47,0	45,4	44,2	41,6
	35,1	30,3	26,9	22,4	26,9	23,4	-3,7	-8,0	-14,3	-18,0

A titolo riassuntivo, la Figura 145 e Figura 146 mostrano i bilanci elettrici annuali rispettivamente per la configurazione 1 e la configurazione 2. Come accennato nel paragrafo precedente, ci sono quattro casi per cui le prestazioni energetiche non sono soddisfacenti per il conseguimento dell'obiettivo ZEB: si tratta di tutti i casi della configurazione 2, per la zona climatica E e per la zona climatica F con entrambi gli impianti HVAC. Questi risultati sono immediatamente visibili nella Figura 146 poiché sono i casi per cui le eccedenze non superano le integrazioni e non si raggiunge il 100% di copertura del fabbisogno elettrico.

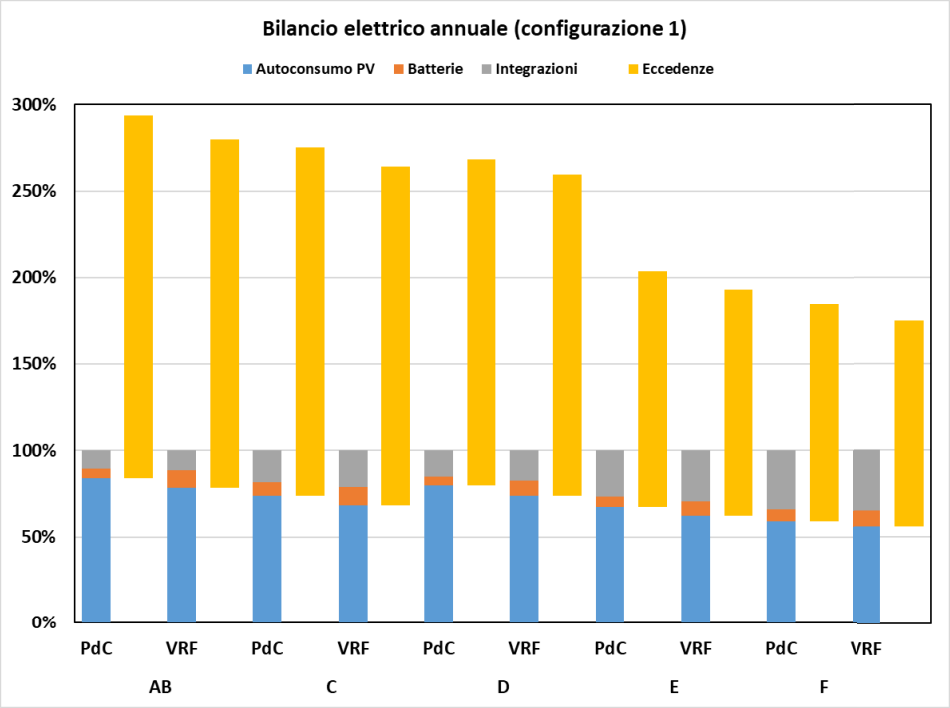


Figura 145. Bilancio elettrico annuale per tipo di impianto HVAC e zona climatica, per la configurazione 1

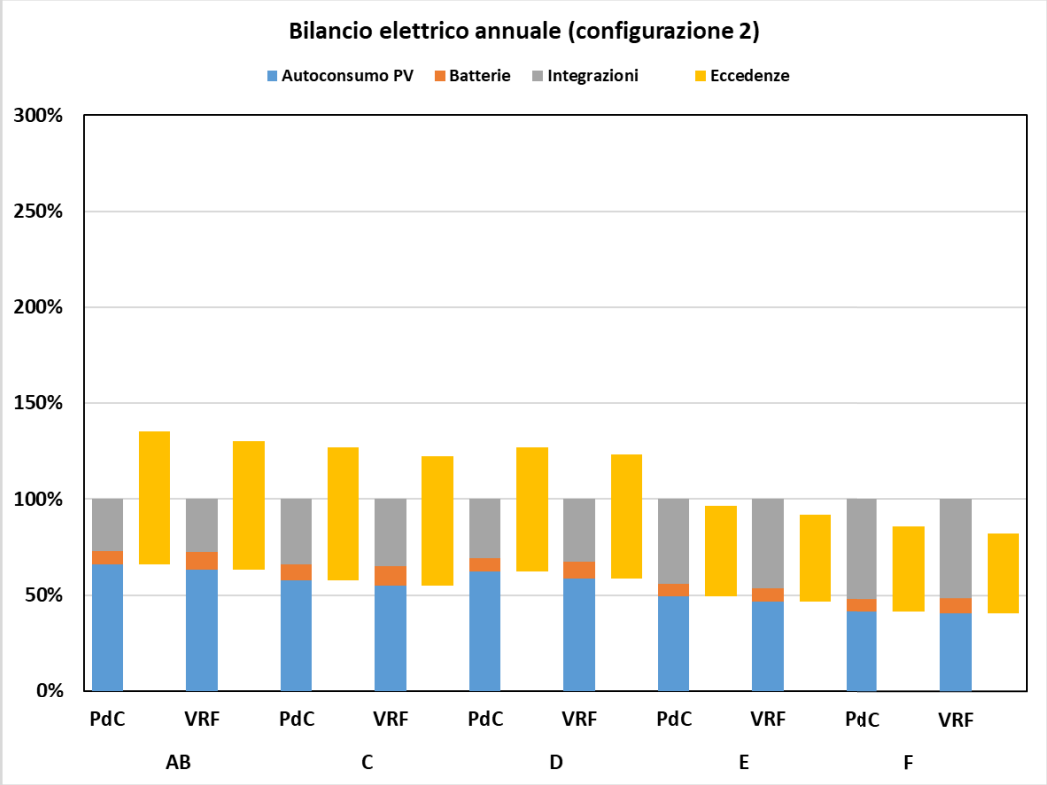


Figura 146. Bilancio elettrico annuale per tipo di impianto HVAC e zona climatica, per la configurazione 2

7 Valutazioni economiche per gli edifici analizzati

7.1 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 più verosimile possibile e consentire un confronto economico tra i modelli individuati.
Le voci di costo sono tratte principalmente dal Prezzario Unico del Cratere del Centro Italia [67] dal Prezzario DEI [48;68;69]. Inoltre, per le soluzioni di involucro o impiantistiche più performanti e innovative 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 di 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 7.2) 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. 7.3 al par. 7.7 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 [70] e non oggetto del presente report, 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.

7.2 Costi dei componenti di involucro

Come anticipato nel paragrafo 7.1, , nell'analisi economica dei costi dei singoli componenti sono stati presi in considerazione gli elementi presenti nel pacchetto stratigrafico del componente in esame, escludendo cioè elementi puntuali o lineari (quali gronde, bocchette ecc.).. Per alcuni casi (quali le coperture e le pareti verticali esterna), si è estesa la stima ad elementi non presenti nei modelli analizzati ma utili a scelte preliminari per valutare la convenienza di determinati pacchetti piuttosto che altri o a confronti successivi, come sarà illustrato in seguito. La lettura delle tabelle riportate nei paragrafi seguenti può avvenire consultando la legenda di Tabella 62.

Tabella 62. Legenda dei materiali utilizzati

Sigla	MATERIALE
Lat	Struttura mista Latero-Cementizia
FCV	Facciata Continua Vetrata
OVF	Facciata Ventilata Opaca
EPSg	Polistirene Espanso Sinterizzato con grafite
LR	Lana di Roccia
PIR	Poliisocianurato o Polyiso

A titolo esemplificativo, si riporta in Tabella 63 lo stralcio di un computo redatto per un componente.

Tabella 63. Stralcio di computo di componente: Facciata ventilata con isolamento in EPS con grafite in zona climatica D

TARIFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	Quantità	IMPORTI	
			unitario	TOTALE
DEI costruz 315011b	Facciata ventilata realizzata con lastre in gres porcellanato, spessore 9 ÷ 11 mm, fissate su struttura in alluminio con ganci a scomparsa. Le lastre, rivestite nella parte interna da una rete di sicurezza in fibra di vetro, sono agganciate, lasciando un'intercapedine, alla struttura di sostegno mediante staffe di ancoraggio con tasselli ad espansione in acciaio inox fissati sul retro delle lastre stesse. Struttura portante costituita da profili in alluminio estruso uniti tra loro da viti in acciaio inox disposti verticalmente ed orizzontalmente sulla parete in muratura a distanze regolari; compreso l'utilizzo di silicone tra le lastre e la struttura in alluminio, esclusi ponteggi esterni e materiali coibenti: posa orizzontale con lastre delle dimensioni di: 600 x 600 mm			
	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	3,00	2,30	2,30
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 m^2)			
	SOMMANO mq	1,00	17	17
A14010.a	Intonaco civile formato da un primo strato di rinzaffo, 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			
	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 (3 mani)			
	SOMMANO mq	3,00	2,10	6,30
	Contributo per l'incidenza a m^2 di infissi in alluminio a taglio termico con infissi doppio vetro			
	SOMMANO mq	1	10,00	10,00
	TOTALE euro			**439,12**

7.2.1 Coperture

In Tabella 64 si riporta il costo della copertura piana a struttura mista in calcestruzzo armato e laterizio, a nervature parallele, per la quale è stato considerato il costo di un solaio realizzato interamente in opera con l'ausilio di tralicci in armatura presagomati con base in laterizio, rivestito all'intradosso da controsoffitto in cartongesso tinteggiato e rivestito esternamente con un pavimento per esterni. È stata considerata anche l'incidenza del costo a m^2 di superficie delle travi in c.a.

Tabella 64. Costi unitari dei solai di copertura

Copertura											
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**
Lat	EPSg	2	3	6	8	10	260	262	266	269	272

7.2.2 Pareti esterne

Sono stati stimati i costi di una parete in blocco di laterizio con isolamento a cappotto (Lat) e di due facciate continue, la prima tutta vetrata e coincidente con quella utilizzata nei modelli (FCV) e la seconda di una ventilata opaca (OVF), utile per confronti successivi (7.8). In questi ultimi due casi sono stati considerati sia il costo della componente opaca che di quella trasparente (Tabella 65). Nel caso del componente OVF per l'isolamento a parete si è fatto riferimento alla voce di costo di applicazione di un cappotto esterno, comprensivo anche dell'ultimo strato di finitura. In tutte le configurazioni è stata poi inserita l'incidenza economica del contributo dei pilastri in c.a.

Tabella 65. 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**
Lat	LR	3	5	7	9	10	165	170	177	179	181
OVF	EPSg	3	5	6	7	8	432	436	439	442	445
FCV	PIR	14*					849				

*: in questo caso lo spessore indicato è uguale per tutte le zone climatiche.

7.2.3 Solai interpiani

Il costo del solaio utilizzato in tutte le configurazioni ammonta a 360 €/m^2, maggiore del costo di un solaio più tradizionale di circa il 25% perché comprensivo di un pavimento sopraelevato e di un controsoffitto in cartongesso all'intradosso. In entrambi i casi sono stati inseriti i costi di un foglio di barriera al vapore, un pannello termoacustico, un massetto livellante e la tinteggiatura del pannello in cartongesso.

7.2.4 Fondazioni e solaio di basamento

Nella valutazione economica della fondazione del tipo a travi rovesce è stato considerato un costo pari a 160 €/m^2. 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 pavimento sopraelevato. Il costo finale comprensivo di solaio e fondazione risulta pari a circa 360 €/m^2 (Tabella 66).

Tabella 66. Costo unitario di fondazione e solaio a basamento

Fondazione e solaio contro-terra con vespaio areato											
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
Lat	EPSg	3	5	8	9	10	356	358	361	362	363

7.2.5 Serramenti e infissi

Sono stati analizzati i costi di infissi in alluminio a taglio termico di finestre a battuta semplice (Tabella 67). Nei costi sono compresi, oltre a doppi e tripli vetri, i controtelai, le maniglie, le guarnizioni e quanto altro occorre per dare l'opera finita.

Tabella 67. Costi unitari degli infissi

Serramenti		
Telaio	Vetro	Costi €/m²
Alluminio a taglio termico	Doppio vetro	380
Alluminio a taglio termico	Triplo vetro	405

7.3 Costi di realizzazione dell'involucro

L'analisi è stata condotta adottando le medesime caratteristiche tecniche utilizzate per i modelli analizzati prendendo a riferimento la zona climatica D. Si è potuto constatare, infatti, che i modelli tra una zona climatica e l'altra riportano variazioni economiche poco significative perché le uniche variazioni di costo dipendono dagli spessori degli isolanti usati in copertura e in parete e dalla tipologia di vetro (doppio o triplo), a seconda della zona climatica nel rispetto dei valori limite di trasmittanza.
Al di là delle specifiche tecnologie utilizzate per ciascun edificio, è possibile individuare i costi delle lavorazioni comuni nella realizzazione dei casi studio.
È 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 dell'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 è stata prevista la posa del magrone, 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/m^3 per le travi di fondazione e 200 kg/m^3 per gli altri elementi strutturali (travi di solaio e pilastri).
Per la realizzazione della facciata continua sono stati considerati i costi della tipologia a cellule autoportanti con pannelli di dimensioni 90 x 320 cm con le stesse caratteristiche termo-fisiche dei casi studio e i relativi elementi di completamento (raccordi orizzontali e verticali di ancoraggio alla struttura), nonché i costi dell'utilizzo di una piattaforma per il sollevamento dei moduli per ciascun piano di destinazione.
I divisori interni sono stati computati come pareti in cartongesso con accoppiato un pannello di isolamento termoacustico tinteggiati con idropittura, mentre i divisori dei corpi scala sono pareti in cartongesso con caratteristiche di resistenza al fuoco REI 60.
All'ingresso di uffici e locali di servizio sono stati previsti porte interne tamburate mentre all'ingresso delle scale sono state considerate due porte tagliafuoco. Gli infissi presi in considerazione sono del tipo in alluminio a taglio termico con infissi doppio vetro selettivi e frangisole a pale orientabili in alluminio.
Per la copertura metallica di sostegno ai pannelli fotovoltaici sono stati valutati i costi di un manufatto costituito da pilastri e travi in acciaio con tubolari quadrati di sezione 250x250mm e travature reticolari di sezione 50x50mm, zincati e verniciati.

Come anticipato nel paragrafo 7.1, 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 dei bagni. Nella Tabella 68 si riportano le stime di costo degli involucri delle due configurazioni, dalle quali si può osservare che la configurazione 1 ha costi maggiori di circa 400 €/m^2 rispetto alla configurazione 2, in quanto la realizzazione della facciata continua vetrata ha costi di esecuzione più elevati rispetto alla muratura con isolamento a cappotto, sebbene quest'ultima comprenda lavorazioni in più come quelle relative all'esecuzione delle opere murarie e degli intonaci.
Le lavorazioni maggiormente incidenti dal punto di vista economico sono così ripartite:

1. nella configurazione di involucro di tipo 1 le categorie più incidenti sono legate alla realizzazione della facciata continua (44%), alla struttura in calcestruzzo armato (13%), ai pavimenti (13%) e alle strutture in cartongesso (10%);
2. nella configurazione di tipo 2 le categorie più incidenti sono relative alla struttura in calcestruzzo armato (20% in totale per le categorie di lavoro 2 e 4 della Tabella 68), ai pavimenti (19%) e alle strutture in cartongesso (14%).

Tutti i costi unitari sono stati ricavati utilizzando la superficie utile complessiva.

Tabella 68. Ripartizione dei costi di involucro per categorie di lavoro per i quattro modelli

CATEGORIE DI LAVORO		COSTI [€]			
		UFFICI ZEB			
		1-Pdc	1-VRF	2-Pdc	2-VRF
1.	Movimenti di terra	16279	16279	16279	16279
2.	Malte, conglomerati cementizi, casseforme e acciaio per c.a.	230773	230773	230773	230773
3.	Opere di sottofondo	93815	93815	93815	93815
4.	Solai	161040	161040	161040	161040
5.	Scale	18000	18000	18000	18000
6.	Facciata continua	1324079	1324079	-	-
7.	Opere murarie	-	-	143150	143150
8.	Coperture e opere da lattoniere	35626	35626	35626	35626
9.	Impermeabilizzazioni	19266	19266	19266	19266
10.	Opere di protezione termica e acustica	31585	31585	143668	143668
11.	Intonaci	-	-	95492	95492
12.	Controsoffitti e pareti divisorie	288840	288840	288840	288840
13.	Pavimenti	376226	376226	376226	376226
14.	Rivestimenti	58257	58257	58257	58257
15.	Serramenti interni	41354	41354	41354	41354
16.	Serramenti esterni	-	-	29741	29741
17.	Tinteggiature	25489	25489	35935	35935
18.	Schermature	172431	172431	172431	172431
19.	Struttura metallica per FV	101584	101584	-	-
	Costo complessivo (IVA esclusa)	**2.994.645**	**2.994.645**	**1.963.397**	**1.963.397**
	Costo unitario [€/m^2]	**1.222**	**1.222**	**801**	**801**

7.4 Costi dei sistemi impiantistici

7.4.1 Impianti elettrici e impianti speciali

Gli impianti elettrici per uffici fanno riferimento in particolare alla norma CEI 64-8 **[71]**. Vengono valutati i costi di impianti posati esternamente con canaletta, a vista e con comandi e prese con scatole esterne, per consentire la massima flessibilità e facilità di manutenzione nel tempo. Per ogni scrivania sono stati considerati 2 punti luce a soffitto, 2 prese 2P+PT,1 presa TV e 1 presa telefonica. All'ingresso è stato previsto

un impianto citofonico e un impianto di illuminazione di sicurezza, come previsto dalla norma CEI 64-8 [71] nel caso di edificio ad uso ufficio con più di 100 dipendenti. L'impianto di illuminazione è dotato di apparecchi a LED per controsoffitti e di sensori di movimento in spazi quali bagni e corridoi. L'edificio è stato dotato anche di un impianto anti-intrusione e di un sistema standard di controllo dei carichi. Per questo ultimo impianto sono state considerate come utenze i servizi generali (climatizzazione, ventilazione, illuminazione, sollevamento e ACS) e i servizi ausiliari legati prevalentemente alle attività di ufficio, quali pc e stampanti, ma anche macchinette del caffè e distributori delle sale ristoro. Sono stati presi in considerazione anche sensori di luce per l'automazione delle schermature.
Per l'impianto antintrusione sono stati previsti sensori del tipo a contatto sui serramenti e un rilevatore a infrarosso negli ambienti principali.

7.4.2 Impianto fotovoltaico e di accumulo elettrico

Nella stima dei costi dell'impianto fotovoltaico sono stati considerati i costi dei moduli e di un inverter con sistema di accumulo di energia integrato con le stesse caratteristiche e potenze uguali a quelle utilizzate nei modelli, che saranno quindi differenti per le configurazioni 1 e 2 di involucro. La prima, infatti, ha un campo fotovoltaico di superficie superiore per la presenza della pensilina dedicata e aggettante la copertura, la seconda invece sfrutta esclusivamente la superficie di copertura, con un numero inferiore, quindi, di pannelli installati.

7.4.3 Impianto idrico-sanitario e di produzione di Acqua Calda Sanitaria

Nella stima dei costi dell'impianto idrico rientrano i costi delle seguenti reti e componenti:

- bollitore con pompa di calore integrata per la produzione di acqua calda sanitaria con medesime caratteristiche di quella utilizzata nei modelli;
- 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 (lavabo, vaso, cassetta di scarico, ecc.), fornito e posto in opera all'interno di bagni 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.

7.4.4 Impianto di climatizzazione estiva e invernale

Il costo dell'impianto di riscaldamento e condizionamento è stato stimato distinguendo i costi tra le due configurazioni impiantistiche. In particolare, per la configurazione PdC oltre al costo delle pompe di calore è stato considerato il costo 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 (caldo/freddo, deumidificazione, ventilazione ecc.) e i costi di collettori di derivazione per piano.
Per la configurazione VRF oltre al costo dell'unità esterna, è stato conteggiato il costo di n. 25 unità interne a piano collegate con tubo in rame ricotto e i relativi giunti di derivazione, i collettori, un pannello di controllo locale per piano e un comando remoto centralizzato per il monitoraggio e la programmazione delle unità interne, nonché la segnalazione di eventuali anomalie. Per entrambe le configurazioni sono comprese, infine, i costi dell'assistenza muraria, l'ulteriore valvolame e i collegamenti elettrici in centrale termica.

7.4.5 Impianto di ventilazione meccanica

Oltre al costo di una UTA (Unità di Trattamento Aria) del tipo preassemblata con recuperatore di calore con portata d'aria simile a quella simulata nel modello, sono stati valutati i costi di canali di sezione circolare con isolamento termico per la realizzazione di condotte per la distribuzione dell'aria da immettere e da estrarre, nonché i relativi raccordi e bocchette, distinti per diametro a seconda che la condotta sia la dorsale principale o la diramazione secondaria. Nel caso dei VRF, è stata conteggiata un'unità VRF aggiuntiva rispetto a quelle deputate per la climatizzazione e a servizio dell'UTA.

7.4.6 Impianto di sollevamento

Viene conteggiato il costo di un ascensore elettrico con una portata fino a 630 kg (8 persone) da 5 fermate e il relativo costo di assistenza muraria.

7.4.7 Costi complessivi dei sistemi impiantistici

Si riportano in Tabella 69 i costi stimati per ciascuna categoria di lavoro.

Tabella 69. Ripartizione dei costi impiantistici per categorie

CATEGORIE DI LAVORO		COSTI [€]			
		UFFICI ZEB			
		1-Pdc	1-VRF	2-Pdc	2-VRF
1.	Impianti elettrici	158959	158959	158959	158959
2.	Impianti speciali	79676	79676	79676	79676
3.	Impianti fotovoltaici	362394	362394	221795	221795
4.	Impianto idrico-sanitario e ACS	65864	65864	65864	65864
5.	Impianti di riscaldamento e condizionamento	251117	198237	251117	198237
6.	Impianto di ventilazione meccanica	228052	228052	228052	228052
7.	Impianto di sollevamento	83129	83129	83129	83129
	Costo totale	**1.229.191**	**1.176.311**	**1.088.593**	**1.035.712**
	Importo unitario [€/m²]	**500**	**480**	**444**	**422**

Le differenze di costo che si evincono tra le soluzioni dei modelli sono date sia dalle due diverse configurazioni di impianto di climatizzazione estiva e invernale (pompa di calore o VRV) e dalla minore superficie di impianto fotovoltaico adottata nelle configurazioni di tipo 2 con involucro a cappotto.
Le categorie di lavoro maggiormente incidenti nelle prime due configurazioni (1-Pdc e 1-VRF) sono così distribuite:

- Impianto fotovoltaico con la maggiore incidenza tra tutte (36-37%);
- Impianto di climatizzazione e di ventilazione meccanica, rispettivamente incidenti il 16 o il 20% (a seconda se l'impianto è del tipo a VRF o a pompa di calore aria-acqua) e il 17% sul costo complessivo;
- Impianto elettrico (13%);
- Impianto di trasporto di persone (6%);
- Impianti idrico-sanitario e di produzione dell'ACS (5%);
- Impianti speciali (3%).

Le categorie di lavoro più incidenti nelle configurazioni di tipo 2 (PdC e VRF) sono, invece, l'impianto di condizionamento estivo ed invernale al 24%, seguite dall'impianto fotovoltaico e di ventilazione, entrambe al 20%, e l'impianto elettrico (14%). Per ultimi troviamo gli impianti speciali, l'impianto idrico sanitario e gli ascensori, incidenti tra il 6%-7% rispettivamente sul costo totale degli impianti.

7.5 Costi accessori

Nonostante la mancanza di un Piano di Sicurezza e Coordinamento ai sensi del D. Lgs 81/2008 [70], si è comunque voluto dare una stima approssimativa tenendo conto delle voci accessorie più significative a livello

di costo (quadro elettrico da cantiere, autogru, trabattello, monoblocchi ad uso ufficio e spogliatoi, bagno chimico ecc...), differenziandoli, dove necessario, a seconda dei tempi ipotizzati per la costruzione relativa a ciascuna tipologia costruttiva ed edilizia (Tabella 70). I costi accessori più alti si hanno nelle configurazioni con muratura a cappotto di tipo 2 a causa dell'installazione di ponteggi, che, per le facciate continue del tipo a cellule autoportanti (configurazioni di tipo 1) non sono necessari. In quest'ultimo caso è previsto però il costo di una piattaforma elevatrice che è stata considerata tra i costi di realizzazione dell'involucro.

Tabella 70. Costi della sicurezza

CATEGORIE DI LAVORO	COSTI [€]			
	UFFICI ZEB			
	1-Pdc	1-VRF	2-Pdc	2-VRF
Durata ipotizzata del cantiere (mesi)	20	20	30	26
Costi accessori	**38.773**	**38.773**	**88.585**	**88.585**

7.6 Costi relativi agli oneri di progettazione

Per il calcolo relativo agli oneri professionali (Tabella 71) 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 71. Calcolo degli oneri di progettazione

CATEGORIE DI LAVORO	COSTI [€]			
	UFFICI ZEB			
	1-Pdc	1-VRF	2-Pdc	2-VRF
Valore dell'opera	4.262.609	4.209.729	3.140.575	3.087.694
Costi di progettazione (20% dell'opera)	**852.522**	**841.946**	**628.115**	**617.539**

7.7 Costi complessivi

Terminata l'analisi puntuale dei costi per macro-categorie di lavoro, è stato possibile individuare i costi complessivi dei quattro modelli simulati nell'analisi energetica, riportati in Tabella 72. Da questa sintesi si riscontra che i casi 1-Pdc e 1-VRF hanno un costo molto simile tra loro e del 26-28% circa più alto rispetto agli altri due casi (2-Pdc e 2-VRF), sia per la tipologia di involucro adottata che per la presenza di maggiore superficie fotovoltaica e della relativa pensilina metallica di sostegno.

Tabella 72. Riepilogo dei costi dei quattro modelli di edificio

MACRO-CATEGORIE DI LAVORO	COSTI [€]			
	UFFICI ZEB			
	1-Pdc	1-VRF	2-PdC	2-VRF
1. Realizzazione involucro	2.994.645	2.994.645	1.963.397	1.963.397
2. Installazione sistemi impiantistici	1.229.191	1.176.311	1.088.593	1.035.712
3. Costi accessori	38.773	38.773	88.585	88.585
4. Oneri di progettazione	852.522	841.946	628.115	617.539
Costo stimato complessivo dell'opera	5.115.131	5.051.675	3.768.690	3.705.233
Costo unitario [€/m²]	**2.086**	**2.061**	**1.537**	**1.511**

In Figura 147 si osserva l'incidenza di costo tra le varie categorie di lavoro. In particolare:

- Per i casi 1-PdC e 1-VRF i costi di realizzazione dell'involucro incidono il 60%, mentre gli impianti solo il 24% circa;
- Per i casi2-Pdc e 2-VRF i costi di realizzazione dell'involucro rappresentano poco più della metà del costo complessivo, mentre gli impianti il 28-29%.

Gli oneri progettuali rappresentano per tutti i modelli il 17% circa dell'importo totale.

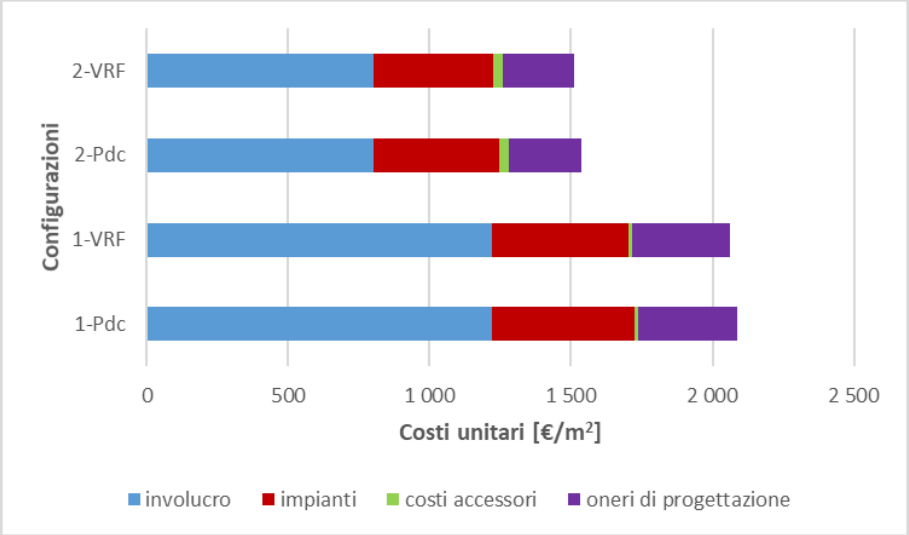


Figura 147. Importi unitari dei quattro modelli di edificio

7.8 Confronto dei costi degli edifici-tipo con costi di riferimento di edifici di nuova costruzione ad alta prestazione già realizzati e/o stimati

Al fine di confrontare i costi ottenuti con quelli di mercato e capire se gli edifici proposti risultano effettivamente fattibili, sono state condotte alcune ricerche bibliografiche e interviste a progettisti di edifici terziari già realizzati, in modo tale da ottenere informazioni di carattere tecnico ed economico sui progetti. I dati economici ottenuti sono stati raccolti in Tabella 73 e mostrano un range di costi di costruzione che varia da un minimo di 900 a un massimo di 2.300 €/m^2.

Tabella 73. Raccolta dei costi di costruzione di edifici nZEB realizzati

Destinazione d'uso	Fonte	Anno	Località	Z.c.	Sup. utile [m^2]	Costi di costruzione [€/m^2]
Scolastica	[33]	2017	Novate Milanese (MI)	E	2.200	1.295
Scolastica	[33]	2017	S. Andrea (FM)	D	525	2.285
Scolastica	[34]	2017	Bisceglie (BAT)	C	1.300	900*
Uffici	[33] Cucinella Architects	2017	Fiorano Modenese (MO)	E	1.700	1.940

*: costi comprensivi di arredi

Per consentire una valutazione con maggior margine di confronto sulla fattibilità economica dei casi-studio, sono stati stimati i costi di due ulteriori edifici ad uso ufficio con le stesse caratteristiche fisiche e geometriche dei modelli ZEB analizzati, ma con prestazioni energetiche paragonabili a quelle di edifici *nearly zero energy buildings* (nZEB), ossia nel rispetto dello standard normativo attuale da raggiungere in caso di nuove costruzioni. Lo studio economico di tali edifici consente di avere un raffronto di costi più attendibile, vista la coerenza delle voci di costo analizzate tra i modelli di riferimento nZEB e gli edifici oggetto di studio nel report. I modelli di costo così definiti presentano le seguenti caratteristiche:

- Il primo, denominato #NZEB1, adotta una tecnologia innovativa ormai molto utilizzata negli edifici ad uso ufficio, come emerso dall'analisi introduttiva (paragrafo 3.1), ovvero la facciata ventilata opaca, e una pompa di calore aria-acqua per riscaldamento e raffrescamento;
- Il secondo, denominato #NZEB2, prevede una tamponatura più diffusa e ormai consolidata come quella dell'isolamento a cappotto su supporto in muratura, e impianto a VRF.

Sono state mantenute le stesse dotazioni impiantistiche e ipotizzate le stesse potenze dei generatori dei casi studio esaminati, riducendo tuttavia l'accumulo elettrico e quota parte di superficie fotovoltaica mantenendo solo la potenza necessaria a garantire il 50% del fabbisogno dell'edificio (42 kWp). I risultati dei costi dei due casi, distinti per macro-categorie di lavoro, sono riportati in Tabella 74.

Tabella 74. Riepilogo dei costi dei 2 modelli di costo

MACRO-CATEGORIE DI LAVORO		COSTI [€]	
		UFFICI	
		#NZEB1	#NZEB2
1.	Realizzazione involucro	2.507.808	1.963.397
2.	Installazione sistemi impiantistici	1.046.759	908.637
3.	Costi accessori	88.585	88.585
4.	Oneri di progettazione	728.630	592.124
	Costo stimato complessivo dell'opera	4.371.782	3.552.743
	Costo unitario [€/m²]	**1.783**	**1.449**

I costi dei casi di riferimento così ottenuti sono stati messi a confronto in Figura 148 con due delle configurazioni dei modelli simulati, ovvero quella con i costi in assoluto più bassi e quella con i costi in assoluto più alti, così da avere margini di confronto più ampi.

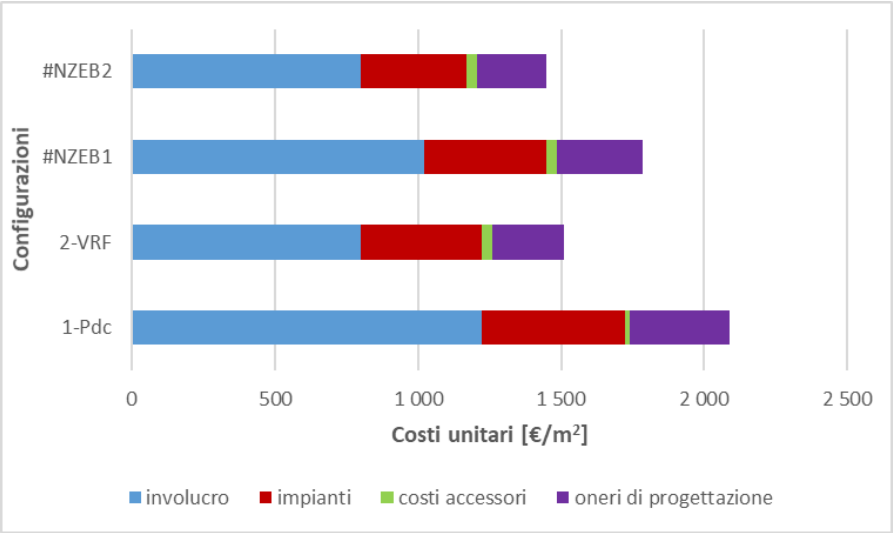


Figura 148. Confronto tra i costi unitari dei casi studio ZEB e i modelli di costo nZEB

Si osserva che i due casi più simili tra loro a livello di costo sono quelle con muratura a cappotto e impianto a VRF, in quanto le tecnologie di involucro e impiantistiche sono del tutto assimilabili, e che lo scarto relativamente minimo, pari solo a 60 €/m^2, è dato dalla superficie fotovoltaica per il raggiungimento dell'obiettivo ZEB. I costi della soluzione ZEB con facciata continua (1-Pdc) restano i costi in assoluto più alti, discostandosi del 17% (300 €/m^2 circa in più) rispetto alla soluzione con facciata ventilata opaca (#NZEB1) e del 36% (637 €/m^2 in più) dalla soluzione a cappotto (#NZEB2). Sicuramente costruzioni più avveniristiche da un punto di vista costruttivo ed estetico incidono maggiormente in partenza sui costi di costruzione dell'involucro di un edificio, che si punti all'obiettivo ZEB o meno.

Successivamente, in Figura 149, sono stati confrontati i costi unitari complessivi dei quattro modelli scelti con i costi degli edifici già realizzati di Tabella 73: i modelli ZEB hanno costi che rientrano nel costo di costruzione massimo di riferimento e, in particolare, la configurazione 2-VRF ha anche un costo inferiore al costo medio di riferimento. La configurazione 1-Pdc ha un costo più elevato del 30% rispetto al costo medio di riferimento.

Inoltre, a riprova della validità delle valutazioni economiche effettuate per i modelli, si riscontra che il costo medio dei modelli #NZEB si allinea al costo medio degli edifici nZEB già realizzati, ipotizzando quindi che le analisi di confronto abbiano verosimilmente un buon indice di attendibilità.

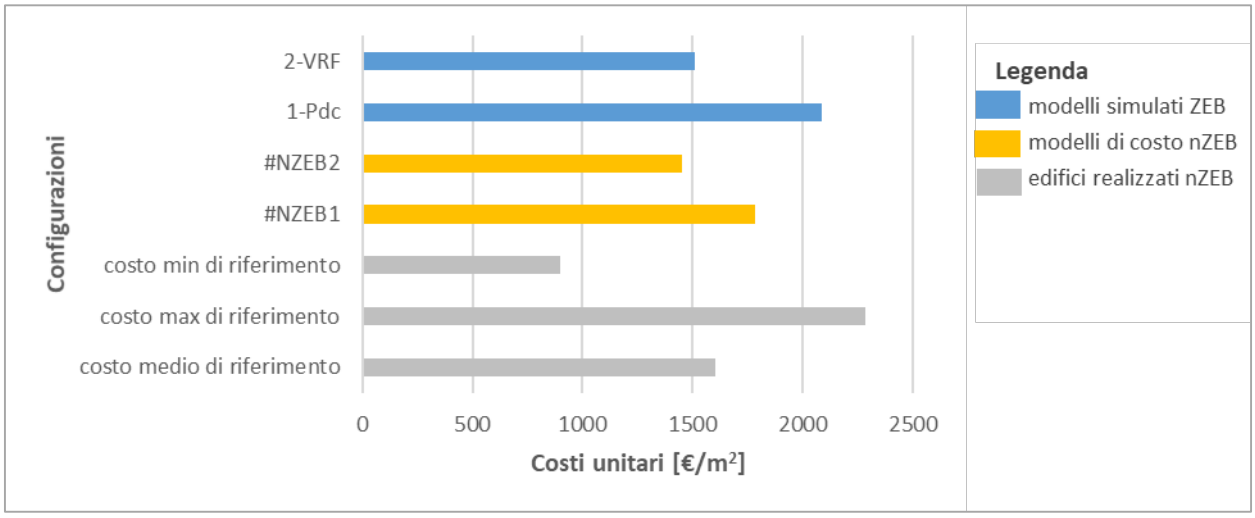


Figura 149. Confronto tra i costi dei modelli studiati e quelli degli edifici già realizzati di Tabella 73

8 Conclusioni

Alla luce del lavoro condotto e finora illustrato, è possibile ottenere alcune conclusioni sostanziali sulla possibilità di raggiungere l'obiettivo *zero energy building.*
Già il processo di definizione dell'edificio-tipo ad uso ufficio è stato caratterizzato dalla necessità di avere ben chiaro tale obiettivo in modo da ottimizzare tutti i parametri utili a raggiungere una prestazione energetica ben più elevata degli standard normativi. Ciò comporta una serie di scelte preliminari che in un esercizio teorico risultano allo stesso tempo complesse ma estremamente libere e, attraverso l'iteratività della fase decisionale con continue verifiche e controlli della bontà delle stesse, portano a risultati accettabili e positivi.
Lo sforzo del lavoro, tuttavia, è stato quello di non limitarsi all'ideazione di edifici astratti e poco realistici, ma piuttosto di studiare dei modelli tali da poter essere esemplificativi di pratiche costruttive avanzate, ma diffuse sul mercato, per fornire delle considerazioni applicabili al contesto italiano nel quale si opera e a tutte le zone climatiche che lo caratterizzano. L'assunto è sicuramente l'imprescindibilità da una progettazione integrata che comporta una coscienza energetica rilevante, una competenza architettonica e impiantistica strettamente interconnesse e una certa "sensibilità" nell'analisi di risultati più strettamente legati alla modellazione e simulazione energetica, che spesso comportano l'elaborazione di dati molteplici e interconnessi la cui complessità è di non poco conto.
I modelli studiati, quindi, sono il risultato di tutti questi aspetti e, non da ultimo, della volontà di raggiungere anche una sicura fattibilità economica, da cui sarebbe inverosimile prescindere.

Riassumendo le fasi e i punti sostanziali del lavoro di ricerca condotto, a seguito di un'analisi accurata del parco edilizio nel settore terziario e delle tecnologie più diffuse in tali edifici, si è deciso di incentrare l'analisi su un edificio-tipo ad uso ufficio variandone le caratteristiche costruttive e impiantistiche. Sono stati, quindi, ottenuti quattro casi-studio diversi combinando due configurazioni di involucro e due di impianto, testati e analizzati nelle diverse zone climatiche.
La prima configurazione di involucro analizzata (configurazione 1) ha previsto l'adozione di un sistema di facciata continua vetrata costituita per circa il 50% da superficie vetrata e per la restante parte da pannelli con uno strato isolante contenuto in un rivestimento metallico e rivestito esternamente da una lastra in vetro.
La seconda configurazione (configurazione 2), invece, ha previsto l'impiego di tecnologie e materiali più consolidate essendo caratterizzata, per l'involucro opaco, da tamponature massive in blocchi di laterizio cui è associato un sistema di isolamento a cappotto in lana di roccia.
Le due configurazioni di involucro si differenziano anche per la copertura: nella prima, al fine di garantire una più ampia superficie da adibire a fotovoltaico e, allo stesso tempo, un maggiore ombreggiamento, è stata ideata una pensilina aggettante in acciaio che conferisce all'edificio maggior carattere e diventa elemento peculiare dell'edificio stesso, prendendo spunto dagli esempi analizzati nella parte introduttiva; nella seconda si è mantenuto un carattere architettonico più tradizionale, prevedendo che non venga realizzata alcuna pensilina e lasciando semplicemente la copertura piana adibita a fotovoltaico con uno spazio riservato all'alloggiamento delle macchine impiantistiche destinate alla climatizzazione degli ambienti.
L'obiettivo di evitare ad ogni modo l'utilizzo di fonti da combustibili fossili ha determinato la scelta di due differenti sistemi impiantistici di climatizzazione invernale ed estiva del tipo "all-electric", il primo a pompa di calore aria-acqua (PdC) e il secondo a pompa di calore aria-aria ad espansione diretta (VRF), nonché dell'installazione di una pompa di calore per la produzione acqua calda sanitaria. Ad integrazione di tali sistemi, per tutti i casi si è prevista l'installazione di un sistema di ventilazione meccanica controllata con recupero di calore.
Grande attenzione, infine, è stata data alla produzione di energia da fonti rinnovabili, in questo caso installando pannelli fotovoltaici in copertura, e all'integrazione con sistemi di accumulo, indispensabili nell'ottica di una gestione efficiente dell'energia prodotta.
Le caratteristiche delle diverse stratigrafie dei componenti di involucro e dei sistemi impiantistici adottati sono state variate a seconda delle diverse zone climatiche in modo da rispettare i requisiti minimi di legge.
Dal punto di vista del dimensionamento degli impianti a pompa di calore, è stato possibile mantenere la stessa potenza massima per il raffrescamento, mentre per il riscaldamento nelle sole zone E ed F sono stati

utilizzati tagli dimensionali diversi per le pompe di calore aria-acqua. Questi risultati sono ascrivibili a diversi fattori, tra i quali spiccano la variazione della trasmittanza con la zona climatica e gli specifici profili di funzionamento degli impianti. Infatti, per adeguare la trasmittanza dei componenti di involucro ai requisiti minimi di legge ne sono stati opportunamente variati gli spessori per ogni zona. Inoltre, un ruolo chiave è stato attribuito anche alle strategie di gestione degli impianti, con riferimento, per esempio, alla possibilità di accensione anticipata in entrambe le stagioni che permette di conseguire una consistente riduzione del picco di assorbimento elettrico. Questo perché, in concomitanza dell'inizio dell'occupazione mattutina dell'edificio, gli impianti sono chiamati a soddisfare un maggiore carico termico dovuto al fatto che gli ambienti sono stati inoccupati e non climatizzati per tutta la notte: in quest'ottica, anticipare l'accensione degli impianti permette di portare gli ambienti ad una temperatura cosiddetta di set-back, già prossima a quella di progetto da raggiungere nel momento in cui l'occupazione degli edifici è a pieno regime.

A seguito dell'analisi energetica condotta, i risultati ottenuti si rivelano interessanti e del tutto peculiari.
A proposito di fabbisogni termici, durante l'inverno la configurazione 1 di involucro (vetrata) risulta la migliore in quanto presenta il minore fabbisogno in tutti i casi, grazie alla scelta di chiusure verticali con bassa trasmittanza ed ai guadagni termici provenienti dagli apporti solari attraverso i sistemi vetrati. I fabbisogni aumentano progressivamente dalla zona A-B alla F, coerentemente con i dati climatici utilizzati e le località analizzate.
Durante l'estate, al contrario, il fabbisogno decresce nelle varie zone climatiche. In questo caso i fabbisogni estivi delle differenti configurazioni all'interno di ciascuna zona climatica sono tra loro confrontabili, anche grazie agli avanzati sistemi di schermatura e di controllo della radiazione solare utilizzati all'interno della configurazione vetrata. L'unica criticità si riscontra nella zona D, nella quale il fabbisogno invernale si colloca tra la zona climatica A-B e la zona C, mentre il fabbisogno estivo risulta maggiore rispetto alle altre zone. Ciò è dovuto alle condizioni climatiche della località di Roma, rappresentativa della zona D, caratterizzate da dati di radiazione solare e temperatura più elevati. Anche il fabbisogno estivo in zona climatica E risulta paragonabile a quello della zona climatica A-B: in questo caso, ciò dipende sia dai dati climatici specifici della città di Milano, caratterizzata da estati calde, sia dai particolari profili di controllo dinamico impostati per le schermature solari. Esse, infatti, entrano in funzione superata una certa soglia di radiazione solare, che in zona E non viene sempre raggiunta, permettendo alla radiazione solare di penetrare all'interno dell'edificio per un periodo più prolungato. Ciò determina un guadagno termico riveniente dagli apporti solari e un bilancio estivo più elevati, al netto del periodo di utilizzo degli impianti che invece risulta determinante nella valutazione dei fabbisogni energetici dell'edificio.
Per quanto riguarda questi ultimi le considerazioni sono molteplici.
L'energia termica totale annuale erogata dagli impianti di riscaldamento è legata alla durata del periodo di funzionamento degli impianti secondo normativa, oltre che alle temperature medie esterne e alle diverse tecnologie di involucro applicate agli edifici e riflette l'andamento dei fabbisogni termici al netto dei sistemi impiantistici con un progressivo incremento dalla zona A-B alla zona F, eccezion fatta per la zona D. In raffrescamento, calcolato per un periodo fissato da giugno a settembre, invece, è evidente come la quantità di energia termica necessaria si riduca sostanzialmente nelle zone climatiche più fredde, considerando esclusivamente le ore in cui gli impianti sono accesi e funzionanti.
Gran parte del fabbisogno di energia elettrica è quindi ascrivibile ai servizi di climatizzazione, seguiti da una quota pressoché costante legata alle apparecchiature elettriche e da un contributo per l'illuminazione che varia leggermente in funzione della zona climatica a causa della tipologia di controllo fortemente dipendente dal livello di illuminazione naturale all'interno dell'edificio.
Si è visto infine come i fabbisogni elettrici delle configurazioni siano pressoché simili tra i casi con le pompe di calore aria-acqua e quelli con VRF, entrambi sistemi efficienti e promettenti da un punto di vista energetico.
Si è anche potuto notare come l'adozione di un sistema di ventilazione meccanica con unità di trattamento aria e recupero di calore sia conveniente al fine di una riduzione e razionalizzazione dell'uso dell'energia soprattutto in inverno, quando si risparmia almeno il 55% dell'energia che sarebbe necessaria senza la scelta di tale sistema.

Al fine di valutare la copertura del fabbisogno da fonti rinnovabili si è sottolineato come sia importante soprattutto negli edifici del terziario tener conto delle diverse componenti dei bilanci elettrici finali, sia mensili che annuali, ossia: energia prodotta da fotovoltaico e direttamente auto-consumata; energia erogata dalle batterie di accumulo precedentemente caricate da fotovoltaico; energia integrata dalla rete ed energia prodotta da fotovoltaico in eccedenza rispetto al fabbisogno.
Dall'analisi condotta risulta che, in quasi tutti i casi, il surplus di energia prodotto da fonti rinnovabili, valutato in termini annuali, supera di gran lunga il fabbisogno totale dell'edificio. Tutti i casi che adottano la configurazione 1 con entrambi i sistemi impiantistici dimostrano che in situazioni di progettazione avanzata e libera da vincoli si possono ottenere superfici più ampie da destinare al fotovoltaico e si può superare l'obiettivo zero energy rendendo l'edificio un "positive building". In situazioni più tradizionali come in configurazione 2, invece, la sola superficie di copertura può risultare insufficiente. A tal proposito, gli unici quattro casi critici per cui le prestazioni energetiche non sono soddisfacenti per il conseguimento dell'obiettivo ZEB a livello annuale sono appunto rappresentati dalla configurazione 2, in zona climatica E ed F con entrambe le tipologie impiantistiche adottate. In tal caso le eccedenze non superano le integrazioni e non si riesce a garantire il 100% di copertura del fabbisogno elettrico annuale da fonti rinnovabili.
Effettuando un'analisi del bilancio energetico su base mensile, invece, si registra la necessità di attingere ad integrazioni di energia elettrica dalla rete anche con la configurazione 1 durante i mesi invernali; l'entità di tali integrazioni risulta non trascurabile già in zona climatica A-B ed è crescente nel passare da tale zona climatica a quella più fredda, ovvero la F. Dunque, se da un lato il bilancio annuale presenta condizioni favorevoli per la produzione di energia da fonte rinnovabile e il relativo sfruttamento anche con una superficie minore quale quella prevista nella configurazione di involucro 2, da un punto di vista mensile, le criticità di conseguimento dell'obiettivo ZEB appaiono più marcate.
I mesi più critici risultano gennaio, novembre e dicembre, in cui neanche per la configurazione di tipo 1, con l'intera pensilina aggettante installata sul tetto adibita a fotovoltaico, si ottiene la copertura totale da fonte rinnovabile del fabbisogno di energia in zona E ed F. Tali mesi, per la configurazione 2, risultano invece critici per tutte le zone climatiche.
Risultato sostanziale, quindi, è che quasi tutte le configurazioni si possono definire edifici "zero energy" a livello annuale o nel caso della configurazione 1 "positive buildings", mentre dal punto di vista del fabbisogno mensile i mesi invernali restano i più critici.
Tornando al bilancio annuale, si è constatato che il contributo delle batterie di accumulo utilizzate può arrivare ad una percentuale superiore all'11% e fornisce energia per una percentuale minima del 7,5 % del fabbisogno. Questi valori delle prestazioni energetiche hanno portato a ritenere il componente scelto un buon compromesso considerando anche l'esborso economico. Aumentare, infatti, le percentuali di incidenza sul bilancio può rappresentare un vero e proprio rischio per la sostenibilità economica dell'insieme edificio-impianto.

A tal proposito, per quanto riguarda l'aspetto economico si è visto come per le configurazioni 1-PdC e 1-VRF i costi di realizzazione dell'involucro incidono per il 60% e i costi impiantistici per il 24% circa, mentre per le configurazioni 2-PdC e 2-VRF i costi di realizzazione dell'involucro rappresentano poco più della metà del costo complessivo, mentre gli impianti incidono per il 28-29% sul totale. Gli oneri progettuali rappresentano per tutti i modelli il 17% circa dell'importo totale.
Dal confronto con edifici nZEB di riferimento, infine, si è potuto notare come i costi più alti siano quelli della configurazione 1 con la facciata continua che si discosta del 17% rispetto ad un edificio nZEB con facciata ventilata opaca e del 36% rispetto ad un edificio nZEB con isolamento a cappotto. Infine, gli edifici ZEB analizzati hanno costi che rientrano nel costo di costruzione massimo di riferimento e, in particolare, la configurazione 2-VRF ha anche un costo inferiore al costo medio di edifici realizzati e presenti sul mercato. La configurazione 1-PdC ha, invece, un costo più elevato del 30% rispetto al costo medio di mercato.
L'incremento di costo è sicuramente dovuto in gran parte alla necessità di ampliare il numero di pannelli fotovoltaici, scegliendo sistemi altamente performanti ed economicamente meno vantaggiosi.

La progettazione in direzione zero energy, infatti, seppur attenta a tutti gli aspetti inerenti alle caratteristiche costruttive e impiantistiche e i sistemi dinamici di gestione e controllo, determina che le tecnologie di

produzione di energia da fonti energetiche rinnovabili debbano essere avanzate e notevolmente performanti, come dimostrato principalmente nella configurazione 2 con involucro tradizionale e fotovoltaico su copertura piana. L'obiettivo *zero energy*, infatti, viene raggiunto su base annuale in tutti i casi della configurazione 1 vetrata e quasi tutti i casi della configurazione 2 opaca, nonostante la consistente riduzione della superficie totale dei pannelli fotovoltaici.

9 Considerazioni conclusive: confronto tra edifici residenziali e terziari e sviluppi futuri

L'importante risultato raggiunto dall'attività di ricerca triennale condotta è sicuramente l'aver dimostrato che per ottenere edifici *zero energy* non è così necessario spingersi eccessivamente oltre i valori di trasmittanza nZEB già normati dal D.M Requisiti Minimi [15]. Ciò, infatti, non apporterebbe un miglioramento sostanziale alle prestazioni energetiche, anzi potrebbe comportare problemi di surriscaldamento soprattutto nelle zone climatiche più calde e risulterebbe poco conveniente dal punto di vista economico [72]. Inoltre, non è neanche necessario aumentare di troppo la superficie di fotovoltaico come si potrebbe pensare, seppur questa rivesta un ruolo chiave nell'integrazione della produzione di energia da fonti rinnovabili.

La ricerca condotta nelle diverse annualità evidenzia come l'approccio di analisi utilizzato per edifici residenziali e terziari, sebbene segua una metodologia condivisa per entrambi i casi, si differenzia tuttavia per alcuni aspetti strettamente legati all'utilizzo dell'edificio e alle diverse esigenze di chi lo occupa, che si concretizzano in profili di funzionamento e di occupazione estremamente differenti.

L'occupazione dell'edificio risulta un fattore importante ma al tempo stesso molto variabile a seconda della destinazione d'uso dei singoli ambienti (uffici, sale conferenze, openspace, e così via) e degli edifici stessi. Nel settore residenziale diventa fattore determinante sul bilancio termico dell'edificio, in quanto sebbene tali edifici siano caratterizzati da un numero di persone per metro quadro ridotto rispetto a quelli del settore terziario, tuttavia l'occupazione stessa delle abitazioni è prolungata nel tempo. In caso di edifici altamente isolati diventa un fattore rilevante rispetto agli altri contributi del fabbisogno netto degli edifici, laddove le tecnologie costruttive e di schermatura ottimizzano l'involucro sia in inverno limitando le dispersioni che in estate favorendo invece i ricambi d'aria e l'ombreggiamento. Nel terziario invece l'occupazione degli edifici è sicuramente caratterizzata da un indice di persone a metro quadro molto più elevato anche se per un tempo meno prolungato e ciò determina ugualmente una significatività del contributo al fabbisogno termico da esso determinato.

Altro aspetto rilevante e di cui bisogna tener conto è quello dei consumi ben più consistenti dovuti, tra gli altri fattori, ai dispositivi elettrici utilizzati a fini lavorativi, che incidono non di poco sui fabbisogni elettrici degli edifici a carattere terziario, mentre risultano trascurabili in campo residenziale.

Rispetto al caso del settore residenziale, è evidente che per edifici a destinazione d'uso ufficio alcuni servizi come la produzione di acqua calda sanitaria incidono meno sul fabbisogno totale dell'edificio determinando la possibilità di decidere di non installare pannelli solari termici e preferire invece l'installazione unicamente di pannelli fotovoltaici per garantire la copertura dei carichi elettrici.

La necessità di garantire i ricambi d'aria opportuni all'interno degli ambienti nel settore residenziale è ancora attuata attraverso la ventilazione naturale e demandata ai comportamenti degli utenti, anche se le ultime tendenze di mercato si rivolgono ormai a sistemi meccanizzati. Tali sistemi sono imprescindibili nel settore terziario e determinano l'installazione di unità di trattamento aria e sistemi di VMC aggiuntivi, incidendo con aliquote rilevanti sul fabbisogno energetico dell'edificio. Diventa, quindi, indispensabile, negli edifici a carattere non residenziale, focalizzare ancor più l'attenzione su approcci di progettazione integrata del sistema edificio-impianto e sulla necessità di utilizzare sistemi di accumulo che possano garantire la minimizzazione della necessità di integrazione dalla rete. L'utilizzo dell'accumulo elettrico, infatti, può contribuire fino all'11% della copertura del fabbisogno, percentuale oltre la quale si rischierebbe di minare la sostenibilità economica della soluzione.

Inoltre, l'utilizzo prevalentemente diurno di un tipico edificio del settore terziario determina un abbattimento del problema della variabilità della produzione da fotovoltaico, più presente invece nelle abitazioni, in quanto occupate in maniera più continuativa e sicuramente al massimo di occupazione nella fascia pomeridiana notturna. Inoltre, è molto più semplice garantire la presenza di sistemi di accumulo idonei nel campo terziario sia per la maggior disponibilità di spazi al servizio delle dotazioni impiantistiche sia per una maggiore

possibilità di investimenti più consistenti a favore della costruzione di edifici spesso rappresentativi di aziende private.
Per quanto riguarda i costi si è infine visto come in entrambi i casi (residenziale e non), i costi di investimento aumentino in range compreso tra il 17 e il 36% rispetto a edifici medi di riferimento già realizzati e qualificati come nZEB secondo lo standard normativo nazionale, tranne nel caso di edifici residenziali plurifamiliari in cui il costo si avvicina a valori di mercato. L'aumento dei costi di investimento negli altri casi non è tuttavia un deterrente verso la realizzazione di edifici in direzione Zero Energy Buildings: per avere una reale stima non soltanto della fattibilità economica (ampiamente dimostrata nel corso della ricerca) ma soprattutto della convenienza economica degli stessi sono necessarie analisi ancor più dettagliate che coinvolgono i piani della gestione, manutenzione e sostenibilità ambientale dell'edificio (in termini ad esempio di riduzione delle emissioni di CO_2). A fronte di tutti questi aspetti sicuramente le valutazioni potranno dare ampio margine di scelta e riveleranno un quadro più esaustivo e completo a favore della realizzazione degli edifici *zero energy*.

In ultima analisi, gli edifici *ZEB* in campo residenziale e non residenziale sembrano già realizzabili nel panorama attuale. Tale conclusione necessita tuttavia di uno studio dettagliato dei singoli casi e dell'utilizzo imprescindibile di strumenti avanzati 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 e di utilizzo. Inoltre, è fondamentale scegliere il periodo di riferimento rispetto al quale effettuare il bilancio energetico dell'edificio. I fabbisogni mensili, infatti, risultano sicuramente più critici rispetto a quelli annuali (generalmente soddisfatti da produzione da fonti rinnovabili in ottica ZEB). In una valutazione annuale, invece, molti nZEB presenti sul nostro territorio potrebbero già essere considerati ZEB, netZEB o addirittura "positive buildings", ampliando il campo di attuazione. Ciò, quindi, determina che un edificio zero energy, in una visione ottimistica, può essere ottenuto anche a partire dal D. M. 26.06.2015 "Requisiti minimi", attualmente vigente, ma sfruttando la conoscenza sulle tematiche esposte da parte degli operatori del settore, oltre che la sensibilità dell'utenza verso comportamenti virtuosi e all'insegna del risparmio energetico.

10 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. S. Di Turi, I. Falcone, L. Ronchetti, I. Nardi, N. Calabrese, "Analisi energetica di edifici in direzione Zero Energy Buildings in Italia: studio di edifici-tipo a carattere residenziale", Ricerca di Sistema Elettrico, Report RdS/PTR2020/105, Accordo di programma MiSE- ENEA, Dicembre 2020.
3. ANCE – Associazione Nazionale Costruttori Edili, "Osservatorio congiunturale sull'industria delle costruzioni" (a cura della Direzione Affari Economici e Centro Studi), Febbraio 2021. Disponibile on line sul sito: https://www.ance.it/docs/docDownload.aspx?id=60483, consultato in data 20 Aprile 2021.
4. Istat.it, Sezione Industria e Costruzioni. Disponibile online sul sito: https://www.istat.it/it/industria-e-costruzioni?dati, consultato in data 21 Aprile 2021.
5. OMI - Osservatorio del Mercato Immobiliare, "Rapporto Immobiliare 2021. Immobili a destinazione terziaria, commerciale e produttiva", 27 Maggio 2021 (periodo di riferimento 2020). Disponibile on line sul sito: https://www.agenziaentrate.gov.it, consultato in data 17 Giugno 2021.
6. F. Margiotta, G. Puglisi, "Caratterizzazione del parco edilizio nazionale. Determinazione dell'edificio tipo per uso ufficio", Ricerca di Sistema Elettrico nell'ambito, Report RSE/2009/164, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA, Marzo 2009.
7. AA.VV., "LombardiA+.L'edilizia a consumo quasi zero in Lombardia", Edizioni Ambiente 2012. Disponibile online sul sito: https://www.cened.it
8. Headquarter 3M Italia. Disponibile on line sul sito: https://www.archilovers.com/projects/36331/headquarter-3m-italia.html
9. Perseo Expo District. Disponibile on line sul sito https://www.ordinearchitetti.mi.it/it/mappe/milanochecambia/edificio/602-perseo-expo-district/105--perseo-expo-district
10. Edificio Parallelo a Milano. Disponibile sul sito: http://www.parallelobuilding.it/
11. Headquarters a Fiorano Modenese (MO). Disponibile on line sul sito https://www.mcarchitects.it/project/iperceramica-headquarters.
12. Focchi Group Headquarters a Rimini. Disponibile on line sul sito https://www.focchi.it/it/progetti/focchi-group-headquarters-2
13. Mario Cucinella Architects, Focchi Group Headquarters a Rimini, 2003-2005. Disponibile on line sul sito https://www.architonic.com/it/project/mario-cucinella-architects-srl-focchi-headquarters/5100679
14. Headquarters a Roma. Disponibile online sul sito: https://www.ingenio-web.it/4656-headquarter-intecs-un-esempio-di-edificio-per-uffici-certificato-casaclima-in-classe-a
15. Decreto Ministeriale 26.6.2015. Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle precisazioni e dei requisiti minimi degli edifici.
16. Disponibile online sul sito: https://www.buntingarchitecturalmetals.com
17. Disponibile online sul sito: https://mapespanels.com/
18. R. Romano, "Facciate vetrate continue" in *Almanacco dell'Architetto. Da un'idea di Renzo Piano*, pp. 325-339, Proctor 2012. Disponibile sul sito https://www.researchgate.net/publication/290392187
19. Disponibile online sul sito: http://buromilan.com/project/edison-business-centre-a-sesto-san-giovanni-milano-italia/
20. Disponibile online sul sito: https://www.focchi.it/it/progetti/edison-business-center-development
21. F. Pomponi, P. A.E. Piroozfar, R. Southall, P. Ashton, E. R.P. Farr, "Energy performance of Double-Skin Façades in temperate climates: A systematic review and meta-analysis". Renewable and Sustainable Energy Reviews 54 (2016) pp. 1525–1536. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.075
22. Disponibile online sul sito: https://ioarch.it/facciate-a-doppia-pelle-i-consigli-guardian-glass/
23. R. Romano "Facciate a doppia pelle per i climi temperati". Azero 10 (2014), pp. 49-55. Disponibile sul sito https://www.researchgate.net/publication/291148160

24. G. Baldinelli, "Double skin façades for warm climate regions: Analysis of a solution with an integrated movable shading system". Building and Environment 44 (2009) pp. 1107–1118. Doi:10.1016/j.buildenv.2008.08.005
25. Headquarter a Cividale del Friuli (UD). Disponibile on line sul sito: https://www.archdaily.com/624725/faber-headquarters-geza
26. Headquarter a Cividale del Friuli (UD). Disponibile on line sul sito: https://www.architonic.com/it/project/geza-gri-e-zucchi-architettura-faber-headquarders/5102476
27. Edificio per uffici a Travagliato: Glass Architettura Urbanistica. Disponibile online sul sito: www.studioglass.it
28. M. Ibañez-Puy, M. Vidaurre-Arbizu, J. A. Sacristán-Fernández, C. Martín-Gómez, "Opaque Ventilated Façades: Thermal and energy performance review". Renewable and Sustainable Energy Reviews 79 (2017) pp. 180–191. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.059
29. C. Balocco, "A simple model study ventilated facades energy performance". Energy and Building 34 (2002) pp. 469-475. Disponibile sul sito www.elsevier.com/locate/enbuild
30. M. Ciampi, F. Leccese, G. Tuoni, "Ventilated facades energy performance in summer cooling of buildings". Sol Energy 75 (2003) pp. 491–502. http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2003.09.010.
31. Edificio ad uffici a Molfetta (BA). Disponibile online sul sito: https://www.archilovers.com/projects/121461/edificio-per-uffici.html#images
32. Disponibile online sul sito: https://protectaweb.it/green-building/nuovo-comune-di-gabicce-mare-eco-costruzione-allavanguardia/
33. 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.
34. Disponibile online sul sito: https://www.teknoring.com/news/progettazione/edilizia-scolastica-nzeb-bisceglie-muratura-armata/
35. Disponibile online sul sito: https://www.archilovers.com/projects/174272/arval-hq.html#info
36. Disponibile online sul sito: https://www.pierattelliarchitetture.com/lavoro/architettura/headquarter-arval-scandicci/
37. Disponibile online sul sito: https://www.architonic.com/it/project/pierattelli-architetture-arval-hq/20017887
38. Comitato Termotecnico Italiano (CTI), Anni tipo climatici, Disponibile online sul sito: https://try.cti2000.it, consultato in Marzo 2020.
39. F. Spinelli, E. Cogliani, 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
40. 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.
41. 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)
42. 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).
43. 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.

44. 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.
45. Norma UNI10339:1995. Impianti aeraulici a fini di benessere - Generalità, classificazione e requisiti - Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura.
46. Ministero dell'Interno, Dipartimento dei Vigili del Fuoco, del Soccorso Pubblico e della Difesa Civile. DM 22 febbraio 2006 Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, la costruzione e l'esercizio di edifici e/o locali destinati ad uffici.
47. F.E. Boafo, J.-H. Kim, J.-G. Ahn, S.-M. Kim, J.-T. Kim, Slim curtain wall spandrel integrated with vacuum insulation panel: A state-of-the-art review and future opportunities, Journal of Building Engineering Volume 42, October 2021, 102445. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102445
48. Prezzi informativi dell'edilizia: "nuove costruzioni", DEI 2020.
49. G. Zhang et al. Review on recent developments of variable refrigerant flow systems since 2015. Energy & Buildings 198 (2019), pp. 444–466. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.032.
50. G.Y. Yun, J. Choi, J.T. Kim. Energy performance of direct expansion air handling unit in office buildings. Energy and Buildings 77 (2014), pp. 425–431. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.039.
51. UNI/TS 11300-2:2019. Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali, 7 Febbraio 2019.
52. EnergyPlus, Design Builder Help v.6. Disponibile online sul sito: http://designbuilder.co.uk/helpv6.0/#Domestic_Hot_Water.htm?Highlight=domestic%20hot%20water
53. E. Fuentes, L. Arce, J. Salom. A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews 81 (2018) 1530-1547, https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.229.
54. T.A. Koiv, A. Mikola, A. Toode. DHW design flow rates and consumption profiles in educational, office buildings and shopping centres. Smart Grid and Renewable Energy, 4 (03) (2013), pp. 287-296. https://doi.org/10.4236/sgre.2013.43035.
55. UNI/TS 11300-6:2016. Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 6: Determinazione del fabbisogno di energia per ascensori, scale mobili e marciapiedi mobili, 31 marzo 2016.
56. UNI EN ISO 25745-2:2015. Prestazioni energetiche di ascensori, scale mobili e marciapiedi mobili - Parte 2: Calcolo dell'energia e classificazione degli ascensori.
57. Seddigheh Norouziasl, Amirhosein Jafari, Chao Wang, "An agent-based simulation of occupancy schedule in office buildings", Building and Environment, Volume 186, 2020, 107352, ISSN 0360-1323, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107352.
58. Kaiser Ahmed, Jarek Kurnitski, Bjarne Olesen, "Data for occupancy internal heat gain calculation in main building categories", Data in Brief, Volume 15, 2017, Pages 1030-1034, ISSN 2352-3409, https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.10.036.
59. Kaiser Ahmed, Ali Akhondzada, Jarek Kurnitski, Bjarne Olesen, Occupancy schedules for energy simulation in new prEN16798-1 and ISO/FDIS 17772-1 standards, Sustainable Cities and Society, Volume 35, 2017, Pages 134-144, ISSN 2210-6707, https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.07.010.
60. A review of domestic hot water consumption profiles for application insystems and buildings energy performance analysis e DHW Design Flow Rates and Consumption Profiles in Educational, Office Buildings and Shopping Centres.
61. Norma UNI EN 12464-1:2021. Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1: Posti di lavoro in interni.
62. UNI CEN/TR 15193-2:2017. Prestazione energetica degli edifici - Requisiti energetici per illuminazione - Parte 2: Spiegazione e giustificazione della EN 15193-1, modulo M9.
63. R. Raustad. Creating performance curves for variable refrigerant flow heat pumps in EnergyPlus. Florida Solar Energy Center (2012).
64. Engineering Reference – EnergyPlus 8.4. Disponibile in data 15/12/2021 sul sito https://bigladdersoftware.com/

65. DesignBuilder/EnergyPlus. Manuale disponibile sul sito: http://www.designbuilder.co.uk/helpv6.0.
66. ASHRAE Standard 55-2017. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Disponibile online sul sito: https://www.ashrae.org/
67. 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
68. Prezzario Impianti elettrici, DEI, 2020.
69. Prezzi informativi dell'edilizia: "Impianti Tecnologici", DEI 2021
70. 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)
71. 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”.
72. V. Corrado, I. Ballarini, G. De Luca, E. Primo, “Aggiornamento della metodologia comparativa per la determinazione dei livelli ottimali di prestazione energetica negli edifici”, Report di Ricerca di Sistema Elettrico RdS/PAR2017/141, settembre 2018. Disponibile online sul sito: https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2015-2017/edifici-nzeb/report-2017/rds-par2017-141.pdf

11 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
CAPFT	Capacity Correction Factor
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
PdC	Pompa di calore aria acqua
PLC	Controllore Logico Programmabile
PLR	Part Load Ratio
PV	Fotovoltaico
PVC	Polivinilcloruro
PVE	Parete Verticale Esterna
SCT	Solaio Controterra
SI	Solaio Interpiano
UTA	Unità di Trattamento Aria
VD	Vetro Doppio
VT	Vetro Triplo
VMC	Ventilazione Meccanica Controllata
VRF	Variable Refrigerant Flow
XPS	Polistirene Espanso Estruso
ZEB	Zero Energy Building

Simboli	Grandezze fisiche	Unità di misura
c	Calore specifico	J/kgK
f	Fattore di attenuazione	-
k_i	Capacità termica areica	kJ/m^2K
$I_{m,s}$	Irradianza media solare	W/m^2
M_s	Massa superficiale	kg/m^2
s	Spessore	m
U	Trasmittanza termica	(W/m^2K)
Y_{IE}	Trasmittanza termica periodica	(W/m^2K)
ϕ	Sfasamento	h
λ	Conducibilità Termica	W/mK
ρ	Densità	kg/m^3

12 Indice delle figure

Figura 1. Diagramma di flusso della metodologia adottata 9
Figura 2. Andamento degli investimenti per le costruzioni in termini di decremento o incremento percentuale annuo. Rielaborazione da [3] 12
Figura 3. Numero di Transazioni Normalizzate (NTN) 2019 per tipologia non residenziale e area geografica. Rielaborazione da [5] 13
Figura 4. Ripartizione dello stock delle unità immobiliari per tipologia non residenziale e area geografica. Rielaborazione da [5] 13
Figura 5. Quotazione media 2019 per tre tipologie di edifici non residenziali. Rielaborazione da [5] 14
Figura 6. Viste dell'esterno e di una delle sale interne e sezione trasversale dell'edificio, tratte da [7 e 8] .. 15
Figura 7. Viste e planimetria del complesso Perseo Expo District, tratte da [9] 16
Figura 8. Viste delle facciate e di un interno del complesso direzionale Auros, tratte da [7] 17
Figura 9. Viste e planimetria dell'edificio Parallelo a Milano, tratte da [10]. 18
Figura 10. Viste degli Headquarters a Fiorano Modenese, tratte da [11] 19
Figura 11. Viste della facciata continua adottata e concept bioclimatico tratti da [13] 20
Figura 12. Viste degli Headquarters Intecs a Roma, tratte da [14]. 21
Figura 13. Immagini illustrative di facciate continue. Fonte: sx [16], dx [17] 22
Figura 14. Immagini illustrative di facciate a doppia pelle. Fonte: [22] 22
Figura 15. Vista del complesso [19] e di uno degli edifici e dettaglio costruttivo della facciata [20] 23
Figura 16. Funzionamento di diverse tipologie di facciata a doppia pelle con e senza ventilazione meccanizzata. Fonte: [21] 25
Figura 17. Vista ed elaborati grafici tratti da [26] 26
Figura 18. Vista e sezione tratte da [27] 27
Figura 19. Vista e sezione tratte da [31] 28
Figura 20. Viste tratte da [32] 28
Figura 21. Vista dell'edificio e dettaglio costruttivo della facciata tratti da [36;37] 34
Figura 22. Piante dei differenti piani e relative distribuzioni funzionali 39
Figura 23. Prospetti dell'edificio ad uso ufficio vetrato (configurazione 1) con pensilina fotovoltaica. 40
Figura 24. Prospetti dell'edificio ad uso ufficio con tamponatura opaca (configurazione 2). 40
Figura 25. Dettaglio di un pannello del tipo "spandrel", adottato in configurazione 1-VAR. 43
Figura 26. Dettaglio di pannello con utilizzo dell'isolante Polyiso (PIR), adottato in configurazione 1-PIR.... 44
Figura 27. Schemi funzionali delle due configurazioni impiantistiche PdC (a) e VRF (b). 51
Figura 28. Schema funzionale dell'unità di trattamento aria 54
Figura 29. Rappresentazione in pianta delle superfici adibite a fotovoltaico: a) PV installa su pensilina mista con piano orizzontale e piano inclinato – Configurazione 1; b) PV installato su tetto piano - Configurazione 2. 55
Figura 30. Modello dell'edificio ad uso ufficio – Configurazione 1 (vetrata) 57
Figura 31. Modello edificio ad uso ufficio – Configurazione 2 (opaca) 57
Figura 32. Layout piano terra, piano primo e piano tipo dell'edificio ad uso ufficio implementato nel modello 58
Figura 33. Esempio di template delle attività definito per gli uffici occupati da due persone 64
Figura 34. Grafico dei profili di occupazione per le principali zone individuate. 67
Figura 35. Esempio di settaggi dei differenti parametri di occupazione per gli uffici. 67
Figura 36. Schemi funzionali delle due configurazioni impiantistiche HP-AHU (a) e VRF-AHU (b). 76
Figura 37. Caratteristiche della pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria, e dettaglio dei dati dei singoli componenti. 77
Figura 38. Coefficienti e andamento della curva della capacità in funzione delle temperature caratteristica della pompa di calore per acqua calda sanitaria - uffici 78
Figura 39. Coefficienti e andamento della curva del COP in funzione delle temperature caratteristiche della pompa di calore per acqua calda sanitaria - uffici 78

Figura 40: Caratteristiche della pompa di calore per riscaldamento, e dettaglio dati dei singoli componenti 79
Figura 41. Coefficienti e andamento della curva della capacità in riscaldamento delle pompe di calore in funzione delle temperature – edificio uffici 80
Figura 42. Coefficienti e andamento della curva di variazione del COP in funzione delle temperature – edificio uffici 80
Figura 43. Caratteristiche del refrigeratore 81
Figura 44. Coefficienti e curva della capacità in raffrescamento in funzione delle temperature caratteristica della pdc in raffrescamento – edificio uffici 81
Figura 45. Coefficienti e curva dell'EER in raffrescamento in funzione delle temperature caratteristiche della PdC in raffrescamento – edificio uffici 81
Figura 46. Caratteristiche dell'impianto a volume di refrigerante variabile 82
Figura 47. Coefficienti e andamento della curva della capacità in riscaldamento dell'impianto VRF in funzione delle temperature 83
Figura 48. Coefficienti e andamento della curva del COP in riscaldamento dell'impianto VRF in funzione delle temperature 84
Figura 49. Coefficienti e andamento della curva della capacità in raffrescamento dell'impianto VRF in funzione delle temperature 85
Figura 50. Coefficienti e andamento delle curve di variazione dell'EER in raffrescamento dell'impianto VRF in funzione delle temperature 86
Figura 51. Rappresentazione dei pannelli fotovoltaici (in blu) posti in copertura nelle due configurazioni e diagramma solare e ombreggiamento relativo ad un giorno tipico di agosto (ore 13:00, 3 Agosto, zona climatica D) 87
Figura 52. Quadro elettrico e sistemi di generazione utilizzati nell'edificio 88
Figura 53. Dati tecnici dei pannelli fotovoltaici e delle batterie di accumulo elettrico 88
Figura 54. Individuazione degli ambienti a piano terra, piano secondo e piano quarto scelti per lo studio di dettaglio 89
Figura 55. Prestazioni dei due sistemi HVAC durante la settimana invernale di progetto (configurazione 1, zona climatica D) 90
Figura 56. Rendimento orario del sistema a pompa di calore nella tipica settimana invernale (configurazione 1, zona climatica D). 91
Figura 57. Rendimento orario dei singoli sistemi VRF nella tipica settimana invernale (configurazione 1, zona climatica D). 91
Figura 58. Temperatura media dell'aria e tasso di ricambio dell'aria per gli ambienti più significativi nella tipica settimana invernale (configurazione 1-PIR, zona climatica D). 92
Figura 59. Prestazioni dei due sistemi HVAC durante la settimana estiva di progetto (configurazione 1-PIR, zona climatica D) 93
Figura 60. Rendimento orario dei singoli sistemi a pompa di calore nella tipica settimana estiva (configurazione 1-PIR, zona climatica D. 94
Figura 61. Rendimento orario dei singoli sistemi VRF in una tipica settimana estiva (configurazione 1-PIR, zona climatica D). 94
Figura 62. Temperatura media dell'aria e tasso di ricambio dell'aria per gli ambienti più significativi nella tipica settimana estiva (configurazione 1-PIR, zona climatica D). 95
Figura 63. Schema funzionale di pretrattamento e movimentazione aria dell'unità di trattamento aria 96
Figura 64. Schema funzionale del recupero termico e del ricircolo dell'unità di trattamento aria. 97
Figura 65. Stima preliminare per le stagioni di riscaldamento e raffrescamento dell'energia termica risparmiata grazie al recupero di calore nell'unità di trattamento aria (configurazione 1). 98
Figura 66. Stima preliminare per le stagioni di riscaldamento e raffrescamento dell'energia termica risparmiata grazie al recupero nell'unità di trattamento aria (configurazione 2) 98
Figura 67. Edificio ad uso ufficio in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di bilancio termico invernale (in kWh/m^2) 101

Figura 68. Edificio ad uso ufficio in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di involucro al bilancio termico (in kWh totali per la stagione di riscaldamento) 101
Figura 69. Edificio ad uso ufficio in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di bilancio termico estivo (in kWh/m^2) 102
Figura 70. Edificio ad uso ufficio in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di involucro al bilancio termico (in kWh totali per la stagione di raffrescamento) 103
Figura 71. Edificio ad uso ufficio in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di bilancio termico invernale (in kWh/m^2) 103
Figura 72. Edificio ad uso ufficio in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di involucro al bilancio termico (in kWh totali per la stagione di riscaldamento) 104
Figura 73. Edificio ad uso ufficio in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di bilancio termico estivo (in kWh/m^2) 104
Figura 74. Edificio ad uso ufficio in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di involucro al bilancio termico (in kWh totali per la stagione di raffrescamento) 105
Figura 75. Edificio ad uso ufficio in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di bilancio termico invernale (in kWh/m^2) 106
Figura 76. Edificio ad uso ufficio in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di involucro al bilancio termico (in kWh totali per la stagione di riscaldamento) 106
Figura 77. Edificio ad uso ufficio in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di bilancio termico estivo (in kWh/m^2) 107
Figura 78. Edificio ad uso ufficio in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di involucro al bilancio termico (in kWh totali per la stagione di raffrescamento) 108
Figura 79. Edificio ad uso ufficio in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di bilancio termico invernale (in kWh/m^2) 109
Figura 80. Edificio ad uso ufficio in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di involucro al bilancio termico (in kWh totali per la stagione di riscaldamento) 109
Figura 81. Edificio ad uso ufficio in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di bilancio termico estivo (in kWh/m^2) 110
Figura 82. Edificio ad uso ufficio in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di involucro al bilancio termico (in kWh totali per la stagione di raffrescamento) 110
Figura 83. Edificio ad uso ufficio in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di bilancio termico invernale (in kWh/m^2) 111
Figura 84. Edificio ad uso ufficio in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di involucro al bilancio termico (in kWh totali per la stagione di riscaldamento) 112
Figura 85. Edificio ad uso ufficio in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di bilancio termico estivo (in kWh/m^2) 112
Figura 86. Edificio ad uso ufficio in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, contributi di involucro al bilancio termico (in kWh totali per la stagione di raffrescamento) 113
Figura 87. Edificio ad uso ufficio in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, fabbisogni termici invernale ed estivo (in kWh/m^2) 114

Figura 88. Edificio ad uso ufficio in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, fabbisogni termici invernale ed estivo (in kWh/m^2) 114
Figura 89. Edificio ad uso ufficio in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, fabbisogni termici invernale ed estivo (in kWh/m^2) 115
Figura 90. Edificio ad uso ufficio in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, fabbisogni termici invernale ed estivo (in kWh/m^2) 115
Figura 91. Edificio ad uso ufficio in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1-Var e PIR- e configurazione 2, fabbisogni termici invernale ed estivo (in kWh/m^2) 116
Figura 92. Edificio ad uso ufficio - Fabbisogni termici invernale ed estivo nelle due configurazioni di involucro in tutte le zone climatiche. 116
Figura 93. Confronto su base oraria tra apporti solari e dispersioni di involucro in zona B e zona E nelle settimane estive di riferimento per la configurazione 1-PIR 117
Figura 94. Andamento medio giornaliero del COP in riscaldamento, zona climatica A-B 119
Figura 95. Andamento medio giornaliero del COP in riscaldamento, zona climatica C 119
Figura 96. Andamento medio giornaliero del COP in riscaldamento, zona climatica D 120
Figura 97. Andamento medio giornaliero del COP in riscaldamento, zona climatica E 120
Figura 98. Andamento medio giornaliero del COP in riscaldamento, zona climatica F 121
Figura 99. Grafico riassuntivo dei coefficienti di prestazione stagionali per il riscaldamento degli impianti HVAC, divisi per configurazione di involucro e zona climatica 121
Figura 100. Zona A-B - Confronto tra configurazione 1 e 2, fabbisogni termici ed elettrici (riscaldamento) 122
Figura 101. Zona C - Confronto tra configurazione 1 e 2, fabbisogni termici ed elettrici (riscaldamento) ... 123
Figura 102. Zona D - Confronto tra configurazione 1 e 2, fabbisogni termici ed elettrici (riscaldamento) .. 123
Figura 103. Zona E - Confronto tra configurazione 1 e 2, fabbisogni termici ed elettrici (riscaldamento) ... 124
Figura 104. Zona F - Confronto tra configurazione 1 e 2, fabbisogni termici ed elettrici (riscaldamento) ... 124
Figura 105. Andamento dell'EER in raffrescamento, zona climatica AB 127
Figura 106. Andamento dell'EER in raffrescamento, zona climatica C 128
Figura 107. Andamento dell'EER in raffrescamento, zona climatica D 128
Figura 108. Andamento dell'EER in raffrescamento, zona climatica E 129
Figura 109. Andamento dell'EER in raffrescamento, zona climatica F 129
Figura 110. Panoramica degli EER stagionali degli impianti HVAC, divisi per configurazione di involucro e zona climatica 130
Figura 111. Zona A-B - Confronto tra configurazione 1 e 2, fabbisogni termici ed elettrici (raffrescamento) 131
Figura 112. Zona C - Confronto tra configurazione 1 e 2, fabbisogni termici ed elettrici (raffrescamento). 131
Figura 113. Zona D - Confronto tra configurazione 1 e 2, fabbisogni termici ed elettrici (raffrescamento). 132
Figura 114. Zona E - Confronto tra configurazione 1 e 2, fabbisogni termici ed elettrici (raffrescamento) . 132
Figura 115. Zona F - Confronto tra configurazione 1 e 2, fabbisogni termici ed elettrici (raffrescamento) . 133
Figura 116. Edificio uffici in zona climatica A-B – Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2 del fabbisogno di energia elettrica mensile per la ventilazione meccanica controllata 136
Figura 117. Edificio uffici in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2 del fabbisogno di energia elettrica mensile per la ventilazione meccanica controllata 136
Figura 118. Edificio uffici in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2 del fabbisogno di energia elettrica mensile per la ventilazione meccanica controllata 137
Figura 119. Edificio uffici in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2 del fabbisogno di energia elettrica mensile per la ventilazione meccanica controllata 137
Figura 120. Edificio uffici in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2 del fabbisogno di energia elettrica mensile per la ventilazione meccanica controllata 138
Figura 121. Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2 del fabbisogno di energia elettrica annuale per la ventilazione meccanica controllata 138
Figura 122. Stima dell'energia termica risparmiata grazie al recupero nell'unità di trattamento aria (configurazione 1) 140

Figura 123. Stima definitiva dell'energia termica risparmiata grazie al recupero nell'unità di trattamento aria (configurazione 2) 141
Figura 124. Andamento del COP giornaliero (a) e bilancio mensile (b) della pompa di calore per la produzione di ACS 142
Figura 125. Edificio uffici in zona climatica A-B – Composizione del fabbisogno elettrico mensile per le due configurazioni 143
Figura 126. Edificio uffici in zona climatica C - Composizione del fabbisogno elettrico mensile per le due configurazioni 144
Figura 127. Edificio uffici in zona climatica D - Composizione del fabbisogno elettrico mensile per le due configurazioni 145
Figura 128. Edificio uffici in zona climatica E - Composizione del fabbisogno elettrico mensile per le due configurazioni 146
Figura 129. Edificio uffici in zona climatica F - Composizione del fabbisogno elettrico mensile per le due configurazioni 147
Figura 130. Composizione percentuale del fabbisogno di energia elettrica nelle differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche per la configurazione 1 148
Figura 131. Composizione percentuale del fabbisogno di energia elettrica nelle differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche per la configurazione 2 149
Figura 132. Edificio uffici in zona climatica A-B - Confronto del bilancio elettrico mensile tra configurazione 1 e configurazione 2 151
Figura 133. Edificio uffici in zona climatica C - Confronto del bilancio elettrico mensile tra configurazione 1 e configurazione 2 152
Figura 134. Edificio uffici in zona climatica D - Confronto del bilancio elettrico mensile tra configurazione 1 e configurazione 2. 153
Figura 135. Edificio uffici in zona climatica E - Confronto del bilancio elettrico mensile tra configurazione 1 e configurazione 2 154
Figura 136. Edificio uffici in zona climatica F - Confronto del bilancio elettrico mensile tra configurazione 1 e configurazione 2 155
Figura 137. Energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico delle due configurazioni nelle diverse zone climatiche 155
Figura 138. Energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico della configurazione 1 e direttamente autoconsumata nelle diverse zone climatiche e per tipo di impianto HVAC 156
Figura 139. Energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico della configurazione 2 e direttamente autoconsumata nelle diverse zone climatiche e per tipo di impianto HVAC 156
Figura 140. Edificio uffici in zona climatica A-B - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, grafico riepilogativo dei fabbisogni elettrici e produzione da fonte rinnovabile 160
Figura 141. Edificio uffici in zona climatica C - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, grafico riepilogativo dei fabbisogni elettrici e produzione da fonte rinnovabile 161
Figura 142. Edificio uffici in zona climatica D - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, grafico riepilogativo dei fabbisogni elettrici e produzione da fonte rinnovabile 162
Figura 143. Edificio uffici in zona climatica E - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, grafico riepilogativo dei fabbisogni elettrici e produzione da fonte rinnovabile 163
Figura 144. Edificio uffici in zona climatica F - Confronto tra configurazione 1 e configurazione 2, grafico riepilogativo dei fabbisogni elettrici e produzione da fonte rinnovabile 164
Figura 145. Bilancio elettrico annuale per tipo di impianto HVAC e zona climatica, per la configurazione 1 166
Figura 146. Bilancio elettrico annuale per tipo di impianto HVAC e zona climatica, per la configurazione 2 166
Figura 147. Importi unitari dei quattro modelli di edificio 176
Figura 148. Confronto tra i costi unitari dei casi studio ZEB e i modelli di costo nZEB 177
Figura 149. Confronto tra i costi dei modelli studiati e quelli degli edifici già realizzati di Tabella 73 178

13 Indice delle tabelle

Tabella 1. Caratteristiche geometriche degli edifici ad ufficio realizzati dal 1992 al 2009 [6] 14
Tabella 2. Dati relativi agli edifici ad uso terziario nZEB di nuova costruzione di casi studio selezionati: parametri geometrici e descrizione dell'involucro con le relative trasmittanze. 30
Tabella 3. Dati relativi agli edifici nZEB di nuova costruzione di casi studio selezionati: descrizione dei sistemi impiantistici con i relativi parametri e ulteriori informazioni. 32
Tabella 4. Località utilizzate per le simulazioni nelle differenti zone climatiche 35
Tabella 5. Trasmittanza termica delle strutture nell'edificio di riferimento [15] 36
Tabella 6. Trasmittanza termica periodica delle strutture nell'edificio di riferimento [15] 36
Tabella 7. Ore giornaliere di riscaldamento ipotizzate per zona climatica e relativo periodo di accensione 37
Tabella 8. Caratteristiche dimensionali dell'edificio ad uso ufficio 41
Tabella 9. Caratteristiche e distribuzione degli ambienti con differenti destinazioni d'uso e suddivisi per piano 41
Tabella 10. Componenti di involucro per il modello di edificio tipo ad uso ufficio – Configurazione 1. Gli spessori variano a seconda della zona climatica analizzata. 45
Tabella 11. Spessori di isolante per ciascuna zona climatica, per l'edificio ad uso ufficio – Configurazione 1. 45
Tabella 12. Tabella riassuntiva delle caratteristiche termo-fisiche, dei componenti di involucro per l'edificio tipo ad uso ufficio - Configurazione 1 46
Tabella 13. Tabella riassuntiva delle caratteristiche delle superfici vetrate nelle due configurazioni analizzate, per ciascuna zona climatica per l'edificio tipo ad uso ufficio - Configurazione 1 48
Tabella 14. Componenti di involucro per il modello di edificio tipo ad uso ufficio. Gli spessori variano a seconda della zona climatica analizzata. 49
Tabella 15. Spessori di isolante per ciascuna zona climatica, per l'edificio ad uso ufficio – Configurazione 2. 49
Tabella 16. Tabella riassuntiva delle caratteristiche termo-fisiche dei componenti di involucro per la configurazione 2 49
Tabella 17. Tabella riassuntiva delle caratteristiche degli infissi nella configurazione analizzata, per ciascuna zona climatica per l'edificio tipo ad uso ufficio - Configurazione 2 51
Tabella 18. Schematizzazione delle due soluzioni impiantistiche per il modello di edificio uffici 52
Tabella 19. Caratteristiche del sistema di tipo pompa di calore 52
Tabella 20. Caratteristiche del sistema di tipo VRF 53
Tabella 21. Dati tecnici della pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria 54
Tabella 22. Caratteristiche dei pannelli fotovoltaici 55
Tabella 23. Caratteristiche dell'accumulo elettrico 55
Tabella 24. Esempio di definizione delle caratteristiche termo-fisiche dei materiali (nel caso specifico dettaglio del materiale polyiso – configurazione 1) 59
Tabella 25. Esempio di definizione delle caratteristiche termo-fisiche dei materiali (nel caso specifico dettaglio del materiale isolante in lana di roccia – configurazione 2) 59
Tabella 26. Esempio di definizione di un elemento di involucro (nel caso specifico dettaglio della facciata continua con isolante PIR – configurazione 1) 60
Tabella 27. 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) 61
Tabella 28. 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 62
Tabella 29. Script dei profili di Occupazione impostati per le principali zone individuate 66
Tabella 30. Esempio di settaggi per l'Acqua Calda Sanitaria 68
Tabella 31. Esempio di settaggi per il Controllo Ambientale: Riscaldamento (zona climatica D) 69

Tabella 32. Periodo di accensione del sistema di riscaldamento fissato da normativa, ore giornaliere di riscaldamento ipotizzate per ciascuna zona climatica e orari di accensione 70
Tabella 33. Profili di riscaldamento adottati per una giornata lavorativa tipo, a seconda delle zone climatiche 70
Tabella 34. Script dei Profili di riscaldamento adottati a seconda delle zone climatiche 71
Tabella 35. Esempio di settaggi per il Controllo Ambientale: Raffrescamento 72
Tabella 36. Scelta delle portate d'aria esterna in base a destinazione d'uso degli ambienti, superficie utile, numero di occupanti e indici di affollamento. 73
Tabella 37. Esempio di settaggi per il Controllo Ambientale: Ventilazione meccanica – schedule compatto (ambiente ufficio) 74
Tabella 38. Livelli di illuminamento e densità di potenza per ambiente 74
Tabella 39. Esempio di settaggi per l'Illuminazione artificiale – schedule compatto (ambiente ufficio) 75
Tabella 40. Pannelli fotovoltaici installati nelle due configurazioni 87
Tabella 41. Energia termica mensile e annuale fornita per il riscaldamento nelle differenti configurazioni di impianto e zone climatiche nella configurazione 1 125
Tabella 42. Energia termica mensile e annuale fornita per il riscaldamento nelle differenti configurazioni di impianto e zone climatiche nella configurazione 2 125
Tabella 43. Energia elettrica mensile e annuale assorbita per il riscaldamento nelle differenti configurazioni di impianto e zone climatiche nella configurazione 1 126
Tabella 44. Energia elettrica mensile e annuale assorbita per il riscaldamento nelle differenti configurazioni di impianto e zone climatiche nella configurazione 2 126
Tabella 45. Energia termica mensile e annuale fornita per il raffrescamento nelle differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche nella configurazione 1 133
Tabella 46. Energia termica mensile e annuale fornita per il raffrescamento nelle differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche nella configurazione 2 134
Tabella 47. Energia elettrica mensile e annuale fornita per il raffrescamento nelle differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche nella configurazione 1 134
Tabella 48. Energia elettrica mensile e annuale assorbita per il raffrescamento nelle differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche nella configurazione 2 135
Tabella 49. Energia elettrica mensile e annuale fornita per la ventilazione meccanica controllata nelle differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche nella configurazione 1 139
Tabella 50. Energia elettrica mensile e annuale assorbita per la ventilazione meccanica controllata nelle differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche nella configurazione 2 139
Tabella 51. Valore percentuale dell'energia termica risparmiata grazie al recupero nell'unità di trattamento aria (configurazione 1) 140
Tabella 52. Valore percentuale dell'energia termica risparmiata grazie al recupero nell'unità di trattamento aria (configurazione 2) 141
Tabella 53. Composizione percentuale del fabbisogno di energia elettrica nelle differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche per la configurazione 1 148
Tabella 54. Composizione percentuale del fabbisogno di energia elettrica nelle differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche per la configurazione 2 149
Tabella 55. Energia elettrica mensile e annuale prodotta dal solare fotovoltaico nelle differenti configurazioni e zone climatiche 157
Tabella 56. Energia elettrica mensile e annuale prodotta dal solare fotovoltaico della configurazione 1 e direttamente autoconsumata per le differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche 157
Tabella 57. Energia elettrica mensile e annuale prodotta dal solare fotovoltaico della configurazione 2 e direttamente autoconsumata per le differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche 158
Tabella 58. Copertura percentuale del fabbisogno mensile da parte del solare fotovoltaico nella configurazione 1, per le differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche 158
Tabella 59. Copertura percentuale del fabbisogno mensile da parte del solare fotovoltaico nella configurazione 2, per le differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche 159

Tabella 60. Copertura percentuale del fabbisogno di energia elettrica nelle differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche per la configurazione 1 165
Tabella 61. Copertura percentuale del fabbisogno di energia elettrica nelle differenti configurazioni impiantistiche e zone climatiche per la configurazione 2 165
Tabella 62. Legenda dei materiali utilizzati 168
Tabella 63. Stralcio di computo di componente: Facciata ventilata con isolamento in EPS con grafite in zona climatica D 169
Tabella 64. Costi unitari dei solai di copertura 170
Tabella 65. Costi unitari delle pareti esterne 170
Tabella 66. Costo unitario di fondazione e solaio a basamento 171
Tabella 67. Costi unitari degli infissi 171
Tabella 68. Ripartizione dei costi di involucro per categorie di lavoro per i quattro modelli 172
Tabella 69. Ripartizione dei costi impiantistici per categorie 174
Tabella 70. Costi della sicurezza 175
Tabella 71. Calcolo degli oneri di progettazione 175
Tabella 72. Riepilogo dei costi dei quattro modelli di edificio 175
Tabella 73. Raccolta dei costi di costruzione di edifici nZEB realizzati 176
Tabella 74. Riepilogo dei costi dei 2 modelli di costo 177