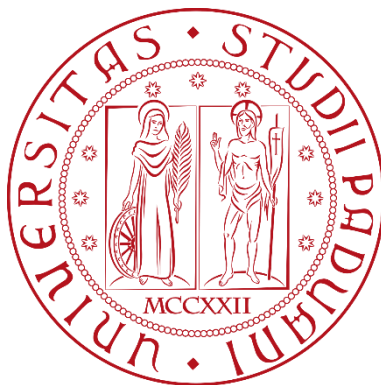




UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale - DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

MODELLO BIM DEL COMPLESSO DI VIA BEATO PELLEGRINO: ANALISI ENERGETICA PRELIMINARE MEDIANTE SIMULAZIONE DINAMICA

Relatore:

Prof. Michele De Carli

Correlatrice:

Monika Pendaroska

Laureando:

Alex Gallo

N° matricola:

2108806

A.A. 2025/2026

INDICE

Sommario.....	1
1. Le simulazioni energetiche integrate: BIM-BEM	3
1.1 Il contesto energetico	3
1.2 BIM (Building Information Modeling)	3
1.3 BEM (Building Energy Modeling)	4
1.4 Interoperabilità.....	5
1.5 Obiettivi della tesi	6
2. Caso studio: il complesso Beato Pellegrino.....	9
2.1 Informazioni generali.....	9
2.2 Clima	14
2.3 Impianti meccanici.....	15
2.4 Caratteristiche	18
3. Metodologia di modellazione	37
3.1 Modellazione in Revit.....	37
3.2 Processo di esportazione e importazione.....	44
3.3 Modellazione in OpenStudio.....	47
4. Analisi e risultati: Revit.....	53
4.1 Simulazione 1: modello con tende esterne abbassate	53
4.2 Simulazione 2: modello con tende esterne alzate	58
5. Analisi e risultati: OpenStudio	63
5.1 Simulazione 3: modello con tende esterne abbassate	63
5.2 Simulazione 4: modello con tende esterne alzate	68
5.3 Simulazione 5: modello con tende esterne abbassate e attenuazione temperatura	72
5.4 Simulazione 6: modello con tende esterne alzate e attenuazione temperatura	76
5.5 Simulazione 7: modello con tende esterne abbassate e recuperatore di calore	80
5.6 Simulazione 8: modello con tende esterne abbassate, recuperatore di calore e attenuazione temperatura	84
6. Confronto e discussione dei risultati	89
6.1 Interoperabilità BIM-BEM	89
6.2 Indici di prestazione energetica globale	97
6.3 Fabbisogni energetici e carichi di picco	99
6.4 Impatto schermature solari (tende esterne).....	103
6.5 Impatto attenuazione temperatura	105
6.6 Impatto recuperatore di calore	106
6.7 Confronto tra zone: Revit vs OpenStudio	109
7. Conclusioni	125
Appendice.....	129
Bibliografia.....	157

Sommario

La seguente tesi magistrale si concentra sulla modellazione e sull'analisi energetica preliminare del complesso "Beato Pellegrino" dell'Università degli Studi di Padova. L'obiettivo principale è la realizzazione dei modelli BIM (Building Information Modeling) per i 15 edifici del polo universitario, seguita da simulazioni energetiche dinamiche, con un confronto dei dati ottenuti utilizzando Autodesk Revit e OpenStudio. Particolare attenzione è riservata all'interoperabilità del flusso di lavoro BIM-to-BEM, elemento cruciale per migliorare la precisione del modello energetico sviluppato in OpenStudio.

Guardando al futuro, il progetto pone le basi per la creazione di un Digital Twin del complesso, grazie all'integrazione con i dati reali raccolti dal Building Management System di Siemens, sarà possibile calibrare il modello per ottimizzare la gestione degli impianti e migliorare le prestazioni energetiche complessive dell'intero complesso.

Nello specifico ogni capitolo tratta degli aspetti specifici:

- Capitolo 1: sono descritti il contesto energetico attuale e come ci siano dei cambiamenti nel mondo dell'edilizia e della progettazione termotecnica, nonché delle nuove tecnologie e soluzioni presenti. Vengono introdotti i concetti di BIM e BEM, i relativi vantaggi ma anche i problemi che ne derivano, ad esempio l'interoperabilità tra i due tipi di modello. L'interoperabilità è una criticità da tenere in considerazione durante le simulazioni essendo un punto cruciale in questo settore, oggetto di molti studi di ricerca scientifica. Il capitolo si conclude delineando gli obiettivi e le finalità del presente lavoro di tesi.
- Capitolo 0: viene introdotto il caso studio specifico, specificandone le informazioni generali dell'intero complesso e dei singoli edifici. Gli aspetti importanti da considerare riguardano le informazioni del clima e degli impianti meccanici realmente installati, più nello specifico per la centrale termofrigorifera generale con le pompe di calore Rhoss (THHEBY 4180 LT e THAETY 4460 P2). Successivamente sono definite le caratteristiche e proprietà delle pareti, coperture, superfici vetrate e tende esterne per ogni singolo edificio del complesso.
- Capitolo 3: vengono illustrate le metodologie di modellazione in ambiente BIM Revit per costruire il modello 3D. Oltre a questo sono spiegate le impostazioni energetiche utilizzate, i processi di simulazione con modello BEM proprietario di Revit, nonché il processo di esportazione e importazione in ambiente puramente BEM di OpenStudio nel quale sono state eseguite delle verifiche preliminare di convalidazione del modello e poi impostati tutti i parametri di simulazione disponibili nel programma (dai file meteo, all'ora legale, ai profili di funzionamento per i termostati, occupazione delle persone, carichi interni dell'illuminazione e delle apparecchiature interne).
- Capitolo 4: si descrivono i risultati ottenuti in ambiente Revit e le relative considerazioni che si possono trarre da queste prime due simulazioni.
- Capitolo 5: si illustrano i risultati riguardanti le successive simulazioni eseguite in OpenStudio, mettendo in risalto anche le strategie di miglioramento adottate in progressione nelle simulazioni.
- Capitolo 6: rappresenta il fulcro della tesi in cui vengono confrontati i risultati delle simulazioni termodinamiche. L'analisi affronta molteplici aspetti come le problematiche di interoperabilità tra Revit e OpenStudio, la valutazione dell'indice di prestazione energetica in due scenari specifici e l'analisi dei fabbisogni energetici mensili e i picchi di carico, nonché un confronto diretto dei risultati ottenuti per le singole zone del complesso tra due simulazioni.
- Capitolo 7: raccoglie le considerazioni conclusive del lavoro di tesi. Oltre a fornire una sintesi dei risultati ottenuti in merito all'interoperabilità BIM-BEM e all'affidabilità dei software per le simulazioni energetiche, vengono definite le prospettive possibili del progetto. In particolare vengono proposti gli sviluppi futuri della ricerca, focalizzati sull'evoluzione dell'attuale modello BIM in un Digital. Quest'ultimo verrà interfacciato direttamente con il Building Management System (BMS) del complesso, ovvero il sistema centralizzato di supervisione e gestione degli impianti. Tale sinergia permetterà di acquisire i dati di monitoraggio in tempo reale e di ottimizzare le logiche di funzionamento del sistema HVAC installato nel complesso Beato Pellegrino.

Il processo adottato durante l'intero lavoro di tesi e i relativi risultati ottenuti hanno trovato un immediato e diretto riscontro nel panorama accademico, infatti la ricerca è stata selezionata per essere presentata alla conferenza internazionale "7th Building Simulation Applications Conference (BSA 2026)" organizzata da IBPSA-Italy (International Building Performance Simulation Association) e dalla Libera Università di Bolzano. Questo traguardo testimonia l'interesse del settore e l'attualità delle tematiche affrontate, specialmente riguardo all'interoperabilità tra i modelli BIM e BEM, confermando l'importanza di sviluppare soluzioni affidabili per la simulazione e la progettazione in ambito energetico.

1. Le simulazioni energetiche integrate: BIM-BEM

1.1 Il contesto energetico

Il settore delle costruzioni è uno dei principali pilastri delle strategie globali ed europee per promuovere la sostenibilità ambientale. Attualmente gli edifici sono responsabili di circa il 40% del consumo energetico finale e del 36% delle emissioni di gas serra nell'Unione Europea. In questo contesto la decarbonizzazione del patrimonio edilizio esistente non è più solo un'opzione, ma una necessità per raggiungere gli obiettivi climatici stabiliti dal Green Deal europeo. Si punta a ridurre le emissioni nette di gas serra di almeno il 55% entro il 2030, rispetto ai livelli del 1990 e a raggiungere la neutralità climatica entro il 2050. Per affrontare questa sfida, la Commissione Europea ha introdotto la strategia "Renovation Wave" che mira a raddoppiare i tassi di ristrutturazione energetica nel prossimo decennio. L'obiettivo è riqualificare oltre 35 milioni di edifici e creare fino a 160 mila nuovi posti di lavoro nel settore delle costruzioni. Tuttavia, per riuscirci, è necessario superare ostacoli significativi, come la frammentazione della filiera e in particolare il basso livello di digitalizzazione. Questo è un aspetto critico, considerando anche che il settore edile è tra i meno digitalizzati in Europa.

1.1.1 Transizione verso l'edilizia 4.0 e il Digital Twin

In questo scenario i limiti della progettazione termotecnica tradizionale diventano chiari. La complessità degli interventi di riqualificazione profonda richiede un cambiamento radicale, rivolto all'uso di strumenti digitali più moderni. L'integrazione tra il Building Information Modeling (BIM) e il Building Energy Modeling (BEM) si presenta come una soluzione fondamentale per affrontare la differenza di prestazioni energetiche previste in fase di progettazione e quelle realmente ottenute nella fase operativa. Adottare processi di lavoro interoperabili BIM-BEM non solo migliora la precisione delle previsioni, ma rappresenta anche un passo importante verso la creazione del Digital Twin dell'edificio. Come mostrano i risultati del progetto europeo DigiBUILD, utilizzare servizi basati sui dati e una modellazione avanzata permette di rendere gli edifici parte attiva nella rete energetica. Questo approccio aiuta a ottimizzare non solo l'involucro edilizio, ma anche l'intero ciclo di vita dell'edificio attraverso una gestione predittiva, intelligente e integrata.

Perciò è fondamentale per l'ingegnere meccanico ed energetico odierno acquisire competenze nell'uso di queste tecnologie. Ciò garantisce che gli interventi volti a migliorare l'efficienza energetica siano effettivamente sostenibili anche dal punto di vista operativo. Inoltre si riducono errori e tempi legati alla modellazione grazie alla completa interoperabilità dei software utilizzati.

1.2 BIM (Building Information Modeling)

Nel contesto dell'ingegneria moderna la modellazione 3D attraverso il BIM (Building Information Modeling) sta superando la tradizionale progettazione CAD in 2D. Si presenta come un database strutturato di informazioni fisiche e funzionali. Secondo il National Institute of Building Sciences, il BIM non è una semplice rappresentazione tridimensionale geometrica; bensì è una rappresentazione digitale delle caratteristiche fisiche e funzionali di un oggetto. Nell'ambito dell'ingegneria meccanica il modello BIM non è solo un contenitore spaziale, ma un insieme di volumi di controllo definiti con proprietà termofisiche precise (conducibilità λ , densità ρ , calore specifico c_p). Questi volumi sono chiamati vani analitici, zone o spaces.

Ogni elemento architettonico, ad esempio sia l'involucro opaco che quello trasparente, diventa un parametro attivo nel bilancio energetico dell'edificio, questi parametri sono essenziali per calcolare i carichi termici di riscaldamento e raffrescamento e per comprendere il comportamento dell'intero sistema edificio-impianto.



figura 1.1: schema generico del BIM

1.3 BEM (Building Energy Modeling)

L'applicazione dei dati contenuti nel BIM all'analisi energetica-termofisica definisce il BEM (Building Energy Modeling). Le normative di certificazione energetica standard, in particolare la UNI TS 11300 in Italia e la UNI EN ISO 13790 – (ora nella UNI EN ISO 52016) si basano su calcoli in regime stazionario o semi-stazionario con bilanci mensili essendo molto più semplici da eseguire, invece il BEM permette la simulazione in regime dinamico a base oraria.

Tramite motori di calcolo specifici come EnergyPlus è possibile sottoporre l'edificio a variabili climatiche su base oraria (con i file climatici EPW), questo approccio permette di superare i limiti della UNI TS 11300 permettendo di:

- Analizzare il comportamento del carico termico inerziale dell'involucro e gli sfasamenti termici, i quali non sono possibili da valutare correttamente con il metodo stazionario.
- Valutare i profili di consumo energetico e i picchi di potenza per il dimensionamento degli impianti meccanici.
- Soddisfare i parametri ambientali interni per l'ambiente termico, la qualità dell'aria interna, l'illuminazione, l'acustica e specifica come stabilire questi parametri per la progettazione del sistema dell'edificio e i calcoli delle prestazioni energetiche (UNI EN 16798-1). In sostanza verificare le condizioni di comfort termico in condizioni operative critiche tramite l'utilizzo del PMV (Predicted Mean Vote) e del PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) (figura 1.2).
 - o PMV: fornisce la sensazione termica media di un ampio gruppo di persone su una scala a 7 punti da -3 a +3 e il PMV=0 corrisponde alla neutralità termica. Secondo la norma UNI EN ISO 7730, gli ambienti confortevoli sono quelli con un PMV compreso tra -0,5 e +0,5.
 - o PPD: è la percentuale di persone che potrebbero provare insoddisfazione termica, anche in condizioni di neutralità termica (PMV=0) è previsto un PPD=5%. È impossibile creare un ambiente che soddisfi tutti i presenti ed esistono 3 categorie: A, B, C.

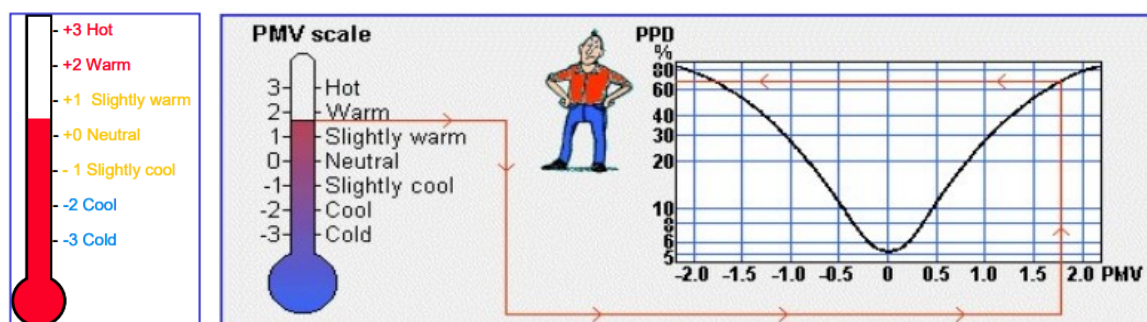


figura 1.2: a) PMV b) MV e PPD

1.4 Interoperabilità

L'interoperabilità tra il software di modellazione BIM e il software di simulazione BEM è fondamentale per migliorare il processo progettuale. L'obiettivo è trasferire il modello e tutte le sue informazioni direttamente nell'ambiente di simulazione, questo elimina la necessità di ricostruire la geometria, riducendo notevolmente i tempi di modellazione e il rischio di differenze geometriche tra i due modelli nei due software.

Un flusso di lavoro integrato offre importanti vantaggi nella progettazione degli impianti MEP (Meccanici, Elettrici, Idraulici):

- Riduzione degli errori: l'esportazione diretta del modello e dei suoi dati riduce le ambiguità tipiche di una modellazione manuale, garantendo la coerenza tra il progetto architettonico e il modello di calcolo termico (ad esempio si può riaggiornare il modello importato nel software BEM con un modello modificato nel software BIM così da non dover reimpostare i parametri di simulazione nell'ambiente di simulazione).
- Ottimizzazione impiantistica: nella fase preliminare permette di confrontare diversi scenari energetici, perfezionando il dimensionamento degli impianti HVAC basandosi sui carichi dinamici reali, piuttosto che su stime cautelative di picco.
- Analisi del ciclo di vita: permette di prevedere i costi operativi e di manutenzione futura, migliorando così l'efficienza edificio-impianti e i costi ad essi collegati.

1.4.1 Criticità da BIM a BEM

1.4.1.1 Il flusso di lavoro e l'utilizzo dello standard gbXML

L'integrazione tra il Building Information Modeling (BIM) e il Building Energy Modeling (BEM) è una delle sfide più importanti per la progettazione sostenibile. Anche se l'obiettivo ideale è un trasferimento dati fluido e senza perdita di informazioni, la realtà dimostra che l'interoperabilità tra software come Autodesk Revit e motori di simulazione come OpenStudio o EnergyPlus è complessa. Il processo di esportazione più comune è quello tramite lo standard gbXML (Green Building XML), ma i problemi geometrici non sono assenti e quindi diventa necessario applicare delle strategie correttive.

Il primo passo fondamentale, spesso trascurato, avviene prima dell'esportazione. Come indicato nel report del progetto BIM-SPEED [6], un modello architettonico dettagliato non è adatto per l'analisi energetica. È necessario definire in Revit gli elementi "Space" (Vani) o "Rooms" (Locali). Questi volumi virtuali e astratti sono essenziali perché il file gbXML non trasporta la geometria fisica dei muri, ma solo le superfici che delimitano le aree termiche. Senza una corretta definizione degli spazi, il motore BEM non può capire i volumi d'aria da climatizzare.

Durante l'esportazione da Revit a gbXML si verificano la maggior parte degli errori critici. Secondo lo studio di Yang (2022) [3], l'algoritmo di esportazione originale produce spesso quella che viene chiamata "dirty geometry", cioè geometria sporca. Questo include superfici non perfettamente chiuse, sovrapposizioni e orientamenti errati. I software di simulazione come EnergyPlus richiedono modelli "watertight". Anche una fessura millimetrica tra due superfici può causare il fallimento del calcolo dei volumi. Yang suggerisce che, anziché riparare manualmente questi errori, sia più efficiente usare un approccio di "ricostruzione", in cui un algoritmo estrae solo i vertici essenziali dal BIM per rigenerare superfici analitiche pulite prima di importarle in OpenStudio.

Oltre ai problemi geometrici, la trasmissione delle informazioni non geometriche rappresenta un ostacolo significativo. La revisione di Ciccozzi (2023) [7] e i risultati di Průša (2025) [1] confermano che, sebbene il formato gbXML sia progettato per trasmettere dati termici, gran parte di queste informazioni viene persa o danneggiata durante il trasferimento. In particolare, parametri come la densità dei materiali, la capacità termica e le schedulazioni operative (orari di occupazione, accensione luci e impianti) raramente sopravvivono al passaggio da Revit a OpenStudio. Per questo motivo, il flusso di lavoro standard richiede quasi sempre una ridefinizione di questi parametri direttamente nell'ambiente BEM (OpenStudio) dopo l'importazione della geometria.

Per affrontare questi problemi, la letteratura suggerisce di abbandonare il metodo di "Direct Export" in favore di un flusso mediato da software "Middleware". Strumenti di terze parti o plugin (come l'OpenStudio SketchUp Plug-in o visualizzatori gbXML basati sul web) consentono di validare e correggere il file XML intermedio. Antunes (2024) [2] mostra come questo passaggio di validazione sia cruciale nelle prime fasi di progettazione per prevenire la propagazione di errori geometrici che renderebbero inaffidabili le analisi di impatto ambientale. L'uso di middleware permette al progettista di visualizzare le superfici problematiche e di assegnare correttamente le condizioni al contorno, come distinguere un muro esterno da uno interrato che Revit potrebbe aver classificato erroneamente.

L'esportazione da Revit a OpenStudio tramite gbXML non è ancora un processo facile e immediato. Richiede una preparazione attenta del modello BIM, l'uso di strumenti per correggere la geometria e una fase manuale per arricchire i dati nel software di destinazione. Solo accettando questo flusso di lavoro iterativo e supervisionato si possono ottenere simulazioni energetiche affidabili a partire da modelli digitali architettonici. [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8]

1.4.1.2 Studio di Průša et al. (2025) [1]

In particolare lo studio recente condotto da Průša et al. (2025) [1] ha identificato tre principali criticità nel passaggio dei dati tramite gbXML, che riflettono sfide operative comuni:

- Incongruenze geometriche: il formato gbXML presenta difficoltà nel gestire geometrie complesse, portando frequentemente a errori nella definizione delle zone termiche, come superfici mancanti o interpretate erroneamente, questo rende necessarie correzioni manuali nei software BEM.
- Perdita di dati termofisici: le informazioni relative alle stratigrafie e alle proprietà termiche dei materiali non vengono sempre trasferite in modo corretto o tendono a essere semplificate in maniera eccessiva durante l'export, obbligando i progettisti a ridefinire parametri essenziali nei motori di calcolo.
- Semplificazione delle condizioni al contorno: elementi come i carichi termici, gli ombreggiamenti complessi o le relazioni di adiacenza (ad esempio con il terreno o edifici limitrofi) spesso risultano eccessivamente schematizzati durante l'esportazione attraverso il formato gbXML.

Nonostante le difficoltà legate all'interoperabilità, lo studio ha convalidato il flusso di lavoro confrontando i risultati della simulazione con i dati reali raccolti tramite sensori su un edificio in legno. I risultati mostrano una forte corrispondenza, con un coefficiente di Pearson di 0,975, tra il modello BEM e i dati reali.

Questo dimostra che una volta risolti gli errori geometrici e definita accuratamente la divisione in zone termiche il metodo è affidabile nel prevedere il comportamento dinamico dell'edificio. Gli autori sottolineano l'importanza della corretta divisione in zone termiche che consiste nel raggruppare gli ambienti interni.

Questo approccio è utile per garantire risultati precisi senza compromettere l'efficienza del calcolo ed è una strategia fondamentale per colmare il divario tra la complessità architettonica e il livello di semplificazione richiesto dall'analisi energetica.

In conclusione gli autori affermano che l'approccio basato sullo standard gbXML rappresenta attualmente la soluzione più praticabile per le esigenze della progettazione ingegneristica.

Tuttavia è essenziale integrare il processo con una fase di validazione accurata e correzione manuale del modello geometrico per garantire risultati affidabili ed efficaci.

1.5 Obiettivi della tesi

Il presente lavoro di tesi si propone di concentrarsi sulla modellazione e sull'analisi energetica preliminare del complesso "Beato Pellegrino" presso l'Università degli Studi di Padova. L'obiettivo principale consiste nella creazione di modelli BIM (Building Information Modeling) e successive simulazioni energetiche dinamiche. I dati ottenuti vengono poi confrontati attraverso l'uso di Autodesk Revit e OpenStudio.

Un'attenzione particolare viene dedicata all'interoperabilità del flusso di lavoro tra BIM (Building Information Modeling) e BEM (Building Energy Modeling), un elemento fondamentale per incrementare la precisione del modello energetico sviluppato con OpenStudio, specialmente applicato a un caso di studio complicato e di ampie dimensioni, rappresentato dal complesso Beato Pellegrino dell'Università degli Studi di Padova, non che l'ex Ospedale Geriatrico di Padova.

Gli obiettivi principali perseguiti nell'ambito di questa ricerca sono articolati come segue:

- Modellazione 3D in ambiente BIM di Autodesk Revit del complesso Beato Pellegrino: realizzabile partendo dai disegni 2D delle viste, delle piante e delle sezioni degli edifici in formato PDF e DWG. Questo processo consente di creare un modello tridimensionale dettagliato, integrando le stratigrafie e le proprietà termiche di elementi quali muri, pavimenti, coperture e serramenti.
- Confronto metodologico degli strumenti di simulazione: la ricerca prevede una comparazione tra i fabbisogni energetici stimati utilizzando due approcci distinti. Il primo è rappresentato dal motore di calcolo integrato nell'ambiente BIM, comunemente impiegato per valutazioni energetiche preliminari. Il secondo approccio si basa sul motore di simulazione dinamica avanzata, tramite OpenStudio, considerato un punto di riferimento per la comunità scientifica. L'obiettivo è quantificare le discrepanze tra i risultati forniti dai due strumenti e valutarne l'impatto.

- Confronto dei risultati ottenuti in differenti casistiche:
 1. Modello con tende esterne abbassate in Revit
 2. Modello con tende esterne alzate in Revit
 3. Modello con tende esterne abbassate in OpenStudio
 4. Modello con tende esterne alzate in OpenStudio
 5. Modello con tende esterne abbassate e attenuazione temperatura in OpenStudio
 6. Modello con tende esterne alzate e attenuazione temperatura in OpenStudio
 7. Modello con tende esterne abbassate e recuperatore di calore in OpenStudio
 8. Modello con tende esterne abbassate, recuperatore di calore e attenuazione temperatura in OpenStudio
- Predisposizione del modello al Digital Twin: il lavoro si propone di sviluppare un modello energetico caratterizzato da un adeguato livello di dettaglio e flessibilità, tale da costituire una base solida per successive operazioni di calibrazione dinamica. Queste attività saranno realizzabili una volta disponibili i dati raccolti dai sistemi di monitoraggio (il BMS di Siemens) installati realmente nell'edificio.

2. Caso studio: il complesso Beato Pellegrino

2.1 Informazioni generali

L'analisi si concentra sul nuovo Polo Umanistico dell'Università degli Studi di Padova (figura 2.1), collocato tra via Beato Pellegrino e via Vendramini. Questo complesso, noto come Beato Pellegrino, si distingue come uno dei più significativi interventi di rigenerazione urbana realizzati di recente nella città. Frutto della ristrutturazione dell'ex Ospedale Geriatrico, il campus universitario è stato inaugurato nel settembre 2019, rappresentando un esempio emblematico di modernità e funzionalità.



figura 2.1: complesso Beato Pellegrino dell'Università degli Studi di Padova

La configurazione distributiva del complesso Beato Pellegrino si compone di 15 edifici distinti (figura 2.2).

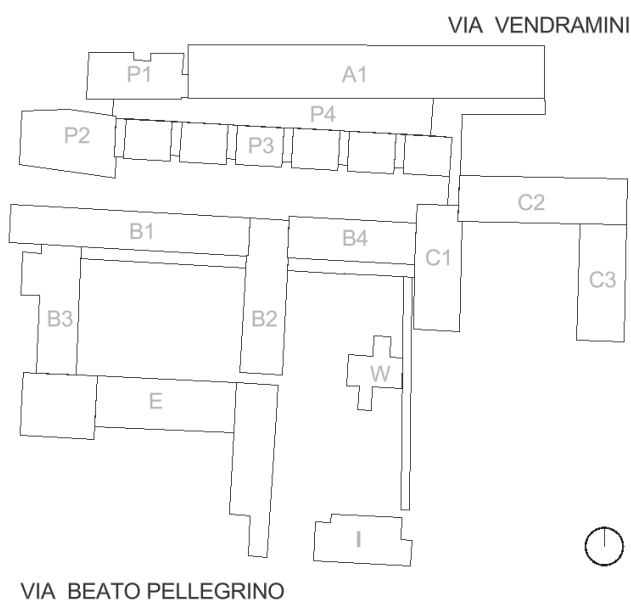


figura 2.2: pianta edifici del complesso

Di seguito viene presentato un quadro sintetico che illustra la suddivisione funzionale di ogni edificio, indicando il numero complessivo di locali e le relative superfici utili nette.

EDIFICIO	AULE	BIBLIOTECHE	UFFICI	BAGNI	LOCALI TECNICI
n°	21	21	174	65	69
A1	7	0	41	15	9
B1	0	5	2	3	9
B2	0	3	1	1	3
B3	0	4	0	3	7
B4	0	5	0	0	3
C1	1	2	0	3	7
C2	0	0	23	2	3
C3	0	0	16	2	0
E	1	1	23	6	0
I	1	0	17	3	2
P1	0	0	16	1	3
P2	2	0	0	0	1
P3	9	0	35	26	22
W	0	1	0	0	0

tabella 2.1: locali per ogni edificio e totali

EDIFICIO	SALE D'ATTESA	GALLERIA
P4	5	1

tabella 2.2: locali dedicati all'edificio P4

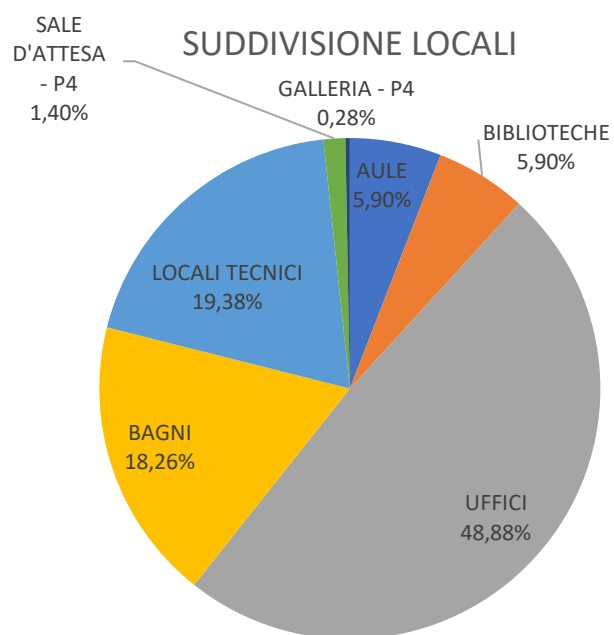


figura 2.3: suddivisioni locali

EDIFICIO	AULE	BIBLIOTECHE	UFFICI	BAGNI	LOCALI TECNICI
totale [m²]	1948,9	4237,76	3284,11	709,4	1539,51
A1	582	0	998,23	201,34	172,25
B1	0	1689,98	44,06	43,72	97,85
B2	0	486,54	25	5,84	21,1
B3	0	749,17	0	70	147,18
B4	0	892	0	0	62,6
C1	85,63	276,79	0	39,48	88,41
C2	0	0	372,74	33,5	50,3
C3	0	0	296,6	28,1	0
E	83,5	93	393,05	81,9	0
I	29,43	0	290,08	32,23	30,9
P1	0	0	393,35	14	11,54
P2	540	0	0	0	58,4
P3	628,34	0	471	159,29	798,98
W	0	50,28	0	0	0

tabella 2.3: superfici nette dei locali per ogni edificio e totali

EDIFICIO	SALE D'ATTESA	GALLERIA
P4	136,9	698,08

tabella 2.4: superfici nette dei locali dedicati all'edificio P4

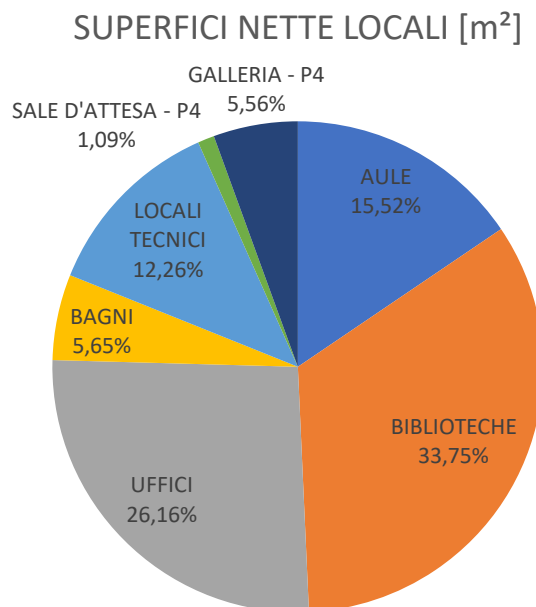


figura 2.4: superfici nette locali

Il complesso Beato Pellegrino si distingue per una configurazione distributiva che assegna priorità agli spazi destinati alla didattica e agli uffici, con aule, biblioteche e uffici. Analizzando i dati relativi agli edifici, l'esame funzionale consente di delineare il seguente quadro riepilogativo:

- 21 aule da 1948,9 m² totali
- 21 biblioteche da 4237,76 m² totali
- 174 uffici da 3284,11 m² totali
- 65 bagni da 709,4 m² totali
- 69 locali tecnici da 1539,51 m² totali
- 5 sale d'attesa da 136,9 m² totali
- 1 galleria da 698,08 m²

Complessivamente dispone di 356 locali e una superficie totale netta di questi ultimi pari a 12554,66 m². Questo dato rappresenta l'area effettivamente dedicata alle attività primarie dell'ateneo e costituisce un parametro fondamentale per determinare i carichi interni variabili, quali l'affollamento, le apparecchiature e l'illuminazione.

In riferimento alla modellazione energetica, è opportuno precisare che per la successiva simulazione dinamica Building Energy Model (BEM), il dominio di calcolo non si limiterà alla sola superficie totale netta sopra menzionata. Invece, esso verrà esteso a tutto il volume lordo del complesso di edifici, escludendo ovviamente gli spazi non condizionati che sono possibile escludere (ad esempio gli intercapedini tra controsoffitti e piani superiori).

Considerando la complessità del sistema, composto da 15 edifici interconnessi, si è deciso di adottare un approccio globale e precauzionale in fase di modellazione. Tale metodologia implica l'inclusione delle aree di disimpegno (corridoi, atri, vani scala) e di spazi come magazzini e ripostigli all'interno delle simulazioni. Questa scelta metodologica offre i seguenti vantaggi:

- Permette di analizzare l'edificio come un sistema termodinamico continuo, riducendo il margine di errore nei flussi termici tra le zone adiacenti;
- Consente di stimare in maniera globale il fabbisogno energetico dell'intero involucro edilizio, includendo anche gli spazi di transito, i quali, sebbene caratterizzati da carichi endogeni (interni) ridotti, contribuiscono significativamente alle dispersioni termiche verso l'esterno.

2.1.1 Contesto storico e urbanistico

Originariamente il complesso ospitava un monastero di monache benedettine, soppresso nel 1806.

In seguito gli spazi furono destinati a luogo di ricovero e dal 1972 fino alla chiusura definitiva nel 2003 divennero sede dell'Ospedale Geriatrico di Padova.

Il progetto di recupero ha riguardato un'area complessiva di circa 17.600 m² con un intervento che ha combinato il restauro conservativo di 13 edifici di valore storico e testimoniale, tra cui gli antichi chiostri, con la costruzione di 5 nuovi edifici moderni progettati per soddisfare le esigenze accademiche e di ricerca.

2.1.2 Struttura architettonica e funzionalità

Il progetto architettonico è stato curato dallo studio dell'architetto Paolo Portoghesi in collaborazione con Manens-Tifs per la parte impiantistica.

L'obiettivo principale era creare un equilibrio tra gli elementi storici esistenti e i nuovi volumi architettonici.

Nel dettaglio, il campus comprende:

- Una Biblioteca Centrale che si estende per circa 4.500 m², capace di accogliere oltre 500.000 volumi. Offre circa 460 postazioni studio in ambienti caratterizzati da ampi spazi a doppia altezza e da una sapiente illuminazione naturale garantita da lucernai zenitali.
- 18 aule didattiche che possono ospitare fino a circa 1.500 studenti.
- Spazi dedicati agli uffici amministrativi e dipartimentali, con circa 400 postazioni lavoro disponibili.
- Un Auditorium con una capienza di 250 posti affiancato da spazi progettati per favorire la socialità.

2.1.3 Efficienza energetica e sostenibilità

Dal punto di vista energetico, il Complesso Beato Pellegrino si distingue come il primo edificio dell'ateneo padovano progettato secondo i principi "Gas Free".

L'intervento ha posto un forte accento sull'efficienza energetica e sull'impiego delle fonti rinnovabili ottenendo riconoscimenti dal GSE (Gestore dei Servizi Energetici).

Le principali caratteristiche tecniche includono:

- Sistema di generazione termica: l'assenza di caldaie a gas è compensata dall'utilizzo di pompe di calore polivalenti alimentate da un campo di sonde geotermiche, sfruttando il sottosuolo per riscaldare e raffreddare gli ambienti con elevata efficienza energetica grazie all'inerzia termica del terreno.
- Involucro edilizio: gli edifici moderni sono dotati di isolamento termo-acustico con performance elevate, oltre a sistemi di schermatura solare passiva progettati per ridurre efficacemente i carichi termici estivi in ambienti con alta densità occupazionale come aule e biblioteche.
- Fonti rinnovabili on site: un impianto fotovoltaico installato sulle coperture contribuisce alla produzione elettrica necessaria a supportare il funzionamento delle pompe di calore e degli altri sistemi ausiliari

Queste soluzioni collocano il complesso come un modello ideale per analisi approfondite nell'ambito BIM-BEM. La complessità delle geometrie storiche combinate con tecnologie edilizie avanzate costituisce una sfida stimolante per la modellazione geometrica e la simulazione dinamica dei sistemi, consentendo una valutazione puntuale dell'efficienza operativa complessiva del progetto.

Per la didattica il complesso può contare su 18 aule effettive, per un totale di 1500 posti, e nella nuova biblioteca trovano posto 356.341 volumi, con 460 posti per studio e lettura. La nuova biblioteca Beato Pellegrino per gli studi letterari, linguistici, pedagogici e dello spettacolo riunisce biblioteche disciplinari diverse.

Il complesso Beato Pellegrino è quindi un pezzo della storia di Padova, che viene restituito alla comunità e che torna a essere vissuto da cittadini e studenti.

2.2 Clima

Il clima di Padova gioca un ruolo cruciale nella definizione delle strategie di modellazione energetica, incidendo in modo diretto sui profili di carico termico e di raffrescamento dell'edificio. Situata nella pianura Padana, la città gode di un clima temperato sub-continentale, con una forte variazione stagionale, attenuata solo in parte dalla prossimità al Mar Adriatico.

Dal punto di vista legislativo il comune di Padova ricade nella fascia climatica E, con un valore caratteristico di 2383 Heating Degree Days (HDD), figura 2.5.

La suddetta classificazione stabilisce il periodo convenzionale di riscaldamento, previsto dal 15 ottobre al 15 aprile, con un massimo di 14 ore giornaliere consentite. Ai fini della simulazione energetica e del dimensionamento degli impianti, la stazione meteorologica storicamente di riferimento è quella dell'Orto Botanico; tuttavia, poiché i relativi dati risultano non disponibili, si utilizza come alternativa la stazione meteorologica dell'Aeroporto Civile di Padova (codice WMO 16950).

pr	z	gr-g	alt	comune
PD	E	2383	11	Montegrotto Terme
PD	E	2383	13	Noventa Padovana
PD	E	2487	12	Ospedaletto Euganeo
PD	E	2383	12	Padova
PD	E	2383	9	Pernumia
PD	E	2355	10	Piacenza d'Adige
PD	E	2383	30	Piazzola sul Brenta

figura 2.5: Heating Degree Days riferiti a Padova

2.2.1 Inverno

Durante la stagione invernale, le temperature sono particolarmente rigide e la conformazione geomorfologica della pianura accentua il fenomeno dell'inversione termica. Questo provoca la comparsa di nebbie dense e persistenti, insieme a strati di aria fredda a livello del suolo.

Dal punto di vista della simulazione BEM ci sono due fattori critici:

- Scarsa radiazione solare: la costante presenza di nuvolosità e nebbia diminuisce significativamente l'incidenza degli apporti solari gratuiti, comunemente noti come free gains, determinando un incremento del fabbisogno termico richiesto dall'involucro edilizio.
- Picchi di freddo: l'arrivo di masse d'aria sub-polari, come la Bora proveniente da Nord-Est, rende necessaria una progettazione prudente dei generatori di calore per gestire eventuali picchi storici, anche se i dati più recenti sui Design Days indicano tendenze meno rigide.

2.2.2 Estate

La stagione estiva rappresenta una delle principali sfide energetiche per gli edifici moderni, specialmente quelli caratterizzati da un'alta densità di occupanti, come il Beato Pellegrino. Il clima dell'area è tipicamente caldo-umido, con temperature massime che spesso raggiungono i 34-35°C e picchi estremi registrati fino a 39,8°C (ad esempio nell'agosto del 2003).

L'elevata umidità relativa determina un considerevole carico termico latente, richiedendo un trattamento dell'aria particolarmente dispendioso dal punto di vista energetico. A ciò si aggiunge la posizione semi-centrale dell'edificio, che lo rende soggetto al fenomeno dell'Isola di Calore Urbana (Urban Heat Island, UHI). Questo fenomeno provoca un lento abbassamento delle temperature notturne a causa del rilascio di calore da parte delle superfici costruite, complicando l'efficacia delle strategie di raffrescamento passivo durante la notte.

2.2.3 Primavera e autunno

Le stagioni di transizione, come primavera e autunno, presentano una marcata variabilità. Se un tempo agivano come una sorta di cuscinetto climatico, i cambiamenti atmosferici più recenti indicano una tendenza alla cosiddetta tropicalizzazione. Questa si manifesta con ondate di caldo precoce già a maggio e prolungamenti delle condizioni estive fino a ottobre, spesso interrotti da intensi episodi temporaleschi.

Il regime dei venti è principalmente influenzato dalle correnti provenienti da Nord-Est (Bora) e Sud-Est (Scirocco), l'analisi di questi flussi risulta fondamentale per valutare il potenziale di ventilazione naturale della struttura.

2.3 Impianti meccanici

Gli impianti meccanici presenti nel complesso Beato Pellegrino includono i seguenti elementi:

- Centrale termofrigorifera generale
- Centrali termofrigorifere di edificio
- Impianto di climatizzazione auditorium/aula magna
- Impianti di climatizzazione edifici adibiti a biblioteca
- Impianti di funzionamento edifici adibiti ad aule/uffici
- Impianto di condizionamento edificio W
- Impianto antincendio tipo water mist a servizio degli edifici biblioteca
- Impianto antincendio ad idranti a servizio di tutti i fabbricati ed esterni

2.3.1 Centrale termofrigorifera generale

Nel piano interrato dell'edificio P3 si trova la centrale principale dedicata alla produzione e al pompaggio dei fluidi termofrigoriferi utilizzati per l'intero complesso. Tale centrale può essere descritta, in sintesi, come composta da:

- n°2 pompe di calore ad acqua condensata, modello Rhoss THHEBY 4180 LT, sono installate all'interno dello stesso locale e operano utilizzando un sistema costituito da 60 sonde geotermiche con una profondità di 120 metri. Le suddette apparecchiature presentano le seguenti prestazioni
 - o Potenza raffreddamento 168,4 kW
 - o Potenza riscaldamento 192,6 kW
- n°2 pompe di calore condensate ad aria installate in copertura, modello Rhoss THAETY 4460 P2, caratterizzate dalle seguenti prestazioni:
 - o Potenza raffreddamento 447 kW
 - o Potenza riscaldamento 318 kW
- n°3 pompe di circolazione teleriscaldamento WILO mod. IL-E 80/160-11/2

Complessivamente la centrale termofrigorifera generale fornisce all'intero complesso:

- $P_{raffrescamento\ tot} = 1230,8\ kW$
- $P_{riscaldamento\ tot} = 1021,2\ kW$

MODEL	QUANTITY	COOLING POWER [kW]	HEATING POWER [kW]	EER	COP
THHEBY 4180 LT	2	168,4	192,6	4,54	4,23
THAETY 4460 P2	2	447	318	3,01	2,12

tabella 2.5: EER e COP riferiti alle pompe di calore Rhoss

TOTAL	
EER	COP
3,43	2,92

tabella 2.6: EER e COP totali e mediati

2.3.2 Sottocentrali di edificio

Nel complesso "Nuovo Polo Umanistico dell'Università di Padova", situato in via Beato Pellegrino n. 28, all'interno degli edifici denominati P3, A1, B1, C1, C2, E e I, sono state installate le sottocentrali termofrigorifere destinate al servizio delle diverse strutture.

Ogni sottocentrale è progettata per servire più edifici contemporaneamente, nello specifico

- La sottocentrale P3 serve gli edifici P2 e P3
- La sottocentrale A1 serve gli edifici A1, P1 e P2
- La sottocentrale B1 serve gli edifici B1 e B3
- La sottocentrale C1 serve gli edifici B2, B4, C1 e W
- La sottocentrale E serve il solo edificio E
- La sottocentrale I serve il solo edificio I

Ogni sottocentrale “di scambio” composta essenzialmente da:

- i collettori di mandata e ritorno all’impianto
- dalle elettropompe di circolazione per i circuiti:
 - o Ventilconvettori
 - o UTA/recuperatori
 - o Pavimento radiante (presente solo negli edifici B1, B2, B3, B4, C1, P4, P1)
 - o Radiatori
- uno scambiatore di calore a piastre, che permette di disaccoppiare la rete di teleriscaldamento/raffrescamento dagli edifici serviti dalla sottocentrale.

L’impianto realizzato è del tipo a due tubi con voltura stagionale.

2.3.3 Impianto di condizionamento edificio P2 (auditorium/aula magna)

Il sistema di condizionamento dell'Auditorium e dell'Aula Magna (edificio P2) è basato su un impianto a tutt'aria esterna. Questo è ottenuto attraverso un'unità di trattamento aria che opera senza ricircolo, costituita principalmente da:

- una sezione ventilante di mandata che elabora 14500 mc/h,
- una sezione ventilante di ripresa che elabora 12500 mc/h
- diverse sezioni di filtrazione,
- un recuperatore di calore rotativo entalpico
- due batterie di riscaldamento/raffrescamento, una distinta per l'aula magna e una per l'auditorium, utilizzata sia per il trattamento che la deumidificazione dell’aria.

Le batterie operano con fluido caldo durante la stagione invernale e con fluido freddo nella stagione estiva. Durante il periodo estivo, offrono una resa di 95 kW con acqua in ingresso a 9,5°C e una temperatura dell’aria esterna di 35°C. In inverno, invece, la resa è pari a 90 kW con acqua di alimentazione a 43°C e una temperatura esterna di -5°C. Le canalizzazioni per la mandata e la ripresa sono completamente indipendenti per l’alimentazione dell’auditorium e dell’aula magna. Sono dotate di quattro cassette per la regolazione della portata, suddivise in due per la mandata e due per la ripresa.

2.3.4 Impianto di condizionamento degli edifici adibiti a biblioteca

Gli edifici destinati a ospitare le biblioteche sono identificati come B1, B2, B3, B4 e C1 al primo piano.

Gli impianti di climatizzazione di queste strutture comprendono, in sintesi:

- Un sistema di riscaldamento e raffrescamento radiante a pavimento, installato nei piani interrati, al piano terra, al primo e al secondo ammezzato di vari edifici (non presente però al piano primo ammezzato di tutti gli edifici).
- Un sistema di ventilazione meccanica controllata, costituito da Unità di Trattamento Aria per gli edifici B3, B4 e C1 e da recuperatori di calore per gli edifici B1 e B2. - Ventilconvettori a servizio dei portici (presenti negli edifici B1 e B4) e degli uffici

Le Unità di Trattamento Aria a servizio delle biblioteche B1, B2, B3, B4 e C1 sono le seguenti:

- REC B1a / B1b / B1c
- REC B2a /B2b
- UTA B3
- UTA B4
- UTA C1

Tutte le Unità di Trattamento Aria (UTA) e i recuperatori presenti nell'impianto sono progettati per funzionare esclusivamente con aria esterna, senza prevedere il ricircolo. Tali dispositivi sono costituiti principalmente da una sezione ventilante di mandata, una sezione di ripresa, diverse sezioni di filtrazione, un recuperatore di calore di tipo rotativo, e un'unica batteria che svolge sia la funzione di riscaldamento che di raffrescamento, garantendo il trattamento termico e la deumidificazione dell’aria. Quest'ultima è alimentata da fluido termico caldo durante la stagione invernale e da fluido refrigerante freddo durante la stagione estiva. In riferimento all’edificio C1, è stato installato, lungo il canale di mandata dell’aria primaria destinato al locale denominato “libri antichi”, un umidificatore a elettrodi immersi del modello UR 010 della Carrel, insieme a un filtro elettrostatico modello Crystal Duct System 40x40 della Sabiana.

2.3.5 Impianto di condizionamento degli edifici adibiti a aule/uffici

Gli edifici destinati a ospitare aule e uffici sono identificati con le sigle C1 piano terra, C2, C3, P1, P3 e A1. Il sistema di climatizzazione e rinnovo dell'aria per questi spazi è strutturato nel seguente modo:

- L'Unità di Trattamento Aria (UTA) è progettata per funzionare con aria totalmente esterna, senza ricircolo, ed è composta da una serie di componenti fondamentali: una sezione ventilante per la mandata, una per la ripresa, diverse sezioni di filtrazione, un recuperatore di calore di tipo rotativo e una batteria unica per il riscaldamento e il raffrescamento. Quest'ultima serve sia per il trattamento termico sia per la deumidificazione dell'aria. Il funzionamento della batteria varia a seconda della stagione, utilizzando fluido caldo in inverno e fluido freddo in estate.
- Sono presenti ventilconvettori collocati all'interno degli uffici e delle aule per garantire maggiore flessibilità nel controllo climatico degli ambienti.
- Una rete di canali per la distribuzione dell'aria primaria è installata per servire tutti gli spazi, con regolatori di portata aria VAV posti in corrispondenza di ogni diramazione verso le aule, sia per la mandata sia per la ripresa dell'aria.

2.3.6 Impianto di condizionamento dell'edificio W

L'impianto di climatizzazione presente nell'edificio W, destinato ad aula studio, utilizza un sistema a tutt'aria esterna. È dotato di un recuperatore di calore a flussi incrociati e di una batteria caldo/freddo per il trattamento successivo dell'aria.

2.4 Caratteristiche

2.4.1 Edificio A1

L'unità edilizia in questione è definita come A1 ed è caratterizzata da 3 piani:

- piano terra
- piano primo
- piano secondo

Sotto il profilo funzionale l'edificio ospita:

- 7 aule da 582 m^2
- 41 uffici da $998,23 \text{ m}^2$
- 15 bagni da $201,34 \text{ m}^2$
- 9 locali tecnici da $172,25 \text{ m}^2$

2.4.1.1 Pareti

<i>PARETE</i>	<i>MURATURA</i>	<i>SPESSORE TOT [cm]</i>	<i>COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - U $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$</i>	<i>MASSA TERMICA $\left[\frac{kJ}{m^2 K}\right]$</i>
Me-5	perimetrale	61	0,2662	741,577
Me-6	perimetrale	71,5	0,2694	932,016
Me-6A	perimetrale	71,5	0,2694	932,016
Me-6B	perimetrale	71,5	0,2694	932,016
Mi-1D	interna	36,5	1,4948	476,700
Mi-1E	interna	28	1,9817	367,500
Mi-1F	interna	28	1,9817	367,500
Mi-1G	interna	28	1,9817	367,500
Mi-2A	interna	44	1,2837	502,465
Mi-2B	interna	44	1,2837	502,465
Mi-3D	interna	44	1,2837	502,465
Mi-3E	interna	29	0,5510	351,694
Mi-3F	interna	29	0,5510	351,694
Mi-3G	interna	29	0,5510	351,694
Mi-3H	interna	50	0,3024	602,284
Mi-3i	interna	61	0,1717	633,068
Mi-3L	interna	50	0,2624	586,775
Mi-4C	interna	46,5	0,1410	366,363
Mi-4E	interna	49	0,2339	496,473
Mi-4F	interna	49	0,2339	496,473
Mi-5	interna	12,5	1,3592	96,725
Mi-5A	interna	10	0,4459	26,252
Mi-5B	interna	12,5	0,4179	41,090
Mi-5C	interna	25	0,1343	44,182
Mi-5D	interna	25	0,1343	44,182
Mi-5E	interna	23	0,2128	67,907
Mi-5F	interna	12,5	0,3964	43,794
Mi-9	interna	38	1,8947	574,560
Mi-10	interna	10	0,4459	26,253
Mi-10A	interna	10	0,4459	26,253

tabella 2.7: proprietà termiche pareti dell'edificio A1

2.4.1.2 Pavimenti

PAVIMENTO	SPESSORE TOT [cm]	COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - $U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$	MASSA TERMICA $\left[\frac{kJ}{m^2 K} \right]$
piano terra	25,5	0,6381	316,339
piano primo	35,5	1,2422	703,174
piano secondo	35,5	1,2422	703,174

tabella 2.8: proprietà termiche pavimenti dell'edificio A1

2.4.2 Edificio B1

L'unità edilizia in questione è definita come B1 ed è caratterizzata da 5 piani:

- piano interrato
- piano terra
- piano primo ammezzato
- piano primo
- piano secondo ammezzato

Sotto il profilo funzionale l'edificio ospita:

- 5 biblioteche da 1689,98 m²
- 2 uffici da 44,06 m²
- 3 bagni da 43,72 m²
- 9 locali tecnici da 97,85 m²

2.4.2.1 Pareti

PARETE	MURATURA	SPESSORE TOT [cm]	COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - $U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$	MASSA TERMICA $\left[\frac{kJ}{m^2 K} \right]$
Me-1	perimetrale	69	0,2582	862,476
Me-2	perimetrale	33	0,6486	432,600
Me-3	perimetrale	113	0,2656	1946,114
Mi-1A	interna	12,5	0,4403	40,913
Mi-1B	interna	33	1,6744	432,600
Mi-2	interna	23	0,9600	302,400
Mi-2A	interna	31,5	0,3497	302,331
Mi-2B	interna	21,5	0,9796	281,400
Mi-3	interna	33	1,6744	432,600
Mi-3A	interna	28	0,7742	367,500
Mi-8	interna	89,5	0,0589	640,382
Mi-10	interna	34	0,5296	430,623
Mi-12	interna	12,5	0,4403	40,913
Mi-14	interna	103	0,2632	1632,778
Mi-15	interna	103	0,2632	1632,778
Mi-16	interna	29	0,7453	380,520

tabella 2.9: proprietà termiche pareti dell'edificio B1

2.4.2.2 Pavimenti

PAVIMENTO	SPESSORE TOT [cm]	COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - U $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	MASSA TERMICA $\left[\frac{kJ}{m^2K}\right]$
piano interrato gres	77,5	0,6506	1590,205
piano interrato legno	77,5	0,6059	1562,639
piano terra	38	0,7853	517,039
piano primo ammezzato	37	0,7877	517,039
piano primo	38,3	0,7025	532,118
piano secondo ammezzato	39,5	0,8080	571,414

tabella 2.10: proprietà termiche pavimenti dell'edificio B1

2.4.3 Edificio B2

L'unità edilizia in questione è definita come B2 ed è caratterizzata da 4 piani:

- piano terra
- piano primo ammezzato
- piano primo
- piano secondo ammezzato

Sotto il profilo funzionale l'edificio ospita:

- 3 biblioteche da $486,54 m^2$
- 1 ufficio da $25 m^2$
- 1 bagno da $5,84 m^2$
- 3 locali tecnici da $21,1 m^2$

2.4.3.1 Pareti

PARETE	MURATURA	SPESSORE TOT [cm]	COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - U $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	MASSA TERMICA $\left[\frac{kJ}{m^2K}\right]$
Me-1	perimetrale	69	0,2582	862,476
Me-2	perimetrale	40	0,1745	272,296
Mi-1	interna	12,5	0,4403	40,913
Mi-2	interna	38,75	0,3882	422,897
Mi-2A	interna	31,5	0,3497	302,331
Mi-3	interna	33	1,6744	432,600
Mi-3A	interna	28	0,7742	367,500
Mi-4	interna	12,5	0,4403	40,913
Mi-5	interna	20	0,2154	48,462
Mi-7	interna	46,5	1,5484	699,720
Mi-9	interna	22,75	0,2114	57,433

tabella 2.11: proprietà termiche pareti dell'edificio B2

2.4.3.2 Pavimenti

PAVIMENTO	SPESSORE TOT [cm]	COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - $U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$	MASSA TERMICA $\left[\frac{kJ}{m^2 K} \right]$
piano terra	35	0,6509	532,511
piano primo ammezzato	20,3	2,4254	396,414
piano primo			
piano secondo ammezzato			

tabella 2.12: proprietà termiche pavimenti dell'edificio B2

2.4.4 Edificio B3

L'unità edilizia in questione è definita come B3 ed è caratterizzata da 5 piani:

- piano interrato
- piano terra
- piano primo ammezzato
- piano primo
- piano secondo ammezzato

Sotto il profilo funzionale l'edificio ospita:

- 4 biblioteche da $749,17 m^2$
- 3 bagni da $70 m^2$
- 7 locali tecnici da $147,18 m^2$

2.4.4.1 Pareti

PARETE	MURATURA	SPESSORE TOT [cm]	COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - $U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$	MASSA TERMICA $\left[\frac{kJ}{m^2 K} \right]$
Me-1	perimetrale	69	0,2582	862,476
Me-2	perimetrale	40	0,1745	272,296
Me-3	perimetrale	88,3	0,2747	1371,114
Mi-1	interna	12,5	0,4403	40,913
Mi-1A	interna	12,5	0,4403	40,913
Mi-1B	interna	33	1,6744	432,600
Mi-1C	interna	32	0,1099	42,371
Mi-2	interna	38,75	0,3882	422,897
Mi-2A	interna	31,5	0,3497	302,331
Mi-2B	interna	21,5	2,5562	281,400
Mi-3	interna	33	1,6744	432,600
Mi-3A	interna	28	0,7742	367,500
Mi-5	interna	20	0,2154	48,462
Mi-6	interna	13	0,4200	45,163
Mi-7	interna	46,5	1,5484	699,720
Mi-8	interna	35,5	2,1657	394,711
Mi-11	interna	12,5	0,4440	47,813
Mi-14	interna	35,5	2,1657	394,711
Mi-15	interna	103	0,2632	1632,778
Mi-16	interna	29	2,7273	432,000
Mi-17	interna	35,5	2,1657	394,711

tabella 2.13: proprietà termiche pareti dell'edificio B3

2.4.4.2 Pavimenti

PAVIMENTO	SPESSORE TOT [cm]	COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - U $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	MASSA TERMICA $\left[\frac{kJ}{m^2K}\right]$
piano interrato gres	77,5	0,6506	1590,205
piano interrato legno	77,5	0,6059	1562,639
piano terra	38	0,7853	517,039
piano primo ammezzato	38,3	0,7025	532,118
piano primo			
piano secondo ammezzato			

tabella 2.14: proprietà termiche pavimenti dell'edificio B3

2.4.5 Edificio B4

L'unità edilizia in questione è definita come B4 ed è caratterizzata da 4 piani:

- piano terra
- piano primo ammezzato
- piano primo
- piano secondo ammezzato

Sotto il profilo funzionale l'edificio ospita:

- 5 biblioteche da 892 m²
- 3 locali tecnici da 62,6 m²

2.4.5.1 Pareti

PARETE	MURATURA	SPESSORE TOT [cm]	COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - U $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	MASSA TERMICA $\left[\frac{kJ}{m^2K}\right]$
Me-1	perimetrale	69	0,2582	862,476
Mi-2	interna	33	0,6486	432,600
Mi-3	interna	23	0,9600	302,400
Mi-7	interna	46,5	1,5484	699,720
Mi-8	interna	35,5	2,1657	394,711
Mi-8a	interna	85	0,0492	445,942

tabella 2.15: proprietà termiche pareti dell'edificio B4

2.4.5.2 Pavimenti

PAVIMENTO	SPESSORE TOT [cm]	COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - U $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	MASSA TERMICA $\left[\frac{kJ}{m^2K}\right]$
piano terra	35	0,6509	532,511
piano primo ammezzato	19	2,0339	379,539
piano primo	20,3	2,4254	396,414
piano secondo ammezzato			

tabella 2.16: proprietà termiche pavimenti dell'edificio B4

2.4.6 Edificio C1

L'unità edilizia in questione è definita come C1 ed è caratterizzata da 3 piani:

- piano terra
- piano primo
- piano secondo ammezzato

Sotto il profilo funzionale l'edificio ospita:

- 1 aula da $85,63 \text{ m}^2$
- 2 biblioteche da $276,79 \text{ m}^2$
- 3 bagni da $39,48 \text{ m}^2$
- 7 locali tecnici da $88,41 \text{ m}^2$

2.4.6.1 Pareti

<i>PARETE</i>	<i>MURATURA</i>	<i>SPESSORE TOT [cm]</i>	<i>COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - U</i> $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$	<i>MASSA TERMICA</i> $\left[\frac{kJ}{m^2 K}\right]$
Me-5	perimetrale	61	0,2662	741,576
Me-10	perimetrale	56	0,3353	709,669
Me-11	perimetrale	10,5	0,4299	33,458
Mi-4G	interna	41	0,3605	488,469
Mi-5A	interna	10	0,4459	26,253
Mi-5F	interna	12,5	0,3964	43,794
Mi-5G	interna	12,5	0,4087	47,569
Mi-6	interna	33	2,1818	495,600
Mi-7	interna	16,25	16,25	1,2500
Mi-8	interna	27,5	0,5875	324,038

tabella 2.17: proprietà termiche pareti dell'edificio C1

2.4.6.2 Pavimenti

<i>PAVIMENTO</i>	<i>SPESSORE TOT [cm]</i>	<i>COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - U</i> $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$	<i>MASSA TERMICA</i> $\left[\frac{kJ}{m^2 K}\right]$
piano terra	30	0,6639	423,083
piano primo	16,3	1,8809	258,241

tabella 2.18: proprietà termiche pavimenti dell'edificio C1

2.4.7 Edificio C2

L'unità edilizia in questione è definita come C2 ed è caratterizzata da 2 piani:

- piano terra
- piano primo

Sotto il profilo funzionale l'edificio ospita:

- 23 uffici da $372,74 \text{ m}^2$
- 2 bagni da $33,5 \text{ m}^2$
- 3 locali tecnici da $50,3 \text{ m}^2$

2.4.7.1 Pareti

<i>PARETE</i>	<i>MURATURA</i>	<i>SPESSORE TOT [cm]</i>	<i>COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - U</i> $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$	<i>MASSA TERMICA</i> $\left[\frac{kJ}{m^2 K}\right]$
Me-5	perimetrale	61	0,2662	741,576
Mi-5	interna	12,5	0,4397	40,113
Mi-5A	interna	12,5	0,4268	49,415
Mi-5G	interna	12,5	0,4129	56,069
Mi-5H	interna	12,5	0,4129	47,394
Mi-5L	interna	12,5	0,3969	44,594
Mi-6	interna	22,8	1,9835	279,363

tabella 2.19: proprietà termiche pareti dell'edificio C2

2.4.7.2 Pavimenti

<i>PAVIMENTO</i>	<i>SPESSORE TOT [cm]</i>	<i>COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - U</i> $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$	<i>MASSA TERMICA</i> $\left[\frac{kJ}{m^2 K}\right]$
piano terra	30	0,6639	423,083
piano primo	16,3	1,8809	258,241

tabella 2.20: proprietà termiche pavimenti dell'edificio C2

2.4.8 Edificio C3

L'unità edilizia in questione è definita come C3 ed è caratterizzata da 2 piani:

- piano terra
- piano primo

Sotto il profilo funzionale l'edificio ospita:

- 16 uffici da $296,6 \text{ m}^2$
- 2 bagni da $28,1 \text{ m}^2$

2.4.8.1 Pareti

PARETE	MURATURA	SPESSORE TOT [cm]	COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - U $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	MASSA TERMICA $\left[\frac{kJ}{m^2K}\right]$
Me-5	perimetrale	61	0,2662	741,576
Me-5A	perimetrale	61	0,2662	741,576
Me-5B	perimetrale	73	0,1169	741,721
Mi-5	interna	12,5	0,4397	40,113
Mi-5A	interna	12,5	0,4268	49,415
Mi-5G	interna	12,5	0,4129	56,069
Mi-5H	interna	12,5	0,4129	47,394
Mi-5L	interna	12,5	0,3969	44,594
Mi-6	interna	22,8	1,9835	279,363

tabella 2.21: proprietà termiche pareti dell'edificio C3

2.4.8.2 Pavimenti

PAVIMENTO	SPESSORE TOT [cm]	COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - U $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	MASSA TERMICA $\left[\frac{kJ}{m^2K}\right]$
piano terra	30	0,6639	423,083
piano primo	16,3	1,8809	258,241

tabella 2.22: proprietà termiche pavimenti dell'edificio C3

2.4.9 Edificio E

L'unità edilizia in questione è definita come I ed è caratterizzata da 3 piani:

- piano terra
- piano primo
- piano secondo ammezzato

Sotto il profilo funzionale l'edificio ospita:

- 1 aula da $83,5 \text{ m}^2$
- 1 biblioteca da 93 m^2
- 23 uffici da $393,05 \text{ m}^2$
- 6 bagni da $81,9 \text{ m}^2$

2.4.9.1 Pareti

PARETE	MURATURA	SPESSORE TOT [cm]	COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - $U \left[\frac{W}{m^2K} \right]$	MASSA TERMICA $\left[\frac{kJ}{m^2K} \right]$
Me-1	perimetrale	69	0,2582	862,476
Mi-2	interna	23	0,9600	302,400
Mi-3	interna	33	1,6744	432,600
Mi-7	interna	46,5	1,5484	699,720

tabella 2.23: proprietà termiche pareti dell'edificio E

2.4.9.2 Pavimenti

PAVIMENTO	SPESSORE TOT [cm]	COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - $U \left[\frac{W}{m^2K} \right]$	MASSA TERMICA $\left[\frac{kJ}{m^2K} \right]$
piano terra	38	0,7853	517,039
piano primo	38,3	0,7025	532,118

tabella 2.24: proprietà termiche pavimenti dell'edificio E

2.4.10 Edificio I

L'unità edilizia in questione è definita come I ed è caratterizzata da 3 piani:

- piano terra
- piano primo
- piano secondo ammezzato

Sotto il profilo funzionale l'edificio ospita:

- 1 aula da $29,43 \text{ m}^2$
- 17 uffici da $290,08 \text{ m}^2$
- 3 bagni da $32,23 \text{ m}^2$
- 2 locali tecnici da $30,9 \text{ m}^2$

2.4.10.1 Pareti

<i>PARETE</i>	<i>MURATURA</i>	<i>SPESSORE TOT [cm]</i>	<i>COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - U $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$</i>	<i>MASSA TERMICA $\left[\frac{kJ}{m^2K}\right]$</i>
Me-5	perimetrale	61	0,2662	741,576
Me-10	perimetrale	56	0,3353	709,669
Mi-5A	interna	12,5	0,4268	49,415
Mi-5G	interna	12,5	0,4129	56,069
Mi-5F	interna	12,5	0,3964	43,794
Mi-6	interna	22,8	1,9835	279,363

tabella 2.25: proprietà termiche pareti dell'edificio I

2.4.10.2 Pavimenti

<i>PAVIMENTO</i>	<i>SPESSORE TOT [cm]</i>	<i>COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - U $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$</i>	<i>MASSA TERMICA $\left[\frac{kJ}{m^2K}\right]$</i>
piano terra	40	0,4101	599,290
piano primo	13,3	3,5503	255,414
piano secondo ammezzato	16,3	3,5503	255,414

tabella 2.26: proprietà termiche pavimenti dell'edificio I

2.4.11 Edificio P1

L'unità edilizia in questione è definita come P1 ed è caratterizzata da 4 piani:

- piano terra
- piano primo
- piano secondo ammezzato
- piano secondo

Sotto il profilo funzionale l'edificio ospita:

- 16 uffici da $393,35 \text{ m}^2$
- 1 bagno da 14 m^2
- 3 locali tecnici da $11,54 \text{ m}^2$

2.4.11.1 Pareti

<i>PARETE</i>	<i>MURATURA</i>	<i>SPESSORE TOT [cm]</i>	<i>COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - $U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$</i>	<i>MASSA TERMICA $\left[\frac{kJ}{m^2 K} \right]$</i>
Me-8	perimetrale	54,5	0,1806	678,688
Me-9	perimetrale	41,5	0,2912	415,416
Mi-1	interna	18	0,8984	142,800
Mi-1B	interna	33	1,6744	432,600
Mi-5	interna	12,5	1,3592	96,725
Mi-5A	interna	10	0,4459	26,253
Mi-5B	interna	12,5	0,4179	41,090
Mi-8	interna	9,25	0,6256	41,691
Mi-8A	interna	9,25	0,6256	41,691
Mi-9	interna	31,5	0,4622	222,600
Mi-10	interna	10	0,4459	26,253
Mi-11	interna	7,5	0,4115	75,753
Mi-13	interna	104	0,0542	775,555

tabella 2.27: proprietà termiche pareti dell'edificio P1

2.4.11.2 Pavimenti

<i>PAVIMENTO</i>	<i>SPESSORE TOT [cm]</i>	<i>COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - $U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$</i>	<i>MASSA TERMICA $\left[\frac{kJ}{m^2 K} \right]$</i>
piano terra	25,5	0,4173	244,023
piano primo	31,5	2,8852	691,414
piano secondo ammezzato			
piano secondo			

tabella 2.28: proprietà termiche pavimenti dell'edificio P1

2.4.12 Edificio P2

L'unità edilizia in questione è definita come P1 ed è caratterizzata da 2 piani:

- piano terra
- piano primo

Sotto il profilo funzionale l'edificio ospita:

- 2 aule da 540 m^2
- 1 locale tecnico da $58,4 \text{ m}^2$

2.4.12.1 Pareti

<i>PARETE</i>	<i>MURATURA</i>	<i>SPESSORE TOT [cm]</i>	<i>COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - $U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$</i>	<i>MASSA TERMICA $\left[\frac{kJ}{m^2 K} \right]$</i>
<i>Me-8D</i>	<i>perimetrale</i>	<i>60,5</i>	<i>0,1170</i>	<i>501,936</i>
<i>Me-8E</i>	<i>perimetrale</i>	<i>34,5</i>	<i>0,4379</i>	<i>587,460</i>
<i>Me-9A</i>	<i>interna</i>	<i>47,5</i>	<i>0,2056</i>	<i>422,792</i>
<i>Mi-5</i>	<i>interna</i>	<i>12,5</i>	<i>0,3389</i>	<i>143,975</i>
<i>Mi-7</i>	<i>interna</i>	<i>13</i>	<i>0,4154</i>	<i>64,319</i>
<i>Mi-12</i>	<i>interna</i>	<i>23</i>	<i>0,6802</i>	<i>176,400</i>

tabella 2.29: proprietà termiche pareti dell'edificio P2

2.4.12.2 Pavimenti

<i>PAVIMENTO</i>	<i>SPESSORE TOT [cm]</i>	<i>COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - $U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$</i>	<i>MASSA TERMICA $\left[\frac{kJ}{m^2 K} \right]$</i>
piano terra	25,5	0,4173	244,023
piano primo	35,5	0,6631	604,281

tabella 2.30: proprietà termiche pavimenti dell'edificio P2

2.4.13 Edificio P3

L'unità edilizia in questione è definita come P3 ed è caratterizzata da 5 piani:

- piano interrato
- piano terra
- piano primo
- piano secondo ammezzato
- piano secondo

Sotto il profilo funzionale l'edificio ospita:

- 9 aule da $628,34 \text{ m}^2$
- 35 uffici da 471 m^2
- 26 bagni da $159,29 \text{ m}^2$
- 22 locali tecnici da $798,98 \text{ m}^2$

2.4.13.1 Pareti

<i>PARETE</i>	<i>MURATURA</i>	<i>SPESSORE TOT [cm]</i>	<i>COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - U $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$</i>	<i>MASSA TERMICA $\left[\frac{kJ}{m^2 K}\right]$</i>
Me-1	perimetrale	40	0,3802	326,200
Me-1a	perimetrale	55	0,2800	677,776
Me-1b	perimetrale	45	0,3666	379,960
Me-2	perimetrale	33	0,4397	227,858
Me-2A	perimetrale	33	0,4497	236,498
Me-3	perimetrale	54	0,1195	253,507
Me-3A	perimetrale	41,5	0,1982	224,909
Me-3B	perimetrale	39	0,2701	243,194
Me-4	perimetrale	44,5	0,1029	149,899
Mi-1	interna	18	0,8984	142,800
Mi-1A	interna	23	0,6802	176,400
Mi-1B	interna	33	0,4578	243,600
Mi-1C	interna	18	0,8984	142,800
Mi-2	interna	30	0,4667	201,600
Mi-3	interna	39	0,2708	246,644
Mi-3A	interna	45,3	0,1794	267,628
Mi-3B	interna	39	0,2701	243,194
Mi-3C	interna	44	0,1754	243,254
Mi-3D	interna	44	0,3801	281,965
Mi-4	interna	31,5	0,2643	179,719
Mi-4A	interna	31,5	0,2643	179,719
Mi-4B	interna	44	0,0958	142,879
Mi-4C	interna	46,5	0,1189	208,863
Mi-5	interna	12,5	1,3592	96,725
Mi-5A	interna	10	0,4459	26,253
Mi-5B	interna	12,5	0,4179	41,090
Mi-5C	interna	25	0,1343	44,182
Mi-5G	interna	25	0,1615	60,089
Mi-6	interna	17,5	0,2128	44,565
Mi-7	interna	13	0,4154	64,319
Mi-8B	interna	9,25	0,6256	41,691

Mi-9	interna	12	2,5000	168,000
Mi-9A	interna	13,5	2,3288	184,128
Mi-9B	interna	15	2,1795	200,256
Mi-11A	interna	10	0,3778	36,999

tabella 2.31: proprietà termiche pareti dell'edificio P3

2.4.13.2 Pavimenti

PAVIMENTO	SPESSORE TOT [cm]	COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - $U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$	MASSA TERMICA $\left[\frac{kJ}{m^2 K} \right]$
piano interrato	80	0,4091	1825,060
piano terra	49,5	0,3045	698,518
piano primo	35,7	1,82	726,164
piano secondo ammezzato			
piano secondo	45	0,2706	804,5448

tabella 2.32: proprietà termiche pavimenti dell'edificio P3

2.4.14 Edificio P4

L'unità edilizia in questione è definita come P4 ed è caratterizzata da 2 piani:

- piano terra
- piano primo

Sotto il profilo funzionale l'edificio non ospita stanze bensì:

- 5 sale d'attesa $136,9 m^2$
- 1 galleria $698,08 m^2$

2.4.14.1 Pareti

PARETE	MURATURA	SPESSORE TOT [cm]	COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - $U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$	MASSA TERMICA $\left[\frac{kJ}{m^2 K} \right]$
Me-8	perimetrale	54,5	0,1420	488,308
Me-8E	perimetrale	76	0,0630	366,081
Me-10	interna	39,33	0,2931	925,839
Mi-12	interna	23	0,6802	176,400
Mi-13	interna	104	0,0466	416,455

tabella 2.33: proprietà termiche pareti dell'edificio P4

2.4.14.2 Pavimenti

PAVIMENTO	SPESSORE TOT [cm]	COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - $U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$	MASSA TERMICA $\left[\frac{kJ}{m^2 K} \right]$
piano terra	60	0,2435	606,333
piano primo	31,5	3,3898	655,414

tabella 2.34: proprietà termiche pavimenti dell'edificio P4

2.4.15 Edificio W

L'unità edilizia in questione è definita come W ed è caratterizzata da 1 piano:

- piano terra

Sotto il profilo funzionale l'edificio ospita:

- 1 sala studio/biblioteca da $50,28 \text{ m}^2$

2.4.15.1 Pavimenti

PAVIMENTO	SPESSORE TOT [cm]	COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - $U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$	MASSA TERMICA $\left[\frac{kJ}{m^2 K} \right]$
piano terra	40	0,4104	603,310

tabella 2.35: proprietà termiche pavimento dell'edificio W

2.4.16 Coperture

Le caratteristiche termiche delle chiusure orizzontali di copertura sono sintetizzate nella tabella 2.36

L'analisi dei dati evidenzia una discontinuità relativa alla copertura dell'edificio P4, che presenta un valore di trasmittanza U più elevato rispetto alle altre strutture opache. Questa differenza è direttamente legata alla tipologia costruttiva: si tratta infatti di una copertura vetrata (lucernario), il cui isolamento, per quanto ottimizzato tramite l'utilizzo di vetri selettivi ad alte prestazioni simili a quelli impiegati nelle finestre presenti nel complesso, risulta inevitabilmente inferiore rispetto a quello dei pacchetti di copertura opaca dotati di un efficace livello di coibentazione.

COPERTURE			
EDIFICIO	SPESSORE TOT [cm]	COEFF. DI SCAMBIO TERMICO - $U [W/(m^2 \cdot K)]$	MASSA TERMICA $[kJ/(m^2 \cdot K)]$
A1	35,5	0,1136	116,739
B1			
B2			
B3			
B4			
C1			
C2			
C3			
E			
I			
P1	48,8	0,2713	953,889
P2	50	0,2258	617,007
P3	45	0,2706	804,545
P4	7,5	0,808	156,240
W	29,3	0,2714	350,218

tabella 2.36: coperture degli edifici

2.4.17 Vetraggi

Per quanto riguarda i vetri impiegati in tutti gli edifici del complesso sono descritti come “Vetrocamera isolante con elevate prestazioni acustiche con canalina warmedge” e composta da:

- Vetro esterno stratificato acustico basso emissivo, con 2 vetri dello spessore di 6 mm, tipo AGC Stratophone Low-e 66.2 (Planibel Clear + Planibel Light), con interposto PVB dalle particolari prestazioni acustiche dello spessore di 0,76 mm; in faccia 2 è deposto un rivestimento bassoemissivo magnetroni, con prestazioni di controllo solare.
- Intercapedine dello spessore di 20 mm, riempita con gas Argon al 90%, con canalina tipo Warm Edge.
- Vetro interno stratificato chiaro, con 2 vetri di spessore di 4 mm, tipo AGC Stratophone 44.2, con interposto PVB con particolari prestazioni acustiche dello spessore di 0,76 mm.

I vetri stratificati sono classificati 1B1 anticaduta nel vuoto secondo la normativa EN 12600.

La vetrata, così composta, garantisce in particolare $R_w = 46$ dB e $U_g = 1.0$

Per caratterizzare con precisione le prestazioni dell'involucro trasparente, è stato effettuato il calcolo spettrale delle vetrature utilizzando i software LBNL WINDOW 7.8 e OPTICS 6. Questa analisi ha permesso di ottenere valori accurati di trasmittanza termica U e coefficiente di guadagno solare $SHGC$, specifici per la configurazione selezionata, superando così le approssimazioni tipiche dei materiali standard.

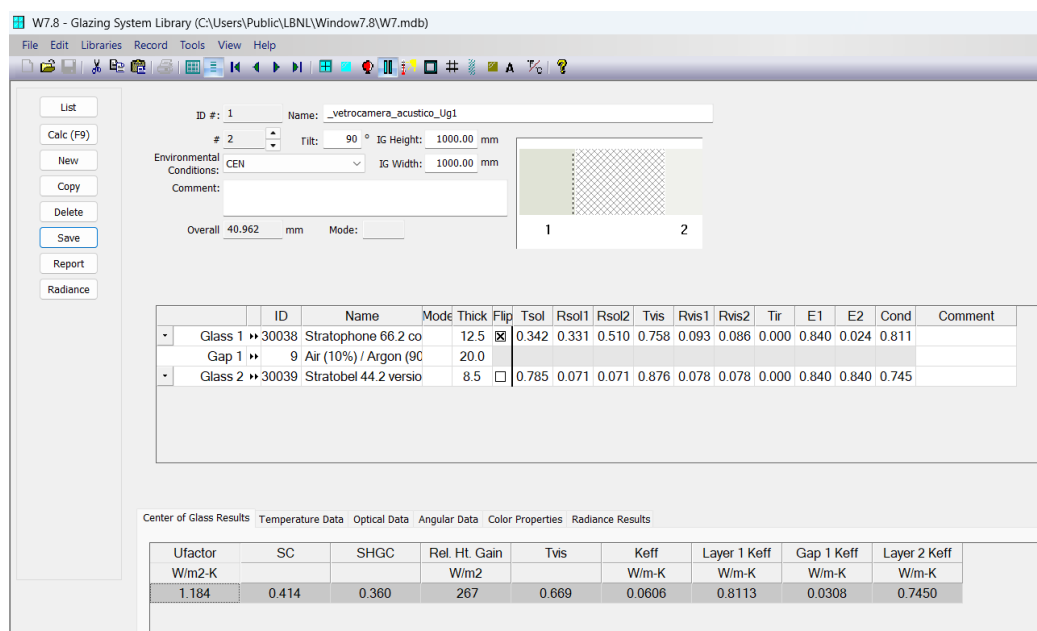


figura 2.6: proprietà vetri ottenute tramite Window 7.8 e Optics6

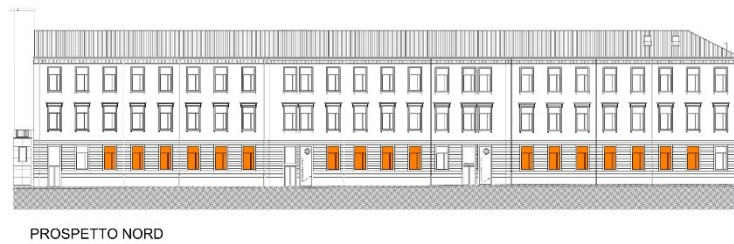
2.4.18 Tende

Per quanto riguarda le tende vengono considerate solamente quelle applicate esternamente, il cui modello è il “Tenda a rullo schermante e filtrante per applicazione esterna a rullo tipo MS85 comando a motore” ed

- Tenda a rullo schermante e filtrante esterna per protezione solare con tessuto filtrante screen peso 525 gr/mq in fibra di vetro rivestita di PVC, classe 1 autoestinguente ed idoneo per l'esposizione diretta ai raggi solari.
- Cassonetto in alluminio estruso di forma quadrata con dimensione 83x82mm e guide laterali in alluminio estruso da 17x20mm con guarnizioni antirumore.
- Terminale diametro 30mm in alluminio estruso con tappi laterali e perni telescopici in alluminio per scorrimento in guida.
- Comando a motore inserito nel rullo di avvolgimento operante a 230V-50HZ con grado di protezione IP44 completo di finecorsa superiore ed inferiore e cavo di alimentazione quadripolare 4x0,75 (esclusa pulsantiera).

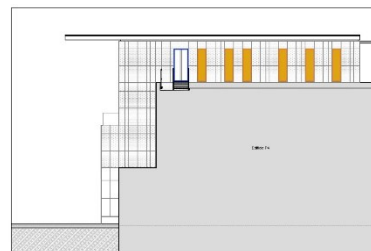
Gli edifici caratterizzati dalla presenza delle schermature esterne abbassate sono:

- A1 rappresentato in figura 2.7
- P1 rappresentato in figura 2.8
- P3 rappresentato in figura 2.9



PROSPETTO NORD

figura 2.7: tende esterne per edificio A1



PROSPETTO SUD



PIANTA PIANO SECONDO

LEGENDA



TENDA A RULLO SCHERMANTE E FILTRANTE PER APPLICAZIONE ESTERNA A RULLO TIPO MS85 COMANDO A MOTORE

Tenda a rullo schermante e filtrante esterna per protezione solare con tessuto filtrante screen peso 525 gr/mq in fibra di vetro rivestita di PVC, classe 1 autoestinguente ed idoneo per l'esposizione diretta ai raggi solari.
Cassonetto in alluminio estruso di forma quadrata con dimensione 83x82mm e guide laterali in alluminio estruso da 17x20mm con guarnizioni antirumore.
Terminale diametro 30mm in alluminio estruso con tappi laterali e perni telescopici in alluminio per scorrimento in guida.
Comando a motore inserito nel rullo di avvolgimento operante a 230V-50HZ con grado di protezione IP44 completo di finecorsa superiore ed inferiore e cavo di alimentazione quadripolare 4x0,75 (esclusa pulsantiera).

figura 2.8: tende esterne per edificio P1



PROSPETTO SUD

LEGENDA



FILTRANTE

TENDA A RULLO SCHERMANTE E FILTRANTE PER APPLICAZIONE ESTERNA A RULLO TIPO MS85 COMANDO A MOTORE

Tenda a rullo schermante e filtrante esterna per protezione solare con tessuto filtrante screen peso 525 gr/mq in fibra di vetro rivestita di PVC, classe 1 autoestinguente ed idoneo per l'esposizione diretta ai raggi solari.
Cassonetto in alluminio estruso di forma quadrata con dimensione 83x82mm e guide laterali in alluminio estruso da 17x20mm con guarnizioni antirumore.
Terminale diametro 30mm in alluminio estruso con tappi laterali e perni telescopici in alluminio per scorrimento in guida.
Comando a motore inserito nel rullo di avvolgimento operante a 230V-50HZ con grado di protezione IP44 completo di finecorsa superiore ed inferiore e cavo di alimentazione quadripolare 4x0,75 (esclusa pulsantiera).

LEGENDA



OSCURANTE

TENDA OSCURANTE INTERNA A RULLO TIPO MS15 A MOTORE PER APPLICAZIONE INTERNA

Tenda per applicazione interna con tessuto oscurante screen tipo MS21154 peso 800gr/mq con pellicola in PVC grigia nel lato interno, staffe a "L" di fissaggio rullo a soffitto o frontale, guide laterali in alluminio estruso dimensione 65x20mm con spazzolini laterali, terminale piatto H-60mm in alluminio estruso.
Casse trasversali in acciaio inserite nel tessuto per lo scorrimento in guida.
Comando a motore inserito nel rullo di avvolgimento operante a 230 V-50 Hz con grado di protezione IP44 completo di finecorsa superiore ed inferiore e cavo di alimentazione quadripolare 4x0,75 (esclusa pulsantiera).

figura 2.9: tende esterne per edificio P3

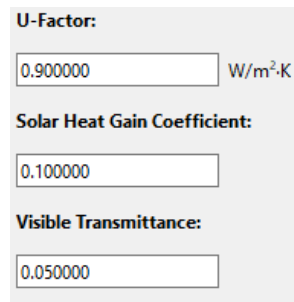
La modellazione delle tende esterne esterne è stata sviluppata con un approccio specifico per considerare l'effetto delle schermature solari direttamente sulle proprietà dei vetri. Per evitare un carico computazionale eccessivo legato alla gestione dinamica delle tende, si è deciso di rappresentare il sistema con un modello di vetrata equivalente. Le proprietà del vetro sono state modificate per includere l'effetto di attenuazione prodotto dalla schermatura abbassata.

Sono stati impostati i seguenti parametri:

- trasmittanza termica globale $U = 0,9 \frac{W}{m^2 K}$
- fattore solare 0,1
- trasmittanza visibile 0,05

Questo approccio permette di simulare in modo fedele l'impatto delle schermature esterne e la significativa riduzione degli apporti solari gratuiti. Questo è un aspetto cruciale per dimensionare correttamente i carichi di raffrescamento durante la stagione estiva.

La scheda tecnica di tale tenda è in tabella 7.1 in appendice.



U-Factor:	
0.900000	W/m²·K
Solar Heat Gain Coefficient:	
0.100000	
Visible Transmittance:	
0.050000	

figura 2.10: proprietà vetro con schermatura esterna abbassata

3. Metodologia di modellazione

3.1 Modellazione in Revit

La digitalizzazione dell'edificio è stata realizzata attraverso l'utilizzo del software BIM Autodesk Revit. È stato adottato un approccio 2D-to-BIM che prevede la ricostruzione tridimensionale a partire dalla documentazione grafica bidimensionale disponibile, ovvero dai disegni 2D in dwg delle piante e delle sezioni di ogni singolo edificio.

L'obiettivo principale era sviluppare un modello tridimensionale dell'intero complesso di edifici, adatto per essere utilizzato nelle analisi energetiche successive (BEM).

3.1.1 Processo operativo

Il processo operativo consiste in varie fasi sequenziali:

1. *Importazione dei riferimenti grafici e definizione dei livelli:* come base per la modellazione geometrica sono stati utilizzati i disegni progettuali in formato CAD (.dwg). Questi elaborati, che comprendono le piante dei vari livelli e le sezioni principali, sono stati prima opportunamente puliti in Autodesk Autocad e successivamente importati nell'ambiente Revit tramite la funzione di collegamento (Collega CAD), figura 3.1. Tale procedimento consente di usare le planimetrie come riferimento per la modellazione, assicurando un'elevata fedeltà geometrica rispetto al rilievo esistente. Contemporaneamente, vengono definite le griglie di riferimento e i livelli altimetrici (Livelli-figura 3.2), fondamentali per vincolare in modo corretto le altezze dei vari piani e le relative altezze degli edifici, nonché delle stanze e quindi dei vani analitici successivamente.

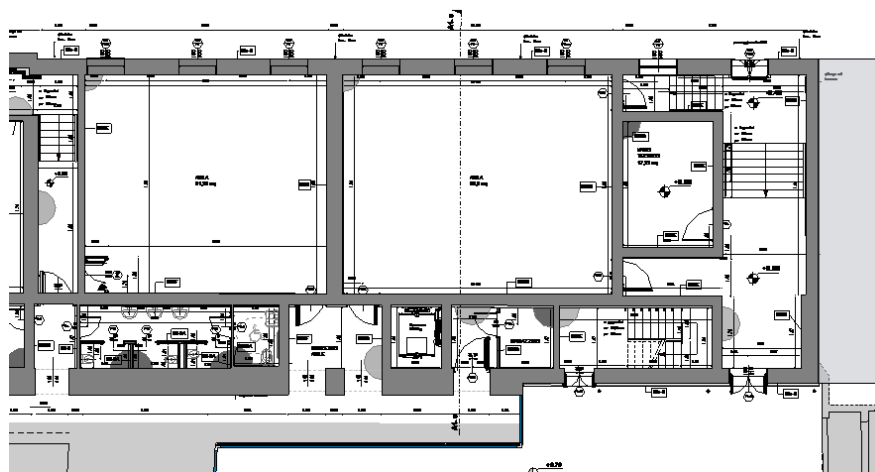


figura 3.1: esempio di collega CAD e modellazione su di esso

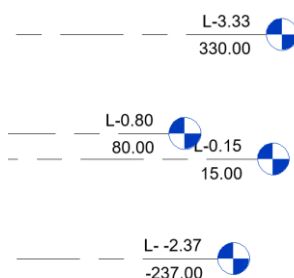


figura 3.2:livelli in Autodesk Revit

2. *Definizione delle famiglie di sistema e stratigrafie:* un passaggio fondamentale per garantire la validità della simulazione energetica futura è il completamento del database informativo del modello. Le caratteristiche termofisiche dell'involucro edilizio, precedentemente analizzate e descritte nel dettaglio nel capitolo 2.4 (consultare gli abachi delle stratigrafie in appendice dalla figura 7.1 alla figura 7.14), vengono integrate nel software mediante la creazione di muri personalizzati che rispecchiano la realtà e quindi di famiglie. Per ciascun elemento costruttivo, come murature perimetrali, tramezze interne, solai e coperture, viene creato un nuovo "Tipo" all'interno di Revit, riproducendo fedelmente la stratigrafia reale.

- a. Caratterizzazione fisica: ogni strato è stato progettato rispettando il suo spessore reale e abbinato al materiale corrispondente.
 - b. Caratterizzazione termica: per ciascun materiale è stata associata la corrispondente scheda tecnica, contenente i valori di conducibilità termica λ , densità ρ e calore specifico c_p stabiliti durante l'analisi preliminare. Questo processo ha consentito al software di determinare in modo automatico la trasmittanza termica U di ogni elemento, parametri fondamentali per il funzionamento corretto delle simulazioni energetiche dinamiche.
3. *Modellazione geometrica dell'involucro*: la modellazione tridimensionale è stata sviluppata seguendo un livello di dettaglio geometrico adeguato agli obiettivi dell'analisi energetica.
- In particolare sono state adottate le seguenti assunzioni:
- a. Gli elementi architettonici come pilastri, travi e scale interne non sono stati considerati dalla modellazione per evitare di appesantire inutilmente il modello 3D. Questa scelta ha permesso di alleggerire anche le simulazioni successive e di ridurre i relativi tempi di calcolo.
 - b. Sono stati definiti i volumi che delimitano gli ambienti riscaldati prestando attenzione alla continuità dell'involucro termico.
 - c. Le murature sono state modellate garantendo la corretta connessione agli angoli, al fine di evitare discontinuità nella geometria. I solai e le coperture sono stati delineati in corrispondenza del perimetro interno delle murature.
 - d. Per quanto riguarda i serramenti, ossia finestre e facciate continue, in fase iniziale è stato impiegato il software Optics6 per la selezione e l'analisi delle singole lastre di vetro. Questo strumento opera come interfaccia per l'International Glazing Database (IGDB), un archivio riconosciuto a livello globale che raccoglie dati radiometrici validati relativi a migliaia di prodotti vetrari commerciali. Grazie all'utilizzo di Optics6 è stato possibile ottenere le proprietà ottiche, come la trasmittanza e la riflettanza in relazione alla lunghezza d'onda, delle specifiche lastre previste nel progetto e creare vetri laminati.
- Per definire il sistema completo con finestre fenestrate, è stato utilizzato il software WINDOW 7.8, un punto di riferimento a livello internazionale riconosciuto da NFRC e ISO, per il calcolo delle prestazioni termiche e ottiche dei serramenti. All'interno dell'ambiente di simulazione, sono state configurate le stratigrafie complete delle vetrocamere.
- I dati numerici generati da WINDOW 7.8 (figura 2.6) sono stati infine inseriti manualmente nei parametri termici delle famiglie di serramenti/vetraggi in Revit. Questo processo ha garantito che il modello energetico rispecchiasse fedelmente il comportamento fisico effettivo della vetrata installata.
4. Oltre agli edifici reali del complesso Beato Pellegrino, sono state aggiunte delle masse concettuali progettate per riflettere e simulare la presenza di edifici in corrispondenza dei muri confinanti e nei pressi del complesso. Questo accorgimento serve a evitare che tali muri vengano interpretati come esterni e quindi che portino a sfalsare le simulazioni, mentre per gli edifici nelle vicinanze del complesso essi sono utili per considerare il loro contributo siccome causano ombreggiamento e quindi influiscono i carichi termici.

Per offrire una panoramica geometrica completa, vengono presentate di seguito le viste assonometriche e in pianta del modello BIM. Questi elaborati grafici consentono di valutare la disposizione degli edifici all'interno del complesso.

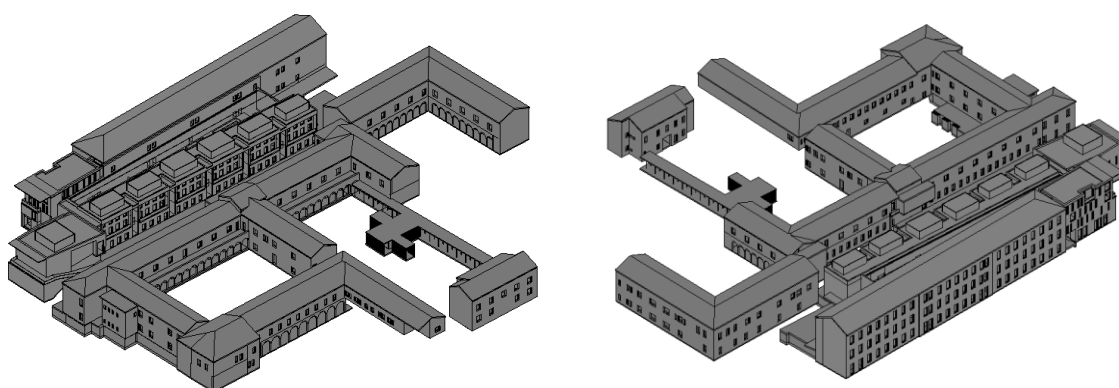


figura 3.3: viste assonometriche del modello BIM del complesso Beato Pellegrino

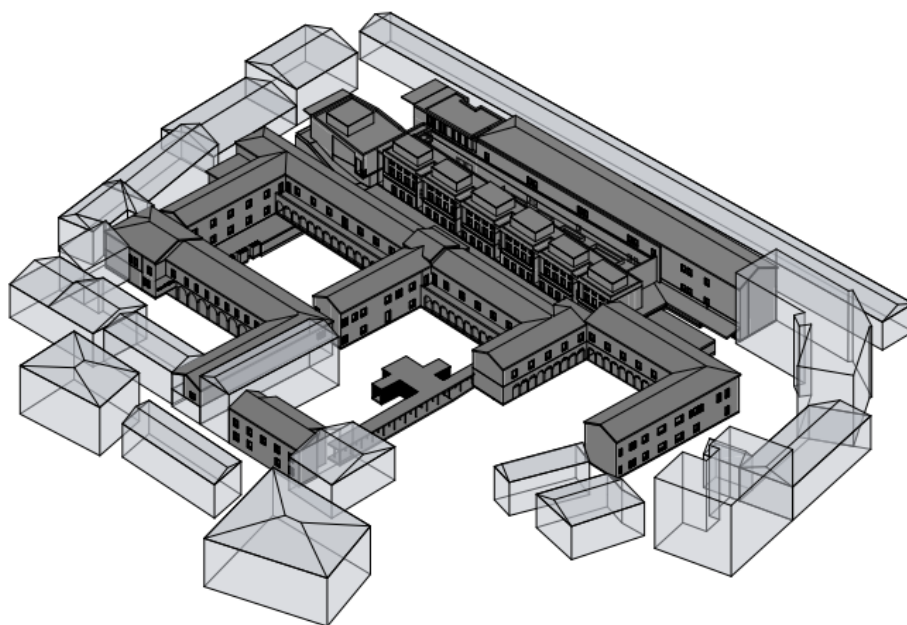


figura 3.4: vista assonometrica del modello BIM con edifici confinanti

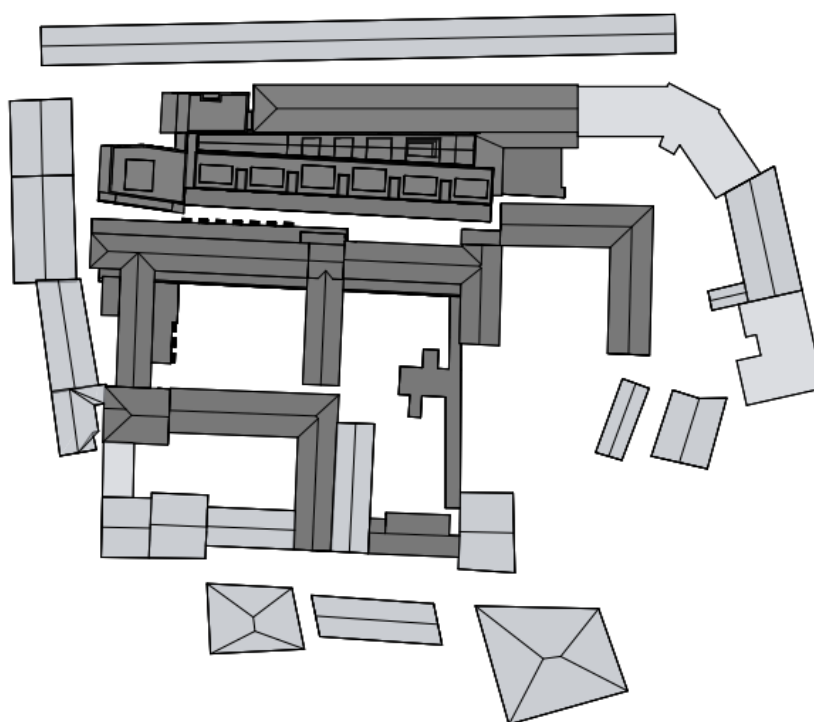


figura 3.5: vista in pianta del modello BIM con edifici confinanti

3.1.2 Ottimizzazione energetica

Di seguito vengono illustrate le impostazioni energetiche [9] (figura 3.6) utilizzate in Revit, alcuni parametri sono di rilevante importanza per l'esito positivo delle simulazioni.

- *Modalità*: per la generazione del modello analitico è stata adottata l'opzione "Usa masse concettuali ed elementi di costruzione". Questa configurazione ibrida si distingue per la sua flessibilità operativa, poiché consente al motore di calcolo di gestire simultaneamente due tipi di geometrie:
 - o gli elementi di costruzione come muri, solai, tetti e finestre che delineano l'involucro dettagliato dell'edificio in esame.
 - o le masse concettuali utilizzate per rappresentare in forma semplificata i volumi degli edifici circostanti. Questa scelta assicura che l'analisi energetica tenga in considerazione sia le proprietà termiche dei materiali assegnati agli elementi costruttivi sia gli effetti di ombreggiamento generati dalle volumetrie circostanti.
- *Piano del terreno*: definisce la quota altimetrica di riferimento ($Z=0$ e nel caso studio corrisponde al livello "L-0.80"), al di sotto della quale le superfici dell'edificio vengono classificate come a contatto con il suolo. Tale distinzione ricopre un ruolo fondamentale per determinare automaticamente le condizioni al contorno termiche, cioè le superfici inferiori trasferiranno calore per conduzione al terreno (condizione Ground), mentre quelle superiori si dirigeranno verso l'esterno disperdendo calore nell'aria (condizione Outdoors). In presenza di geometrie complesse, come edifici parzialmente interrati o situati su terreni inclinati, è stato adottato il criterio di scegliere come livello di riferimento il piano con la più ampia superficie esposta all'aria. Questa semplificazione permette di ridurre al minimo il margine di errore nei calcoli, considerando con maggior cautela la parte prevalente dell'involucro edilizio come esposta alle variazioni della temperatura esterna, piuttosto che a quella più costante del terreno.
- *Fase del progetto*: funge da criterio temporale per la creazione del modello energetico. Selezionando una fase di riferimento, come ad esempio "Nuova Costruzione" o "Stato di Progetto", il software considera unicamente gli elementi costruttivi e le masse volumetriche che appartengono a quello specifico momento o alle fasi precedenti, come l'Esistente. Al contrario, gli elementi relativi a fasi successive o le demolizioni vengono esclusi automaticamente dal calcolo, assicurando che il modello mantenga coerenza geometrica con la configurazione architettonica analizzata.
- *Risoluzione Vano Analitico e Risoluzione Superficie Analitica*: questi parametri regolano il processo di trasformazione della geometria architettonica (BIM) in un modello energetico (BEM). Questi definiscono la tolleranza geometrica minima che il software utilizza per identificare e chiudere i volumi d'aria, colmando eventuali discontinuità presenti tra gli elementi costruttivi. Sebbene i valori predefiniti rappresentino un equilibrio ottimale tra precisione dei risultati e carico computazionale, potrebbe essere necessario modificarli in caso di modelli geometricamente complessi o che presentano imperfezioni. È importante sottolineare che ridurre eccessivamente questi valori (cioè aumentare la risoluzione) può far crescere in modo esponenziale i tempi di elaborazione senza garantire una maggiore accuratezza del modello. Al contrario, l'impostazione di tolleranze troppo stringenti potrebbe impedire il riconoscimento di alcuni vani termici, se le irregolarità o i gap tra i muri del modello architettonico risultano superiori alla tolleranza impostata. Nel caso studio il valore della risoluzione del vano analitico è pari a 15,24 cm mentre il valore della risoluzione della superficie analitica è pari a 7,62 cm
- *Soglia altezza vuoto verticale media*: tale parametro funziona da filtro geometrico automatizzato, punta a garantire una classificazione accurata delle destinazioni d'uso degli spazi. I vani analitici, definiti come volumi d'aria, sono soggetti a un'analisi software che determina la loro altezza media attraverso un rapporto matematico tra il volume del vano stesso e la superficie in pianta. Nel caso in cui il valore che si ottiene sia inferiore alla soglia predefinita, stabilita di norma intorno a 1,8288 metri (circa 6 piedi), il sistema classifica automaticamente l'area analizzata come "zona non climatizzata". Questa funzionalità riveste un ruolo essenziale nel prevenire una distribuzione errata dei carichi endogeni, quali la presenza di persone, l'illuminazione, o la definizione di setpoint di temperatura, in spazi tecnici quali i plenum dei controsoffitti, le intercapedini o i cavedi, che non richiedono alcun tipo di trattamento dell'aria.
- *Soglia area di incassatura/vuoto orizzontale*: analogamente al parametro precedente, la soglia relativa alla dimensione del vano orizzontale agisce come un filtro basato sulla superficie in pianta. Questa configurazione consente di individuare i vani analitici con estensione trascurabile, come cavedi impiantistici verticali o piccole intercapedini, forzandone la classificazione come zone non climatizzate. In questo modo si evita l'attribuzione impropria di profili di carico termico o di fabbisogni di ventilazione a volumi di servizio non occupati, escludendoli dalla simulazione

Impostazioni energetiche	
Parametro	Valore
Modello di analisi energetica	
Modalità	Usa masse concettuali ed elementi di costruzione
Usa solo elementi visibili nella vista corrente	☐
Piano del terreno	L-0.80
Fase del progetto	Fase 1
Risoluzione vano analitico	15.24
Risoluzione superficie analitica	7.62
Profondità della zona perimetrale	0.00
Divisione della zona perimetrale	☐
Soglia altezza vuoto verticale media	182.88
Soglia area di incassatura/vuoto orizzontale	4.000 m ²
Percorso cartella rapporti	.\Analisi energetiche Revit
Avanzate	
Altre opzioni	Modifica...

figura 3.6: impostazioni energetiche

La definizione del modello energetico non si ferma ai soli dati geometrici di base, ma attraverso l'area dedicata alle impostazioni energetiche avanzate [9] (figura 3.7) si possono modificare nel dettaglio le variabili che incidono direttamente sul bilancio energetico. Questa fase risulta indispensabile dopo la creazione iniziale del modello analitico, siccome consente di inserire le reali caratteristiche dell'involucro e degli impianti, trasformando così un calcolo generico in una simulazione mirata e specifica per il caso studio.

- **Complessità esportazione:** determina il grado di astrazione geometrica applicato alle aperture trasparenti e agli elementi di ombreggiamento. Questa configurazione risulta fondamentale per trovare un equilibrio tra la precisione della simulazione e i tempi di elaborazione.
 - o La modalità "Semplice" semplifica le facciate continue, consolidando l'intero sistema vetrato in una singola apertura analitica. Questo metodo, generalmente indicato per le analisi energetiche, consente di ridurre significativamente il numero di superfici da calcolare.
 - o La modalità "Complessa" conserva la rappresentazione geometrica dettagliata di ogni pannello vetrato, garantendo un livello di dettaglio molto elevato nel modello ma aumentando in modo considerevole la complessità computazionale.
 - o Le opzioni che sono caratterizzate da superfici ombreggiate includono nell'esportazione anche gli elementi che non delimitano spazi interni ma contribuiscono significativamente alla generazione di ombre.
 - o Il livello di dettaglio più avanzato è caratterizzato dal considerare i montanti delle facciate continue, trasformandoli in superfici di ombreggiamento definite da asse e spessore reale.
- **Involuppo dell'edificio:** questo parametro definisce l'algoritmo utilizzato dal software per distinguere tra le superfici disperdenti dell'involucro edilizio e le partizioni interne. La modalità predefinita, basata sul parametro "Funzione" è caratterizzata dal software che esamina le proprietà assegnate a muri e pavimenti durante la modellazione. Un approccio alternativo è rappresentato dalla modalità "Identifica elementi esterni" che si basa su un criterio solamente geometrico. Attraverso l'impiego di algoritmi di ray-casting e analisi topologica, il software analizza il modello tridimensionale per individuare fisicamente quali facciate siano direttamente esposte all'ambiente esterno, senza tenere conto della classificazione attribuita alle famiglie degli elementi.
- **Classe di infiltrazione edificio:** consente di stimare il tasso di ricambio d'aria non voluto attraverso l'involucro edilizio, determinato dalla presenza di problemi di tenuta o da fessurazioni. Il software effettua tale calcolo applicando un coefficiente specifico per unità di superficie disperdente, definito in cfm/sqft, che varia in funzione della qualità costruttiva assunta.
 - o "Infiltrazione diffusa" ha un coefficiente pari a 0,076 cfm/sqft, è indicativa di edifici esistenti o caratterizzati da una bassa tenuta all'aria.
 - o "Infiltrazione media" è associata a un valore di 0,038 cfm/sqft, rappresenta invece gli standard costruttivi attuali.
 - o "Infiltrazione minima" prevede un coefficiente di 0,019 cfm/sqft ed è applicato agli edifici progettati secondo criteri di alta efficienza energetica e dotati di dettagli accurati per la sigillatura.
 - o "Assenza di infiltrazione" esclude completamente tale contributo dal calcolo del bilancio termico dell'edificio.
- **Tipo di edificio:** la scelta del tipo di edificio costituisce il primo passo nella caratterizzazione funzionale del modello energetico. Questa impostazione assegna al progetto una destinazione d'uso principale, associando automaticamente profili di funzionamento standardizzati (schedules) forniti dal software. Questi profili gestiscono gli orari di occupazione, il funzionamento degli impianti e l'utilizzo

delle attrezzature. Le differenze operative tra varie destinazioni d'uso, come l'orario prolungato di un'attività commerciale rispetto a quello di un ufficio, influenzano significativamente il calcolo del fabbisogno energetico. Sebbene il software offra valori predefiniti basati su standard normativi, è possibile modificarli successivamente per adattarli in modo personalizzato alle esigenze specifiche dello studio in esame.

- *Sistema riscaldamento, ventilazione e aria condizionata*: questa impostazione consente di specificare un sistema riscaldamento, ventilazione e aria condizionata per il progetto. Il sistema VAV (Variable Air Volume) selezionato è quello di default preimpostato da Revit. L'aspetto importante da considerare è che se si posizionano solamente gli spazi (vani analitici), si crea il modello energetico e si avvia l'analisi, allora i carichi verranno calcolati come carichi ideali (Ideal Air Loads), il che significa che si otterranno i risultati netti. [19]
- *Tipi schematici ed elementi dettagliati*: la caratterizzazione termofisica dell'involucro edilizio in Revit è organizzata tramite una struttura gerarchica a tre livelli, progettata per adattarsi alle diverse fasi di sviluppo del progetto, dal preliminare all'esecutivo. Il motore di calcolo elabora questi dati seguendo un preciso ordine di priorità, nel quale le informazioni più specifiche prevalgono sempre su quelle più generiche.
 - “Tipi Concettuali” che offrono valori predefiniti standardizzati da utilizzare in assenza di dati più dettagliati.
 - “Tipi Schematici” i quali, se attivati, sovrascrivono i valori dei tipi concettuali, consentendo una definizione delle prestazioni energetiche per macro-categorie di elementi.
 - “Elementi Dettagliati” ovvero quando ai materiali delle stratigrafie (come muri, solai e tetti) vengono assegnate proprietà termiche specifiche, il software ignora le configurazioni generali precedenti e utilizza i valori calcolati direttamente dalla geometria costruttiva reale. Questo garantisce un modello energetico estremamente preciso e fedele alla realtà, nonché la tipologia impiegata nel caso studio.

Impostazioni energetiche avanzate	
Parametro	Valore
Modello dettagliato	
Percentuale superficie vetrata	0%
Altezza davanzale	75.00
La vetrata è ombreggiata	☐
Lunghezza aggetto ombreggiante	45.72
Percentuale superficie lucernari	0%
Larghezza e profondità lucernario	91.44
Avanzate	
Complessità esportazione	Semplice con superfici ombreggiate
Tolleranza vani ridotti	0.00
Involuppo dell'edificio	Usa parametro Funzione
Dimensioni cella griglia analitica	91.44
Impianto edificio	
Classe di infiltrazione edificio	Stretto
Dati di costruzione	
Tipo di edificio	Beato Pellegrino 7-00 20-00
Abaco utilizzo dell'edificio	Default
Sistema riscaldamento, ventilazione e aria condizionata	VAV centrale, riscaldamento acqua calda, refrigeratore 5.96
Informazioni sui ricambi d'aria	Modifica...
Dati locali/vani	
Categoria di esportazione	Vani
Proprietà termiche dei materiali	
Tipi concettuali	Modifica...
Tipi schematici	<Edificio>
Elementi dettagliati	☒

figura 3.7: impostazioni energetiche avanzate

I parametri relativi alle impostazioni energetiche, sopra citati, vengono scelti in modo iterativo eseguendo diverse simulazioni e ponendo attenzione all'andamento dei risultati, così da comprendere come possono variare in relazioni ai settaggi utilizzati. Si ottengono quindi i vani analitici (figura 3.8 e figura 3.9) che non sono altro che elementi tridimensionali avanzati impiegati per studiare i volumi d'aria presenti all'interno di un edificio. Diversamente dalle stanze architettoniche, che delimitano le aree calpestabili, i vani analitici sono concepiti per raccogliere informazioni tecniche fondamentali, utili nei calcoli dei carichi termici (riscaldamento e raffrescamento) e nelle analisi energetiche [10].

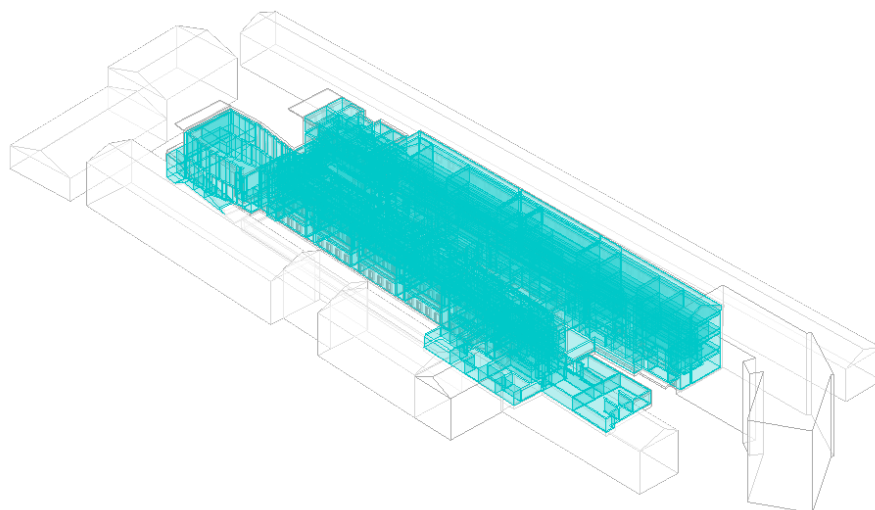


figura 3.8: vani analitici degli edifici A1-P1-P2-P3-P4

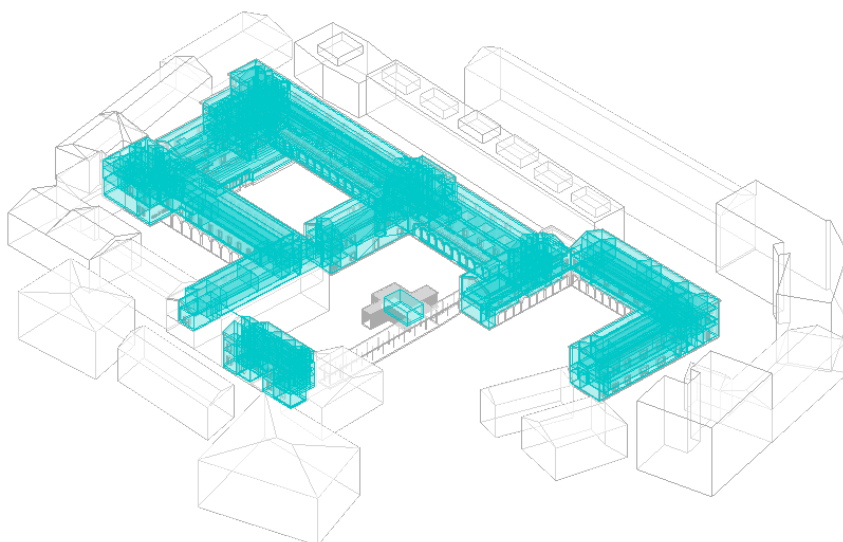


figura 3.9: vani analitici degli edifici B1-B2-B3-B4-C1-C2-C3-E-I-W

Una volta settate correttamente le impostazioni energetiche di base e avanzate è possibile avviare la “simulazione energetica dell’edificio annuale”, in modo da ottenere il report di simulazione con i consumi annuali relativi al riscaldamento e raffrescamento in $[kWh]$, nonché i picchi rispettivi della domanda di richiesta in $[W]$ e i corrispettivi valori di efficienza del complesso tramite l’indice di prestazione energetica globale non rinnovabile $EP_{gl,nren} \left[\frac{kWh}{m^2 \text{ year}} \right]$, il quale indica il consumo energetico annuo complessivo che l’edificio richiede, calcolato in funzione della sua superficie utile, i valori di prestazione energetica riferiti al solo riscaldamento e al solo raffrescamento $EP \left[\frac{kWh}{m^2 \text{ year}} \right]$ e anche i valori che indicano l’intensità del carico termico, ovvero il fabbisogno energetico per unità di superficie $\left[\frac{W}{m^2} \right]$, utili per il dimensionamento preliminare della potenza termica necessaria per riscaldare o raffreddare una stanza/edificio, per la scelta dei terminali, per valutare l’isolamento e l’efficienza energetica.

3.2 Processo di esportazione e importazione

Il passaggio dal modello tridimensionale BIM generato in Revit, all'ambiente di simulazione energetica in OpenStudio del modello BEM si basa sull'uso del formato gbXML come standard di scambio tra i due software. Questo schema dati, descritto precedentemente nei paragrafi 1.4 e 1.4.1, svolge un ruolo fondamentale nel trasferimento delle geometrie e delle proprietà termiche ai software di simulazione energetica.

Sebbene sia essenziale per garantire che diversi strumenti/software funzionino insieme, presenta alcune limitazioni, queste derivano dalla necessità di semplificare le geometrie. Tale aspetto richiede una gestione attenta durante l'applicazione, infatti il trasferimento delle informazioni non è solo un'operazione tecnica di conversione, ma un processo logico con diverse fasi di verifica.

3.2.1 Verifica preliminare

Nella fase iniziale, per affrontare le problematiche del formato gbXML, è stato svolto in Revit un controllo approfondito sul modello geometrico prima dell'esportazione. In questa fase si è prestata particolare attenzione alla definizione precisa dei delimitatori spaziali, assicurando la chiusura completa di ogni volume interno. Questo aiuta a generare una distribuzione coerente delle masse d'aria.

3.2.2 Generazione del modello analitico

La conversione al formato gbXML è avvenuta attraverso strumenti di esportazione specifici, presenti in Revit, capaci di generare un file strutturato secondo gli standard richiesti. Durante l'elaborazione, il software ha semplificato la complessità dell'architettura tridimensionale originale, ad esempio gli elementi volumetrici sono stati ridotti a configurazioni bidimensionali. Tali superfici sono posizionate lungo l'asse centrale degli elementi costruttivi o all'interno dei loro contorni interni. Durante questa fase, vengono assegnate automaticamente le condizioni al contorno preliminari e le superfici esterne disperdenti sono distinte dagli elementi divisori interni.

3.2.3 Importazione , validazione e miglioramenti

Dopo la generazione del modello analitico, questo è stato importato nel software di simulazione OpenStudio (figura 3.10 e figura 3.11) per una verifica dettagliata prima dell'avvio delle simulazioni energetiche vere e proprie.

Questa attività è fondamentale per ridurre gli errori dalla traduzione dei file gbXML, l'analisi qualitativa del modello ha permesso di valutare visivamente la coerenza delle geometrie esportate e di verificare la corretta connessione tra superfici interne adiacenti, tale processo avviene attraverso la scheda "Geometry" in OpenStudio dove è possibile visualizzare il modello in modalità "Boundary" così da avere la possibilità di controllare le superficie se sono rispettivamente interne od esterne, se sono esposto al sole e al vento oppure no (figura 3.12 e figura 3.13), quindi si esegue un controllo fondamentale sulla corretta esportazione del modello, dei vani analitici e di conseguenza dei volumi delle stanze e degli edifici che verranno considerati nelle simulazioni.

Inoltre, il controllo dell'allineamento delle normali e la verifica delle condizioni di adiacenza hanno garantito l'efficacia degli scambi termici per conduzione tra le diverse zone dell'edificio.

In seguito è possibile utilizzare strumenti secondari per migliorare il modello e correggere eventuali discrepanze analitiche che potrebbero emergere durante le fasi di esportazione e importazione dei dati.

Queste operazioni vengono effettuate tramite specifiche "Measures" presenti in OpenStudio, tra cui spicca quella denominata "Surface Matching". Nella transizione di un modello 3D BIM da Revit, il software di solito interpreta i muri interni tra due ambienti come entità distinte, separate da un'intercapedine d'aria di dimensioni minime. Grazie alla funzione di "Surface Matching", si procede a scansionare il modello per riunire le superfici adiacenti, convertendole in partizioni interne definite dal vincolo "Surface" e facilitando così lo scambio di calore tra le diverse zone dell'edificio.

Questo processo ha dunque assicurato una base geometrica robusta per integrare successivamente i profili d'uso e i componenti impiantistici richiesti dalla simulazione energetica.

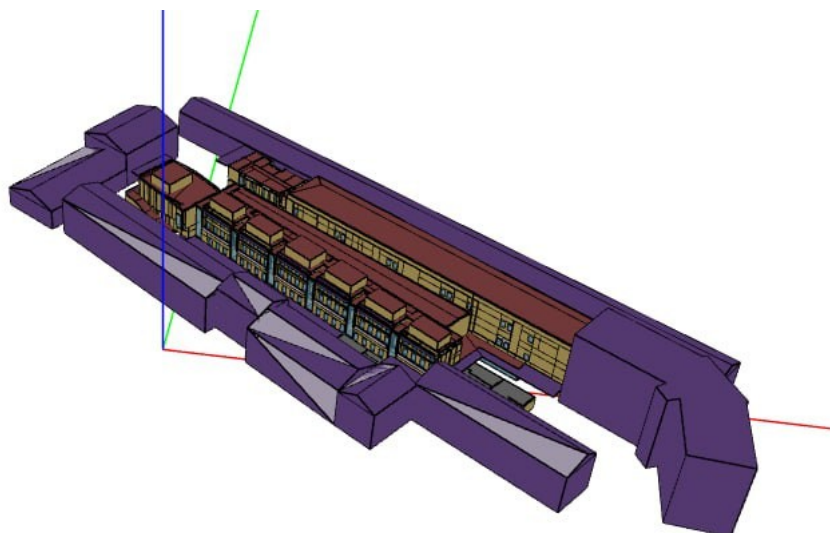


figura 3.10: modello 3D BEM degli edifici A1-P1-P2-P3-P4 importato in OpenStudio

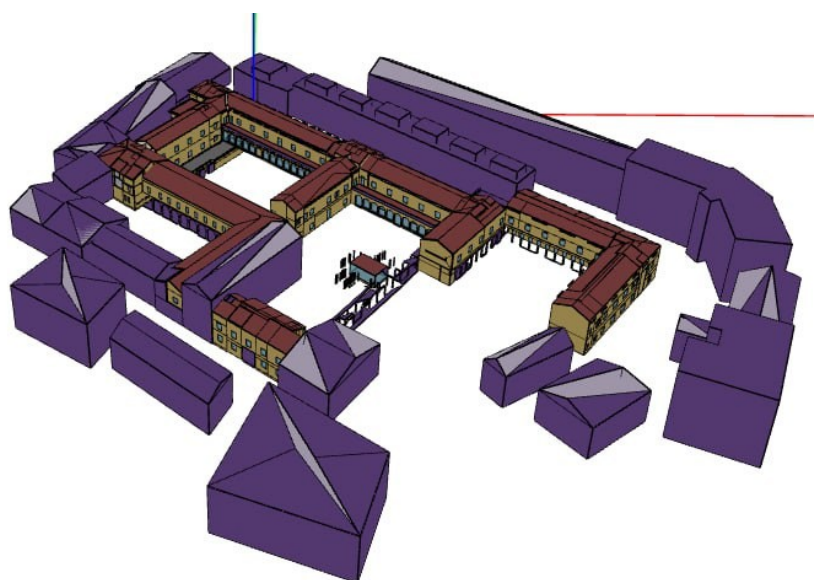


figura 3.11: modello 3D BEM degli edifici B1-B2-B3-B4-C1-C2-C3-E-I-W importato in OpenStudio

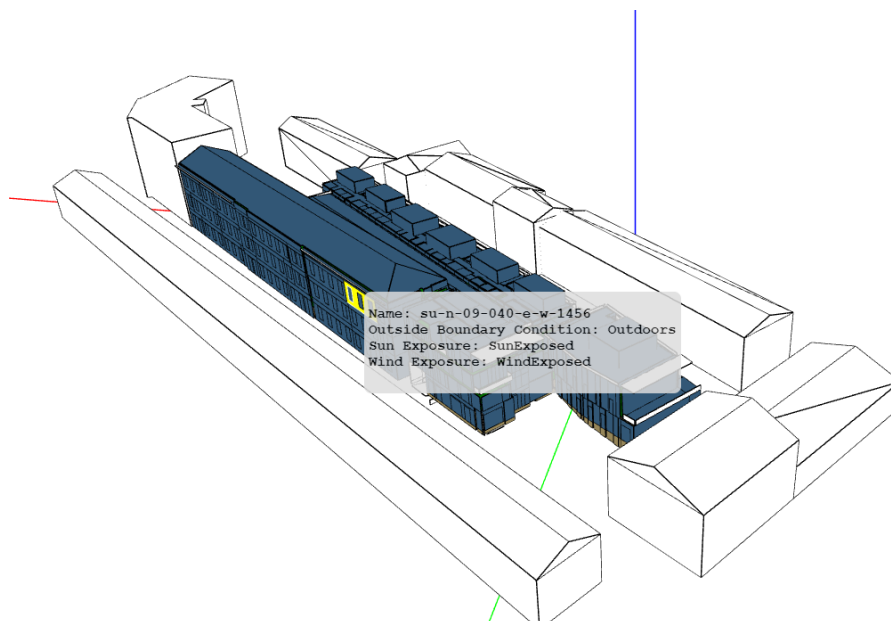


figura 3.12: esempio di superficie esterna, esposta al sole e al vento

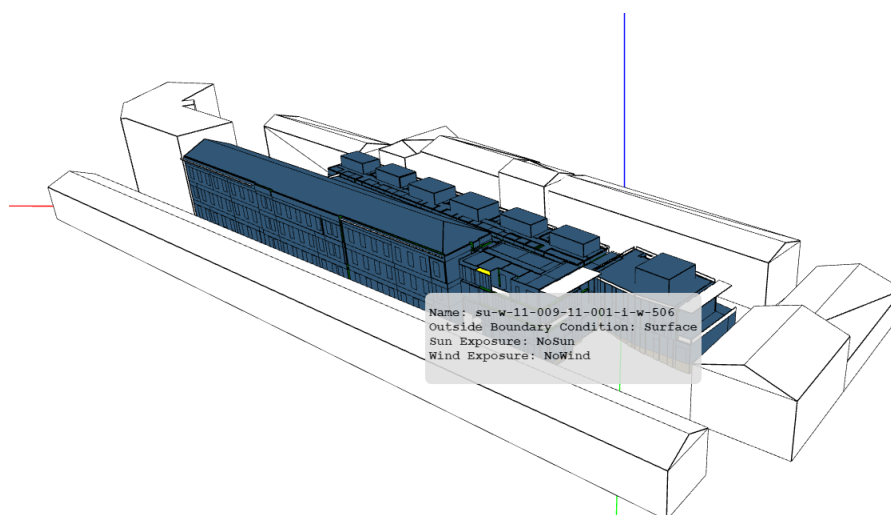


figura 3.13: esempio di superficie interna, non esposta al sole e al vento

3.3 Modellazione in OpenStudio

3.3.1 Sito

La configurazione del contesto climatico viene effettuata nella sezione Sito di OpenStudio.

Viene selezionato il file meteorologico di riferimento (.epw) per la località analizzata, impostando l'anno di simulazione (nel caso studio il 2025) e attivando automaticamente l'ora legale impostando il giorno di inizio e il giorno di fine. Tutto ciò consente anche di determinare con precisione le coordinate del luogo o della città nell'area di simulazione, oltre a identificare il fuso orario.

Un elemento fondamentale in questa fase consiste nell'importazione dei Giorni di Progetto (Design Days) tramite il file .ddy corrispondente. Questa integrazione dei dati climatici estremi rappresenta un passaggio indispensabile per abilitare il calcolo del dimensionamento (Zone Sizing). Tale operazione consente al software di determinare i carichi termici di picco, sia per il periodo invernale che estivo, specifici per ciascuna zona termica, separatamente dalla simulazione energetica su base annuale.

The screenshot shows the 'Sito' (Site) configuration window in OpenStudio. The window is divided into several sections: 'Weather File' (Nome: Padova.AP, Latitudine: 45.4, Longitudine: 11.85, TimeZone: 1), 'Site Information' (Keep Site Location Information: on, Quota: 14.000000 m, Terrain: City), 'Etichette Per Misure (Facoltativo):' (Zona Climatica ASHRAE, Zona Climatica CEC), 'Seleziona Anno Per:' (Anno Calendario: 2025, Primo Giorno Dell' Anno: Domenica), 'Ora Legale:' (on), 'Inizia:' (Seleziona Per Giorno Della Settimana E Mese: Ultima, Domenica, Marzo), 'Finisce:' (Seleziona Per Giorno Della Settimana E Mese: Ultima, Domenica, Ottobre), 'Giorni di Simulazione' (Importa Da DDY), and a table for 'Giorni Di Simulazione' with columns for Nome Del Giorno (Progetto), Tutti, Giorno Del Mese, Mese, Giorno (Tipo), and Ora Legale. The table contains two rows for 'Padova.AP Ann Clg .4% Condns DP=>MC' and 'Padova.AP Ann Clg 1% Condns DP=>MD', both with 'Giorno (Tipo)' set to 'SummerDesignDay'.

figura 3.14: scheda sito in OpenStudio

3.3.2 Schedules: profili di funzionamento

La simulazione dinamica prevede una definizione accurata dei profili di funzionamento, che determinano la presenza delle persone, l'utilizzo dei carichi interni come illuminazione (indicati in figura 7.15) ed equipaggiamenti, e il funzionamento del sistema di climatizzazione.

Diversamente dal calcolo stazionario, il quale si basa su valori medi o di picco statici, il modello dinamico adottato in OpenStudio modifica i valori di tali parametri su base oraria per coprire l'intero anno tipo.

I giorni di chiusura del complesso Beato Pellegrino utilizzati nelle simulazioni corrispondono a quelli previsti dal calendario accademico per l'anno 2024/2025 [11]. Nello specifico sono stati presi in considerazione i periodi di chiusura prolungata applicabili sia agli edifici destinati a uffici e aule, sia a quelli utilizzati come biblioteche e aule studio.

- Vacanze di Natale: da sabato 21 dicembre 2024 a lunedì 6 gennaio 2025
- Vacanze di Pasqua: da venerdì 18 aprile 2025 a martedì 22 aprile 2025
- Vacanze estive: da lunedì 4 agosto 2025 a sabato 16 agosto 2025

PARAMETRO	VALORE/ORARIO	PERIODO
Occupazione uffici e aule	07:00 ÷ 20:00 lun-ven 07:00 ÷ 14:00 sab	Tutto l'anno, tranne per i giorni di chiusura.
Occupazione biblioteche	09:00 ÷ 22:00 lun-ven 09:00 ÷ 18:00 sab-dom	Tutto l'anno, tranne per i giorni di chiusura.
Riscaldamento (comfort)	21°C	Dal 15/10 al 15/04, tranne per i giorni di chiusura.
Riscaldamento (attenuazione)	16°C	Dal 15/10 al 15/04
Riscaldamento (antigelo)	7°C	Durante i periodi di chiusura prolungati presenti dal 15/10 al 15/04
Raffrescamento (comfort)	26°C	Dal 15/04 al 15/10, tranne per i giorni di chiusura.
Raffrescamento (attenuazione)	OFF	Dal 15/04 al 15/10

tabella 3.1: sintesi dei parametri inerenti alle schedules

3.3.2.1 Occupazione

Per le aree dedicate a utilizzi specifici, come gli uffici amministrativi e la biblioteca, sono stati stabiliti dei profili di occupazione (indicati in figura 7.16 e figura 7.17) e funzionamento basati sugli orari effettivi di apertura del complesso.

Negli uffici il profilo di occupazione prevede un utilizzo dalle 07:00 alle 20:00 dal lunedì al venerdì, mentre il sabato l'orario è limitato dalle 07:00 alle 14:00 e la domenica non è prevista alcuna attività.

La biblioteca e le sale studio, caratterizzate da un intenso utilizzo, seguono un orario più ampio: dal lunedì al venerdì sono accessibili dalle 09:00 alle 22:00, mentre il sabato e la domenica l'apertura è dalle 09:00 alle 18:00. La densità di affollamento è stata calcolata sulla base del numero di posti disponibili, mostrando una percentuale di occupazione che varia in relazione alle fasce orarie. Si registra un picco tra il 95 e il 100% durante le ore centrali del giorno e una diminuzione nelle fasce di apertura iniziale o in prossimità della chiusura.

3.3.2.2 Regolazione termica

Le logiche operative del sistema di climatizzazione sono state configurate seguendo le disposizioni relative alle date di accensione degli impianti di riscaldamento in Italia per l'anno 2025, le quali sono principalmente disciplinate dal DPR 412/1993, integrato e modificato successivamente dal DPR 74/2013

Modalità invernale (Riscaldamento):

La stagione di riscaldamento è stata programmata seguendo il calendario della Zona Climatica E, ovvero dal 15 ottobre al 15 aprile (schedules indicate in figura 7.20 e figura 7.21).

- Setpoint di comfort (21°C): durante l'utilizzo degli ambienti, la temperatura operativa viene stabilizzata a 21°C ($\pm 0,5^\circ\text{C}$), assicurando il rispetto della categoria di comfort prevista dalla norma UNI EN 16798-1.
- Riduzione notturna / Setback (16°C): durante le ore di inattività, come nelle notti e nei fine settimana, il setpoint viene abbassato a 16°C. Questo valore, in linea con le pratiche tecniche, riduce le dispersioni termiche contenendo la differenza di temperatura rispetto all'esterno e garantisce un'inerzia termica adeguata, prevenendo così richieste energetiche elevate al momento del riavvio mattutino.
- Protezione antigelo (7°C): durante i periodi di chiusura prolungata, come le vacanze natalizie o pasquali, il sistema entra in modalità di protezione attivandosi esclusivamente nel caso in cui la temperatura interna scenda al di sotto dei 7°C. In questo modo vengono tutelati sia gli impianti sia i macchinari.

Modalità estiva (Climatizzazione):

La stagione di raffrescamento è stata programmata seguendo il calendario della Zona Climatica E, ovvero dal 15 aprile al 15 ottobre (schedules indicate in figura 7.18 e figura 7.19).

- Setpoint di Comfort (26°C): la temperatura prevista per la modalità estiva è fissata a 26°C, in linea con le normative che disciplinano la riduzione dei consumi energetici.
- Gestione notturna: durante i periodi di inattività, il sistema di raffrescamento viene disattivato o configurato su un setpoint di sicurezza più elevato. Nei casi in cui sia possibile, si privilegia l'impiego della ventilazione naturale o meccanica (free-cooling) per agevolare la dispersione del calore accumulato nel corso della giornata.

3.3.3 Space types

La classificazione delle zone termiche all'interno dell'ambiente di simulazione OpenStudio è stata organizzata tramite l'identificazione di tre principali categorie di locali (Space Types), ognuna delle quali caratterizzata da specifici profili di carico e di funzionamento:

1. Tipologia didattica e uffici (standard): questa categoria è stata applicata alla maggior parte delle zone occupate, come uffici, aule didattiche e sale riunioni. Rappresenta un profilo d'uso standard, con orari di occupazione e attivazione degli impianti strettamente legati agli orari lavorativi e didattici tipici.
2. Tipologia biblioteca e studio: dedicata a spazi con un'elevata intensità di utilizzo, come aule studio e biblioteche. Rispetto alla tipologia standard, presenta una maggiore durata temporale dei carichi interni (presenza di persone e utilizzo dell'illuminazione), rispecchiando gli orari prolungati tipici di questi ambienti.
3. Tipologia locali non climatizzati (unconditioned/vuoto): destinata ai volumi tecnici e di servizio, come plenum dei controsoffitti, vani sottotetto e intercapedini. In questi spazi, anche se fanno parte del modello geometrico, non sono previsti carichi interni (assenza di carichi) né terminali di climatizzazione, con setpoint di riscaldamento o raffrescamento assenti.

Space Type Name	All	Rendering Color	Default Construction Set	Default Schedule Set	Design Specification Outdoor Air	Space Infiltration Design Flow Rates
	☐		Apply to Selected	Apply to Selected	Apply to Selected	Apply to Selected
Space Type Biblioteca	☐			Biblioteca schedule	Ventilation 10 l/s px	Infiltration 0.5 ACH 1
Space Type standard	☐			Beato Pellegrino schedule	Ventilation 10 l/s px	Infiltration 0.5 ACH
Vuoto	☐					

figura 3.15: space types in OpenStudio

Portata d'aria esterna di progetto UNI EN 10339 – Ricambi di aria e ventilazione

La ventilazione meccanica è stata progettata configurando il parametro Design Specification Outdoor Air in linea con i requisiti di qualità dell'aria interna (IAQ). Sebbene la norma UNI EN 16798 consenta, per gli edifici esistenti, di ridurre i tassi di ventilazione fino a $6 \frac{l}{s \cdot persona}$, nel modello si è scelto prudentemente di rispettare valori più elevati, vicini a quelli indicati dalla UNI 10339 pari a $10 \frac{l}{s \cdot persona}$ ponendo attenzione sul comfort e l'igiene ambientale.

Questa decisione, sebbene comporti un aumento del fabbisogno energetico invernale dovuto al volume d'aria aggiuntivo da riscaldare, garantisce condizioni ottimali per lo studio e risulta conforme agli standard nazionali previsti per gli edifici scolastici e universitari.

3.3.3.1 Carichi (Loads)

Persone UNI 10339

Durante la fase di definizione del modello energetico è stato preliminarmente ipotizzato un indice di affollamento medio pari a $n_{s\text{ medio}} = 0,2 \frac{\text{persone}}{\text{m}^2}$.

Successivamente, tale stima è stata sottoposta a un processo di verifica analitico mediante un calcolo basato sulla media ponderata delle superfici nette dei locali e sugli indici di affollamento n_s (tabella 3.2 e tabella 7.2 in appendice) stabiliti dalla norma UNI 10339.

Il risultato di tale calcolo ha restituito un valore puntuale di: $0,21 \frac{\text{persone}}{\text{m}^2}$

	n_s	% superfici nette dei locali	$n_{s\text{ medio}}$
UFFICI	0,06	26,16%	0,2101
AULE	0,6	15,52%	
BIBLIOTECHE	0,3	33,75%	

tabella 3.2: indici di affollamento n_s per categoria di edifici e $n_{s\text{ medio}}$

Nonostante il valore risultante sia leggermente superiore alla stima iniziale, si è scelto di mantenere nel modello energetico definitivo l'indice originale di $0,20 \frac{\text{persone}}{\text{m}^2}$ (figura 7.22).

Questa leggera riduzione è stata adottata per integrare il fattore di contemporaneità, considerando che, a differenza del calcolo normativo che somma la capienza massima teorica di ogni ambiente (aule, connettivi, servizi) come se fossero occupati simultaneamente, nella realtà operativa i flussi sono più dinamici.

Ad esempio, la presenza di studenti nei corridoi o nei servizi segnala la loro temporanea assenza dalle aule.

L'adozione del valore di $0,20 \frac{\text{persone}}{\text{m}^2}$ consente dunque di rappresentare un carico medio più realistico sull'intero edificio, evitando una sovrastima dei picchi di ventilazione e raffrescamento che deriverebbe dall'assunzione di una piena occupazione simultanea di tutti gli spazi.

Luci UNI EN 12464-1

Il valore della potenza elettrica destinata all'illuminazione artificiale è stato determinato in conformità con i criteri di comfort visivo definiti dalla norma UNI EN 12464-1, la quale prevede un illuminamento medio di $E_M = 500 \text{ lux}$ per ambienti quali aule, uffici e sale lettura delle biblioteche.

Al fine di tradurre tale requisito in carico termico ed elettrico $\frac{W}{\text{m}^2}$, è stato preso in considerazione l'impiego di apparecchi di illuminazione basati su tecnologia LED di ultima generazione.

Nel calcolo è stata assunta un'efficienza luminosa di sistema η compresa tra $70 \div 75 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$, valore che tiene conto delle perdite associate agli ausiliari e al fattore di manutenzione. Sulla base di tali presupposti, il carico elettrico è stato determinato secondo la seguente metodologia:

$$\frac{500 \text{ lux}}{70 \frac{\text{lm}}{\text{W}}} = 7,143 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Tale valore è stato prudentemente arrotondato a $7,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ nel modello OpenStudio (figura 7.23).

Inoltre il dato risulta in linea con i limiti di densità di potenza (LPD) indicati dallo standard energetico internazionale ASHRAE 90.1-2019 per edifici scolastici, secondo il metodo Space-by-Space che raccomanda valori tra $6,9 \div 7,6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ per uffici e aule didattiche.

Apparecchiature elettriche ASHRAE 90.1 e standard NREL

Per stimare i carichi termici derivanti dalle apparecchiature elettriche, comunemente indicate come "Plug Loads", ad esempio computer, proiettori e stampanti, è stato applicato un valore medio di $5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ per l'intero edificio (figura 7.24).

Tale parametro è stato calcolato facendo riferimento agli standard internazionali di modellazione energetica ASHRAE 90.1 e ai modelli di riferimento elaborati dal NREL (National Renewable Energy Laboratory) per edifici commerciali, in particolare alla categoria "Educational/Secondary School".

Questi standard stabiliscono per le scuole, e quindi adattabili anche alle università, una densità di potenza compresa tra $4,8 \div 5,5 \frac{W}{m^2}$

La scelta del valore di $5 \frac{W}{m^2}$ riflette le specificità dell'utenza universitaria del complesso. Questo tipo di utenza si distingue per l'impiego predominante di dispositivi personali a basso consumo energetico, come pc portatili e tablet nelle aule e nelle sale studio, diversamente da ambienti ad alta densità di pc con postazioni fisse, come uffici amministrativi, che richiederebbero valori superiori a $10 \frac{W}{m^2}$

Inoltre la stima tiene conto delle aree di connessione e i locali di servizio, dove il contributo dei carichi legati alle apparecchiature risulta nullo.

Infiltrazioni di aria esterna

Per quanto concerne le infiltrazioni d'aria involontarie attraverso l'involucro edilizio, è stato considerato un valore costante di $0,5 ACH$ (*Air Changes per Hour*) (ricambi d'aria per ora). Sebbene gli standard energetici più avanzati, come quelli previsti dal protocollo Passivhaus o dagli NZEB altamente performanti, richiedano livelli di tenuta all'aria molto elevati, con valori minori di $0,6 ACH$ misurati con una pressione introdotta di 50 Pa), la scelta di utilizzare in simulazione un tasso di ricambio naturale pari a di $0,5 ACH$ trova giustificazione in tre fattori specifici legati al caso studio:

1. Considerando il valore storico del complesso Beato Pellegrino, le interazioni tra le strutture murarie preesistenti e i nuovi serramenti costituiscono inevitabili punti di dispersione acustica e termica, oltre a rappresentare criticità per quanto riguarda la permeabilità all'aria. Garantire una tenuta perfetta richiederebbe interventi invasivi come una nastratura e sigillatura costanti che risultano spesso incompatibili con la salvaguardia del patrimonio architettonico.
2. In assenza di un Blower Door Test per certificare l'ermeticità dell'involucro ristrutturato, si è scelta una strategia conservativa. Impiegare i parametri tipici delle nuove costruzioni $0,1 \div 0,2 ACH$ senza una verifica strumentale avrebbe potuto portare a una sottostima delle dispersioni con il rischio di dimensionare in modo insufficiente la potenza di picco richiesta per il riscaldamento.
3. Il valore di $0,5 ACH$ include in modo complessivo e prudentiale sia le infiltrazioni attraverso le fessure sia la permeabilità legata all'uso operativo, causata dall'elevata frequenza di apertura delle porte d'ingresso e dei passaggi verso l'esterno, caratteristica tipica di un edificio universitario con un alto flusso di studenti. Questo approccio assicura che i risultati della simulazione siano affidabili e orientati al lato della sicurezza, rappresentando fedelmente le condizioni operative effettive ed evitando valutazioni energetiche troppo ottimistiche.

Space Type Name	All	Load Name	Multiplier	Definition	Schedule	Activity Schedule (People Only)
	☐		Apply to Selected		Apply to Selected	Apply to Selected
Space Type Biblioteca	☐	People 2	1.000000	People Definition Beato Pellegrino	Biblioteca occupancy	Beato Pellegrino activity
	☐	Lights 2	1.000000	Lights Definition Beato Pellegrino	Biblioteca occupancy	
	☐	Electric Equipment 2	1.000000	Electric Equipment Definition Bea	Biblioteca occupancy	
	☐	Infiltration 0.5 ACH 1				
Space Type standard	☐	People 1	1.000000	People Definition Beato Pellegrino	Beato Pellegrino occupan	Beato Pellegrino activity
	☐	Lights 1	1.000000	Lights Definition Beato Pellegrino	Beato Pellegrino light	
	☐	Electric Equipment 1	1.000000	Electric Equipment Definition Bea	Beato Pellegrino occupan	
	☐	Infiltration 0.5 ACH				
Vuoto						

figura 3.16: carichi relative a persone, luci, apparecchiature elettriche e infiltrazioni di aria esterna

4. Analisi e risultati: Revit

L'analisi energetica condotta con Autodesk Revit si suddivide in due simulazioni, entrambe sono progettate per esaminare in dettaglio due scenari operativi specifici:

- Simulazione 1: modello con tende esterne abbassate
- Simulazione 2: modello con tende esterne alzate

Con il termine modello si fa riferimento all'insieme degli edifici, senza includere direttamente nelle impostazioni energetiche il recupero di calore durante la stagione invernale. Si tratta di un aspetto rilevante che sarà analizzato in OpenStudio attraverso alcune simulazioni, valutando l'impatto sui consumi energetici e sui picchi di domanda legati al riscaldamento.

BUILDINGS AREA	Total Building Area	Net Conditioned Building Area	Unconditioned Building Area
Buildings A-P	14002,6	9058,5	4944,1
Buildings B-C1-W	5100,3	3816,8	1283,6
Buildings C2-C3-E-I	5512,1	4018,9	1493,3
Total [m²]	24615,0	16894,1	7720,9

tabella 4.1: aree edifici, totale, climatizzata e non climatizzata

4.1 Simulazione 1: modello con tende esterne abbassate

Il primo scenario analizzato definisce la configurazione di base del complesso edilizio modellato in Revit. Questo modello rappresenta l'edificio nelle sue normali condizioni di progetto e di esercizio, fornendo la base quantitativa (fabbisogni energetici e carichi di picco) necessaria per valutare l'efficacia delle successive varianti.

In questa specifica configurazione gli edifici A1, P1 e P3 sono stati modellati prevedendo l'abbassamento delle schermature esterne, una strategia passiva fondamentale per mitigare l'irraggiamento solare, ridurre il fabbisogno di raffrescamento e abbattere il relativo picco di carico estivo.

SITE AND SOURCE ENERGY		Total Energy $\left[\frac{MWh}{year}\right]$	Energy Per Total Building Area $\left[\frac{kWh}{m^2 year}\right]$	Energy Per Conditioned Building Area $\left[\frac{kWh}{m^2 year}\right]$
Buildings A-P	Total/Net Site Energy	806,50	57,60	89,03
Buildings B-C1-W	Total/Net Site Energy	845,46	165,77	221,51
Buildings C2-C3-E-I	Total/Net Site Energy	541,50	98,24	134,74
Total	Total Site Energy	2193,45	89,11	129,84
	Total Source Energy without efficiency of heat pumps	2844,94	115,58	168,40
	Total Source Energy with efficiency of heat pumps	2294,21	93,20	135,80

tabella 4.2: fabbisogno di energia finale e consumo di energia primaria

4.1.1 Fabbisogni di energia

COOLING CONSUMPTION	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	Total [MWh]
Buildings A-P	0,00	0,00	0,00	0,48	17,28	58,96	78,38	42,36	17,67	1,22	0,00	0,00	216,34
Buildings B-C1-W	0,00	0,00	0,00	4,40	43,73	90,77	117,88	57,77	42,82	7,56	0,00	0,00	364,92
Buildings C2-C3-E-I	0,00	0,00	0,00	0,77	16,79	49,81	63,48	34,52	14,71	1,26	0,00	0,00	181,34
Total [MWh]	0,00	0,00	0,00	5,64	77,79	199,53	259,75	134,66	75,19	10,04	0,00	0,00	762,61

tabella 4.3: fabbisogno di energia termica per il raffrescamento

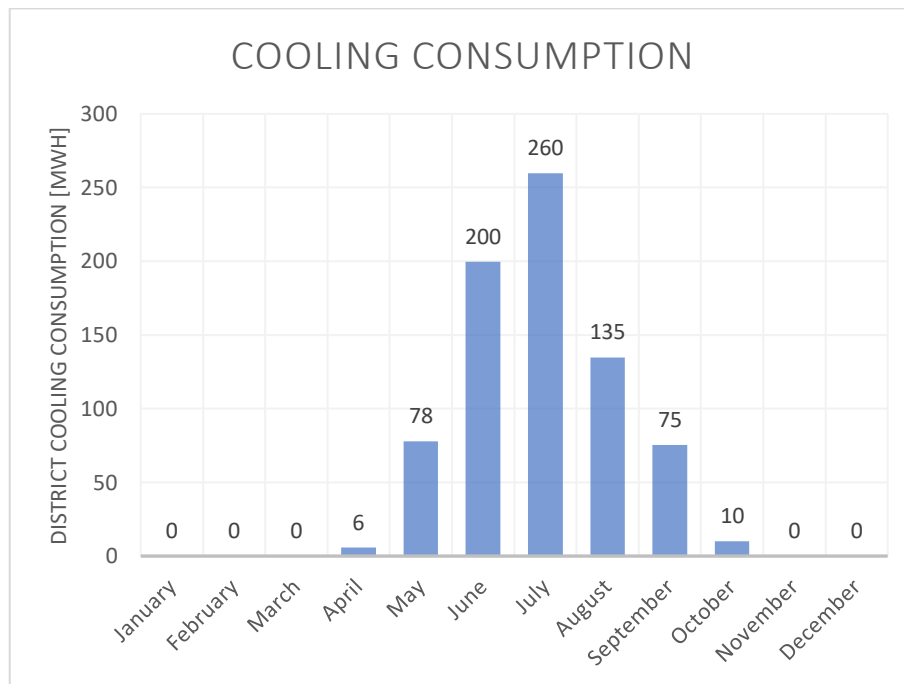


figura 4.1: grafico fabbisogno di energia termica per il raffrescamento

HEATING CONSUMPTION	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	Total [MWh]
Buildings A-P	72,54	49,59	21,30	1,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,87	20,83	57,32	223,56
Buildings B-C1-W	91,16	67,11	31,13	3,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,96	40,76	66,08	304,52
Buildings C2-C3-E-I	62,67	42,46	19,05	1,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,67	19,98	50,20	197,51
Total [MWh]	226,37	159,15	71,49	5,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,50	81,57	173,61	725,59

tabella 4.4: fabbisogno di energia termica per il riscaldamento

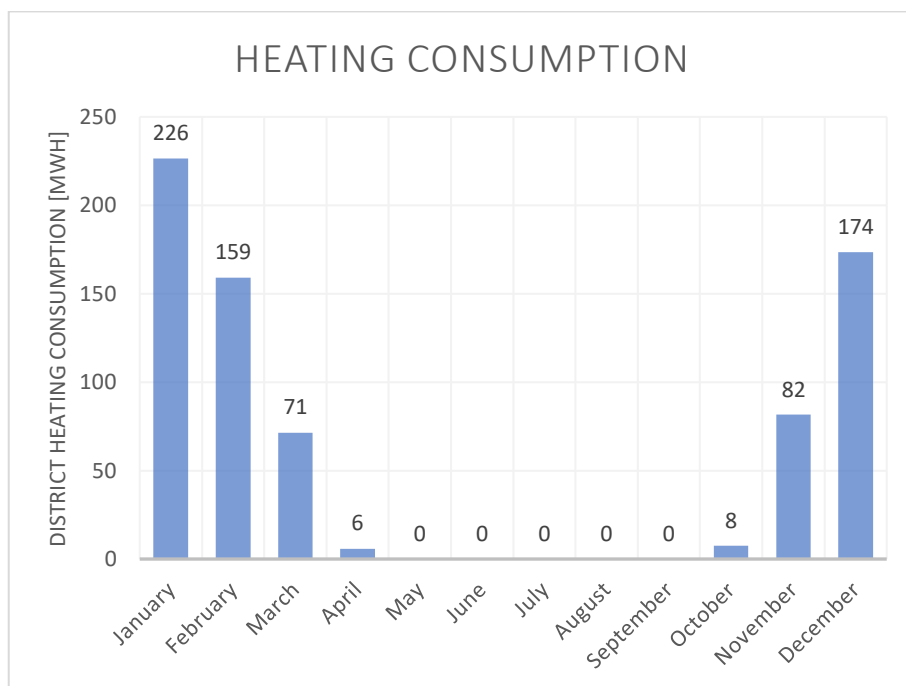


figura 4.2: grafico fabbisogno di energia termica per il riscaldamento

EP $\left[\frac{kWh}{m^2 \text{ year}} \right]$	
COOLING	HEATING
45,14	42,95

tabella 4.5: indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale ed estiva

4.1.2 Carichi termici di picco

COOLING PEAK DEMAND	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Buildings A-P	0,00	0,00	0,00	97,97	397,97	544,90	635,57	579,54	315,92	150,41	0,00	0,00
Buildings B-C1-W	0,00	0,00	0,00	204,46	396,85	499,03	559,02	503,95	323,08	234,41	0,00	0,00
Buildings C2-C3-E-I	0,00	0,00	0,00	79,09	254,69	341,56	387,47	360,64	206,28	89,61	0,00	0,00
Total [kW]	0,00	0,00	0,00	381,52	1049,51	1385,49	1582,06	1444,14	845,27	474,43	0,00	0,00

tabella 4.6: carichi termici di picco per il raffrescamento

COOLING PEAK DEMAND	
[kW]	[W/m ²]
1582,1	93,65

tabella 4.7: carico termico di picco per il raffrescamento

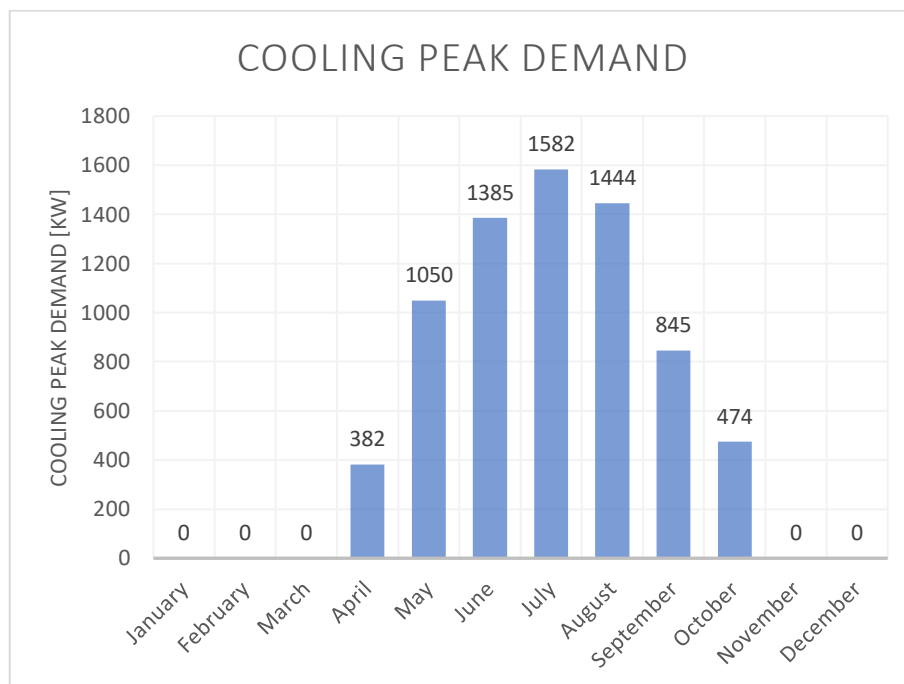


figura 4.3: grafico carichi termici di picco per il raffrescamento

HEATING PEAK DEMAND	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Buildings A-P	473,11	349,35	289,46	60,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	72,64	279,12	370,62
Buildings B-C1-W	448,34	390,84	304,63	150,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	188,56	310,22	368,13
Buildings C2-C3-E-I	285,54	216,95	194,10	75,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	83,53	168,21	243,24
Total [kW]	1206,99	957,15	788,19	287,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	344,73	757,55	981,99

tabella 4.8: carichi termici di picco per il riscaldamento

HEATING PEAK DEMAND	
[kW]	[W/m ²]
1207,0	71,44

tabella 4.9: carico termico di picco per il riscaldamento

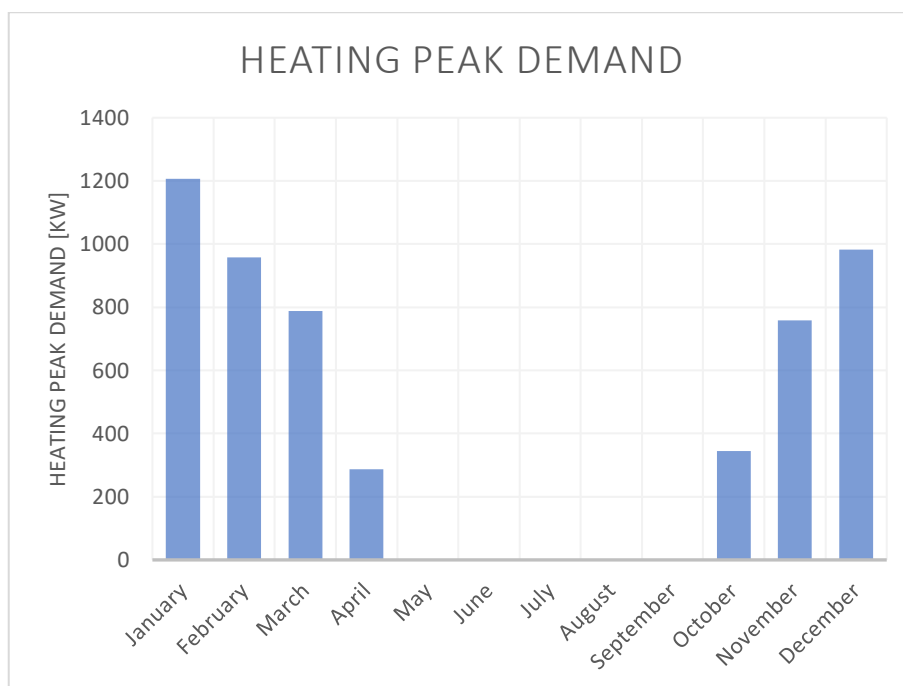


figura 4.4: grafico carichi termici di picco per il riscaldamento

4.2 Simulazione 2: modello con tende esterne alzate

Questa simulazione analizza l'impatto termico causato dall'assenza totale di schermature esterne solari e permette di confrontarlo con lo scenario di riferimento. Nel modello energetico adottato, le tende esterne degli edifici A1, P1 e P3 sono state tenute in posizione ritratta, quindi senza ombreggiatura. Questa configurazione ha massimizzato i guadagni solari gratuiti, ma ha anche esposto gli ambienti al livello massimo di irraggiamento estivo. I grafici e le tabelle che seguono hanno l'obiettivo di quantificare l'aumento della domanda di energia necessaria per il raffrescamento e il conseguente incremento del picco di potenza richiesto.

SITE AND SOURCE ENERGY		Total Energy $\left[\frac{MWh}{year}\right]$	Energy Per Total Building Area $\left[\frac{kWh}{m^2 year}\right]$	Energy Per Conditioned Building Area $\left[\frac{kWh}{m^2 year}\right]$
Buildings A-P	Total/Net Site Energy	985,63	70,39	108,81
Buildings B-C1-W	Total/Net Site Energy	845,46	165,77	221,51
Buildings C2-C3-E-I	Total/Net Site Energy	541,50	98,24	134,74
Total	Total Site Energy	2372,58	96,39	140,44
	Total Source Energy without efficiency of heat pumps	2942,75	119,55	174,19
	Total Source Energy with efficiency of heat pumps	2396,91	97,38	141,88

tabella 4.10: fabbisogno di energia finale e consumo di energia primaria

4.2.1 Fabbisogni di energia

COOLING CONSUMPTION	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	Total [MWh]
Buildings A-P	0,00	0,00	0,00	2,09	40,67	102,74	129,33	69,56	38,46	4,37	0,00	0,00	387,22
Buildings B-C1-W	0,00	0,00	0,00	4,40	43,73	90,77	117,88	57,77	42,82	7,56	0,00	0,00	364,92
Buildings C2-C3-E-I	0,00	0,00	0,00	0,77	16,79	49,81	63,48	34,52	14,71	1,26	0,00	0,00	181,34
Total [MWh]	0,00	0,00	0,00	7,26	101,19	243,32	310,70	161,85	95,98	13,19	0,00	0,00	933,48

tabella 4.11: fabbisogno di energia termica per il raffrescamento

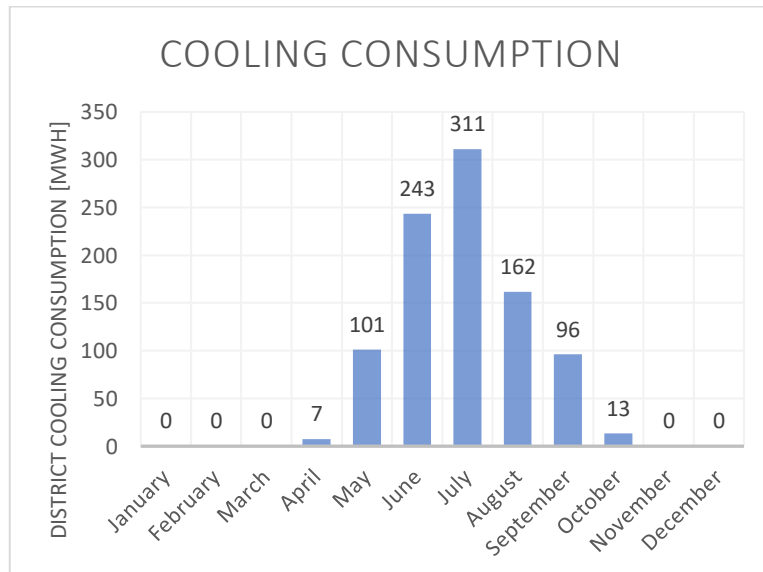


figura 4.5: grafico fabbisogno di energia termica per il raffrescamento

HEATING CONSUMPTION	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	Total [MWh]
Buildings A-P	81,59	52,97	19,39	0,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,68	17,03	59,51	231,81
Buildings B-C1-W	91,16	67,11	31,13	3,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,96	40,76	66,08	304,52
Buildings C2-C3-E-I	62,67	42,46	19,05	1,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,67	19,98	50,20	197,51
Total [MWh]	235,43	162,53	69,57	5,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,32	77,77	175,80	733,84

tabella 4.12: fabbisogno di energia termica per il riscaldamento

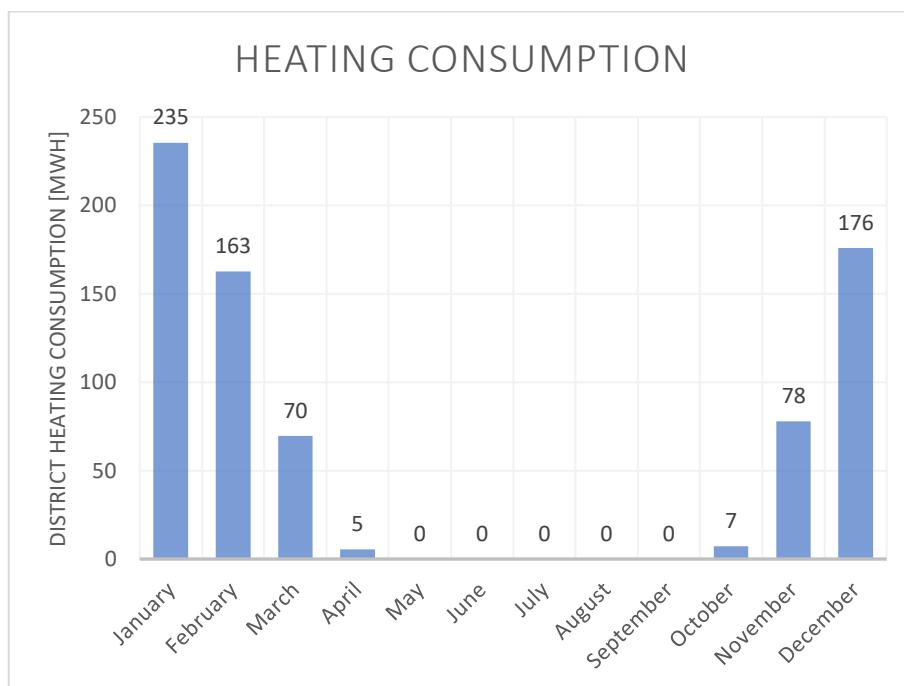


figura 4.6: grafico fabbisogno di energia termica per il riscaldamento

EP $\left[\frac{kWh}{m^2 \text{ year}} \right]$	
COOLING	HEATING
55,25	43,44

tabella 4.13: indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale ed estiva

4.2.2 Carichi termici di picco

COOLING PEAK DEMAND	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Buildings A-P	0,00	0,00	0,00	191,53	517,28	663,98	765,19	711,12	434,46	242,53	0,00	0,00
Buildings B-C1-W	0,00	0,00	0,00	204,46	396,85	499,03	559,02	503,95	323,08	234,41	0,00	0,00
Buildings C2-C3-E-I	0,00	0,00	0,00	79,09	254,69	341,56	387,47	360,64	206,28	89,61	0,00	0,00
Total [kW]	0,00	0,00	0,00	475,08	1168,81	1504,57	1711,68	1575,71	963,81	566,56	0,00	0,00

tabella 4.14: carichi termici di picco per il raffrescamento

COOLING PEAK DEMAND	
[kW]	[W/m ²]
1711,7	101,32

tabella 4.15: carico termico massimo di picco per il raffrescamento

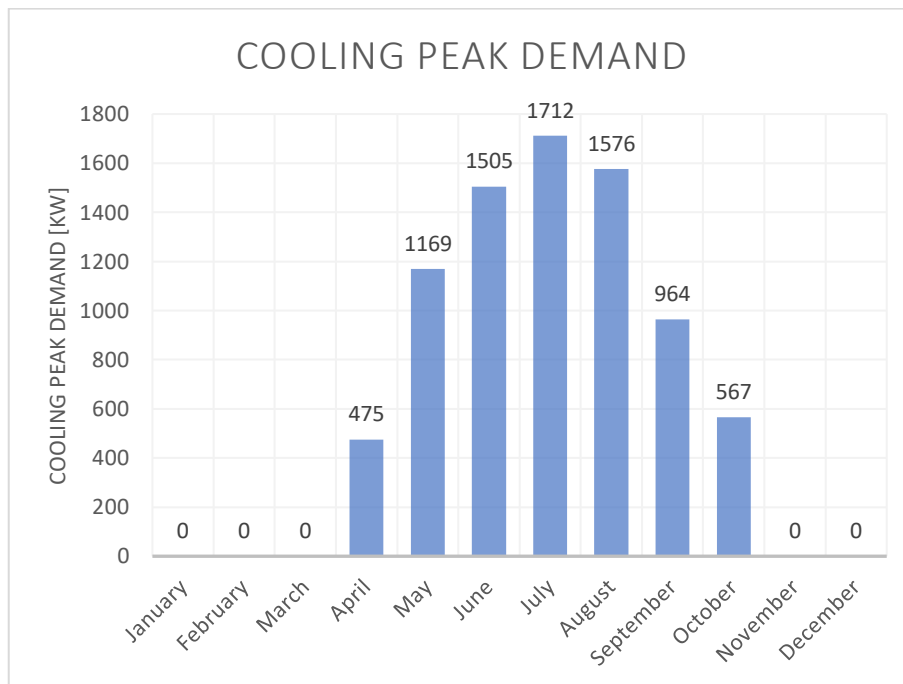


figura 4.7: grafico carichi termici di picco per il raffrescamento

HEATING PEAK DEMAND	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Buildings A-P	498,95	375,30	335,21	79,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	73,25	268,73	419,40
Buildings B-C1-W	448,34	390,84	304,63	150,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	188,56	310,22	368,13
Buildings C2-C3-E-I	285,54	216,95	194,10	75,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	83,53	168,21	243,24
Total [kW]	1232,83	983,10	833,94	306,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	345,34	747,16	1030,77

tabella 4.16: carichi termici di picco per il riscaldamento

HEATING PEAK DEMAND	
[kW]	[W/m ²]
1232,8	72,97

tabella 4.17: carico termico di picco per il riscaldamento

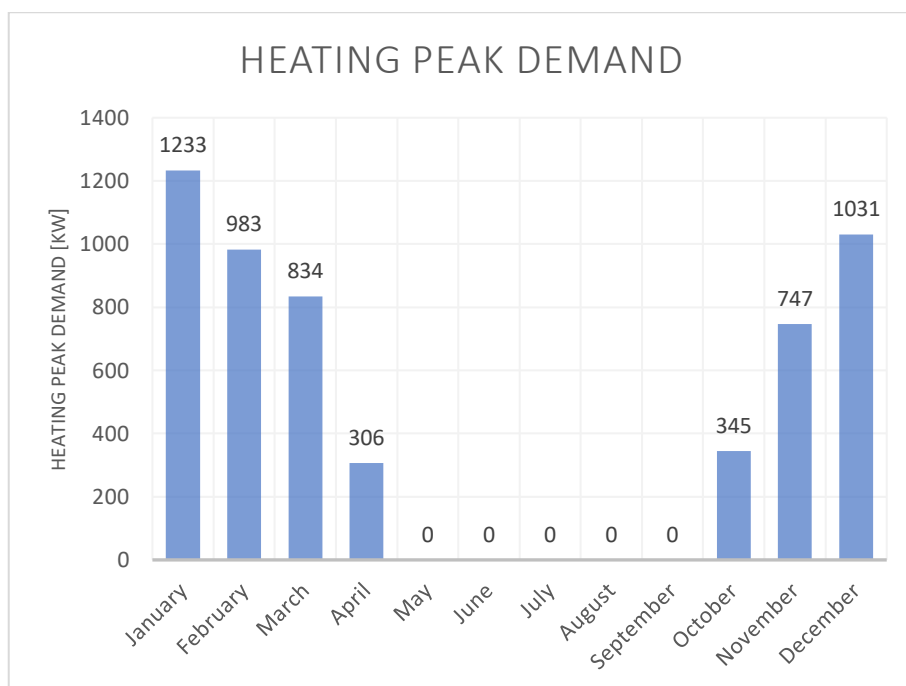


figura 4.8: grafico carichi termici di picco per il riscaldamento

5. Analisi e risultati: OpenStudio

Il passaggio all'ambiente di simulazione in OpenStudio ha offerto un livello molto superiore di parametrizzazione e una gestione più precisa dei dati di input rispetto alla configurazione iniziale in Revit. Questo progresso ha permesso un miglioramento sistematico del modello energetico del complesso, intervenendo con attenzione e precisione su aspetti fondamentali che influenzano il bilancio termodinamico reale dell'edificio.

In particolare le capacità del software hanno reso possibile:

- *Impostare dettagliatamente i profili d'uso (Schedules)*: i carichi termici interni sono stati stabiliti con attenzione, sono stati considerati parametri come occupazione, illuminazione e uso delle apparecchiature elettriche. A ciascun elemento è stato assegnato un profilo specifico di funzionamento e questo profilo varia sia a livello orario sia stagionale. Infatti sono state incluse anche le modifiche legate alla gestione dell'ora legale.
- *Definizione dei periodi di accensione degli impianti*: sono stati stabiliti con precisione i periodi di attivazione per i sistemi di riscaldamento e raffrescamento. Questo supera una limitazione legata alla modellazione in Revit, il cui aspetto verrà esaminato più approfonditamente nei paragrafi successivi.
- *Ottimizzare le zone termiche*: la definizione e l'assegnazione delle destinazioni d'uso alle varie zone termiche sono molto più veloci in OpenStudio. Queste operazioni sono gestite tramite un unico file e possono essere facilmente ripetute e modificate.

Questo aspetto è stato fondamentale per ridurre i tempi di calcolo delle differenti simulazioni.

In Revit la funzione per creare in modo automatico i vani analitici non consente di distinguere facilmente tra diverse tipologie. Di conseguenza, è necessaria un'assegnazione manuale, che richiede molto tempo e risulta un'operazione particolarmente impegnativa, data la complessità del modello che include 15 edifici con centinaia di stanze.

BUILDINGS AREA	Total Building Area	Net Conditioned Building Area	Unconditioned Building Area
Buildings A-P	14002,6	9058,5	4944,1
Buildings B-C-E-I-W	10608,6	7831,8	2776,8
Total [m²]	24611,2	16890,3	7720,9

tabella 5.1: aree edifici, totale, climatizzata e non climatizzata

5.1 Simulazione 3: modello con tende esterne abbassate

SITE AND SOURCE ENERGY		Total Energy [MWh] [year]	Energy Per Total Building Area [$\frac{kWh}{m^2 \cdot year}$]	Energy Per Conditioned Building Area [$\frac{kWh}{m^2 \cdot year}$]
Buildings A-P	Total/Net Site Energy	868,17	62,00	95,80
Buildings B-C-E-I-W	Total/Net Site Energy	816,48	77,00	104,20
Total	Total Site Energy	1684,64	68,45	99,74
	Total Source Energy without efficiency of heat pumps	2228,81	90,56	131,96
	Total Source Energy with efficiency of heat pumps	1882,66	76,50	111,46

tabella 5.2: fabbisogno di energia finale e consumo di energia primaria

5.1.1 Fabbisogni di energia

COOLING CONSUMPTION	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	Total [MWh]
Buildings A-P	0,00	0,00	0,00	1,64	21,65	69,12	112,18	53,62	40,38	6,39	0,00	0,00	304,98
Buildings B-C-E-I-W	0,00	0,00	0,00	1,48	19,01	62,89	107,87	49,75	33,35	4,88	0,00	0,00	279,23
Total [MWh]	0,00	0,00	0,00	3,12	40,66	132,01	220,05	103,37	73,73	11,27	0,00	0,00	584,22

tabella 5.3: fabbisogno di energia termica per il raffrescamento

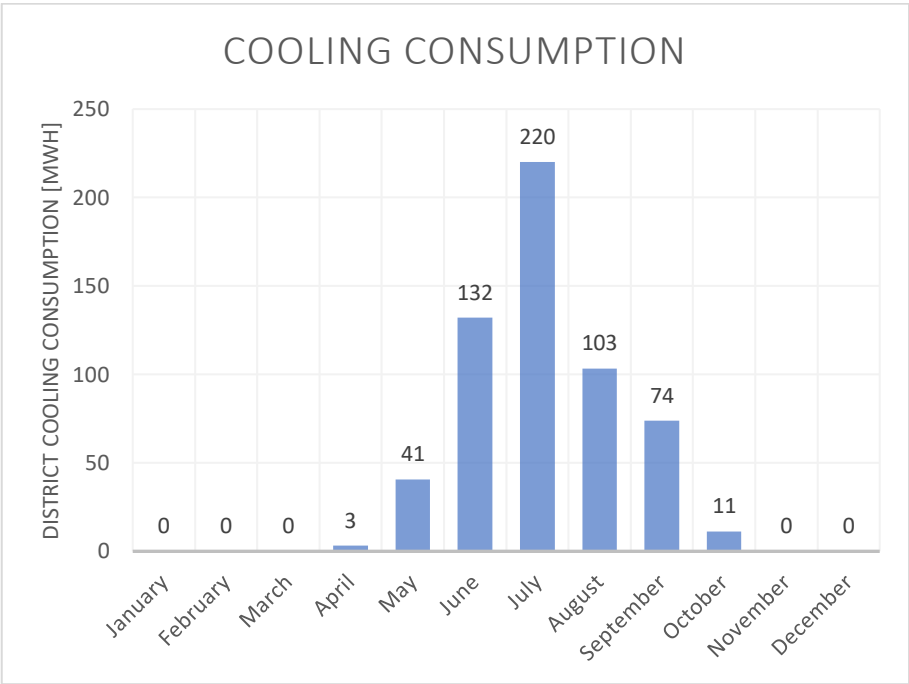


figura 5.1: grafico fabbisogno di energia termica per il raffrescamento

HEATING CONSUMPTION	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	Total [MWh]
Buildings A-P	73,74	52,79	19,30	0,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,63	28,31	44,22	221,82
Buildings B-C-E-I-W	78,32	55,69	22,39	0,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,45	33,08	48,10	242,92
Total [MWh]	152,06	108,47	41,70	1,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,08	61,39	92,32	464,74

tabella 5.4: fabbisogno di energia termica per il riscaldamento

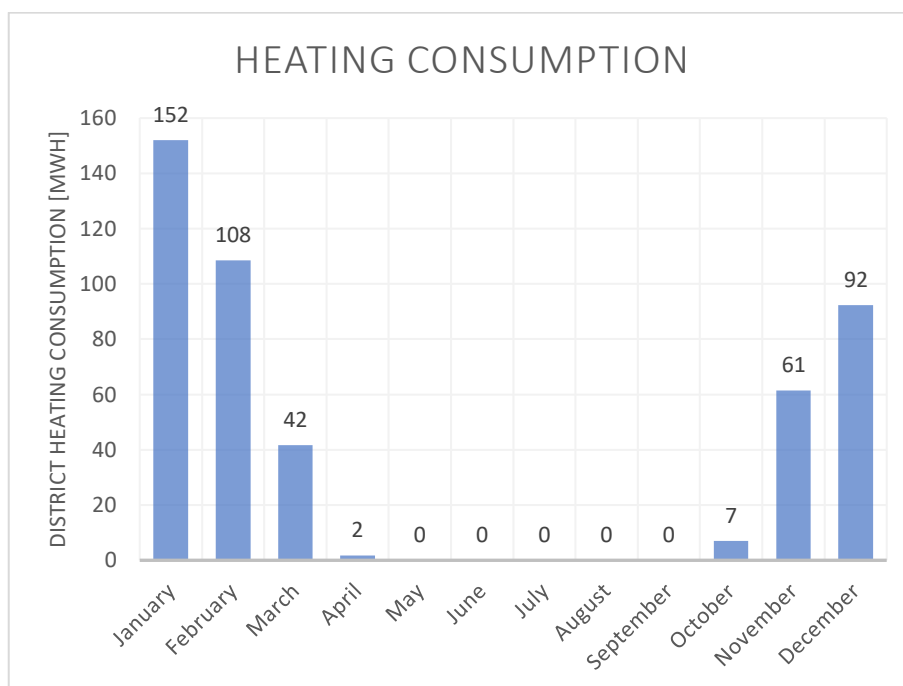


figura 5.2: grafico fabbisogno di energia termica per il riscaldamento

EP $\left[\frac{kWh}{m^2 \text{ year}} \right]$	
COOLING	HEATING
34,59	27,51

tabella 5.5: indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale ed estiva

5.1.2 Carichi termici di picco

COOLING PEAK DEMAND	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Buildings A-P	0,00	0,00	0,00	180,01	411,97	572,70	823,22	771,49	469,49	267,65	0,00	0,00
Buildings B-C-E-I-W	0,00	0,00	0,00	144,27	365,51	536,05	756,16	713,23	413,47	229,37	0,00	0,00
Total [kW]	0,00	0,00	0,00	324,28	777,48	1108,75	1579,38	1484,73	882,96	497,02	0,00	0,00

tabella 5.6: carichi termici di picco per il raffrescamento

COOLING PEAK DEMAND	
[kW]	[W/m ²]
1579,4	93,51

tabella 5.7: carico termico massimo di picco per il raffrescamento

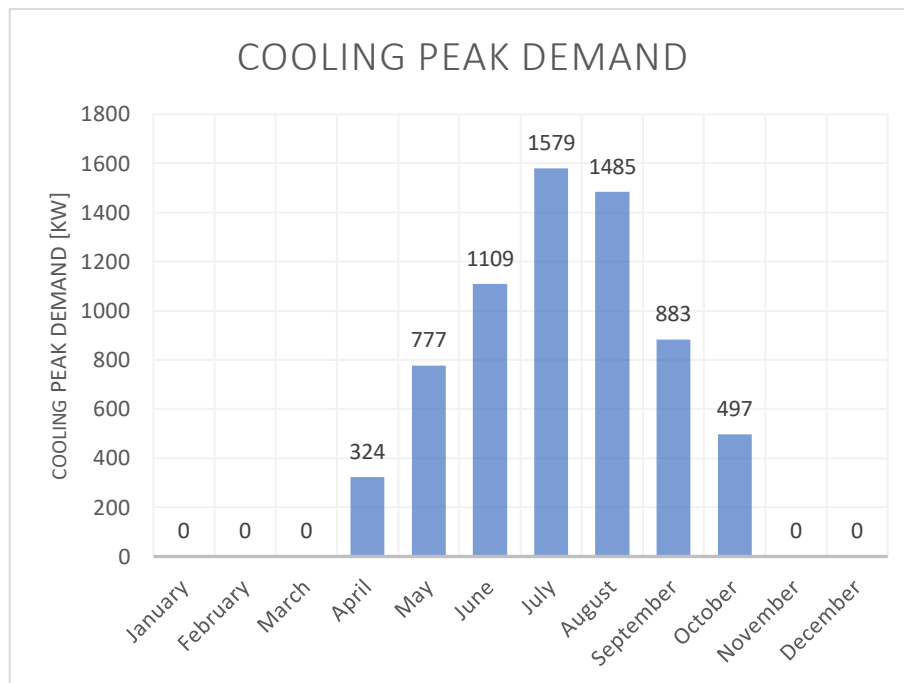


figura 5.3: grafico carichi termici di picco per il raffrescamento

HEATING PEAK DEMAND	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Buildings A-P	1084,37	650,63	357,21	118,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	202,18	526,71	678,08
Buildings B-C-E-I-W	1136,58	545,08	326,41	110,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	175,08	495,75	611,62
Total [kW]	2220,94	1195,71	683,62	228,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	377,26	1022,46	1289,70

tabella 5.8: carichi termici di picco per il riscaldamento

HEATING PEAK DEMAND	
[kW]	[W/m ²]
2220,9	131,49

tabella 5.9: carico termico di picco per il riscaldamento

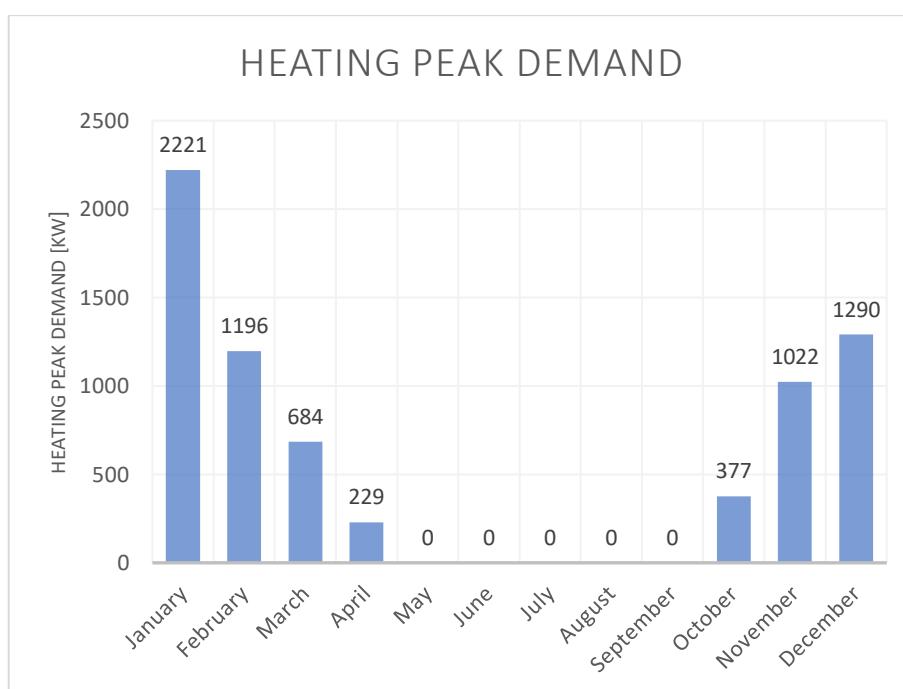


figura 5.4: grafico carichi termici di picco per il riscaldamento

5.2 Simulazione 4: modello con tende esterne alzate

Analogamente a quanto previsto per la simulazione 2, in questo scenario le schermature solari esterne degli edifici A1, P1 e P3 sono state considerate alzate. Questo ha eliminato il loro ruolo nella riduzione degli apporti solari.

SITE AND SOURCE ENERGY		Total Energy [MWh] [year]	Energy Per Total Building Area [$\frac{kWh}{m^2 \text{ year}}$]	Energy Per Conditioned Building Area [$\frac{kWh}{m^2 \text{ year}}$]
Buildings A-P	Total/Net Site Energy	879,66	62,80	97,10
Buildings B-C-E-I-W	Total/Net Site Energy	816,48	77,00	104,20
Total	Total Site Energy	1696,14	68,92	100,42
	Total Source Energy without efficiency of heat pumps	2226,81	90,48	131,84
	Total Source Energy with efficiency of heat pumps	1888,42	76,73	111,80

tabella 5.10: fabbisogno di energia finale e consumo di energia primaria

5.2.1 Fabbisogni di energia

COOLING CONSUMPTION	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	Total [MWh]
Buildings A-P	0,00	0,00	0,00	2,19	24,28	72,35	116,31	57,05	44,28	7,77	0,00	0,00	324,23
Buildings B-C-E-I-W	0,00	0,00	0,00	1,48	19,01	62,89	107,87	49,75	33,35	4,88	0,00	0,00	279,23
Total [MWh]	0,00	0,00	0,00	3,67	43,29	135,24	224,18	106,80	77,63	12,65	0,00	0,00	603,46

tabella 5.11: fabbisogno di energia termica per il raffrescamento

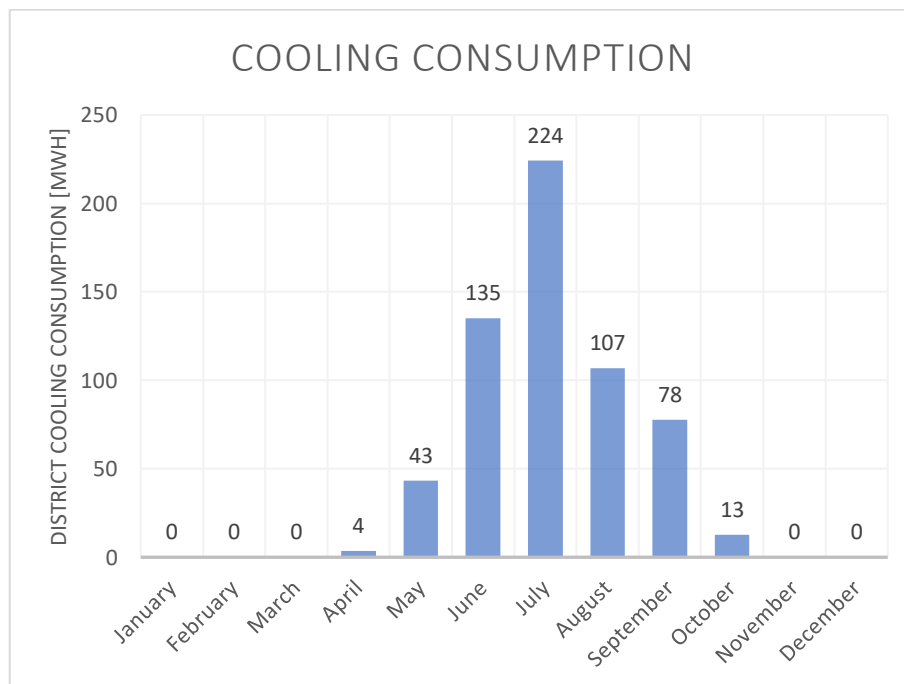


figura 5.5: grafico fabbisogno di energia termica per il raffrescamento

HEATING CONSUMPTION	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	Total [MWh]
Buildings A-P	71,64	50,87	18,16	0,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,48	27,02	43,13	214,07
Buildings B-C-E-I-W	78,32	55,69	22,39	0,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,45	33,08	48,10	242,92
Total [MWh]	149,96	106,55	40,56	1,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,93	60,10	91,22	456,99

tabella 5.12: fabbisogno di energia termica per il riscaldamento

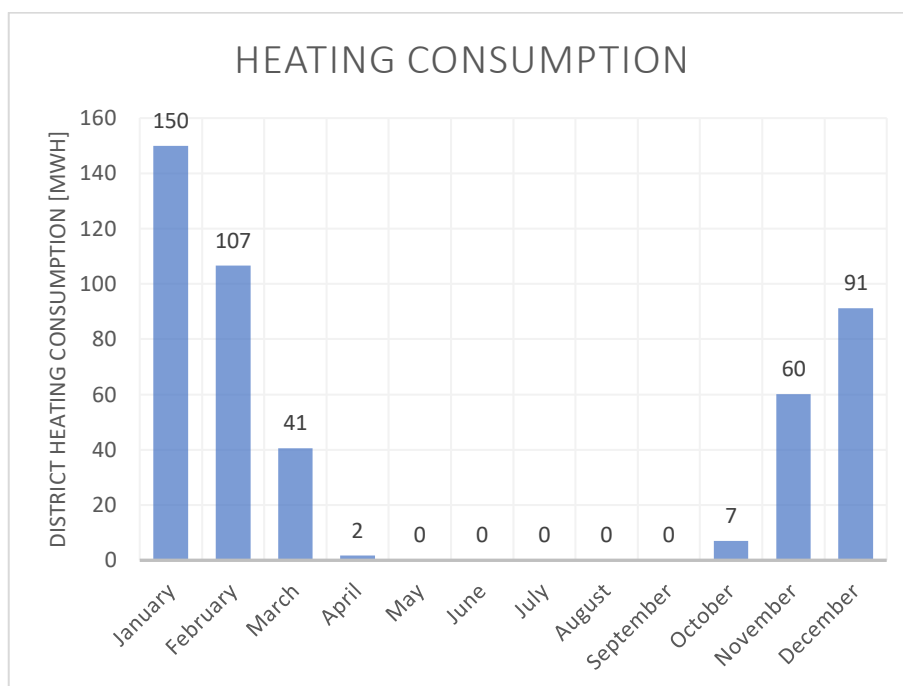


figura 5.6: grafico fabbisogno di energia termica per il riscaldamento

EP $\left[\frac{kWh}{m^2 \text{ year}}\right]$	
COOLING	HEATING
35,73	27,06

tabella 5.13: indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale ed estiva

5.2.2 Carichi termici di picco

COOLING PEAK DEMAND	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Buildings A-P	0,00	0,00	0,00	212,11	425,70	585,24	837,84	809,74	486,66	291,12	0,00	0,00
Buildings B-C-E-I-W	0,00	0,00	0,00	144,27	365,51	536,05	756,16	713,23	413,47	229,37	0,00	0,00
Total [kW]	0,00	0,00	0,00	356,38	791,22	1121,29	1594,00	1522,98	900,13	520,49	0,00	0,00

tabella 5.14: carichi termici di picco per il raffrescamento

COOLING PEAK DEMAND	
[kW]	[W/m²]
1594,0	94,37

tabella 5.15: carico termico massimo di picco per il raffrescamento

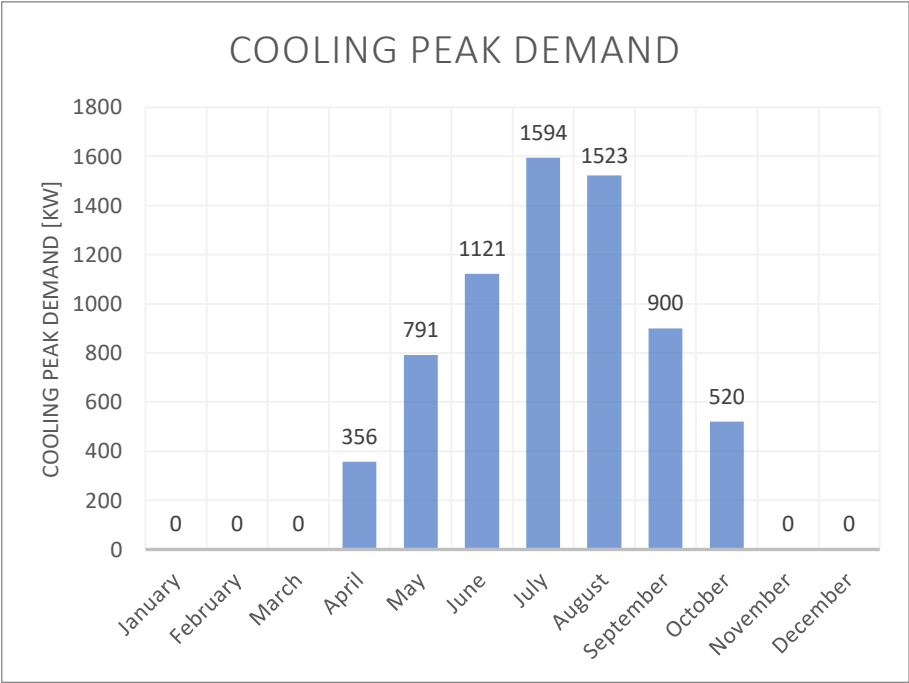


figura 5.7: grafico carichi termici di picco per il raffrescamento

HEATING PEAK DEMAND	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Buildings A-P	1048,71	640,08	349,32	107,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	190,53	519,14	673,33
Buildings B-C-E-I-W	1136,58	545,08	326,41	110,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	175,08	495,75	611,62
Total [kW]	2185,28	1185,16	675,73	217,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	365,61	1014,89	1284,95

tabella 5.16: carichi termici di picco per il riscaldamento

HEATING PEAK DEMAND	
[kW]	[W/m ²]
2185,3	129,38

tabella 5.17: carico termico di picco per il riscaldamento

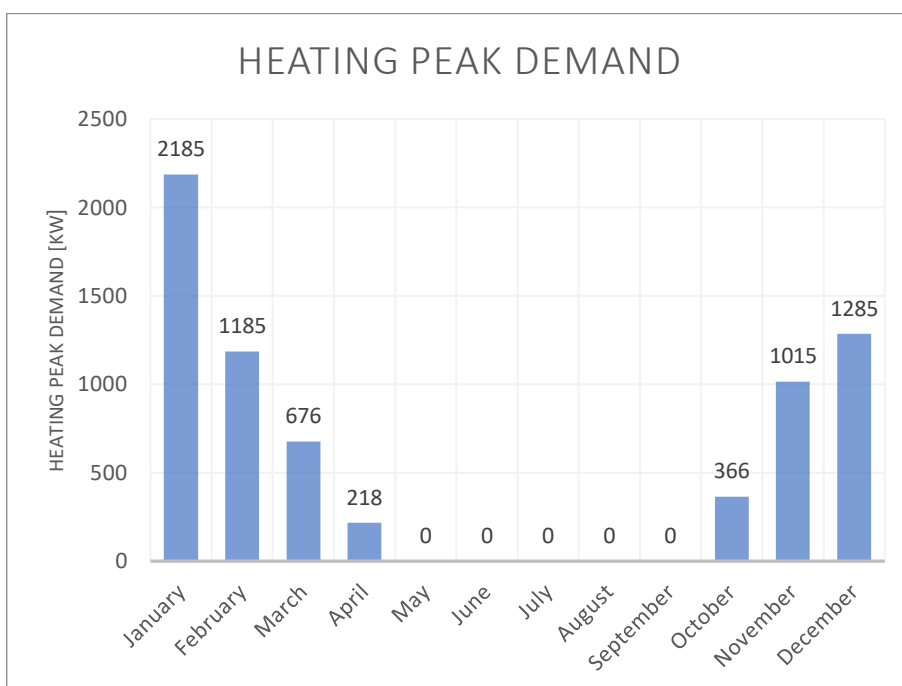


figura 5.8: grafico carichi termici di picco per il riscaldamento

5.3 Simulazione 5: modello con tende esterne abbassate e attenuazione temperatura

In questo scenario della simulazione 5, la configurazione degli edifici A1, P1 e P3 include schermature solari esterne attive e tale misura passiva è stata ulteriormente integrata con un profilo di regolazione delle temperature di setpoint tramite le normative sull'attenuazione delle temperature sia in periodi di chiusura brevi sia lunghi, come spiegato nel paragrafo 3.3.2.2.

L'obiettivo è migliorare l'efficienza energetica complessiva del modello.

SITE AND SOURCE ENERGY		Total Energy [MWh] [year]	Energy Per Total Building Area [$\frac{kWh}{m^2 \text{ year}}$]	Energy Per Conditioned Building Area [$\frac{kWh}{m^2 \text{ year}}$]
Buildings A-P	Total/Net Site Energy	869,09	62,10	95,90
Buildings B-C-E-I-W	Total/Net Site Energy	821,67	77,50	104,80
Total	Total Site Energy	1690,76	68,70	100,10
	Total Source Energy without efficiency of heat pumps	2237,98	90,93	132,50
	Total Source Energy with efficiency of heat pumps	1886,74	76,66	111,71

tabella 5.18: fabbisogno di energia finale e consumo di energia primaria

5.3.1 Fabbisogni di energia

COOLING CONSUMPTION	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	Total [MWh]
Buildings A-P	0,00	0,00	0,00	1,64	21,65	69,12	112,18	53,62	40,38	6,39	0,00	0,00	304,98
Buildings B-C-E-I-W	0,00	0,00	0,00	1,48	19,01	62,89	107,87	49,75	33,35	4,88	0,00	0,00	279,23
Total [MWh]	0,00	0,00	0,00	3,12	40,66	132,01	220,05	103,37	73,74	11,27	0,00	0,00	584,21

tabella 5.19: fabbisogno di energia termica per il raffrescamento

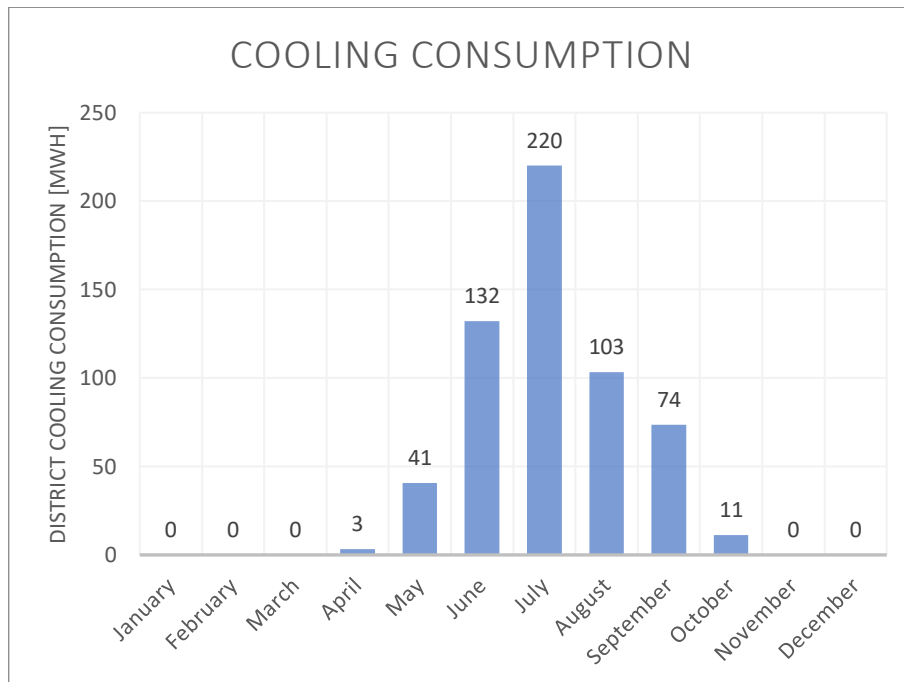


figura 5.9: grafico fabbisogno di energia termica per il raffrescamento

HEATING CONSUMPTION	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	Total [MWh]
Buildings A-P	74,45	52,83	19,29	0,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,63	28,35	44,36	222,74
Buildings B-C-E-I-W	81,42	56,59	22,24	0,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,36	33,47	49,17	248,11
Total [MWh]	155,87	109,42	41,53	1,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,98	61,82	93,52	470,85

tabella 5.20: fabbisogno di energia termica per il riscaldamento

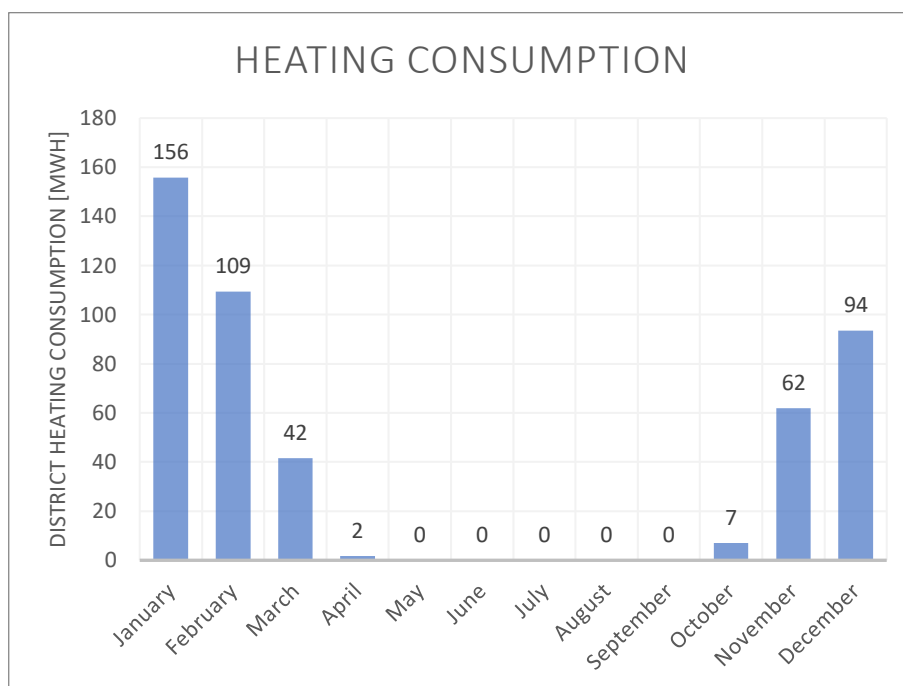


figura 5.10: grafico fabbisogno di energia termica per il riscaldamento

EP $\left[\frac{kWh}{m^2 \text{ year}} \right]$	
COOLING	HEATING
34,59	27,88

tabella 5.21: indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale ed estiva

5.3.2 Carichi termici di picco

COOLING PEAK DEMAND	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Buildings A-P	0,00	0,00	0,00	180,01	411,97	572,70	823,22	771,49	469,49	267,65	0,00	0,00
Buildings B-C-E-I-W	0,00	0,00	0,00	144,15	365,50	536,05	756,15	713,24	413,47	229,38	0,00	0,00
Total [kW]	0,00	0,00	0,00	324,16	777,47	1108,75	1579,38	1484,73	882,95	497,03	0,00	0,00

tabella 5.22: carichi termici di picco per il raffrescamento

COOLING PEAK DEMAND	
[kW]	[W/m ²]
1579,4	93,51

tabella 5.23: carico termico massimo di picco per il raffrescamento

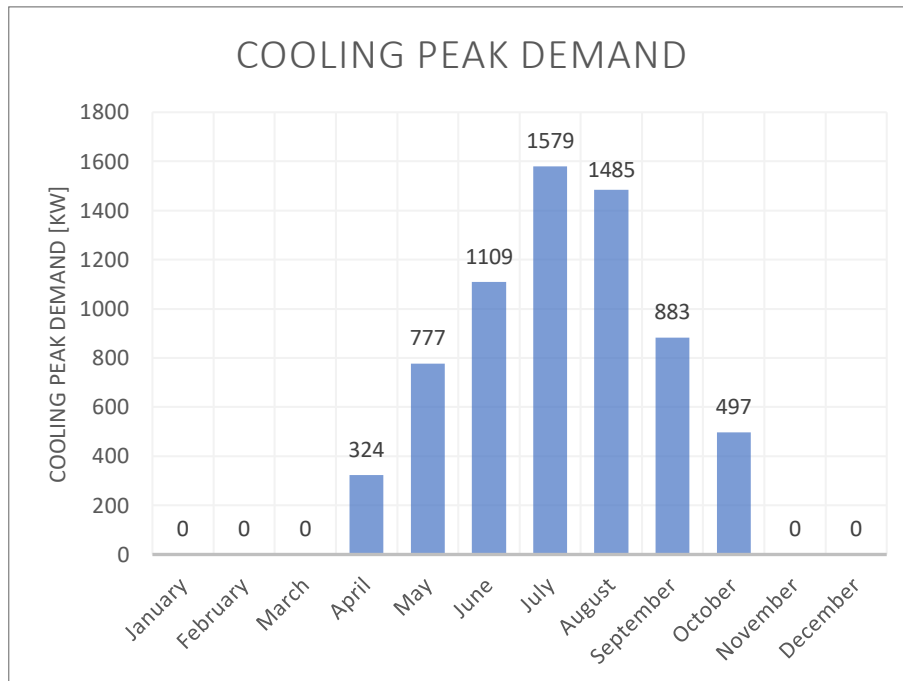


figura 5.11: grafico carichi termici di picco per il raffrescamento

HEATING PEAK DEMAND	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Buildings A-P	875,61	613,18	355,31	118,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	202,18	509,24	675,59
Buildings B-C-E-I-W	854,06	530,87	312,14	110,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	175,15	439,23	547,71
Total [kW]	1729,68	1144,05	667,45	229,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	377,33	948,47	1223,29

tabella 5.24: carichi termici di picco per il riscaldamento

HEATING PEAK DEMAND	
[kW]	[W/m ²]
1729,7	102,41

tabella 5.25: carico termico di picco per il riscaldamento

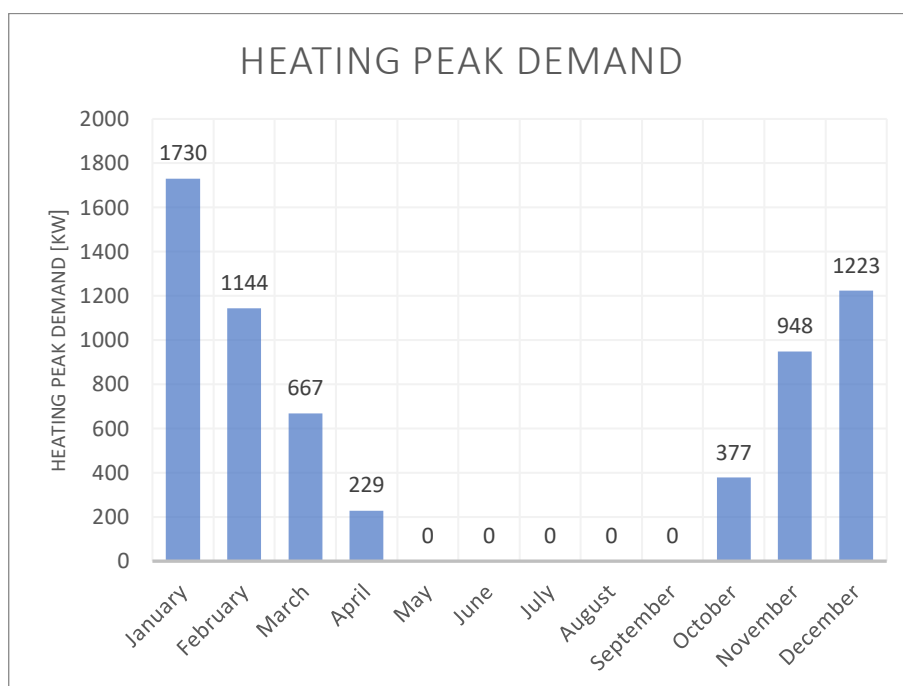


figura 5.12: grafico carichi termici di picco per il riscaldamento

5.4 Simulazione 6: modello con tende esterne alzate e attenuazione temperatura

La simulazione in questione è caratterizzata dalle medesime impostazione della simulazione 5 precedente, l'unica differenza presente è la totale mancanza di schermature esterne per il sole negli edifici che ne sarebbero dotati, ovvero A1, P1 e P3.

Successivamente nel capitolo 6 si noteranno i cambiamenti apportati da tale modifica nei risultati ottenuti.

SITE AND SOURCE ENERGY		Total Energy [MWh] [year]	Energy Per Total Building Area [$\frac{kWh}{m^2 \text{ year}}$]	Energy Per Conditioned Building Area [$\frac{kWh}{m^2 \text{ year}}$]
Buildings A-P	Total/Net Site Energy	880,52	62,90	97,20
Buildings B-C-E-I-W	Total/Net Site Energy	821,67	77,50	104,80
Total	Total Site Energy	1702,19	69,16	100,78
	Total Source Energy without efficiency of heat pumps	2235,88	90,85	132,38
	Total Source Energy with efficiency of heat pumps	1892,46	76,89	112,04

tabella 5.26: fabbisogno di energia finale e consumo di energia primaria

5.4.1 Fabbisogni di energia

COOLING CONSUMPTION	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	Total [MWh]
Buildings A-P	0,00	0,00	0,00	2,19	24,28	72,35	116,31	57,05	44,28	7,77	0,00	0,00	324,23
Buildings B-C-E-I-W	0,00	0,00	0,00	1,48	19,01	62,89	107,87	49,75	33,35	4,88	0,00	0,00	279,23
Total [MWh]	0,00	0,00	0,00	3,67	43,29	135,24	224,18	106,80	77,63	12,65	0,00	0,00	603,46

tabella 5.27: fabbisogno di energia termica per il raffrescamento

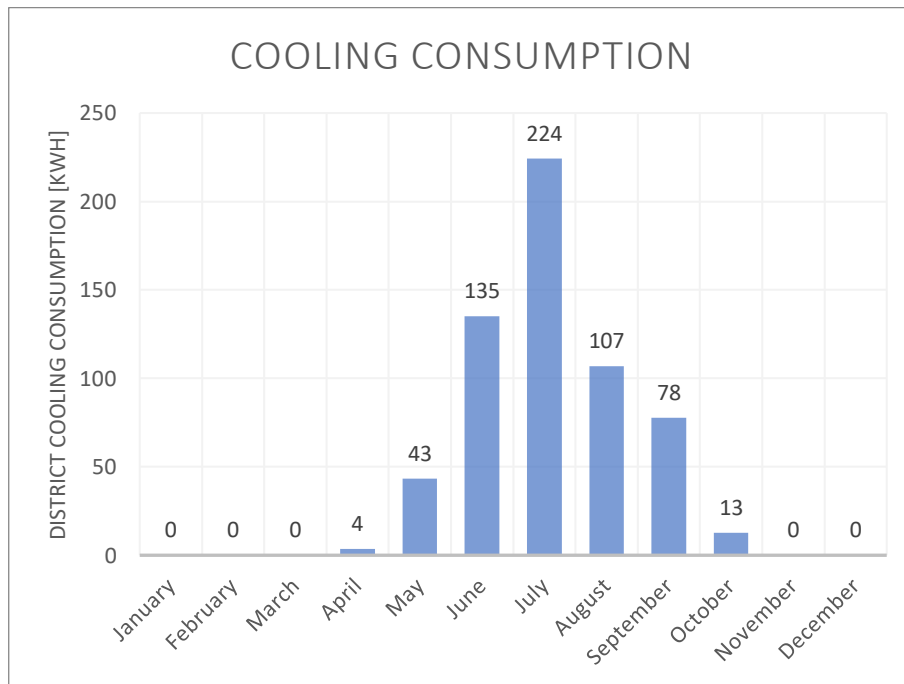


figura 5.13: grafico fabbisogno di energia termica per il raffrescamento

HEATING CONSUMPTION	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	Total [MWh]
Buildings A-P	72,29	50,91	18,16	0,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,48	27,06	43,25	214,93
Buildings B-C-E-I-W	81,42	56,59	22,24	0,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,36	33,47	49,17	248,11
Total [MWh]	153,71	107,51	40,39	1,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,84	60,53	92,42	463,03

tabella 5.28: fabbisogno di energia termica per il riscaldamento

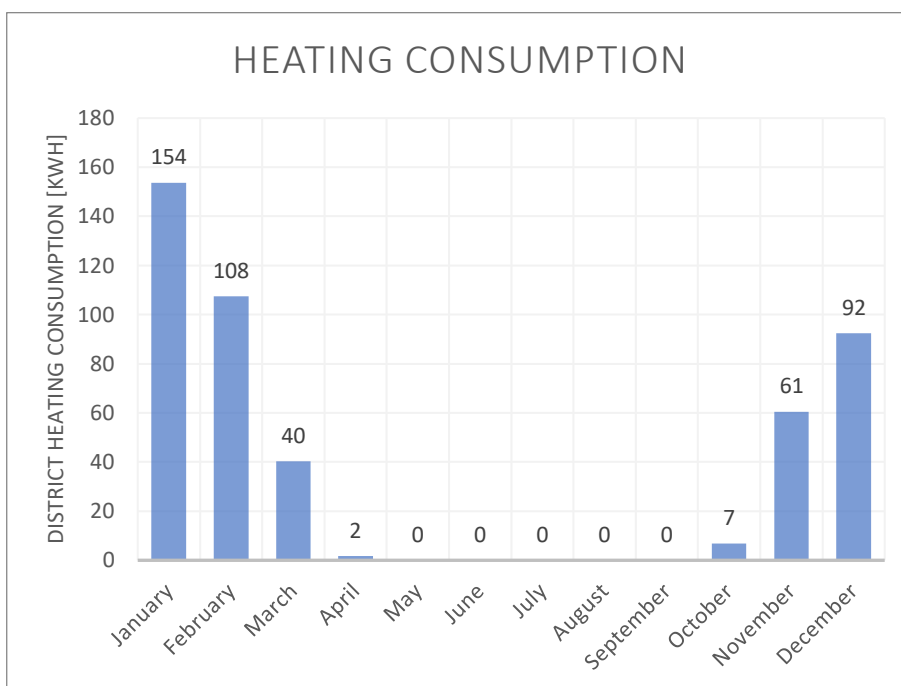


figura 5.14: grafico fabbisogno di energia termica per il riscaldamento

EP $\left[\frac{kWh}{m^2 \text{ year}} \right]$	
COOLING	HEATING
35,73	27,41

tabella 5.29: indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale ed estiva

5.4.2 Carichi termici di picco

COOLING PEAK DEMAND	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Buildings A-P	0,00	0,00	0,00	212,11	425,70	585,24	837,84	809,74	486,66	291,12	0,00	0,00
Buildings B-C-E-I-W	0,00	0,00	0,00	144,15	365,50	536,05	756,15	713,24	413,47	229,38	0,00	0,00
Total [kW]	0,00	0,00	0,00	356,26	791,21	1121,29	1594,00	1522,98	900,12	520,49	0,00	0,00

tabella 5.30: carichi termici di picco per il raffrescamento

COOLING PEAK DEMAND	
[kW]	[W/m ²]
1594,0	94,37

tabella 5.31: carico termico massimo di picco per il raffrescamento

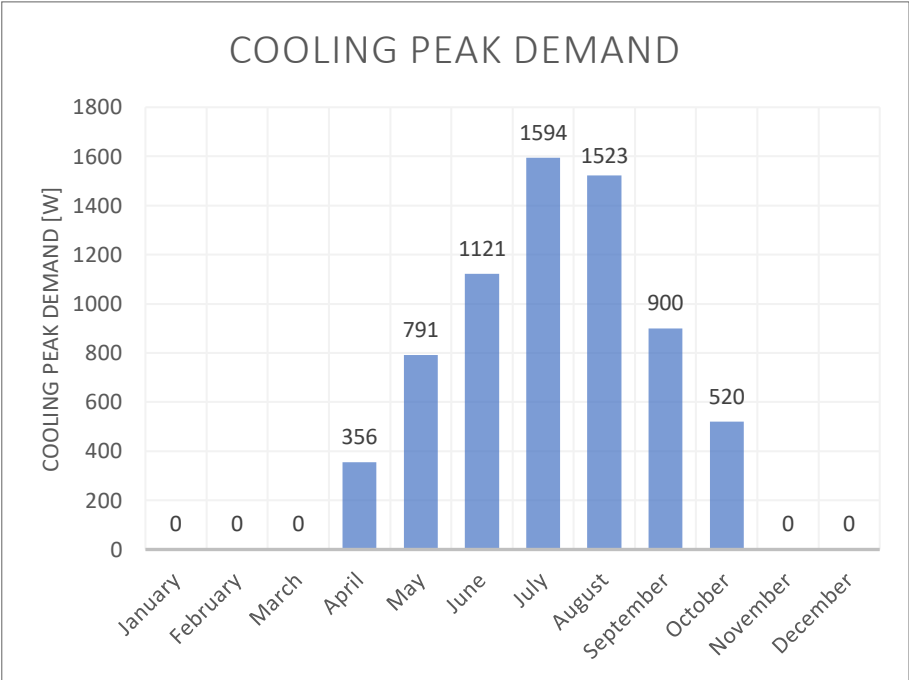


figura 5.15: grafico carichi termici di picco per il raffrescamento

HEATING PEAK DEMAND	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Buildings A-P	853,60	605,01	347,45	107,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	190,53	502,13	670,96
Buildings B-C-E-I-W	854,06	530,87	312,14	110,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	175,15	439,23	547,71
Total [kW]	1707,67	1135,88	659,59	218,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	365,68	941,36	1218,67

tabella 5.32: carichi termici di picco per il riscaldamento

HEATING PEAK DEMAND	
[kW]	[W/m ²]
1707,7	101,10

tabella 5.33: carico termico di picco per il riscaldamento

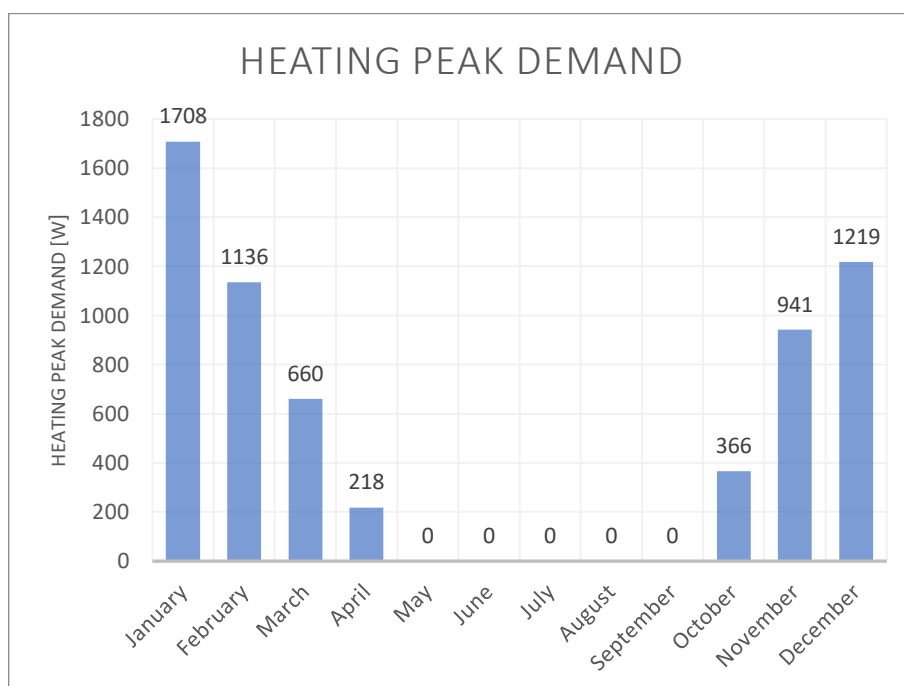


figura 5.16: grafico carichi termici di picco per il riscaldamento

5.5 Simulazione 7: modello con tende esterne abbassate e recuperatore di calore

Nella Simulazione 7 sono stati cambiati i parametri per l'analisi energetica, si è valutato l'inserimento di un ipotetico recuperatore di calore nell'aria di rinnovo. Questo scambiatore è stato considerato con un'efficienza di recupero del calore sensibile del 75% durante tutto il periodo di riscaldamento, quindi è stata impostata una portata di aria immessa pari a $2,5 \frac{l}{s \cdot px}$, ovvero il 75% in meno rispetto al valore standard di partenza di $10 \frac{l}{s \cdot px}$.

Da tenere bene a mente che questo vale solo per le stagioni caratterizzate dal riscaldamento, dal 15/10 al 15/04.

SITE AND SOURCE ENERGY		Total Energy [MWh] [year]	Energy Per Total Building Area [$\frac{kWh}{m^2 \text{ year}}$]	Energy Per Conditioned Building Area [$\frac{kWh}{m^2 \text{ year}}$]
Buildings A-P	Total/Net Site Energy	677,27	48,37	74,77
Buildings B-C-E-I-W	Total/Net Site Energy	641,05	60,43	81,85
Total	Total Site Energy	1318,32	53,57	78,05
	Total Source Energy without efficiency of heat pumps	1679,33	68,23	99,43
	Total Source Energy with efficiency of heat pumps	1637,68	66,54	96,96

tabella 5.34: fabbisogno di energia finale e consumo di energia primaria

5.5.1 Fabbisogni di energia

COOLING CONSUMPTION	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	Total [MWh]
Buildings A-P	0,00	0,00	0,00	1,64	21,65	69,12	112,18	53,62	40,38	6,39	0,00	0,00	304,98
Buildings B-C-E-I-W	0,00	0,00	0,00	1,48	19,01	62,89	107,87	49,75	33,35	4,88	0,00	0,00	279,23
Total [MWh]	0,00	0,00	0,00	3,12	40,66	132,01	220,05	103,37	73,73	11,27	0,00	0,00	584,22

tabella 5.35: fabbisogno di energia termica per il raffrescamento

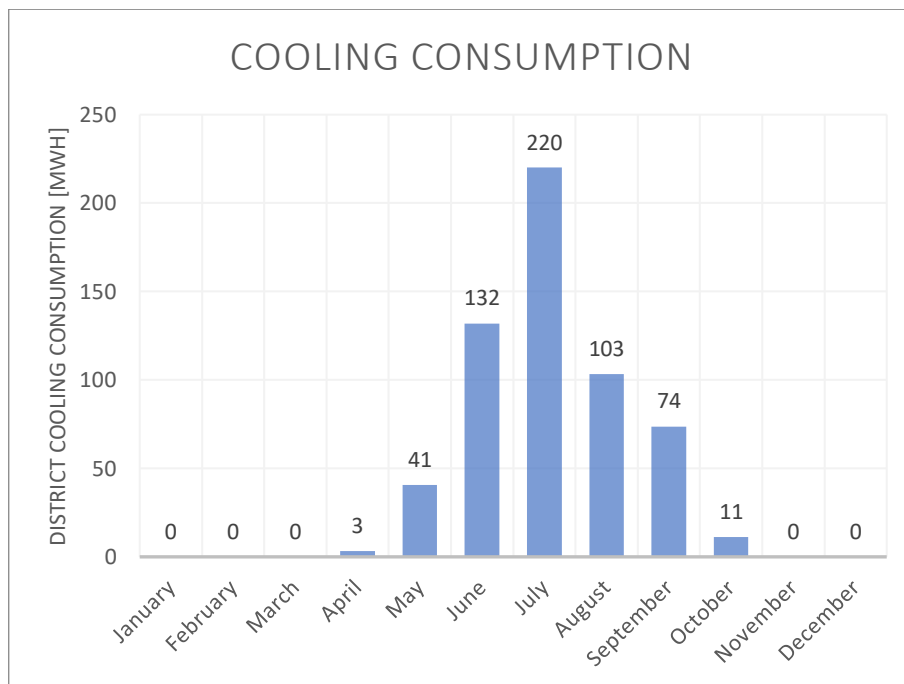


figura 5.17: grafico fabbisogno di energia termica per il raffrescamento

HEATING CONSUMPTION	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	Total [MWh]
Buildings A-P	17,73	5,52	1,47	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	2,13	3,75	30,93
Buildings B-C-E-I-W	29,85	13,84	4,25	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,64	6,63	12,17	67,48
Total [MWh]	47,58	19,37	5,72	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,89	8,76	15,91	98,41

tabella 5.36: fabbisogno di energia termica per il riscaldamento

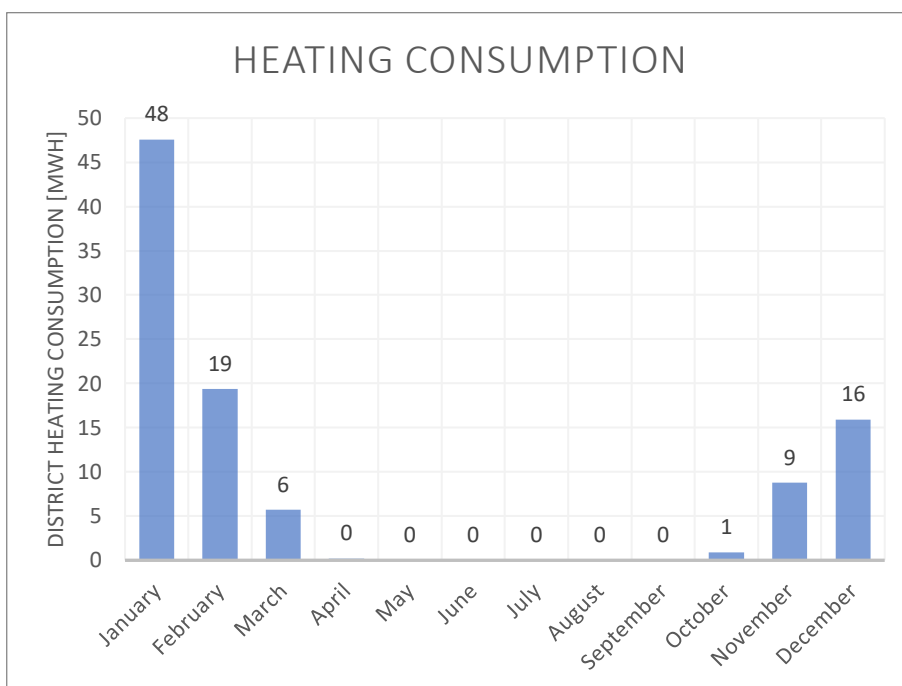


figura 5.18: grafico fabbisogno di energia termica per il riscaldamento

EP $\left[\frac{kWh}{m^2 \text{ year}} \right]$	
COOLING	HEATING
34,59	5,83

tabella 5.37: indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale ed estiva

5.5.2 Carichi termici di picco

COOLING PEAK DEMAND	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Buildings A-P	0,00	0,00	0,00	180,01	411,97	572,70	823,22	771,49	469,49	267,65	0,00	0,00
Buildings B-C-E-I-W	0,00	0,00	0,00	144,27	365,51	536,05	756,16	713,23	413,47	229,37	0,00	0,00
Total [kW]	0,00	0,00	0,00	324,28	777,48	1108,75	1579,38	1484,73	882,96	497,02	0,00	0,00

tabella 5.38: carichi termici di picco per il raffrescamento

COOLING PEAK DEMAND	
[kW]	[W/m ²]
1579,4	93,51

tabella 5.39: carico termico massimo di picco per il raffrescamento

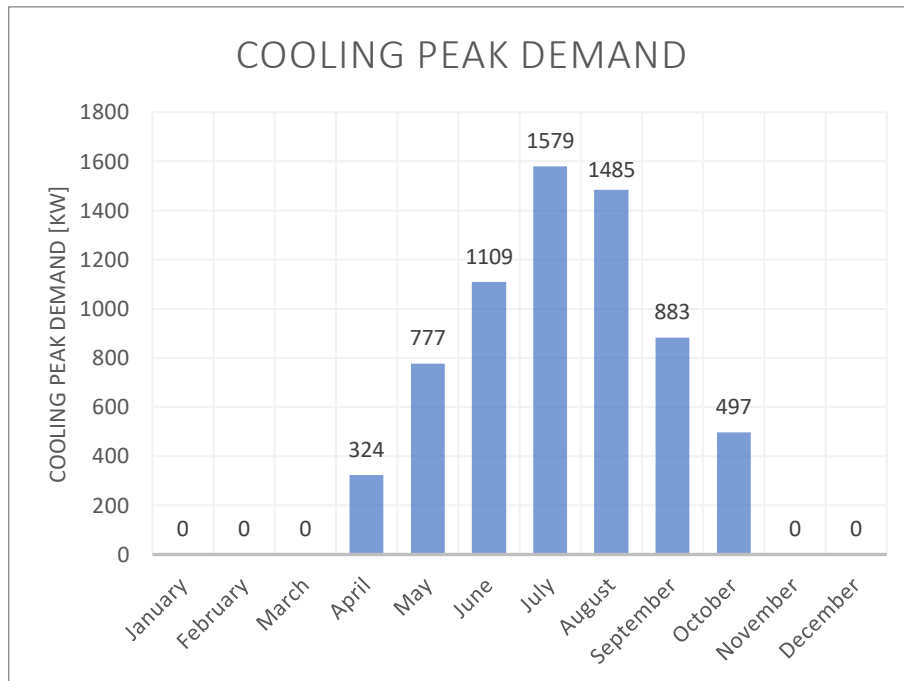


figura 5.19: grafico carichi termici di picco per il raffrescamento

HEATING PEAK DEMAND	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Buildings A-P	764,42	179,08	92,64	28,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	43,01	135,20	166,26
Buildings B-C-E-I-W	972,00	264,78	181,44	32,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	65,40	283,09	337,33
Total [kW]	1736,42	443,86	274,08	61,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	108,41	418,29	503,59

tabella 5.40: carichi termici di picco per il riscaldamento

HEATING PEAK DEMAND	
[kW]	[W/m ²]
1736,4	102,81

tabella 5.41: carico termico di picco per il riscaldamento

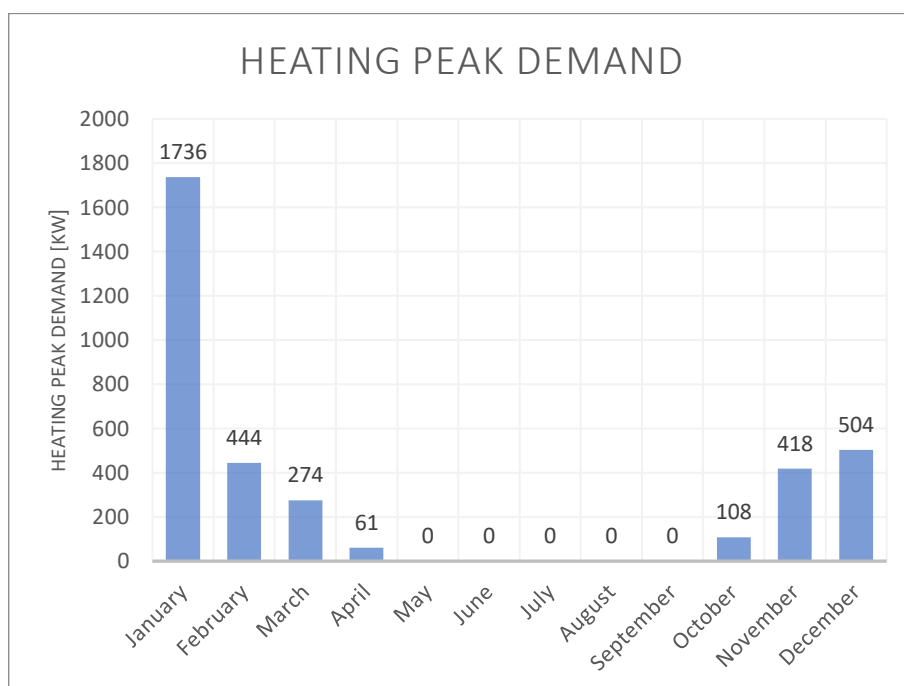


figura 5.20: grafico carichi termici di picco per il riscaldamento

5.6 Simulazione 8: modello con tende esterne abbassate, recuperatore di calore e attenuazione temperatura

L'ottava e ultima simulazione mostra lo scenario con il massimo livello di ottimizzazione, sia impiantistica che gestionale, nella quale i parametri della Simulazione 7 sono il punto di partenza. Il modello include, per tutta la durata del calcolo, l'attenuazione delle temperature durante i periodi di chiusura breve e lunga.

Questo metodo di controllo, che integrato con il recuperatore di calore nella stagione di riscaldamento, consente di ridurre notevolmente il relativo carico termico di picco e di conseguenza, anche il fabbisogno di riscaldamento degli ambienti.

SITE AND SOURCE ENERGY		Total Energy [MWh] [year]	Energy Per Total Building Area [$\frac{kWh}{m^2 \text{ year}}$]	Energy Per Conditioned Building Area [$\frac{kWh}{m^2 \text{ year}}$]
Buildings A-P	Total/Net Site Energy	678,25	48,44	74,87
Buildings B-C-E-I-W	Total/Net Site Energy	648,92	61,17	82,86
Total	Total Site Energy	1327,17	53,93	78,58
	Total Source Energy without efficiency of heat pumps	1692,60	68,77	100,21
	Total Source Energy with efficiency of heat pumps	1643,60	66,78	97,31

tabella 5.42: fabbisogno di energia finale e consumo di energia primaria

5.6.1 Fabbisogni di energia

COOLING CONSUMPTION	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	Total [MWh]
Buildings A-P	0,00	0,00	0,00	1,64	21,65	69,12	112,18	53,62	40,38	6,39	0,00	0,00	304,98
Buildings B-C-E-I-W	0,00	0,00	0,00	1,48	19,01	62,89	107,87	49,75	33,35	4,88	0,00	0,00	279,23
Total [MWh]	0,00	0,00	0,00	3,12	40,66	132,01	220,05	103,37	73,73	11,27	0,00	0,00	584,22

tabella 5.43: fabbisogno di energia termica per il raffrescamento

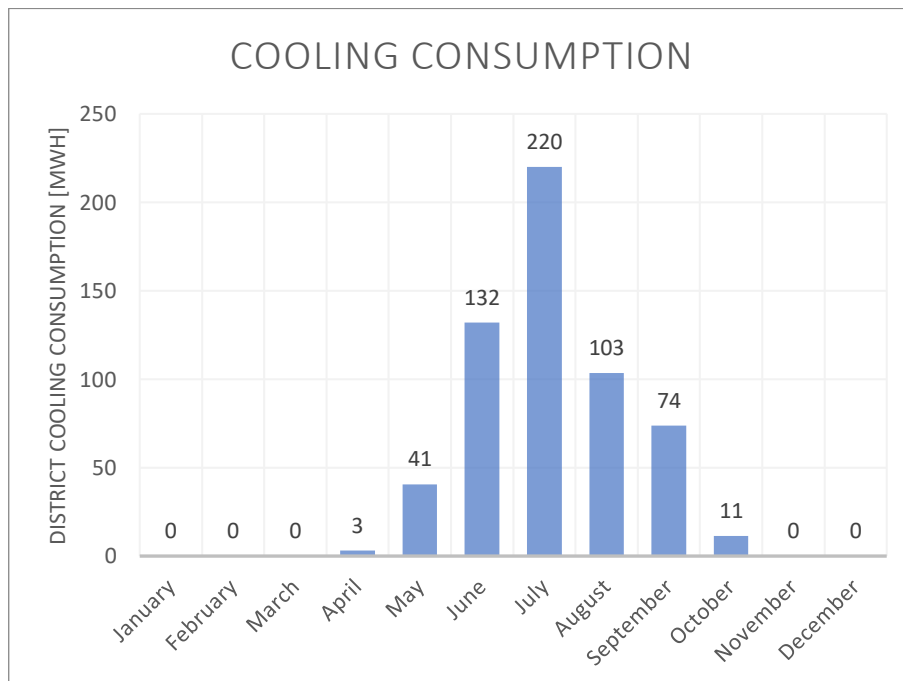


figura 5.21: grafico fabbisogno di energia termica per il raffrescamento

HEATING CONSUMPTION	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	Total [MWh]
Buildings A-P	18,57	5,57	1,47	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	2,14	3,83	31,90
Buildings B-C-E-I-W	33,60	15,22	4,55	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,68	7,57	13,63	75,36
Total [MWh]	52,17	20,79	6,02	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,93	9,72	17,46	107,26

tabella 5.44: fabbisogno di energia termica per il riscaldamento

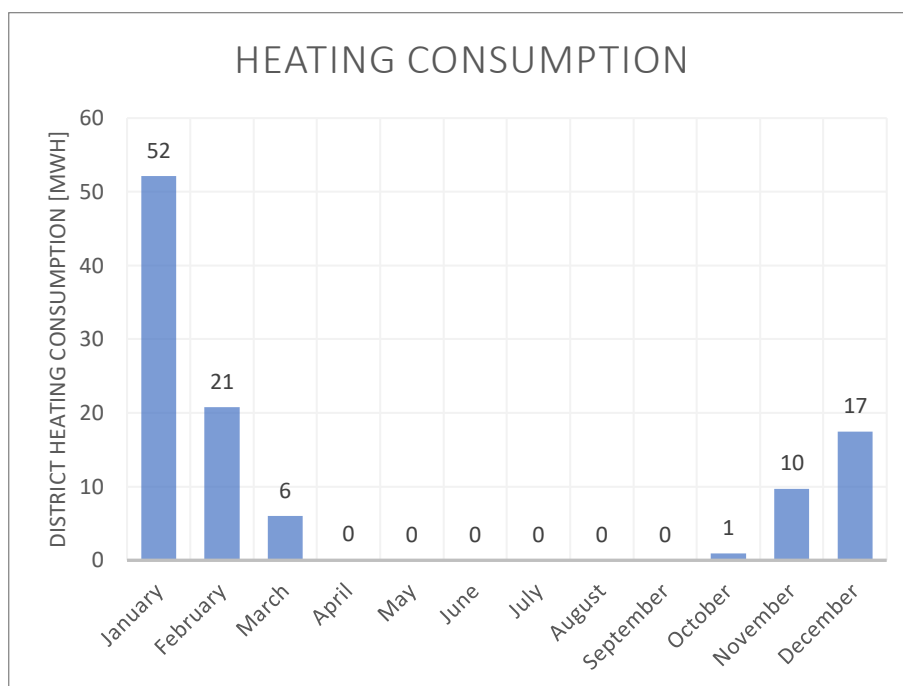


figura 5.22: grafico fabbisogno di energia termica per il riscaldamento

EP $\left[\frac{kWh}{m^2 \text{ year}} \right]$	
COOLING	HEATING
34,59	6,35

tabella 5.45: indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale ed estiva

5.6.2 Carichi termici di picco

COOLING PEAK DEMAND	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Buildings A-P	0,00	0,00	0,00	180,01	411,97	572,70	823,22	771,49	469,49	267,65	0,00	0,00
Buildings B-C-E-I-W	0,00	0,00	0,00	144,27	365,51	536,05	756,16	713,23	413,47	229,37	0,00	0,00
Total [kW]	0,00	0,00	0,00	324,28	777,48	1108,75	1579,38	1484,73	882,96	497,02	0,00	0,00

tabella 5.46: carichi termici di picco per il raffrescamento

COOLING PEAK DEMAND	
[kW]	[W/m ²]
1579,4	93,51

tabella 5.47: carico termico massimo di picco per il raffrescamento

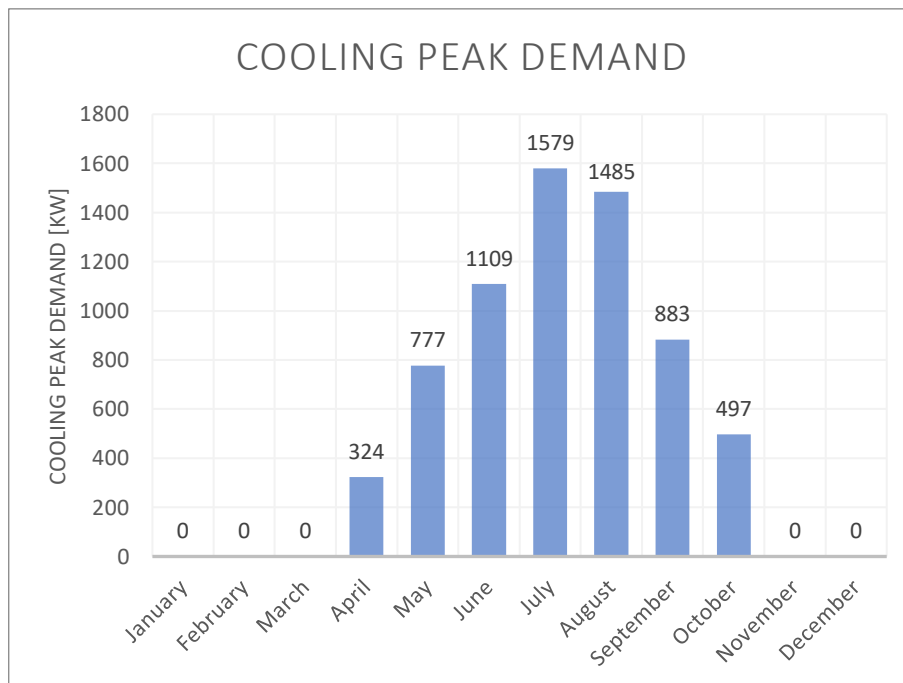


figura 5.23: grafico carichi termici di picco per il raffrescamento

HEATING PEAK DEMAND	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Buildings A-P	504,11	160,87	92,57	28,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	43,01	128,18	146,23
Buildings B-C-E-I-W	668,11	203,42	150,26	32,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	64,87	186,09	260,48
Total [kW]	1172,22	364,29	242,84	61,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	107,88	314,27	406,71

tabella 5.48: carichi termici di picco per il riscaldamento

HEATING PEAK DEMAND	
[kW]	[W/m ²]
1172,2	69,40

tabella 5.49: carico termico di picco per il riscaldamento

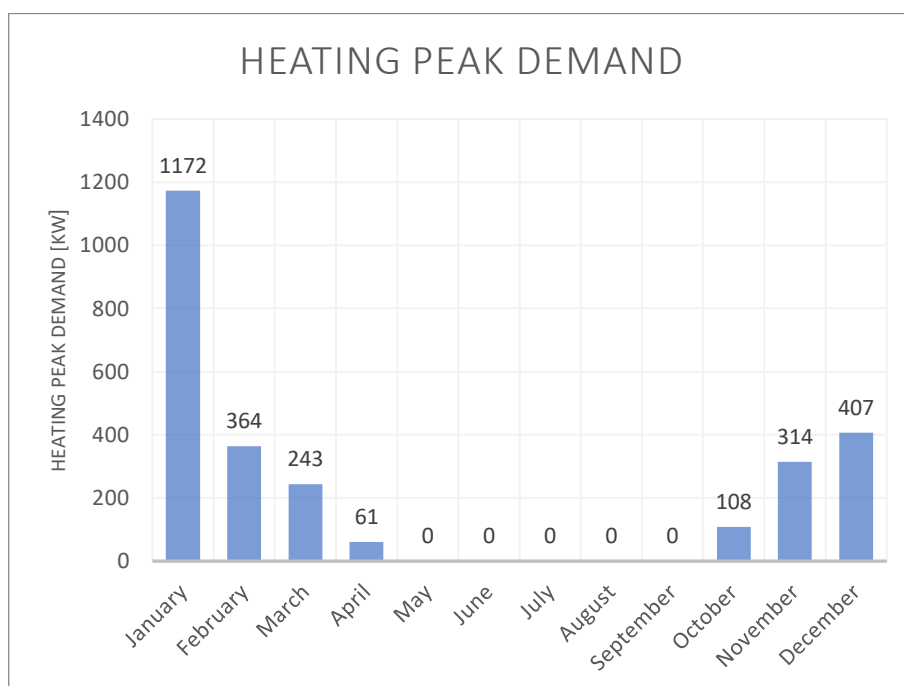


figura 5.24: grafico carichi termici di picco per il riscaldamento

6. Confronto e discussione dei risultati

Il capitolo 6 è incentrato sull'analisi comparativa dei risultati ottenuti nelle otto simulazioni di analisi energetica del complesso Beato Pellegrino, eseguite sia in Autodesk Revit sia in OpenStudio.

Le simulazioni eseguite sono state sviluppate in modo tale da poter avere una sequenza progressiva di scenari, con l'obiettivo principale di eseguire delle analisi energetiche preliminari per quantificare il fabbisogno energetico annuale, i carichi di picco sia diretti che specifici di raffrescamento e riscaldamento dei 15 edifici presenti nel complesso.

Un fattore di rilevante importanza è l'indice di prestazione energetica non rinnovabile $EP_{gl,n ren}$ che esprime il fabbisogno di energia primaria globale in relazione alla superficie utile di riferimento e viene espresso in $\left[\frac{kWh}{m^2 year}\right]$, tale indice serve a determinare la classe energetica e permette di eseguire un confronto diretto con il valore di riferimento reale, ovvero di $99,30 \frac{kWh}{m^2 year}$ che posiziona l'edificio in classe energetica A2.

Un'alta importantissima possibilità che offre tale indice di prestazione è quella di valutare l'accuratezza dei modelli utilizzati nelle simulazioni e motivare così le assunzioni fatte per ottenere dei risultati migliori e più affidabili.

Vengono ricavati anche gli indici di prestazione energetica per il raffrescamento e il riscaldamento espressi come EP_C e EP_H in $\left[\frac{kWh}{m^2 year}\right]$.

Le varianti comprendono differenti casistiche e settaggi energetici e le prime due simulazioni riguardano il modello di partenza generato in Revit, nel quale le possibilità di impostazioni energetiche sono minori e limitate rispetto a quelle disponibili in OpenStudio.

Lo scopo di avere otto simulazioni è quello in primis di valutare il problema dell'interoperabilità BIM-BEM tra i software di modellazione BIM, come Revit, e quelli totalmente sviluppati per il solo scopo di eseguire delle simulazioni energetiche, OpenStudio.

Successivamente un altro scopo di rilevante importanza è quello di valutare l'impatto dei miglioramenti implementati nelle varie simulazioni, ad esempio l'impiego delle schermature esterne per il sole, l'installazione di un recuperatore di calore sull'aria di rinnovo nei periodi di riscaldamento e l'attenuazione della temperatura nei periodi di chiusura degli edifici sempre in fase di riscaldamento.

Prima di tutto viene eseguito un confronto generale dei risultati ottenuti tra le otto simulazioni, in particolare i consumi (energy consumption), i picchi di carico di raffrescamento e riscaldamento (peak cooling e peak heating) e i carichi specifici in $\frac{W}{m^2}$ necessari per dimensionare la centrale termofrigorifera principale.

Successivamente il confronto eseguito per le singole zone di ogni edificio da la possibilità di dimensionare correttamente la potenza dei terminali richiesti per ogni stanza e di valutare più nello specifico la differenza tra le simulazioni 1 e 3, quindi tra Revit e OpenStudio nelle stesse condizioni di simulazione.

6.1 Interoperabilità BIM-BEM

Il processo di esportazione ed importazione del modello BIM tra Revit e OpenStudio genera delle differenze marcate, si può notare come OpenStudio tende a sovrastimare i picchi di carico estivi e questo trova giustificazione nei ricambi di aria siccome l'immissione dell'aria esterna fredda al mattino porta ad avere elevati sbalzi di temperatura per raggiungere il valore impostato di $21^{\circ}C$. D'altro canto durante la giornata tipo OpenStudio riesce a gestire in maniera più efficace i carichi interni abbattendo così il fabbisogno energetico totale, cosa che accade sia nei periodi di riscaldamento che di raffrescamento.

Per quanto riguarda le differenze tra i modelli con tende esterne abbassate e alzate si nota come nel caso delle simulazioni 2 e 4 (schermature esterne non attive) ci sia una differenza maggiore tra Revit e OpenStudio, circa un 221%, rispetto alle simulazioni 1 e 3 (schermature esterne attive), quindi si può concludere che Revit tende a sovrastimare in maniera importante il contributo diretto del sole nei vetri.

Δ% Revit vs OpenStudio							
SIMULATIONS	Energy Total/Net	EP_{gl}		EP		PEAK LOAD	
		TOTAL AREA	CONDITIONED AREA	COOLING	HEATING	COOLING	HEATING
SIM 1 vs SIM 3	-17,9%	-17,9%	-17,9%	-23,4%	-35,9%	-0,2%	84,0%
SIM 2 vs SIM 4	-21,2%	-21,2%	-21,2%	-35,3%	-37,7%	-6,9%	77,3%

tabella 6.1: differenze percentuali tra Revit e OpenStudio dei principali risultati

6.1.1 Confronto simulazioni 1 e 3

Dalle simulazioni 1 e 3, eseguite rispettivamente in Revit e in OpenStudio, sono caratterizzate entrambe da impostazioni energetiche di base, ovvero senza considerare l'attenuazione della temperatura e nemmeno il recuperatore di calore. Dai risultati ottenuti si evince come OpenStudio tenda a sottostimare i consumi generali di raffrescamento, di riscaldamento e anche dell'elettricità.

ENERGY CONSUMPTION [MWh] [year]	COOLING	HEATING	LIGHTS - ELECTRICAL EQUIPMENT	TOTAL
REVIT – 1: “tende esterne giù”	762,6	725,6	705,3	2193,5
OPENSTUDIO – 3: “tende esterne giù”	584,2	464,7	635,7	1684,6
Δ%	-23,4%	-36,0%	-9,9%	-23,2%

tabella 6.2: fabbisogni di energia termica annuali dell'intero complesso e differenze percentuali tra simulazione 1 e 3

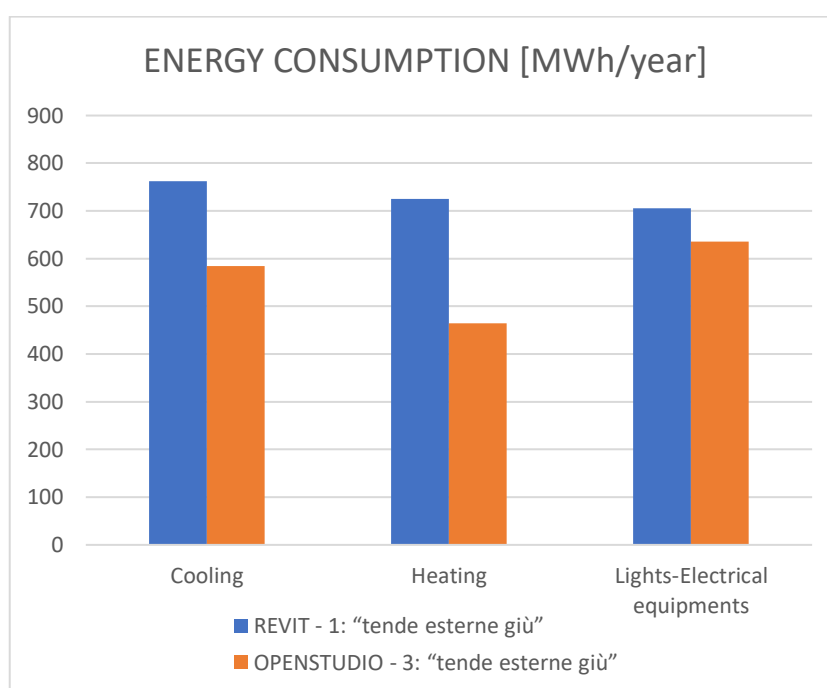


figura 6.1: grafico fabbisogni di energia termica annuali dell'intero complesso e differenze percentuali tra simulazione 1 e 3

Per quanto riguarda i fabbisogni di energia termica sia di raffrescamento che di riscaldamento si nota un trend di riduzione dei valori ottenuti tramite OpenStudio, in alcuni casi anche di un 70%.

Questo fenomeno può essere ampiamente confermato da altre ricerche scientifiche, [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8], infatti Revit non riesce a separare in modo corretto le frazioni di calore latente, radiante e disperso per le apparecchiature elettriche e l'illuminazione, ma considera tutto il calore generato dai carichi interni come calore puramente convettivo, immettendolo direttamente nei vani.

COOLING CONSUMPTION [MWh]	SIMULATIONS	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
REVIT	1: “tende esterne giù”				5,6	77,8	199,5	259,7	134,7	75,2	10,0		
OPENSTUDIO	3: “tende esterne giù”				3,1	40,7	132,0	220,0	103,4	73,7	11,3		
Δ%					-44,6%	-47,7%	-33,8%	-15,3%	-23,2%	-1,9%	12,2%		

tabella 6.3: fabbisogno di energia termica per il raffrescamento delle simulazioni 1 e 3

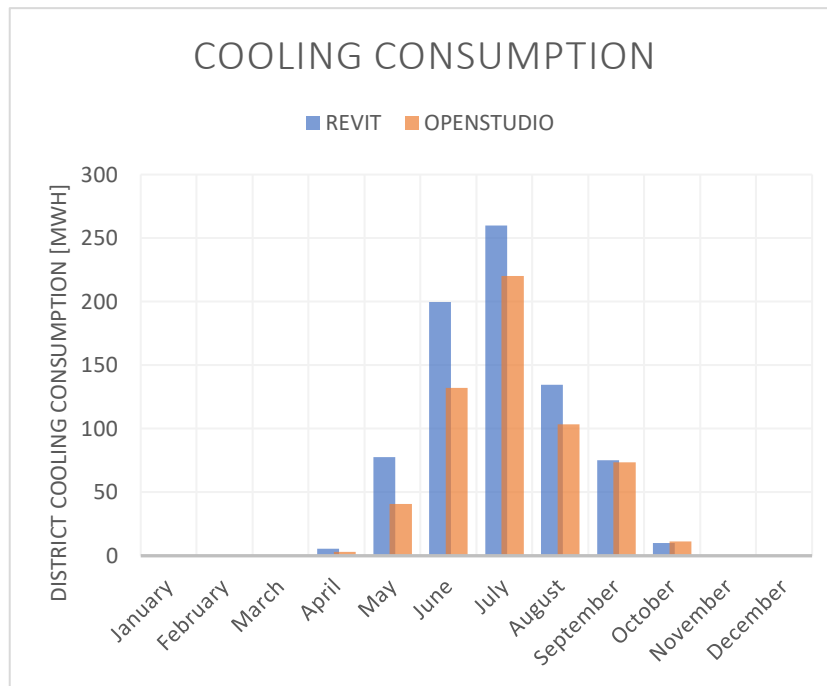


figura 6.2: grafico fabbisogno di energia termica per il raffreddamento delle simulazioni 1 e 3

HEATING CONSUMPTION [MWh]	SIMULATIONS	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
REVIT	1: "tende esterne giù"	226,4	159,2	71,5	5,9	0	0	0	0	0	7,5	81,6	173,6
OPENSTUDIO	3: "tende esterne giù"	152,1	108,5	41,7	1,7	0	0	0	0	0	7,1	61,4	92,3
$\Delta\%$		-32,8%	-31,8%	-41,7%	-70,9%	0	0	0	0	0	-5,7%	-24,7%	-46,8%

tabella 6.4: fabbisogno di energia termica per il riscaldamento delle simulazioni 1 e 3

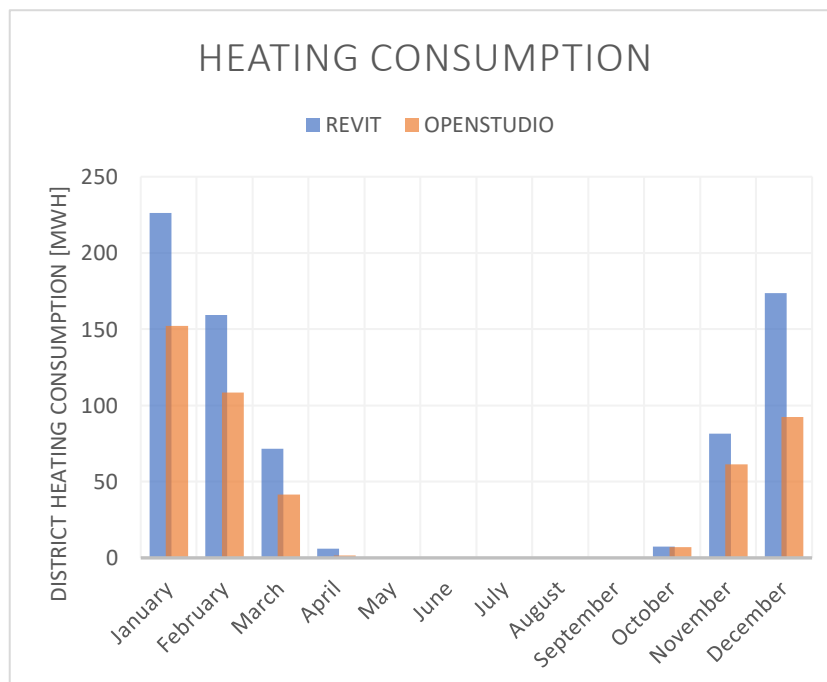


figura 6.3: grafico fabbisogno di energia termica per il riscaldamento delle simulazioni 1 e 3

Riguardo ai picchi di riscaldamento e raffrescamento Revit tende a sottostimarli, questo può essere ricondotto ai limiti del software nella corretta simulazione delle infiltrazioni di aria e dei transitori di messa a regime al mattino, ovvero quando dopo una notte che il complesso è stato chiuso bisogna riportare la temperatura interna al valore di comfort preimpostato (21°C). Infatti si noterà successivamente come l'attenuazione della temperatura in OpenStudio permette di ridurre i picchi del riscaldamento del 22%, confermando come in OpenStudio sia possibile impostare correttamente differenti parametri e anche i contributi che si ottengono nel modello e nei risultati delle simulazioni.

COOLING PEAK DEMAND [kW]	SIMULATIONS	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
REVIT	1: "tende esterne giù"	0	0	0	381,5	1049,5	1385,5	1582,1	1444,1	845,3	474,4	0	0
OPENSTUDIO	3: "tende esterne giù"	0	0	0	324,3	777,5	1108,8	1579,4	1484,7	883,0	497,0	0	0
$\Delta\%$		0	0	0	-15,0%	-25,9%	-20,0%	-0,2%	2,8%	4,5%	4,8%	0	0

tabella 6.5: carichi termici di picco per il raffrescamento delle simulazioni 1 e 3

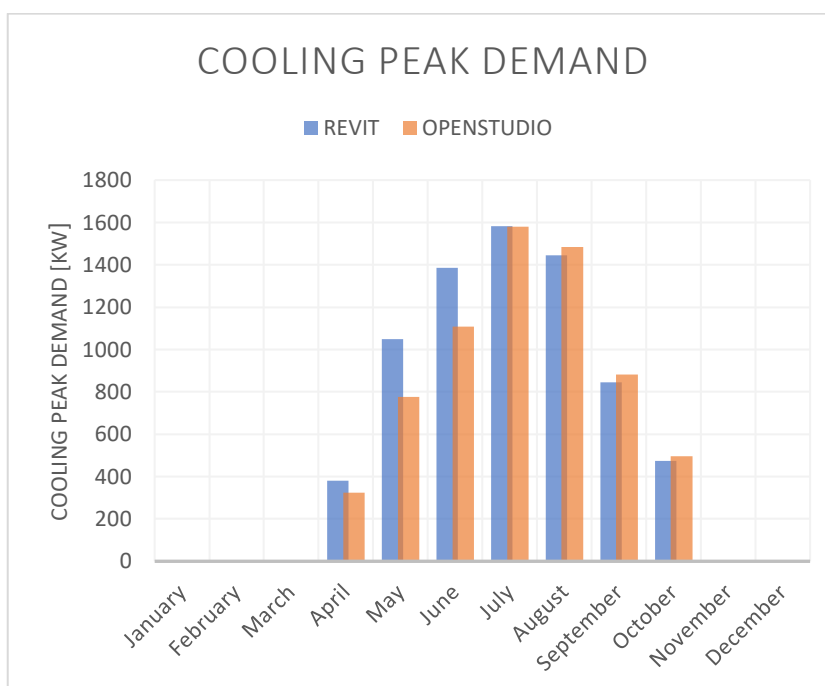


figura 6.4: grafico carichi termici di picco per il raffrescamento delle simulazioni 1 e 3

HEATING PEAK DEMAND [kW]	SIMULATIONS	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
REVIT	1: "tende esterne giù"	1207,0	957,2	788,2	287,4	0	0	0	0	0	344,7	757,5	982,0
OPENSTUDIO	3: "tende esterne giù"	2220,9	1195,7	683,6	228,7	0	0	0	0	0	377,3	1022,5	1289,7
$\Delta\%$		84,0%	24,9%	-13,3%	-20,4%	0	0	0	0	0	9,4%	35,0%	31,3%

tabella 6.6: carichi termici di picco per il riscaldamento delle simulazioni 1 e 3

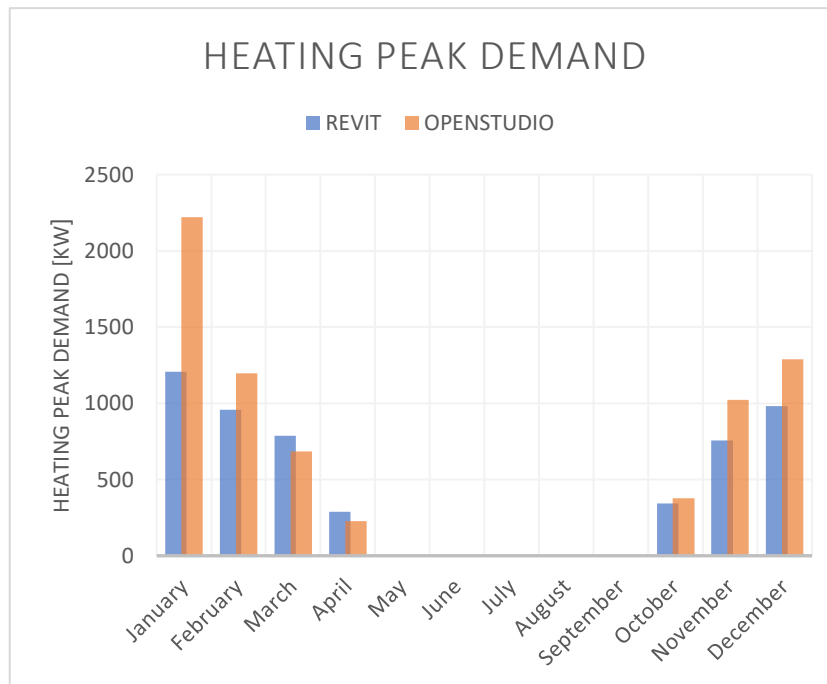


figura 6.5: grafico carichi termici di picco per il riscaldamento delle simulazioni 1 e 3

6.1.2 Confronto simulazioni 2 e 4

Le considerazioni fatte tra le simulazioni 1 e 3 rimangono valide anche tra le simulazioni 2 e 4, solo che in questo caso i risultati ottenuti si amplificano tra OpenStudio e Revit, siccome viene aumentato l'errore nella gestione della radiazione solare diretta nei vetri in Revit. Quindi nelle simulazioni 2 e 4, Revit sovrastima maggiormente il contributo solare a causa degli algoritmi di simulazioni più semplificativi rispetto ad OpenStudio che è basato su simulazione dinamica più dettagliata.

ENERGY CONSUMPTION [$\frac{MWh}{year}$]	COOLING	HEATING	LIGHTS - ELECTRICAL EQUIPMENT	TOTAL
REVIT – 2: “tende esterne su”	933,5	733,8	705,3	2372,6
OPENSTUDIO – 4: “tende esterne su”	603,5	457,0	635,7	1696,1
$\Delta\%$	-35,4%	-37,7%	-9,9%	-28,5%

tabella 6.7: fabbisogni di energia termica annuali dell'intero complesso e differenze percentuali tra simulazione 2 e 4

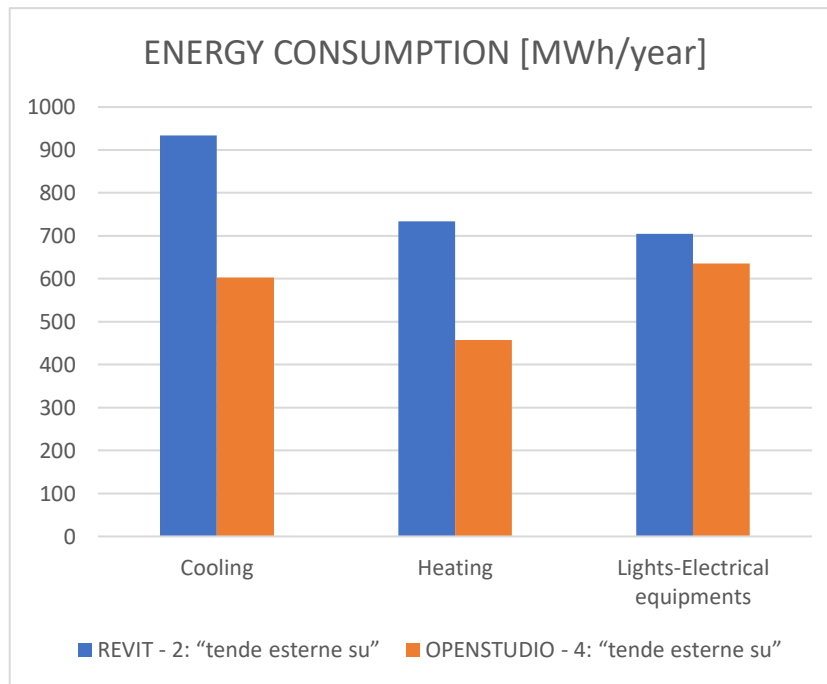


figura 6.6: grafico fabbisogni di energia termica annuali dell'intero complesso e differenze percentuali tra simulazione 2 e 4

COOLING CONSUMPTION [MWh]	SIMULATIONS	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
REVIT	2: "tende esterne su"	0	0	0	7,3	101,2	243,3	310,7	161,9	96,0	13,2	0	0
OPENSTUDIO	4: "tende esterne su"	0	0	0	3,7	43,3	135,2	224,2	106,8	77,6	12,6	0	0
$\Delta\%$		0	0	0	-49,4%	-57,2%	-44,4%	-27,8%	-34,0%	-19,1%	-4,1%	0	0

tabella 6.8: fabbisogno di energia termica per il raffrescamento delle simulazioni 2 e 4

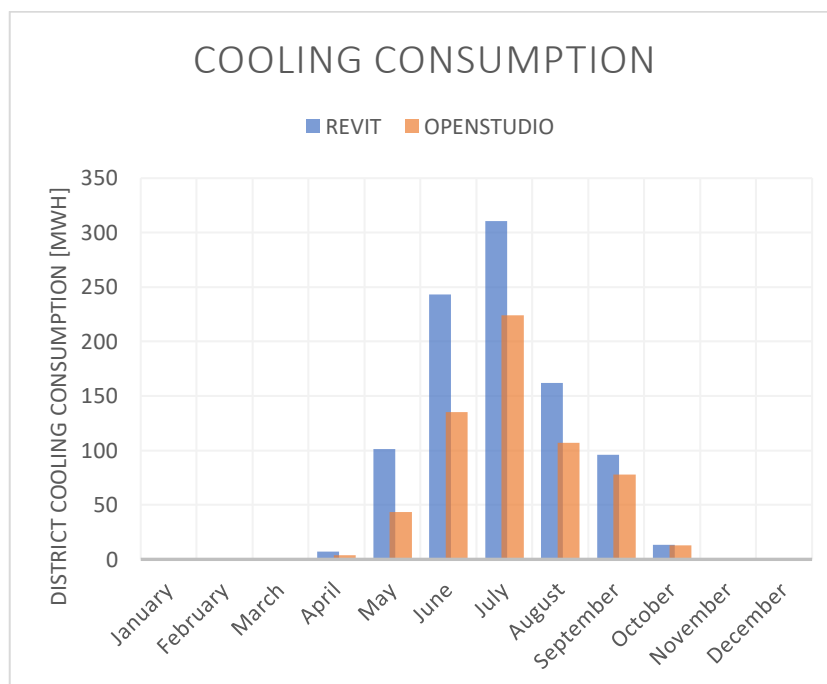


figura 6.7: grafico fabbisogno di energia termica per il raffrescamento delle simulazioni 2 e 4

HEATING CONSUMPTION [MWh]	SIMULATIONS	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
REVIT	2: “tende esterne su”	235,4	162,5	69,6	5,4	0	0	0	0	0	7,3	77,8	175,8
OPENSTUDIO	4: “tende esterne su”	150,0	106,6	40,6	1,7	0	0	0	0	0	6,9	60,1	91,2
$\Delta\%$		-36,3%	-34,4%	-41,7%	-69,4%	0	0	0	0	0	-5,3%	-22,7%	-48,1%

tabella 6.9: fabbisogno di energia termica per il riscaldamento delle simulazioni 2 e 4

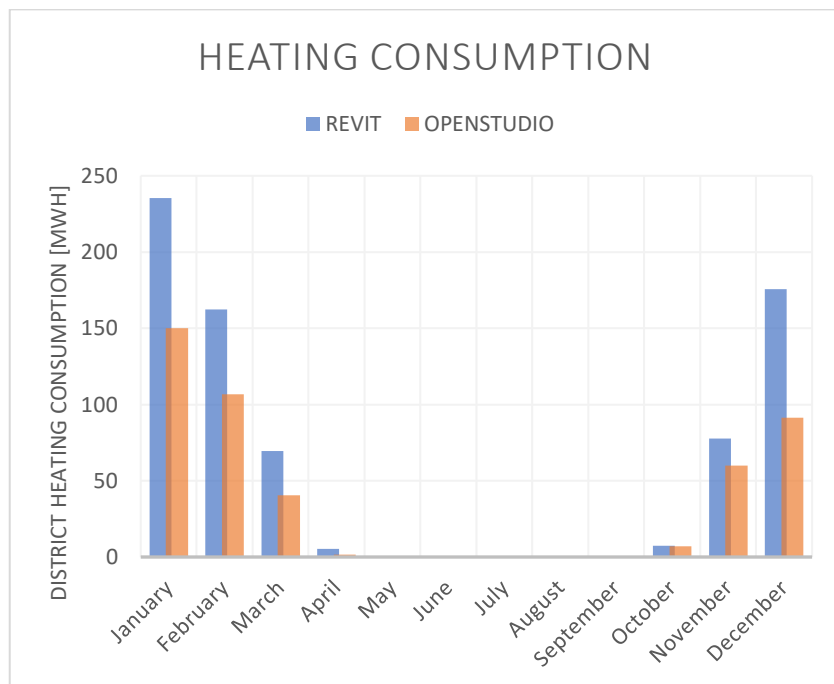


figura 6.8: grafico fabbisogno di energia termica per il riscaldamento delle simulazioni 2 e 4

Anche nei picchi di raffrescamento e riscaldamento si possono fare le medesime considerazioni, si nota infatti un maggiore impatto delle schermature esterne in Revit rispetto che in OpenStudio confermando ancora di più l'impatto importante del sole che viene considerato in Revit.

COOLING PEAK DEMAND [kW]	SIMULATIONS	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
REVIT	2: “tende esterne su”	0	0	0	475,1	1168,8	1504,6	1711,7	1575,7	963,8	566,6	0	0
OPENSTUDIO	4: “tende esterne su”	0	0	0	356,4	791,2	1121,3	1594,0	1523,0	900,1	520,5	0	0
$\Delta\%$		0	0	0	-25,0%	-32,3%	-25,5%	-6,9%	-3,3%	-6,6%	-8,1%	0	0

tabella 6.10: carichi termici di picco per il raffrescamento delle simulazioni 2 e 4

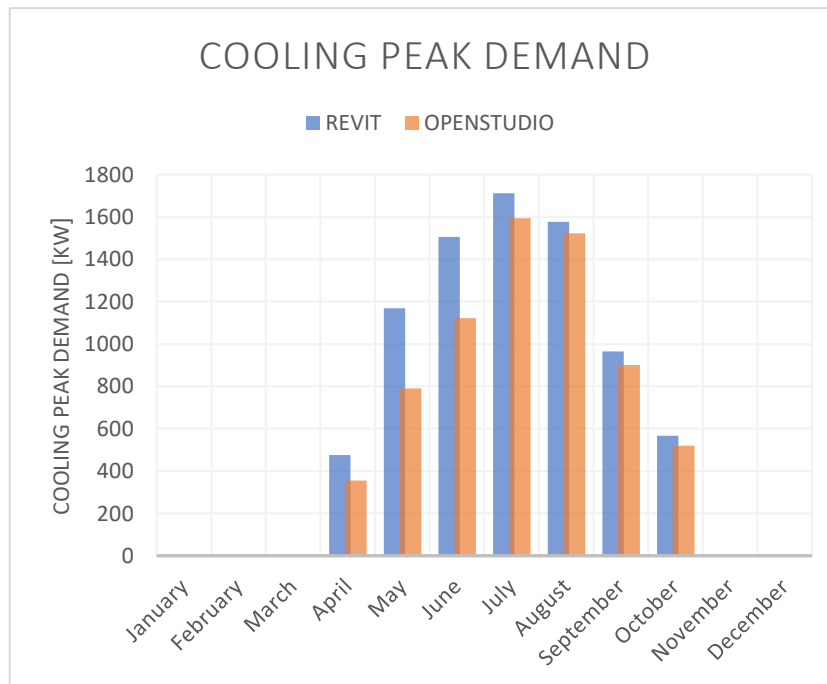


figura 6.9: grafico carichi termici di picco per il raffrescamento delle simulazioni 2 e 4

HEATING PEAK DEMAND [kW]	SIMULATIONS	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
REVIT	2: "tende esterne su"	1232,8	983,1	833,9	306,3	0	0	0	0	0	345,3	747,2	1030,8
OPENSTUDIO	4: "tende esterne su"	2185,3	1185,2	675,7	217,8	0	0	0	0	0	365,6	1014,9	1284,9
$\Delta\%$		77,3%	20,6%	-19,0%	-28,9%	0	0	0	0	0	5,9%	35,8%	24,7%

tabella 6.11: carichi termici di picco per il riscaldamento delle simulazioni 2 e 4

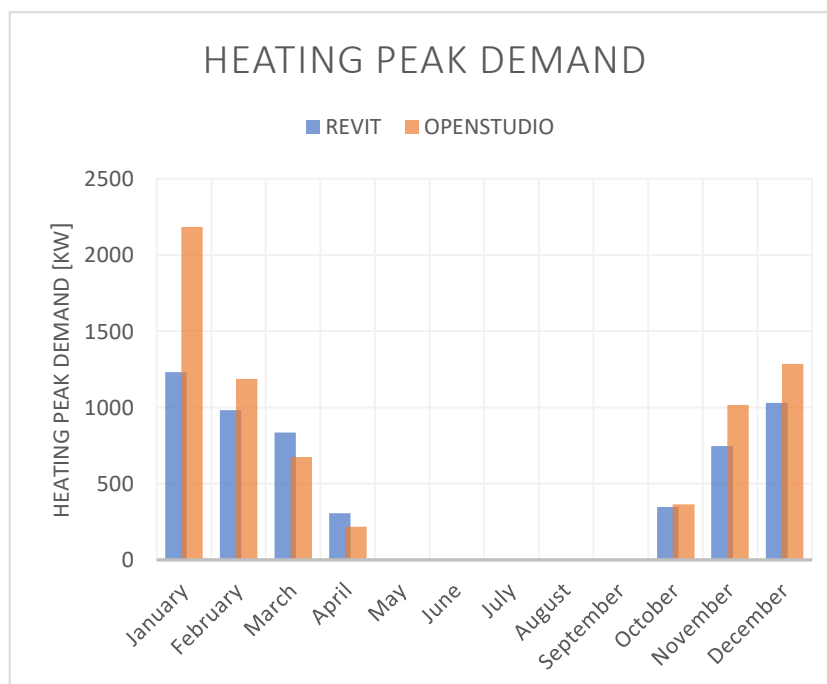


figura 6.10: grafico carichi termici di picco per il riscaldamento delle simulazioni 2 e 4

6.2 Indici di prestazione energetica globale

La tabella 6.13 e la tabella 6.14 sintetizzano i risultati più rilevanti ottenuti dalle otto simulazioni, ovvero i valori riferiti all'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile che permette di confrontare in modo diretto l'esito dei calcoli con il dato reale di certificazione del complesso Beato Pellegrino, pari a $99,30 \frac{kWh}{m^2 \text{ year}}$

il quale posiziona il complesso Beato Pellegrino in classe energetica A2.

Per ogni simulazione sono stati considerati due scenari specifici:

1. Lo scenario reale del progetto (tabella 6.13): basato sull'integrazione delle effettive efficienze operative delle pompe di calore Rhoss installate all'interno del complesso.
2. Lo scenario di baseline (tabella 6.14): un caso generico servito da reti urbane di teleriscaldamento (district heating) e teleraffrescamento (district cooling).

Nel primo caso le efficienze COP e EER delle pompe di calore sono state ricavate alle temperature di progetto e mediati ponderalmente in base alle rispettive potenze erogate (tabella 2.5 e tabella 2.6) e considerando il solo fattore di conversione relativo alla rete elettrica (tabella 6.12), questo permette di ottenere correttamente il valore della energia primaria (source energy), partendo dall'energia finale (site energy).

Nel secondo caso invece non si considerano delle pompe di calore installate, bensì il teleraffrescamento (district cooling) per i periodi caldi, teleriscaldamento (district heating) per i periodi freddi e la rete elettrica (grid electricity) per le luci e le apparecchiature elettriche.

CONVERSION FACTORS	
grid electricity	1,95
district cooling	0,5
district heating	1,5

tabella 6.12: fattori di conversione dall'energia finale all'energia primaria

I valori ottenuti nel primo caso con le pompe di calore Rhoss sono un'ulteriore prova del perché sono state eseguite le simulazioni energetiche sia su Revit sia su OpenStudio, i valori dell'indice di prestazione globale il flusso di lavoro in OpenStudio mostra un progressivo e netto miglioramento dei risultati passando da una simulazione alla successiva. Nello specifico, le simulazioni 7 e 8 convergono in modo quasi perfetto con l'indice di riferimento reale, registrando valori rispettivamente di $97 \frac{kWh}{m^2 \text{ year}}$ e $97,3 \frac{kWh}{m^2 \text{ year}}$.

Si può notare invece come Revit tende a sovrastimare in modo importante l'energia primaria e di conseguenza anche l'indice di prestazione globale.

SIMULATIONS		Total Source Energy with heat pumps efficiency $[MWh]$ $[year]$	$EP_{gl \text{ non renewable}}$ $[\frac{kWh}{m^2 \text{ year}}]$	$\Delta\%$ reference value
			CONDITIONED AREA	
				$99,3 \frac{kWh}{m^2 \text{ year}}$
REVIT	1: "con schermature"	2294,2	135,8	36,8%
	2: "senza schermature"	2396,9	141,9	42,9%
OPENSTUDIO	3: "con schermature"	1882,7	111,5	12,2%
	4: "senza schermature"	1888,4	111,8	12,6%
	5: "con schermature e attenuazione"	1886,7	111,7	12,5%
	6: "senza schermature e attenuazione"	1892,5	112,0	12,8%
	7: "con schermature e recuperatore di calore"	1637,7	97,0	-2,4%
	8: "con schermature, recuperatore di calore e attenuazione"	1643,6	97,3	-2,0%

tabella 6.13: $EP_{gl \text{ non renewable}}$ delle otto simulazioni con l'efficienza delle pompe di calore realmente installate e $\Delta\%$ rispetto al valore di riferimento $99,30 \frac{kWh}{m^2 \text{ year}}$

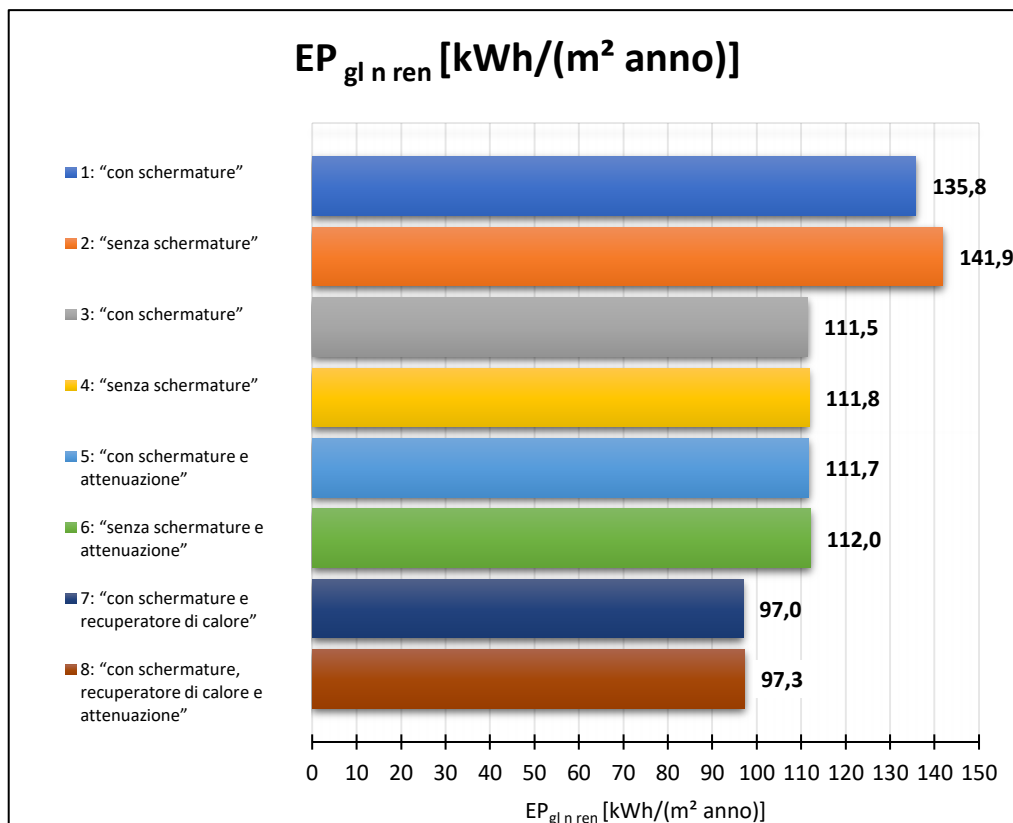


figura 6.11: indici di prestazione energetica globale

Nel secondo scenario, sebbene i requisiti energetici ideali dell'involucro edilizio sono stati mantenuti invariati, l'assenza delle pompe di calore, unita all'impiego dei fattori di conversione relativi ai sistemi di teleriscaldamento e teleraffrescamento, determina un significativo incremento dell'energia primaria in tutte le simulazioni eseguite. Anche in questo contesto meno favorevole, tuttavia, le simulazioni 7 e 8 garantiscono dei consumi energetici più contenuti. Ciò fornisce un'ulteriore conferma dell'importanza cruciale dei recuperatori di calore e dalle strategie di attenuazione notturna nel miglioramento delle prestazioni energetiche complessive.

SIMULATIONS		Total Source Energy without heat pumps efficiency $\left[\frac{MWh}{year}\right]$	$EP_{gl\ non\ renewable}$ $\left[\frac{kWh}{m^2\ year}\right]$	$\Delta\%$ reference value
			CONDITIONED AREA	99,3 $\left[\frac{kWh}{m^2\ year}\right]$
REVIT	1: "con schermature"	2844,9	168,4	69,6%
	2: "senza schermature"	2942,8	174,2	75,4%
OPENSTUDIO	3: "con schermature"	2228,8	132,0	32,9%
	4: "senza schermature"	2226,8	131,8	32,8%
	5: "con schermature e attenuazione"	2238,0	132,5	33,4%
	6: "senza schermature e attenuazione"	2235,9	132,4	33,3%
	7: "con schermature e recuperatore di calore"	1679,3	99,4	0,1%
	8: "con schermature, recuperatore di calore e attenuazione"	1692,6	100,2	0,9%

tabella 6.14: $EP_{gl\ non\ renewable}$ delle otto simulazioni considerando impianto generici e $\Delta\%$ rispetto al valore di riferimento $99,30 \frac{kWh}{m^2\ year}$

6.3 Fabbisogni energetici e carichi di picco

Dall'analisi dei principali valori di indici di prestazione per il raffrescamento, riscaldamento e dei picco di carico, le considerazioni che si possono trarre sul comportamento termofisico del complesso sono molteplici. Si nota innanzitutto un impatto maggiore in Revit delle tende esterne per la schermatura del sole, come spiegato precedentemente questo effetto può essere ricondotto alla modalità con cui Revit interpreta il contributo solare diretto nei vetri. In OpenStudio il contributo è presente, ma in quantità minore, d'altronde sono solo tre gli edifici caratterizzati dalle tende esterne, A1, P1 e P3, di cui non tutte le finestre sono dotate di tali schermature, quindi su 15 edifici totali il contributo è sicuramente di minore importanza.

Un altro aspetto importante sono gli impatti dell'attenuazione della temperatura nei periodi di chiusura del complesso e dell'impiego del recuperatore di calore ipotetico, con rendimento del 75%.

Si può concludere che l'attenuazione permette di ridurre in maniera sensibile il picco di carico termico di riscaldamento mentre i consumi generali rimangono in linea con le precedenti simulazioni.

Il recuperatore di calore invece porta a diminuire i consumi del 22%, lo stesso vale per il picco di carico di riscaldamento nel caso senza attenuazione di temperatura.

Se invece considerassimo sia l'attenuazione di temperatura che il recuperatore di calore, il loro contributo permette di ridurre sensibilmente i consumi annuali del 22%, ma l'impatto più importante si può notare nel picco di carico di riscaldamento infatti il suo valore diminuisce fino al valore di 1172,2 kW e con una riduzione massima del 47% rispetto alla simulazione 3, che presentava il valore più alto tra tutte le simulazioni eseguite. I valori ottenuti per gli indici di prestazione energetica sia di raffrescamento che di riscaldamento sono confermati da precedenti studi ed articoli scientifici, in particolare confrontando i valori ottenuti con i benchmark di riferimento dell'articolo BIM-SPEED [6], per interventi di ristrutturazione profonda su edifici pubblici, per il $EP_{HEATING}$ i valori target sono $20 \div 40 \frac{kWh}{m^2 \text{ year}}$. Mentre per i valori di riferimento per l'indice

di prestazione energetica di raffrescamento $EP_{COOLING}$ i valori si attestano sui $30 \div 50 \frac{kWh}{m^2 \text{ year}}$, valori presi dall'articolo "BIM for Sustainable Redevelopment of a Major Office Building in Rome" [5] che sono inerenti a complessi di edifici, come uffici di dimensioni importanti e con elevati carichi interni, infatti in questi casi è predominante il fabbisogno energetico di raffrescamento pure durante le mezze stagioni.

SIMULATIONS		EP [kWh/(m²year)]		PEAK LOAD [kW]		SPECIFIC LOAD [W/m²]	
		COOLING	HEATING	COOLING	HEATING	COOLING	HEATING
REVIT	1: "con schermature"	45,1	42,9	1582,1	1207,0	93,6	71,4
	2: "senza schermature"	55,3	43,4	1711,7	1232,8	101,3	73,0
OPENSTUDIO	3: "con schermature"	34,6	27,5	1579,4	2220,9	93,5	131,5
	4: "senza schermature"	35,7	27,1	1594,0	2185,3	94,4	129,4
	5: "con schermature e attenuazione"	34,6	27,9	1579,4	1729,7	93,5	102,4
	6: "senza schermature e attenuazione"	35,7	27,4	1594,0	1707,7	94,4	101,1
	7: "con schermature e recuperatore di calore"	34,6	5,8	1579,4	1736,4	93,5	102,8
	8: "con schermature, recuperatore di calore e attenuazione"	34,6	6,4	1579,4	1172,2	93,5	69,4

tabella 6.15: risultati generali delle otto simulazioni

6.3.1 Fabbisogni di energia termica

L'analisi dell'andamento mensile del fabbisogno energetico di raffrescamento conferma che la richiesta maggiore avviene nel mese di luglio, nello specifico nelle simulazioni eseguite in Revit i dati mettono in risalto come l'assenza di schermature esterne per il sole portino ad un incremento dei consumi pari al 19,6% in questo mese e ad un aumento del 18,3% dei consumi annuali.

Mentre nelle simulazioni eseguite in OpenStudio l'aumento mensile è pari al 1,9%, mentre quello annuale è del 3,3%.

COOLING CONSUMPTION [MWh] [year] SIMULATIONS		January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	TOTAL [MWh]
REVIT	1: "con schermature"	0,0	0,0	0,0	5,6	77,8	199,5	259,7	134,7	75,2	10,0	0,0	0,0	762,6
	2: "senza schermature"	0,0	0,0	0,0	7,3	101,2	243,3	310,7	161,9	96,0	13,2	0,0	0,0	933,5
OPENSTUDIO	3: "con schermature"	0,0	0,0	0,0	3,1	40,7	132,0	220,0	103,4	73,7	11,3	0,0	0,0	584,2
	4: "senza schermature"	0,0	0,0	0,0	3,7	43,3	135,2	224,2	106,8	77,6	12,6	0,0	0,0	603,5
	5: "con schermature e attenuazione"	0,0	0,0	0,0	3,1	40,7	132,0	220,0	103,4	73,7	11,3	0,0	0,0	584,2
	6: "senza schermature e attenuazione"	0,0	0,0	0,0	3,7	43,3	135,2	224,2	106,8	77,6	12,6	0,0	0,0	603,5
	7: "con schermature e recuperatore di calore"	0,0	0,0	0,0	3,1	40,7	132,0	220,0	103,4	73,7	11,3	0,0	0,0	584,2
	8: "con schermature, recuperatore di calore e attenuazione"	0,0	0,0	0,0	3,1	40,7	132,0	220,0	103,4	73,7	11,3	0,0	0,0	584,2

tabella 6.16: fabbisogno di energia termica per il raffrescamento delle otto simulazioni

Per quanto riguarda i valori del fabbisogno di energia termica di riscaldamento i valori più elevati si raggiungono in Gennaio, con una diminuzione significativa tra Revit e OpenStudio ma soprattutto quando nelle simulazioni 7 e 8 dove è stato considerato il recuperatore di calore, si arriva ad ottenere una differenza nel mese di Gennaio pari a 69,5% e quella annuale pari a 79%, confermando l'enorme importanza di tale soluzione, specialmente in complessi di edifici di dimensioni elevate come il Beato Pellegrino.

HEATING CONSUMPTION [MWh] [year] SIMULATIONS		January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	TOTAL [MWh]
REVIT	1: "con schermature"	226,4	159,2	71,5	5,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	81,6	173,6	725,6
	2: "senza schermature"	235,4	162,5	69,6	5,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,3	77,8	175,8	733,8
OPENSTUDIO	3: "con schermature"	152,1	108,5	41,7	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,1	61,4	92,3	464,7
	4: "senza schermature"	150,0	106,6	40,6	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,9	60,1	91,2	457,0
	5: "con schermature e attenuazione"	155,9	109,4	41,5	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,0	61,8	93,5	470,8
	6: "senza schermature e attenuazione"	153,7	107,5	40,4	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,8	60,5	92,4	463,0
	7: "con schermature e recuperatore di calore"	47,6	19,4	5,7	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	8,8	15,9	98,4
	8: "con schermature, recuperatore di calore e attenuazione"	52,2	20,8	6,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	9,7	17,5	107,3

tabella 6.17: fabbisogno di energia termica per il riscaldamento delle otto simulazioni

6.3.2 Carichi termici di picco

Riguardo ai carichi termici di picco riferiti al raffrescamento si può notare come Revit nella simulazione 2 sovrastima il picco durante quasi tutti i mesi estivi, come spiegato precedentemente il contributo solare diretto nei vetri ha un contributo notevole nel calcolo del picco di carico. Se si si guarda alla simulazione 1, invece, i valori di picco ottenuti sono allineati quasi perfettamente tra Revit e la simulazione 3 in OpenStudio, tale convergenza conferma la corretta calibrazione geometrica e termofisica del modello in entrambi gli ambienti di simulazione.

Osservando i risultati delle simulazioni effettuate nell'ambiente OpenStudio (dalla 3 alla 8), emerge chiaramente come i valori dei picchi termici durante la stagione estiva restino invariati nei mesi analizzati. Questa stabilità è strettamente correlata alle logiche di gestione implementate nel modello energetico adottato, infatti le strategie di ottimizzazione, quali l'attenuazione notturna e il recupero di calore sulla ventilazione, sono state progettate per operare esclusivamente nel periodo di riscaldamento. Di conseguenza, non si rilevano variazioni nella stima della potenza frigorifera massima richiesta nei mesi estivi rispetto ai casi di partenza nelle simulazioni 3 e 4.

COOLING PEAK DEMAND [kW] SIMULATIONS		January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
REVIT	1: “con schermature”	0,0	0,0	0,0	381,5	1049,5	1385,5	1582,1	1444,1	845,3	474,4	0,0	0,0
	2: “senza schermature”	0,0	0,0	0,0	475,1	1168,8	1504,6	1711,7	1575,7	963,8	566,6	0,0	0,0
OPENSTUDIO	3: “con schermature”	0,0	0,0	0,0	324,3	777,5	1108,8	1579,4	1484,7	883,0	497,0	0,0	0,0
	4: “senza schermature”	0,0	0,0	0,0	356,4	791,2	1121,3	1594,0	1523,0	900,1	520,5	0,0	0,0
	5: “con schermature e attenuazione”	0,0	0,0	0,0	324,2	777,5	1108,7	1579,4	1484,7	883,0	497,0	0,0	0,0
	6: “senza schermature e attenuazione”	0,0	0,0	0,0	356,3	791,2	1121,3	1594,0	1523,0	900,1	520,5	0,0	0,0
	7: “con schermature e recuperatore di calore”	0,0	0,0	0,0	324,3	777,5	1108,8	1579,4	1484,7	883,0	497,0	0,0	0,0
	8: “con schermature, recuperatore di calore e attenuazione”	0,0	0,0	0,0	324,3	777,5	1108,8	1579,4	1484,7	883,0	497,0	0,0	0,0

tabella 6.18: carichi termici di picco per il raffrescamento delle otto simulazioni

Per i carichi termici di picco per il riscaldamento si nota come OpenStudio li sovrastima in maniera importante, specialmente nelle simulazioni 3 e 4. Questo scostamento trova spiegazione nelle logiche di calcolo e simulazione dei due software, infatti in OpenStudio le simulazioni sono state eseguite utilizzando l'impostazione di “Ideal air loads”, fabbisogni ideali, quindi nel modello è applicata una potenza teoricamente infinita. Nei transitori, tipo alla riaccensione mattutina degli impianti, OpenStudio eroga istantaneamente tutta la potenza necessaria per soddisfare i valori di temperatura di comfort preimpostati (21°C), generando picchi di carico molto elevati.

In Revit, invece, bisogna tenere presente il fatto che non avendo definito gli impianti nel browser di sistema i risultati ottenuti sono sì ideali, ma il contributo dell'aria di rinnovo non è presente e su zone di ampie dimensioni questo va ad influire pesantemente.

La validità dell'algoritmo di OpenStudio è confermata dai risultati delle successive simulazioni, specialmente dalla 7 e 8, infatti l'inserimento del recuperatore di calore riduce drasticamente i valori di picco mensili, per il picco massimo invece la simulazione 8 fa da riferimento allineandosi con i valori ottenuti in Revit nelle simulazioni 1 e 2.

HEATING PEAK DEMAND [kW] SIMULATIONS		January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
REVIT	1: “con schermature”	1207,0	957,2	788,2	287,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	344,7	757,5	982,0
	2: “senza schermature”	1232,8	983,1	833,9	306,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	345,3	747,2	1030,8
OPENSTUDIO	3: “con schermature”	2220,9	1195,7	683,6	228,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	377,3	1022,5	1289,7
	4: “senza schermature”	2185,3	1185,2	675,7	217,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	365,6	1014,9	1284,9
	5: “con schermature e attenuazione”	1729,7	1144,1	667,5	229,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	377,3	948,5	1223,3
	6: “senza schermature e attenuazione”	1707,7	1135,9	659,6	218,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	365,7	941,4	1218,7
	7: “con schermature e recuperatore di calore”	1736,4	443,9	274,1	61,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	108,4	418,3	503,6
	8: “con schermature, recuperatore di calore e attenuazione”	1172,2	364,3	242,8	61,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	107,9	314,3	406,7

tabella 6.19: carichi termici di picco per il riscaldamento delle otto simulazioni

6.4 Impatto schermature solari (tende esterne)

In Revit l'impatto delle tende esterne per la schermatura solare hanno un impatto elevato sul fabbisogno energetico totale del complesso, infatti senza considerare tali schermature il valore del fabbisogno aumenta di $332 \frac{MWh}{year}$, ovvero di un 16%. Lo stesso impatto avviene anche negli indici di prestazione energetica non rinnovabile globale che aumentano del 22% per il $EP_{COOLING}$ e del 1% per il $EP_{HEATING}$, questo valore rimane abbastanza costante. Si possono trarre le medesime considerazioni pure per i carichi termici di picco, infatti se considerate le tende esterne riescono ad abbattere del 8% il picco di raffrescamento e del 2% quello di riscaldamento. Le stesse identiche percentuali valgono anche per il carico specifico.

In OpenStudio i risultati ottenuti dalle simulazioni dinamiche nei due casi sono molto simili, se non per una leggera riduzione del picco di raffrescamento del 3%.

La differenza che si ottiene tra i due software utilizzati può essere attribuita alla modalità di gestione del bilancio termico che i due software usano, di base i software BIM come Revit sono caratterizzati da un metodo di simulazione semplificato e che quindi porta a sovrastimare l'influenza diretta del sole nelle superficie come vetri e tende. OpenStudio invece è noto per eseguire un'analisi dettagliata in funzione dei profili d'uso (schedules), in questo caso i carichi interni come persone, luci e apparecchiature elettriche limitano l'impatto del sole diretto, essendoci una elevata densità di questi carichi.

$\Delta\%$ "tende esterne"							
SIMULATIONS	Energy Total/Net	EP_{gt}		EP		PEAK LOAD	
		TOTAL AREA	CONDITIONED AREA	COOLING	HEATING	COOLING	HEATING
SIM 1 vs SIM 2	4,5%	4,5%	4,5%	22,4%	1,1%	8,2%	2,1%
SIM 3 vs SIM 4	0,3%	0,3%	0,3%	3,3%	-1,7%	0,9%	-1,6%

tabella 6.20: impatto delle tende esterne nei principali risultati

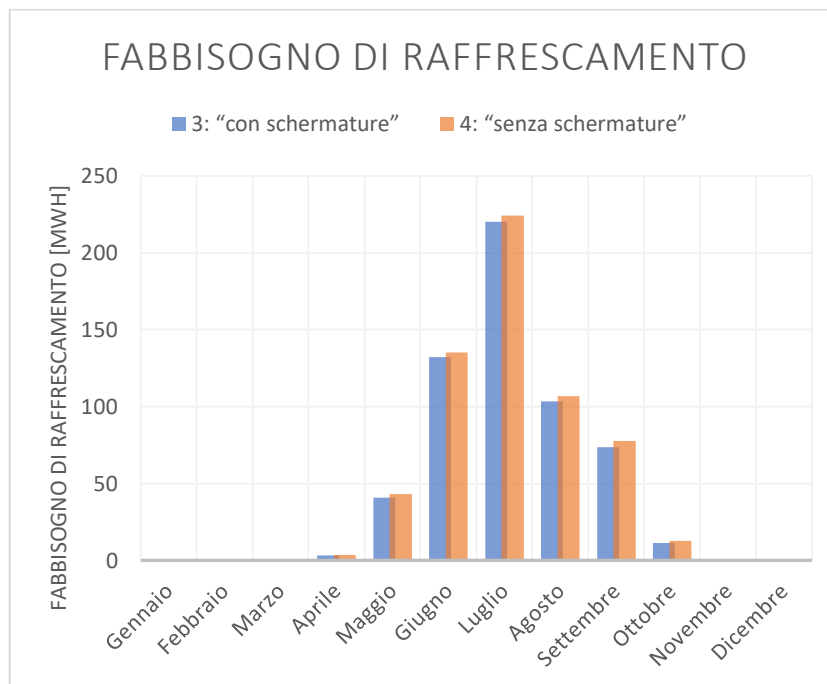


figura 6.12: impatto schermature solari sul fabbisogno

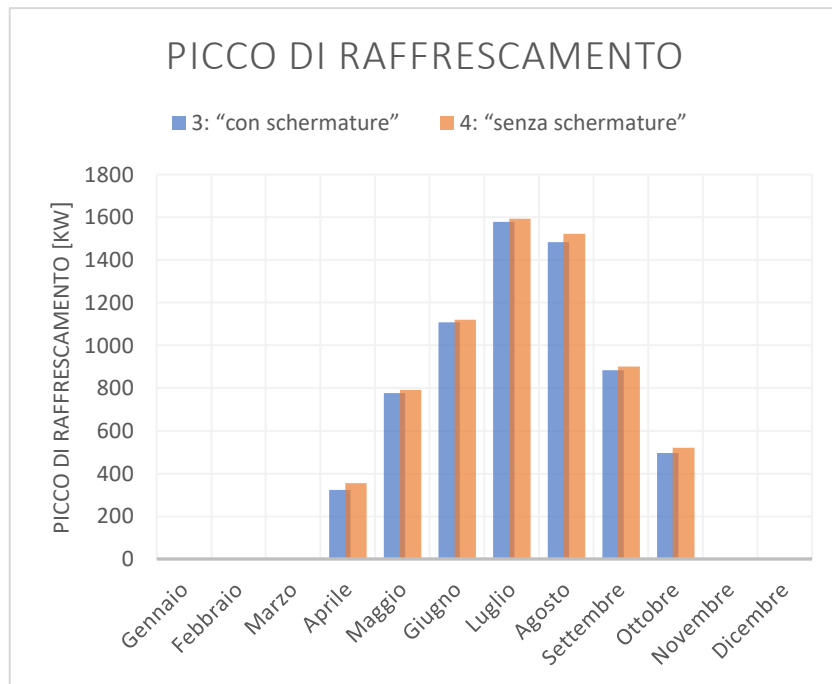


figura 6.13: impatto schermature solari sul picco di carico

6.5 Impatto attenuazione temperatura

L'attenuazione della temperatura è una soluzione che deve essere impiegata per normative e leggi nazionali/internazionali, infatti nella stagione di riscaldamento sono previste delle temperature di efficienza e di sicurezza da applicare nei periodi di chiusura breve e prolungata. Nei periodi brevi si considera una temperatura di 16°C che permette di ridurre gli sbalzi termici durante la giornata, mentre per i periodi di lunga durata si applica una temperatura di sicurezza di antigelo.

Questa soluzione permette di avere dei consumi annuali che risultano praticamente identici, ma il vero vantaggio che si ottiene riguarda la riduzione del picco di carico di riscaldamento, nel caso studio di un 22%.

SIMULATIONS	$\Delta\%$ "attenuazione temperatura"						
	Energy Total/Net	EP_{gt}		EP		PEAK LOAD	
		TOTAL AREA	CONDITIONED AREA	COOLING	HEATING	COOLING	HEATING
SIM 3 vs SIM 5	0,2%	0,2%	0,2%	0%	1,3%	0%	-22,1%

tabella 6.21: impatto dell'attenuazione della temperatura nei principali risultati

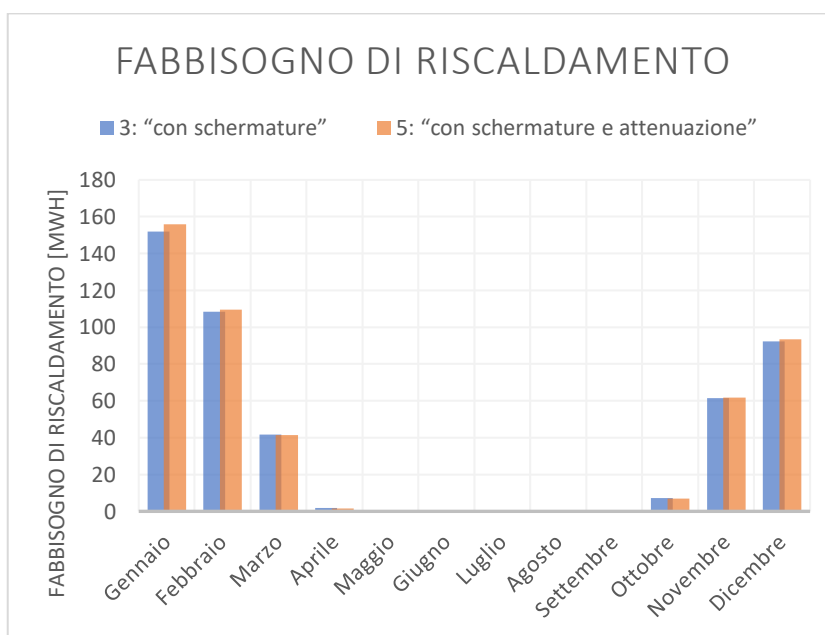


figura 6.14: impatto attenuazione temperatura sul fabbisogno

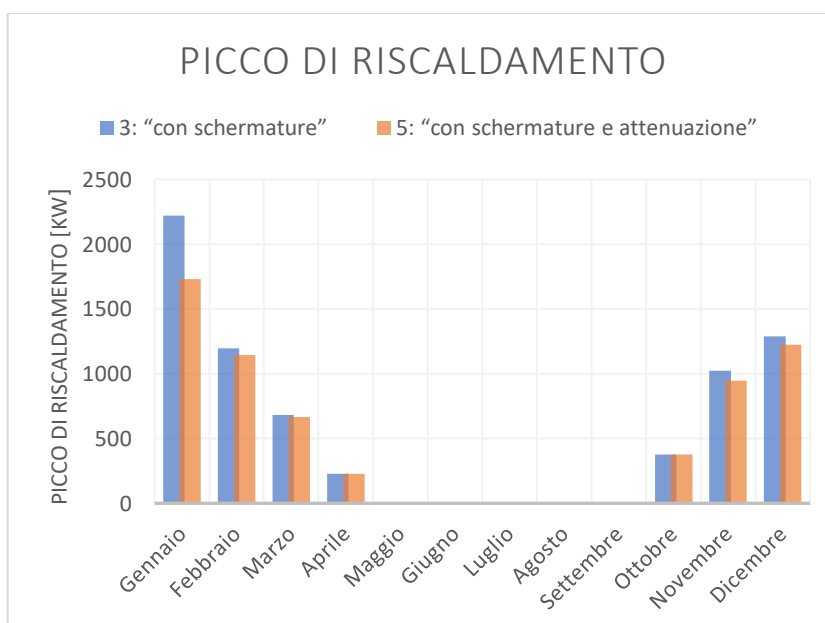


figura 6.15: impatto attenuazione temperatura sul picco di carico

6.6 Impatto recuperatore di calore

L'effetto del recuperatore di calore è stato considerato nel periodo di riscaldamento (dal 15/10 al 15/04) e con un'efficienza del 75% che porta ad ottenere una riduzione considerevole dei consumi annuali, un 22%, ma soprattutto una riduzione ancora maggiore dei picchi di carico di riscaldamento, senza attenuazione di temperatura si ha un 22% in meno, mentre considerando l'effetto dell'attenuazione si ottiene una riduzione del 32%.

$\Delta\%$ "recuperatore di calore"							
SIMULATIONS	Energy Total/Net	EP_{gl}		EP		PEAK LOAD	
		TOTAL AREA	CONDITIONED AREA	COOLING	HEATING	COOLING	HEATING
SIM 3 vs SIM 7	-13,0%	-13,0%	-13,0%	0%	-78,8%	0%	-21,8%
SIM 7 vs SIM 8	0,4%	0,4%	0,4%	0%	9,0%	0%	-32,5%

tabella 6.22: impatto del recuperatore di calore nei principali risultati

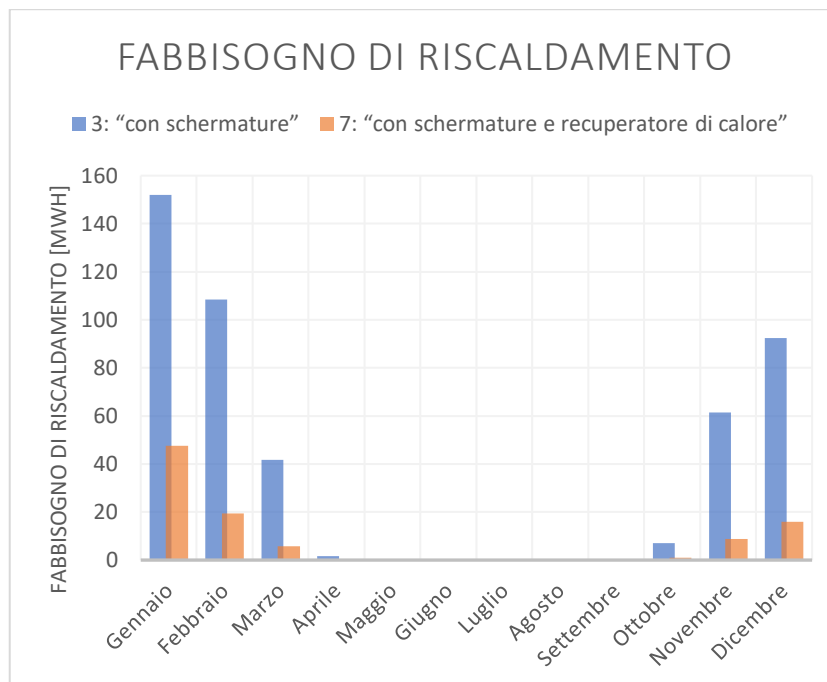


figura 6.16: impatto recuperatore di calore sul fabbisogno

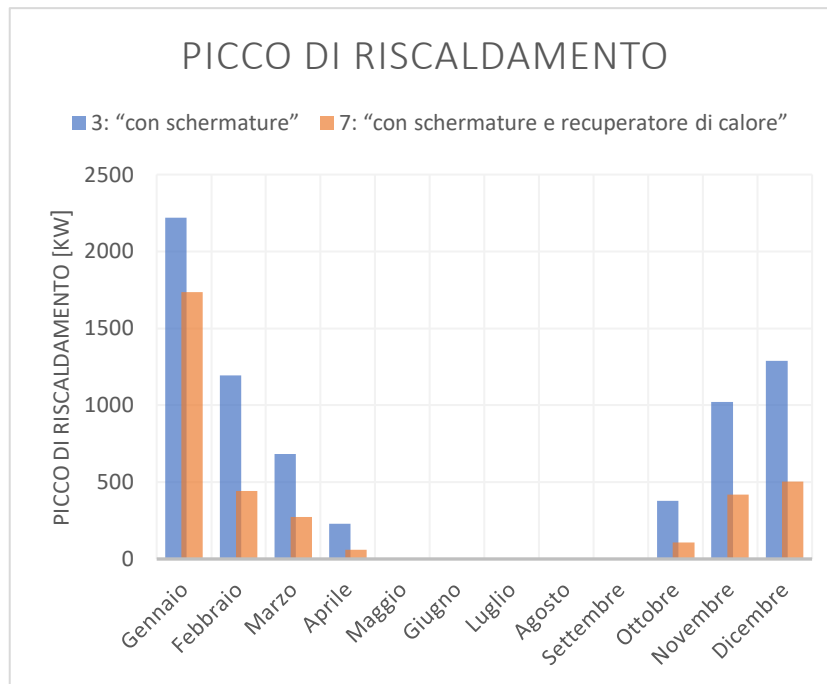


figura 6.17: impatto recuperatore di calore sul picco di carico

Per quanto riguarda la configurazione finale (simulazione 8) si ottengono i seguenti grafici per il fabbisogno energetico e i picchi di carico riscaldamento.

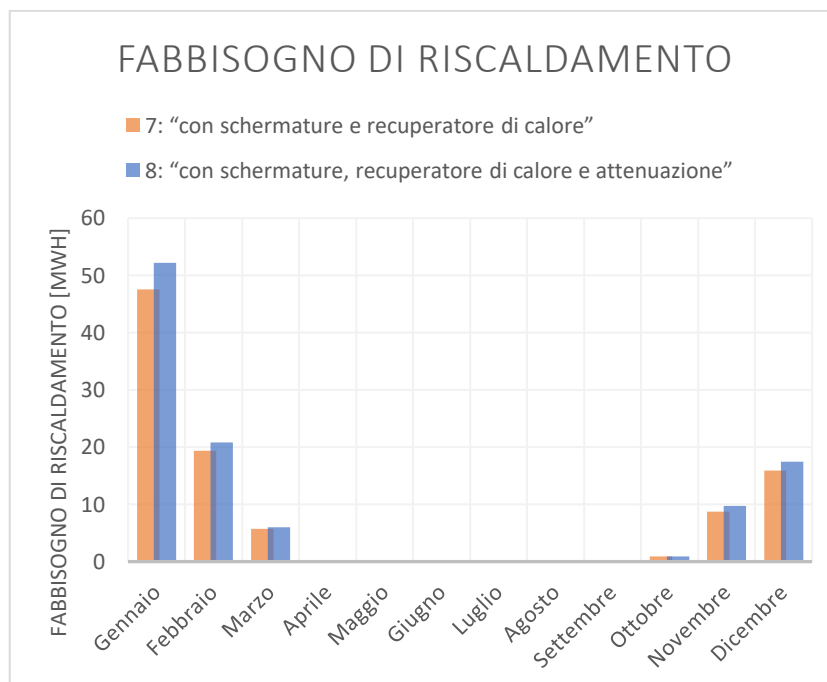


figura 6.18: impatto schermature, recuperatore di calore, attenuazione temperatura sul fabbisogno

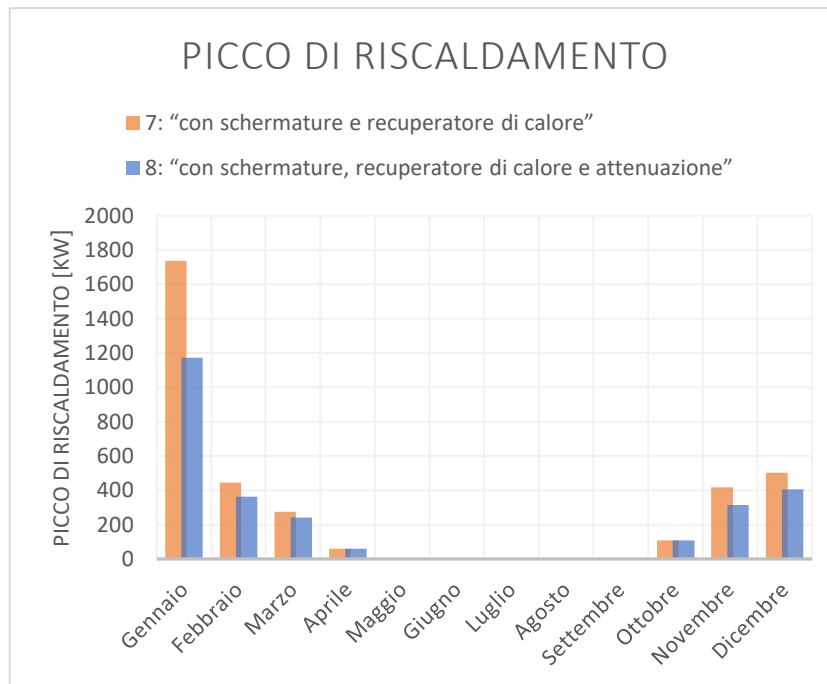


figura 6.19: impatto schermature, recuperatore di calore, attenuazione temperatura sul picco di carico

6.7 Confronto tra zone: Revit vs OpenStudio

Dopo aver analizzato le prestazioni energetiche complessive a livello dell'intero edificio, lo studio è stato approfondito fino a raggiungere il massimo livello di dettaglio, ovvero il confronto delle zone termiche.

Il confronto tra i carichi di picco netti (W) e quelli specifici ($\frac{W}{m^2}$) dei vari locali mette in evidenza le significative differenze nei risultati ottenuti dai due modelli utilizzati rispettivamente nei due ambienti software di simulazione, per avere un confronto più corretto e quindi con le impostazioni energetiche che fossero il più possibile simili, si sono messe a confronto le simulazioni 1 e 3.

Questo confronto permette di valutare approfonditamente il problema dell'interoperabilità BIM-BEM, i risultati ottenuti dimostrano come il passaggio da un software all'altro non è un semplice trasferimento del modello ma rappresenta un problema di rilevante importanza, le differenze presenti a livello di singola zona dimostrano i limiti presenti nei calcolatori dei software di modellazione BIM, spesso incapaci di simulare correttamente il comportamento termofisico di un edificio.

6.7.1 Edificio A1

La seguente tabella riporta i risultati delle 90 zone simulate e anche in questo caso si conferma il trend per le differenze percentuali presenti nei risultati generali, per il raffrescamento si arriva ad una riduzione del picco di raffrescamento 69% passando da Revit ad OpenStudio, mentre per il picco di riscaldamento è presente un aumento del 316%.

ZONE	AREA [m ²]	VOLUME [m ³]	REVIT		OPENSTUDIO		REVIT		OPENSTUDIO		Δ% COOLING	Δ% HEATING
			PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m ²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m ²]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m ²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m ²]		
287	7,1	30,22	758	169	345	677	106,76	23,80	48,56	95,36	-55%	301%
303	16,48	67,72	1514	289	756	1188	91,87	17,54	45,86	72,09	-50%	311%
344	18,02	71,99	1531	275	727	262	84,96	15,26	40,32	14,54	-53%	-5%
203	17,16	32,13	1560	265	735	225	90,91	15,44	42,83	13,14	-53%	-15%
233	4,87	10,25	394	56	210	151	80,90	11,50	43,08	31,10	-47%	170%
217	18,83	34,87	1585	246	802	231	84,17	13,06	42,57	12,29	-49%	-6%
281	4,74	9,19	399	59	214	156	84,18	12,45	45,12	32,83	-46%	164%
364	13,41	73,45	1895	898	867	781	141,31	66,96	64,64	58,27	-54%	-13%
362	22,59	96,28	2766	1599	1263	2892	122,44	70,78	55,92	128,04	-54%	81%
244	14,54	28,22	1207	176	663	222	83,01	12,10	45,59	15,26	-45%	26%
248	9,14	27,35	1156	884	504	1156	126,48	96,72	55,19	126,47	-56%	31%
348	14,78	53,68	1559	772	766	1068	105,48	52,23	51,83	72,24	-51%	38%
315	17,16	36,42	1522	288	732	611	88,69	16,78	42,66	35,61	-52%	112%
346	19,49	40,18	1551	285	814	737	79,58	14,62	41,75	37,84	-48%	159%
288	5,36	11,94	724	184	224	229	135,07	34,33	41,74	42,76	-69%	25%
283	6,22	11,87	729	167	261	249	117,20	26,85	41,89	40,08	-64%	49%
238	18,83	39,68	1544	271	801	669	82,00	14,39	42,55	35,51	-48%	147%
373	7,83	15,92	744	150	319	305	95,02	19,16	40,72	38,91	-57%	103%
321	6,15	12,71	735	168	273	244	119,51	27,32	44,35	39,70	-63%	45%
326	4,74	10,44	387	65	203	204	81,65	13,71	42,78	43,03	-48%	214%
232	18,3	44,77	1552	270	956	866	84,81	14,75	52,27	47,34	-38%	221%
192	12,96	31,57	1183	225	682	621	91,28	17,36	52,59	47,90	-42%	176%
377	9,01	31,6	853	190	525	524	94,67	21,09	58,31	58,15	-38%	176%
246	15,77	52,09	1596	385	837	520	101,20	24,41	53,08	32,97	-48%	35%
301	7,19	18	760	154	406	382	105,70	21,42	56,47	53,11	-47%	148%
198	8,57	28,44	792	140	450	281	92,42	16,34	52,51	32,83	-43%	101%
190	6,86	16,16	754	159	387	368	109,91	23,18	56,35	53,68	-49%	132%
371	14,06	34,79	1162	202	752	686	82,65	14,37	53,51	48,81	-35%	240%
234	45,13	163,07	3814	714	1959	2684	84,51	15,82	43,41	59,46	-49%	276%
273	143,43	527,47	12446	2854	6711	10025	86,77	19,90	46,79	69,89	-46%	251%
285	50,25	191,67	6135	3042	2735	2691	122,09	60,54	54,42	53,54	-55%	-12%

220	41,33	183,7	4347	1197	2238	1314	105,18	28,96	54,16	31,78	-49%	10%
393	130,82	481,99	11593	2689	6190	9264	88,62	20,55	47,32	70,82	-47%	245%
272	6,26	19,49	748	166	382	434	119,49	26,52	61,08	69,33	-49%	161%
312	20,91	73,04	1915	389	941	1305	91,58	18,60	45,02	62,39	-51%	235%
308	43,87	156,03	3466	604	1903	2512	79,01	13,77	43,37	57,26	-45%	316%
201	97,69	361,46	8608	1998	4613	7079	88,12	20,45	47,22	72,46	-46%	254%
381	22,3	101,47	2650	1198	1360	2286	118,83	53,72	60,98	102,49	-49%	91%
331	90,18	331,12	8173	1922	4305	6569	90,63	21,31	47,74	72,85	-47%	242%
311	100,86	370,38	9014	2111	4795	7172	89,37	20,93	47,54	71,11	-47%	240%
332	27,37	62,81	2373	368	1257	902	86,70	13,45	45,91	32,96	-47%	145%
380	20,82	46,19	1949	330	970	707	93,61	15,85	46,59	33,95	-50%	114%
210	12,74	27,42	1170	194	578	432	91,84	15,23	45,38	33,89	-51%	123%
191	25,98	51,99	2621	626	1160	407	100,89	24,10	44,65	15,67	-56%	-35%
305	12,39	26,61	1171	199	573	423	94,51	16,06	46,27	34,13	-51%	112%
370	7,24	14,87	769	143	347	257	106,22	19,75	47,92	35,49	-55%	80%
320	4,75	14,85	407	50	227	161	85,68	10,53	47,86	33,93	-44%	222%
193	10,83	28,88	1648	367	783	775	152,17	33,89	72,25	71,54	-53%	111%
223	222,59	643,67	19289	2900	11565	4697	86,66	13,03	51,96	21,10	-40%	62%
218	29,69	100,41	3155	1358	1587	1221	106,26	45,74	53,45	41,11	-50%	-10%
402	74,37	262,98	7075	1576	4175	5588	95,13	21,19	56,14	75,13	-41%	255%
295	105,78	381,44	10242	2309	5447	2276	96,82	21,83	51,50	21,52	-47%	-1%
310	78,92	291,96	7543	1687	4117	1781	95,58	21,38	52,16	22,57	-45%	6%
375	38,89	154,86	3854	879	2129	1010	99,10	22,60	54,75	25,96	-45%	15%
300	24,13	80,87	2370	520	1335	653	98,22	21,55	55,33	27,05	-44%	26%
351	101,13	373,78	9848	2241	5262	2371	97,38	22,16	52,04	23,44	-47%	6%
327	24,06	84,13	2760	1420	1443	2579	114,71	59,02	59,97	107,21	-48%	82%
268	99,23	360,38	9422	2087	5155	2137	94,95	21,03	51,95	21,53	-45%	2%
322	44,34	162,5	4284	943	2377	1138	96,62	21,27	53,61	25,67	-45%	21%
334	11,32	49,27	1188	190	681	438	104,95	16,78	60,12	38,70	-43%	131%
384	39,3	162,85	3231	433	2132	944	82,21	11,02	54,24	24,03	-34%	118%
347	18,37	42,05	1851	443	860	361	100,76	24,12	46,79	19,65	-54%	-19%
267	12,23	22,5	1174	201	547	186	95,99	16,43	44,77	15,24	-53%	-7%
189	12,99	27,32	1295	303	624	484	99,69	23,33	48,05	37,22	-52%	60%
235	7,24	15,75	842	204	367	285	116,30	28,18	50,66	39,32	-56%	40%
276	6,78	16,77	837	211	343	276	123,45	31,12	50,54	40,73	-59%	31%
333	6,09	14,78	819	220	303	272	134,48	36,12	49,74	44,58	-63%	23%
314	18,48	55,9	1900	459	903	439	102,81	24,84	48,88	23,75	-52%	-4%
274	10,59	24,79	1235	309	497	416	116,62	29,18	46,92	39,32	-60%	35%
334	21,79	51,06	2183	511	681	438	100,18	23,45	31,23	20,11	-69%	-14%
250	11,58	28,18	1285	316	571	446	110,97	27,29	49,33	38,51	-56%	41%
354	14,79	41,9	1392	336	733	754	94,12	22,72	49,53	50,97	-47%	124%
263	4,42	12,15	491	188	242	362	111,09	42,53	54,67	81,93	-51%	93%
294	235,74	697,68	24498	3684	13831	4374	103,92	15,63	58,67	18,55	-44%	19%
323	14,53	40,3	1482	584	755	1047	102,00	40,19	51,96	72,03	-49%	79%
236	5,78	15,74	822	223	299	341	142,21	38,58	51,71	59,08	-64%	53%
264	36,7	152,47	3886	868	2209	1042	105,89	23,65	60,20	28,40	-43%	20%
329	50,5	180,62	5192	1155	2981	3902	102,81	22,87	59,03	77,26	-43%	238%
324	44,31	154,19	4363	928	2675	3329	98,47	20,94	60,38	75,13	-39%	259%
391	121,04	442,94	11859	2554	6547	2523	97,98	21,10	54,09	20,84	-45%	-1%
390	76,81	295,09	7640	1684	4199	1795	99,47	21,92	54,67	23,37	-45%	7%
299	74,46	276,61	7615	1931	4070	2377	102,27	25,93	54,67	31,92	-47%	23%
401	95,09	379,9	9606	2158	5233	2245	101,02	22,69	55,03	23,61	-46%	4%
221	10,43	41,95	1656	1101	592	1109	158,77	105,56	56,79	106,37	-64%	1%
345	15,29	66,1	1823	500	754	367	119,23	32,70	49,34	24,00	-59%	-27%
293	4,81	20	499	121	259	239	103,74	25,16	53,86	49,67	-48%	97%

227	28,21	114,41	3238	1404	1610	1264	114,78	49,77	57,07	44,81	-50%	-10%
275	70,67	309,46	7256	1652	3947	1930	102,67	23,38	55,86	27,32	-46%	17%
245	8,57	17,39	885	206	405	238	103,27	24,04	47,27	27,73	-54%	15%
199	21,11	40,87	2222	516	1022	449	105,26	24,44	48,43	21,27	-54%	-13%

tabella 6.23: confronto tra zone edificio A1

6.7.2 Edificio B1

La seguente tabella riporta i risultati delle 21 zone simulate e anche in questo caso si conferma il trend per le differenze percentuali presenti nei risultati generali, per il raffrescamento si arriva ad una riduzione del picco di raffrescamento 82% passando da Revit ad OpenStudio, mentre per il picco di riscaldamento è presente un aumento del 239%.

ZONE	AREA [m²]	VOLUME [m³]	REVIT		OPENSTUDIO		REVIT		OPENSTUDIO		A% COOLING	A% HEATING
			PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]		
218	15,89	33,51	1511	295	621	179	95,09	18,57	39,09	11,27	-59%	-39%
176	260,04	681,56	19508	3878	8229	1420	75,02	14,91	31,65	5,46	-58%	-63%
97	24,39	57,18	1963	320	1018	1009	80,48	13,12	41,75	41,36	-48%	215%
85	20,14	62,61	1897	363	785	211	94,19	18,02	39,00	10,45	-59%	-42%
142	4,01	9,66	379	70	260	237	94,51	17,46	64,91	59,10	-31%	239%
211	49,7	118,94	3828	692	1848	294	77,02	13,92	37,18	5,91	-52%	-58%
205	1341,36	4583,5	108849	36092	19386	18368	81,15	26,91	14,45	13,69	-82%	-49%
268	11,98	38,93	1261	280	558	277	105,26	23,37	46,54	23,11	-56%	-1%
165	23,7	68,68	2844	1684	1402	1602	120,00	71,05	59,17	67,60	-51%	-5%
174	116,01	571,13	15094	7197	7348	5489	130,11	62,04	63,34	47,31	-51%	-24%
152	12,73	74,32	1416	395	638	447	111,23	31,03	50,14	35,12	-55%	13%
241	5,06	26,87	942	366	274	335	186,17	72,33	54,24	66,27	-71%	-8%
247	51,43	232,13	5016	1688	1864	1374	97,53	32,82	36,25	26,71	-63%	-19%
160	14,3	34,85	1305	250	693	503	91,26	17,48	48,49	35,19	-47%	101%
159	17,91	42,91	2029	322	1080	391	113,29	17,98	60,30	21,82	-47%	21%
231	14,03	39,43	1307	259	662	261	93,16	18,46	47,19	18,60	-49%	1%
90	27,74	88,56	3572	2108	1897	2162	128,77	75,99	68,40	77,92	-47%	3%
186	7,11	32	1011	476	439	786	142,19	66,95	61,68	110,52	-57%	65%
124	18,15	97,2	1921	466	968	746	105,84	25,67	53,31	41,12	-50%	60%
78	17,93	71,08	1837	365	945	533	102,45	20,36	52,71	29,75	-49%	46%
264	14,26	51,02	1358	247	709	341	95,23	17,32	49,74	23,90	-48%	38%

tabella 6.24: confronto tra zone edificio B1

6.7.3 Edificio B2

La seguente tabella riporta i risultati delle 11 zone simulate e anche in questo caso si conferma il trend per le differenze percentuali presenti nei risultati generali, per il raffrescamento si arriva ad una riduzione del picco di raffrescamento 64% passando da Revit ad OpenStudio, mentre per il picco di riscaldamento è presente un aumento del 49%.

ZONE	AREA [m²]	VOLUME [m³]	REVIT		OPENSTUDIO		REVIT		OPENSTUDIO		Δ% COOLING	Δ% HEATING
			PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]		
109	11,9	22,57	1531	409	691	610	128,66	34,37	58,07	51,30	-55%	49%
217	22,39	53,44	2322	623	1202	597	103,71	27,82	53,68	26,66	-48%	-4%
144	161,15	651,41	15927	4105	7713	3448	98,83	25,47	47,86	21,39	-52%	-16%
224	54,85	173,59	4984	1193	2212	1009	90,87	21,75	40,33	18,39	-56%	-15%
73	40,28	212,65	5152	3123	1864	4351	127,90	77,53	46,28	108,02	-64%	39%
258	193,18	1165,18	17532	5002	6915	5898	90,75	25,89	35,80	30,53	-61%	18%
109	11,9	25,01	1518	419	691	610	127,56	35,21	58,07	51,30	-54%	46%
109	11,9	23,59	1659	420	691	610	139,41	35,29	58,07	51,30	-58%	45%
76	31,91	161,26	4369	3419	1883	3029	136,92	107,15	59,02	94,93	-57%	-11%
104	337,35	1224,07	31129	8255	12421	6374	92,28	24,47	36,82	18,89	-60%	-23%
98	11,9	34,61	1613	674	767	926	135,55	56,64	64,43	77,78	-52%	37%

tabella 6.25: confronto tra zone edificio B2

6.7.4 Edificio B3

La seguente tabella riporta i risultati delle 19 zone simulate e anche in questo caso si conferma il trend per le differenze percentuali presenti nei risultati generali, per il raffrescamento si arriva ad una riduzione del picco di raffrescamento 77% passando da Revit ad OpenStudio, mentre per il picco di riscaldamento è presente un aumento del 182%.

ZONE	AREA [m²]	VOLUME [m³]	REVIT		OPENSTUDIO		REVIT		OPENSTUDIO		A% COOLING	A% HEATING
			PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]		
171	123,76	321,61	9341	1765	4159	597	75,48	14,26	33,61	4,82	-55%	-66%
130	42,45	249,54	3244	794	747	453	76,42	18,70	17,60	10,68	-77%	-43%
178	166,39	491,2	13261	2305	6521	1204	79,70	13,85	39,19	7,23	-51%	-48%
123	26,48	94,83	2505	163	1825	179	94,60	6,16	68,92	6,75	-27%	10%
269	20,56	68,56	1874	347	786	147	91,15	16,88	38,21	7,13	-58%	-58%
179	541,23	1977,16	50244	17890	14018	10873	92,83	33,05	25,90	20,09	-72%	-39%
117	11,55	31,9	1503	346	717	522	130,13	29,96	62,09	45,19	-52%	51%
127	12,57	37,7	1194	237	580	669	94,99	18,85	46,15	53,20	-51%	182%
204	6,6	16,18	995	366	356	491	150,76	55,45	53,96	74,38	-64%	34%
82	34,89	122,03	3003	736	1396	467	86,07	21,09	40,02	13,39	-53%	-37%
129	16,78	33,28	1839	409	888	663	109,59	24,37	52,94	39,52	-52%	62%
163	42,22	92,09	4295	1266	1980	1798	101,73	29,99	46,90	42,59	-54%	42%
150	16,78	33,04	1957	400	994	708	116,63	23,84	59,25	42,18	-49%	77%
181	5,02	16,36	1125	522	406	493	224,10	103,98	80,90	98,30	-64%	-5%
220	17,47	37,21	1613	286	857	678	92,33	16,37	49,08	38,80	-47%	137%
273	9,15	17,46	1086	522	507	447	118,69	57,05	55,36	48,84	-53%	-14%
99	32,12	161,5	3472	715	1786	780	108,09	22,26	55,60	24,28	-49%	9%
141	37,69	73,26	3859	967	1945	1100	102,39	25,66	51,62	29,20	-50%	14%
75	16,78	46,09	1883	428	932	941	112,22	25,51	55,55	56,06	-50%	120%

tabella 6.26: confronto tra zone edificio B3

6.7.5 Edificio B4

La seguente tabella riporta i risultati delle 6 zone simulate e anche in questo caso si conferma il trend per le differenze percentuali presenti nei risultati generali, per il raffrescamento si arriva ad una riduzione del picco di raffrescamento 59% passando da Revit ad OpenStudio, mentre per il picco di riscaldamento è presente un aumento del 193%.

ZONE	AREA [m²]	VOLUME [m³]	REVIT		OPENSTUDIO		REVIT		OPENSTUDIO		A% COOLING	A% HEATING
			PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]		
229	28,92	97,06	2638	593	1447	1735	91,22	20,50	50,04	60,00	-45%	193%
252	104,25	410,64	12891	6604	5822	4487	123,65	63,35	55,85	43,04	-55%	-32%
272	415,21	1323,04	34878	9187	14888	17312	84,00	22,13	35,86	41,70	-57%	88%
131	415,21	1656,51	39762	10018	16395	8308	95,76	24,13	39,49	20,01	-59%	-17%
79	28,1	57,69	3150	666	1824	1443	112,10	23,70	64,92	51,35	-42%	117%
107	27,24	90,86	3363	1689	1849	2388	123,46	62,00	67,89	87,67	-45%	41%

tabella 6.27: confronto tra zone edificio B4

6.7.6 Edificio C1

La seguente tabella riporta i risultati delle 18 zone simulate e anche in questo caso si conferma il trend per le differenze percentuali presenti nei risultati generali, per il raffrescamento si arriva ad una riduzione del picco di raffrescamento 63% passando da Revit ad OpenStudio, mentre per il picco di riscaldamento è presente un aumento del 236%.

ZONE	AREA [m²]	VOLUME [m³]	REVIT		OPENSTUDIO		REVIT		OPENSTUDIO		Δ% COOLING	Δ% HEATING
			PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]		
111	16,44	32,33	1891	784	796	975	115,02	47,69	48,44	59,28	-58%	24%
259	7,26	19,89	1512	1449	660	1280	208,26	199,59	90,85	176,26	-56%	-12%
114	96,61	328,57	10485	4757	5163	5976	108,53	49,24	53,44	61,85	-51%	26%
96	7,65	30,23	970	449	409	634	126,80	58,69	53,50	82,86	-58%	41%
207	18,24	79,59	1862	655	890	903	102,08	35,91	48,80	49,51	-52%	38%
257	13,58	54,83	1548	317	809	628	113,99	23,34	59,59	46,25	-48%	98%
172	12,5	52,84	1866	1660	723	1538	149,28	132,80	57,84	123,07	-61%	-7%
244	12,31	51,42	1653	1210	676	1211	134,28	98,29	54,94	98,41	-59%	0%
219	4,18	37,97	451	71	248	239	107,89	16,99	59,42	57,11	-45%	236%
170	16,44	36,69	1907	654	820	679	116,00	39,78	49,90	41,28	-57%	4%
194	20	47,85	2047	1017	1038	1079	102,35	50,85	51,91	53,93	-49%	6%
154	11,26	29,85	1193	222	552	229	105,95	19,72	49,04	20,30	-54%	3%
225	44,29	155,01	5457	2707	2912	2589	123,21	61,12	65,75	58,46	-47%	-4%
195	250,6	984,55	24330	7411	8965	6679	97,09	29,57	35,78	26,65	-63%	-10%
216	20,21	104,88	1970	425	771	417	97,48	21,03	38,16	20,64	-61%	-2%
240	18,92	75,07	2165	1206	1069	1266	114,43	63,74	56,47	66,93	-51%	5%
168	16,3	32,49	1602	285	806	498	98,28	17,48	49,45	30,53	-50%	75%
94	24,78	105,37	2313	411	1370	943	93,34	16,59	55,29	38,04	-41%	129%

tabella 6.28: confronto tra zone edificio C1

6.7.7 Edificio C2

La seguente tabella riporta i risultati delle 28 zone simulate e anche in questo caso si conferma il trend per le differenze percentuali presenti nei risultati generali, per il raffrescamento si arriva ad una riduzione del picco di raffrescamento 61% passando da Revit ad OpenStudio, mentre per il picco di riscaldamento è presente un aumento del 217%.

ZONE	AREA [m²]	VOLUME [m³]	REVIT		OPENSTUDIO		REVIT		OPENSTUDIO		Δ% COOLING	Δ% HEATING
			PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]		
116	137,63	474,2	18549	4056	10784	7911	134,77	29,47	78,36	57,48	-42%	95%
137	45,44	151,1	4435	1188	2158	2539	97,60	26,14	47,50	55,88	-51%	114%
119	18,43	73,05	2305	1208	1085	1537	125,07	65,55	58,88	83,40	-53%	27%
261	77,73	248,18	8119	3543	3966	5302	104,45	45,58	51,03	68,21	-51%	50%
125	11,18	34,88	1272	354	528	810	113,77	31,66	47,24	72,48	-58%	129%
177	16,33	51,82	2608	1049	1214	1349	159,71	64,24	74,34	82,60	-53%	29%
222	6,72	45,54	1133	676	438	531	168,60	100,60	65,21	79,00	-61%	-21%
80	83,28	293,23	10640	3109	6089	5588	127,76	37,33	73,11	67,10	-43%	80%
246	11,35	45,96	2048	806	982	1085	180,44	71,01	86,56	95,60	-52%	35%
213	10,84	43,41	1182	229	572	593	109,04	21,13	52,79	54,69	-52%	159%
136	23,66	80,93	3038	1236	1674	1684	128,40	52,24	70,76	71,18	-45%	36%
196	63,84	218,2	6154	1426	3416	3599	96,40	22,34	53,51	56,38	-44%	152%
262	17,23	55,55	1772	420	900	1084	102,84	24,38	52,25	62,89	-49%	158%
81	52,3	201,14	4654	665	2699	1034	88,99	12,72	51,61	19,76	-42%	55%
126	34,6	112,36	3302	774	1865	1868	95,43	22,37	53,91	54,00	-44%	141%
147	46,78	160,46	4649	1103	2509	2588	99,38	23,58	53,62	55,32	-46%	135%
156	19,27	74,77	2193	1028	1125	1485	113,80	53,35	58,40	77,06	-49%	44%
260	22,52	76,5	2570	926	1210	1144	114,12	41,12	53,73	50,78	-53%	24%
223	68,93	227,32	6382	1366	3564	4137	92,59	19,82	51,71	60,02	-44%	203%
198	18,18	57,8	1780	386	955	1223	97,91	21,23	52,55	67,25	-46%	217%
105	6,79	15,84	920	261	389	402	135,49	38,44	57,32	59,22	-58%	54%
255	51,62	167,15	4933	1080	2694	2984	95,56	20,92	52,19	57,80	-45%	176%
88	20,68	79,87	2487	782	1071	1237	120,26	37,81	51,79	59,81	-57%	58%
133	36,26	116,54	3561	796	1753	1147	98,21	21,95	48,33	31,63	-51%	44%
169	96,24	280,35	9915	2004	5368	5909	103,02	20,82	55,78	61,39	-46%	195%
203	12,65	45,59	1615	650	735	893	127,67	51,38	58,12	70,60	-54%	37%
158	11,71	55,85	1231	208	622	382	105,12	17,76	53,15	32,63	-49%	84%
86	65,63	254,84	5841	869	3250	1327	89,00	13,24	49,52	20,22	-44%	53%

tabella 6.29: confronto tra zone edificio C2

6.7.8 Edificio C3

La seguente tabella riporta i risultati delle 17 zone simulate e anche in questo caso si conferma il trend per le differenze percentuali presenti nei risultati generali, per il raffrescamento si arriva ad una riduzione del picco di raffrescamento 63% passando da Revit ad OpenStudio, mentre per il picco di riscaldamento è presente un aumento del 291%.

ZONE	AREA [m²]	VOLUME [m³]	REVIT		OPENSTUDIO		REVIT		OPENSTUDIO		Δ% COOLING	Δ% HEATING
			PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]		
122	8,81	25,11	1431	1398	684	1300	162,43	158,68	77,64	147,57	-52%	-7%
145	13,98	44,88	1315	338	690	919	94,06	24,18	49,38	65,72	-47%	172%
248	31,5	134,08	6389	2887	3856	3470	202,83	91,65	122,41	110,15	-40%	20%
166	127,39	443,95	15460	3145	10467	7105	121,36	24,69	82,17	55,78	-32%	126%
140	27,15	107,48	2983	770	1615	839	109,87	28,36	59,50	30,91	-46%	9%
180	41,03	289,75	6071	4591	2275	3298	147,96	111,89	55,45	80,38	-63%	-28%
139	52,62	137,52	4484	1114	1768	750	85,21	21,17	33,60	14,25	-61%	-33%
214	93,3	306,17	10518	2136	6129	5190	112,73	22,89	65,69	55,62	-42%	143%
238	93,86	328,41	9786	2259	5807	2830	104,26	24,07	61,87	30,15	-41%	25%
230	8,2	37,84	829	132	483	515	101,10	16,10	58,85	62,86	-42%	291%
102	15,34	57,05	2005	489	1001	621	130,70	31,88	65,27	40,49	-50%	27%
274	50,28	176,97	4796	874	2723	1126	95,39	17,38	54,16	22,40	-43%	29%
101	96,89	306,86	9552	1938	5307	5632	98,59	20,00	54,78	58,13	-44%	191%
267	19,4	59,22	1888	392	1082	1177	97,32	20,21	55,78	60,68	-43%	200%
173	27,1	113,02	2604	452	1393	608	96,09	16,68	51,41	22,44	-46%	35%
254	106,02	369,37	9898	2046	5165	2825	93,36	19,30	48,72	26,65	-48%	38%
215	48,78	218,79	4358	683	2593	1340	89,34	14,00	53,16	27,48	-40%	96%

tabella 6.30: confronto tra zone edificio C3

6.7.9 Edificio E

La seguente tabella riporta i risultati delle 44 zone simulate e anche in questo caso si conferma il trend per le differenze percentuali presenti nei risultati generali, per il raffrescamento si arriva ad una riduzione del picco di raffrescamento 65% passando da Revit ad OpenStudio, mentre per il picco di riscaldamento è presente un aumento del 348%.

ZONE	AREA [m²]	VOLUME [m³]	REVIT		OPENSTUDIO		REVIT		OPENSTUDIO		Δ% COOLING	Δ% HEATING
			PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]		
148	33,37	171,76	2899	697	1347	583	86,87	20,89	40,38	17,48	-54%	-16%
83	63,12	272,63	5924	1823	2515	1312	93,85	28,88	39,85	20,78	-58%	-28%
201	43,04	179,48	4750	1757	2176	1247	110,36	40,82	50,57	28,98	-54%	-29%
256	21,56	93,25	2639	1140	1147	1091	122,40	52,88	53,22	50,62	-57%	-4%
226	19,86	85,87	2456	1628	1107	1900	123,67	81,97	55,72	95,66	-55%	17%
134	32,09	136,82	3463	1040	1566	1049	107,92	32,41	48,81	32,68	-55%	1%
155	57,14	249,79	6324	3143	3163	4866	110,68	55,01	55,36	85,15	-50%	55%
251	12,86	54,22	1502	677	727	1194	116,80	52,64	56,56	92,84	-52%	76%
116	132,05	715,7	12530	4291	10784	7911	94,89	32,50	81,67	59,91	-14%	84%
237	6,12	23,57	871	303	320	491	142,32	49,51	52,34	80,27	-63%	62%
228	109,69	488,51	11613	2778	5794	3000	105,87	25,33	52,82	27,35	-50%	8%
132	9,98	42,46	948	290	506	260	94,99	29,06	50,74	26,05	-47%	-10%
125	8,9	61,77	1009	488	528	810	113,37	54,83	59,34	91,05	-48%	66%
89	28,18	76,6	2991	619	1574	673	106,14	21,97	55,86	23,88	-47%	9%
199	22,54	72,66	2540	767	1019	1373	112,69	34,03	45,23	60,91	-60%	79%
221	8,21	26,99	963	249	610	571	117,30	30,33	74,24	69,50	-37%	129%
184	32,77	110,1	3145	553	1880	1503	95,97	16,88	57,37	45,85	-40%	172%
164	7,89	25,39	817	177	442	427	103,55	22,43	56,03	54,06	-46%	141%
271	62,12	288,68	7801	4823	3967	5522	125,58	77,64	63,87	88,89	-49%	14%
265	28,48	131,3	4048	2632	1900	2085	142,13	92,42	66,71	73,23	-53%	-21%
242	40,51	159,98	4732	2144	2567	3663	116,81	52,93	63,35	90,42	-46%	71%
239	86,93	356,76	8769	2129	5277	6386	100,87	24,49	60,71	73,47	-40%	200%
118	136,73	687,72	17027	6756	9173	7153	124,53	49,41	67,09	52,32	-46%	6%
128	110,14	474,58	10433	1812	6416	4340	94,72	16,45	58,25	39,40	-39%	139%
74	20,15	73,79	3063	1615	1635	2102	152,01	80,15	81,16	104,32	-47%	30%
120	179,22	721,33	18693	6258	10469	5896	104,30	34,92	58,41	32,90	-44%	-6%
270	14,16	56,3	1435	439	923	1384	101,34	31,00	65,21	97,73	-36%	215%
151	28,27	113,97	2796	609	1785	2539	98,90	21,54	63,14	89,82	-36%	317%
243	55,27	223,57	6285	2399	3653	4620	113,71	43,41	66,09	83,59	-42%	93%
249	9,09	35,24	1080	482	631	948	118,81	53,03	69,45	104,29	-42%	97%
190	11,78	45,42	1317	309	748	1048	111,80	26,23	63,50	88,96	-43%	239%
138	24,02	92,72	2432	571	1398	1008	101,25	23,77	58,18	41,98	-43%	77%
135	5,73	19,87	948	320	390	525	165,45	55,85	68,14	91,63	-59%	64%
190	9,98	51,86	998	362	748	1048	100,00	36,27	74,95	105,00	-25%	189%
108	5,3	11,68	791	225	274	219	149,25	42,45	51,71	41,30	-65%	-3%
106	51,08	160,89	4842	1044	2509	963	94,79	20,44	49,11	18,86	-48%	-8%
236	4,43	10,06	469	122	236	228	105,87	27,54	53,30	51,38	-50%	87%
227	4,56	15,5	454	72	269	227	99,56	15,79	59,04	49,89	-41%	216%
187	13,72	41,75	1301	242	696	302	94,83	17,64	50,74	22,05	-46%	25%
202	18,02	49,73	1945	480	942	623	107,94	26,64	52,28	34,56	-52%	30%
121	16,08	82,25	1665	285	888	447	103,54	17,72	55,24	27,79	-47%	57%
250	14,74	74,1	1488	413	881	734	100,95	28,02	59,78	49,81	-41%	78%
210	58,8	190,57	5363	1160	2841	1081	91,21	19,73	48,32	18,38	-47%	-7%
263	4,85	24,26	458	56	311	251	94,43	11,55	64,20	51,77	-32%	348%

tabella 6.31: confronto tra zone edificio E

6.7.10 Edificio I

La seguente tabella riporta i risultati delle 33 zone simulate e anche in questo caso si conferma il trend per le differenze percentuali presenti nei risultati generali, per il raffrescamento si arriva ad una riduzione del picco di raffrescamento 66% passando da Revit ad OpenStudio, mentre per il picco di riscaldamento è presente un aumento del 276%.

ZONE	AREA [m²]	VOLUME [m³]	REVIT		OPENSTUDIO		REVIT		OPENSTUDIO		Δ% COOLING	Δ% HEATING
			PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]		
182	4,45	17,21	495	126	252	295	111,24	28,31	56,72	66,19	-49%	134%
237	6,37	19,02	826	252	320	491	129,67	39,56	50,28	77,12	-61%	95%
212	11,34	34,79	1347	439	565	886	118,78	38,71	49,85	78,11	-58%	102%
232	4,34	13,79	408	94	220	354	94,01	21,66	50,79	81,45	-46%	276%
93	14,86	48,35	1566	856	779	1095	105,38	57,60	52,43	73,68	-50%	28%
193	15,58	56,77	2335	934	1089	1304	149,87	59,95	69,91	83,70	-53%	40%
95	28,09	120,93	3468	1680	1541	1308	123,46	59,81	54,87	46,56	-56%	-22%
253	19,19	86,76	2786	2271	1336	2719	145,18	118,34	69,63	141,70	-52%	20%
84	9,07	28,66	944	238	522	593	104,08	26,24	57,55	65,36	-45%	149%
189	5,58	12,76	898	364	309	657	160,93	65,23	55,39	117,74	-66%	80%
110	19,79	72,57	2327	1349	1167	1081	117,58	68,17	58,94	54,60	-50%	-20%
192	15,22	62,39	2424	1102	1047	959	159,26	72,40	68,80	63,03	-57%	-13%
235	14,04	57,77	1977	1927	844	2129	140,81	137,25	60,12	151,63	-57%	10%
188	9,13	18,05	860	189	452	299	94,19	20,70	49,55	32,75	-47%	58%
185	7,37	14,26	775	148	371	265	105,16	20,08	50,38	35,98	-52%	79%
234	11,00	21,27	1335	337	594	652	121,36	30,64	54,01	59,32	-55%	94%
143	10,80	20,73	1226	294	527	447	113,52	27,22	48,83	41,35	-57%	52%
157	11,36	29,52	1357	377	625	654	119,45	33,19	55,05	57,60	-54%	74%
206	5,46	14,08	949	533	348	731	173,81	97,62	63,66	133,80	-63%	37%
77	14,04	38,71	1811	1377	846	1550	128,99	98,08	60,29	110,42	-53%	13%
113	39,63	134,76	3751	1153	1702	2646	94,65	29,09	42,96	66,76	-55%	129%
103	30,69	105,74	3502	1583	1385	2211	114,11	51,58	45,14	72,03	-60%	40%
162	35,71	126,55	4419	1757	2081	3493	123,75	49,20	58,27	97,81	-53%	99%
153	54,24	196,98	6066	2785	2478	3894	111,84	51,35	45,69	71,79	-59%	40%
112	32,00	128,41	3634	949	1422	1413	113,56	29,66	44,44	44,15	-61%	49%
233	30,75	116,54	3471	853	1433	1026	112,88	27,74	46,60	33,35	-59%	20%
266	19,19	50,10	2511	1471	1298	1763	130,85	76,65	67,65	91,88	-48%	20%
208	23,31	49,25	2130	613	802	734	91,38	26,30	34,41	31,49	-62%	20%
115	10,54	20,74	1133	226	485	371	107,50	21,44	46,03	35,19	-57%	64%
146	6,57	18,59	804	191	322	257	122,37	29,07	49,03	39,17	-60%	35%
200	4,67	12,85	443	88	270	290	94,86	18,84	57,89	62,13	-39%	230%
209	19,19	45,02	2254	1430	1120	1790	117,46	74,52	58,34	93,26	-50%	25%
175	19,50	53,06	2439	1963	1125	2018	125,08	100,67	57,67	103,49	-54%	3%

tabella 6.32: confronto tra zone edificio I

6.7.11 Edificio P1

La seguente tabella riporta i risultati delle 23 zone simulate e anche in questo caso si conferma il trend per le differenze percentuali presenti nei risultati generali, per il raffrescamento si arriva ad una riduzione del picco di raffrescamento 58% passando da Revit ad OpenStudio, mentre per il picco di riscaldamento è presente un aumento del 235%.

ZONE	AREA [m²]	VOLUME [m³]	REVIT		OPENSTUDIO		REVIT		OPENSTUDIO		Δ% COOLING	Δ% HEATING
			PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]		
318	16,13	55,87	2049	928	799	694	127,03	57,53	49,54	43,01	-61%	-25%
317	152,04	557,48	13829	3126	5417	2312	90,96	20,56	35,63	15,21	-61%	-26%
367	6,5	23,97	2138	851	1682	891	328,92	130,92	258,80	137,12	-21%	5%
339	4,25	8,23	444	113	196	211	104,47	26,59	46,23	49,69	-56%	87%
237	7,12	18,03	800	177	323	318	112,36	24,86	45,40	44,71	-60%	80%
188	49,41	154,85	4931	1218	2282	1043	99,80	24,65	46,17	21,11	-54%	-14%
328	23,12	64,05	2293	501	1201	538	99,18	21,67	51,96	23,26	-48%	7%
387	16,91	64,76	1899	466	1060	671	112,30	27,56	62,70	39,71	-44%	44%
261	21,44	67,55	2728	1496	1370	1723	127,24	69,78	63,91	80,35	-50%	15%
226	49,88	137,36	4156	574	1935	909	83,32	11,51	38,80	18,22	-53%	58%
352	22,59	66,88	2373	573	1319	895	105,05	25,37	58,40	39,62	-44%	56%
337	13,74	43,33	1762	632	993	523	128,24	46,00	72,29	38,08	-44%	-17%
330	64,14	199,5	6289	1492	3173	1500	98,05	23,26	49,46	23,39	-50%	1%
341	33,81	104,01	4124	952	2352	1035	121,98	28,16	69,57	30,61	-43%	9%
365	4,11	13,25	422	65	228	216	102,68	15,82	55,53	52,64	-46%	233%
304	17,96	60,18	2032	522	1174	705	113,14	29,06	65,39	39,27	-42%	35%
254	36,39	97,29	3882	636	1701	1084	106,68	17,48	46,75	29,80	-56%	71%
313	20	72,47	2760	768	993	831	138,00	38,40	49,67	41,56	-64%	8%
271	15,42	44,49	1950	538	931	631	126,46	34,89	60,39	40,92	-52%	17%
212	23,63	74,49	3114	722	1103	793	131,78	30,55	46,68	33,54	-65%	10%
302	21,23	71,42	2550	1193	970	884	120,11	56,19	45,70	41,62	-62%	-26%
325	27,95	88,14	3513	1612	2335	1262	125,69	57,67	83,55	45,15	-34%	-22%
292	18,04	60,85	2169	929	1185	754	120,23	51,50	65,70	41,78	-45%	-19%

tabella 6.33: confronto tra zone edificio P1

6.7.12 Edificio P2

La seguente tabella riporta i risultati delle 5 zone simulate e anche in questo caso si conferma il trend per le differenze percentuali presenti nei risultati generali, per il raffrescamento si arriva ad una riduzione del picco di raffrescamento 70% passando da Revit ad OpenStudio, mentre per il picco di riscaldamento è presente un aumento del 97%.

ZONE	AREA [m²]	VOLUME [m³]	REVIT		OPENSTUDIO		REVIT		OPENSTUDIO		Δ% COOLING	Δ% HEATING
			PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]		
231	278,17	1319,87	24504	5945	8490	3749	88,09	21,37	30,52	13,48	-65%	-37%
216	25,48	97,81	3141	1827	1094	1616	123,27	71,70	42,94	63,42	-65%	-12%
206	248,87	1491,04	25077	6484	11645	6469	100,76	26,05	46,79	25,99	-54%	0%
266	10,79	44,97	2118	1886	762	1168	196,29	174,79	70,66	108,21	-64%	-38%
335	11,73	24,92	1139	232	362	454	97,10	19,78	30,88	38,69	-68%	96%

tabella 6.34: confronto tra zone edificio P2

6.7.13 Edificio P3

La seguente tabella riporta i risultati delle 97 zone simulate e anche in questo caso si conferma il trend per le differenze percentuali presenti nei risultati generali, per il raffrescamento si arriva ad una riduzione del picco di raffrescamento 69% passando da Revit ad OpenStudio, mentre per il picco di riscaldamento è presente un aumento del 1620%.

ZONE	AREA [m²]	VOLUME [m³]	REVIT		OPENSTUDIO		REVIT		OPENSTUDIO		Δ% COOLING	Δ% HEATING
			PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]		
259	15,47	44,19	1567	195	1064	599	101,29	12,61	68,76	38,74	-32%	207%
204	12,93	36,72	1198	117	887	482	92,65	9,05	68,63	37,26	-26%	312%
368	14,08	37,67	1132	208	570	560	80,40	14,77	40,47	39,75	-50%	169%
196	19,33	52,25	1352	338	517	722	69,94	17,49	26,74	37,33	-62%	113%
269	4,96	10,23	376	67	181	126	75,81	13,51	36,42	25,30	-52%	87%
349	40,88	115,28	3585	385	2492	414	87,70	9,42	60,95	10,12	-31%	7%
385	11,81	32,47	1090	176	679	521	92,29	14,90	57,50	44,13	-38%	196%
399	41,77	115,8	3663	350	2637	365	87,69	8,38	63,13	8,75	-28%	4%
398	75,28	232,09	6365	862	3782	416	84,55	11,45	50,24	5,52	-41%	-52%
389	119,53	393,37	10007	568	8979	9770	83,72	4,75	75,12	81,74	-10%	1620%
386	15,18	34,76	1359	366	442	580	89,53	24,11	29,12	38,18	-67%	58%
230	61,32	177,72	5405	427	4102	465	88,14	6,96	66,90	7,58	-24%	9%
383	182,4	572,7	14442	2237	7880	790	79,18	12,26	43,20	4,33	-45%	-65%
369	89,04	278,62	6873	1051	3726	839	77,19	11,80	41,85	9,43	-46%	-20%
202	6,76	12,55	766	151	321	251	113,31	22,34	47,55	37,07	-58%	66%
338	8,13	15,64	789	134	390	283	97,05	16,48	47,96	34,85	-51%	111%
242	4,82	11	407	54	227	162	84,44	11,20	47,10	33,54	-44%	199%
394	5,63	14,2	741	169	263	223	131,62	30,02	46,66	39,56	-65%	32%
358	18,97	47,29	1687	341	835	370	88,93	17,98	44,02	19,50	-51%	8%
357	8,38	15,56	863	200	410	355	102,98	23,87	48,89	42,41	-53%	78%
197	6,77	12,75	755	157	308	263	111,52	23,19	45,42	38,84	-59%	67%
316	5,76	11,79	778	166	320	262	135,07	28,82	55,48	45,49	-59%	58%
229	4	8,49	412	67	225	195	103,00	16,75	56,29	48,72	-45%	191%
396	4	8,62	422	63	229	195	105,50	15,75	57,35	48,72	-46%	209%
239	6,28	13,61	761	158	305	243	121,18	25,16	48,52	38,75	-60%	54%
222	5,01	13,88	733	175	230	169	146,31	34,93	45,81	33,71	-69%	-3%
228	63,15	169	6870	1222	3802	1229	108,79	19,35	60,21	19,45	-45%	1%
392	6,12	12,67	794	158	343	292	129,74	25,82	55,98	47,69	-57%	85%
395	6,27	13,39	750	163	287	250	119,62	26,00	45,83	39,92	-62%	54%
355	6,47	19,33	758	161	303	186	117,16	24,88	46,79	28,79	-60%	16%
374	81,02	231,6	8911	1733	4980	1481	109,99	21,39	61,46	18,28	-44%	-15%
270	90,58	243,21	9617	1755	5148	1540	106,17	19,38	56,83	17,01	-46%	-12%
397	90,58	243,66	9655	1766	5435	5502	106,59	19,50	60,00	60,74	-44%	212%
378	79,51	237,68	8542	1546	4717	1666	107,43	19,44	59,33	20,96	-45%	8%
366	79,86	238,68	8673	1458	4932	1314	108,60	18,26	61,75	16,45	-43%	-10%
297	30,38	155,15	4134	1087	3549	1830	136,08	35,78	116,81	60,24	-14%	68%
211	8,85	37,88	795	127	406	187	89,83	14,35	45,88	21,10	-49%	47%
359	8,25	26,45	783	138	400	459	94,91	16,73	48,49	55,64	-49%	233%
241	4,72	14,08	408	62	225	200	86,44	13,14	47,61	42,37	-45%	223%
403	29,26	152,31	3785	1349	3482	1697	129,36	46,10	119,01	57,99	-8%	26%
291	64,78	201,43	6410	1557	2875	1587	98,95	24,04	44,39	24,49	-55%	2%
309	37,64	193,84	3973	1113	1509	1604	105,55	29,57	40,10	42,62	-62%	44%
400	139,83	367,62	11534	3193	3704	2588	82,49	22,83	26,49	18,51	-68%	-19%
286	16,88	44,31	1657	348	761	657	98,16	20,62	45,06	38,93	-54%	89%

253	52,72	125,6	6709	1012	2973	2793	127,26	19,20	56,40	52,98	-56%	176%
257	16,96	47,32	1556	236	744	497	91,75	13,92	43,85	29,31	-52%	111%
187	8,38	16,83	990	482	407	564	118,14	57,52	48,55	67,33	-59%	17%
219	10,97	30,42	1741	299	641	650	158,71	27,26	58,45	59,25	-63%	117%
298	6,66	12,5	758	151	304	238	113,81	22,67	45,67	35,80	-60%	58%
255	50,07	125,31	6660	1042	2856	2641	133,01	20,81	57,05	52,75	-57%	153%
363	13,64	36,66	1178	161	596	395	86,36	11,80	43,71	28,93	-49%	145%
240	37,43	92,85	4969	734	2145	1965	132,75	19,61	57,31	52,50	-57%	168%
406	6,65	12,95	759	152	304	239	114,14	22,86	45,71	35,97	-60%	57%
243	8,13	16,29	779	132	369	265	95,82	16,24	45,42	32,65	-53%	101%
361	11,49	28	1162	210	540	406	101,13	18,28	47,01	35,33	-54%	93%
360	49,13	154,95	6300	891	2702	1083	128,23	18,14	55,00	22,05	-57%	22%
249	46,03	138,69	6373	1101	2584	1143	138,45	23,92	56,13	24,84	-59%	4%
307	48,51	150,1	6317	878	2697	1073	130,22	18,10	55,60	22,11	-57%	22%
342	77,4	169,38	6114	1381	2508	1514	78,99	17,84	32,41	19,56	-59%	10%
404	5,3	14,05	741	167	243	154	139,81	31,51	45,90	28,97	-67%	-8%
256	6,27	17,29	759	154	296	164	121,05	24,56	47,24	26,17	-61%	7%
251	22,21	62,63	1953	443	875	581	87,93	19,95	39,41	26,14	-55%	31%
382	12,72	36,32	1179	192	569	173	92,69	15,09	44,73	13,62	-52%	-10%
376	8,25	23,7	783	130	370	155	94,91	15,76	44,80	18,84	-53%	20%
278	5,89	17,93	755	159	287	169	128,18	26,99	48,70	28,76	-62%	7%
296	22,99	67,06	2014	344	1113	594	87,60	14,96	48,41	25,84	-45%	73%
372	8,31	15,93	976	470	413	593	117,45	56,56	49,67	71,37	-58%	26%
356	6,44	12,94	771	177	305	313	119,72	27,48	47,41	48,65	-60%	77%
289	6	13,73	792	199	308	233	132,00	33,17	51,29	38,80	-61%	17%
306	12,61	34,58	1261	261	604	312	100,00	20,70	47,87	24,73	-52%	19%
407	5,31	14,06	749	186	254	246	141,05	35,03	47,80	46,25	-66%	32%
258	6,7	12,52	775	176	311	320	115,67	26,27	46,39	47,69	-60%	82%
353	23,91	65,19	3164	730	1326	871	132,33	30,53	55,46	36,42	-58%	19%
284	14,83	42,97	1220	166	666	296	82,27	11,19	44,92	19,98	-45%	78%
260	4,6	12,36	402	62	227	185	87,39	13,48	49,39	40,18	-43%	198%
290	58,32	135,26	6864	1462	3115	3551	117,70	25,07	53,42	60,89	-55%	143%
336	21,46	47,74	1980	333	969	323	92,26	15,52	45,14	15,03	-51%	-3%
319	37,75	99,3	4976	1094	2066	1238	131,81	28,98	54,73	32,79	-58%	13%
265	16,59	48,76	1598	272	790	386	96,32	16,40	47,61	23,24	-51%	42%
205	8,06	15,72	795	160	375	361	98,64	19,85	46,58	44,79	-53%	126%
225	7,23	14,97	783	163	348	301	108,30	22,54	48,17	41,67	-56%	85%
252	8,7	17,95	820	153	421	270	94,25	17,59	48,37	31,06	-49%	77%
207	18,71	39,63	1650	304	891	382	88,19	16,25	47,63	20,41	-46%	26%
215	21,17	58,91	3159	794	1181	919	149,22	37,51	55,78	43,42	-63%	16%
213	57,6	133,4	7094	1432	3049	1447	123,16	24,86	52,93	25,13	-57%	1%
195	57,59	133,79	6804	1059	2901	1196	118,15	18,39	50,38	20,76	-57%	13%
247	17,14	47,27	1678	356	786	426	97,90	20,77	45,86	24,84	-53%	20%
280	58,32	133,5	7133	1484	3221	3605	122,31	25,45	55,23	61,81	-55%	143%
262	12,24	33,32	1713	305	666	554	139,95	24,92	54,41	45,25	-61%	82%
350	4,55	12,36	402	61	226	191	88,35	13,41	49,58	41,90	-44%	213%
279	14,1	39,09	1219	180	663	340	86,45	12,77	47,01	24,13	-46%	89%
343	5,54	14,84	784	200	276	238	141,52	36,10	49,79	42,94	-65%	19%
282	4,84	13,76	435	85	239	211	89,88	17,56	49,40	43,65	-45%	149%
340	6,17	16,24	793	192	304	223	128,53	31,12	49,23	36,08	-62%	16%
277	8,18	22,67	838	175	400	249	102,44	21,39	48,86	30,50	-52%	43%
379	48,61	140,24	6380	3159	3262	4340	131,25	64,99	67,10	89,29	-49%	37%

tabella 6.35: confronto tra zone edificio P3

6.7.14 Edificio P4

La seguente tabella riporta i risultati della zona simulata e anche in questo caso si conferma il trend per le differenze percentuali presenti nei risultati generali, per il raffrescamento si ottiene ad una riduzione del picco di raffrescamento 53% passando da Revit ad OpenStudio, mentre per il picco di riscaldamento è presente un aumento del 30%.

ZONE	AREA [m²]	VOLUME [m³]	REVIT		OPENSTUDIO		REVIT		OPENSTUDIO		Δ% COOLING	Δ% HEATING
			PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]		
214	852,62	6577,54	76976	17586	28857	22657	90,28	20,63	33,85	26,57	-63%	29%

tabella 6.36: confronto tra zone edificio P4

6.7.15 Edificio W

La seguente tabella riporta i risultati della zona simulata e anche in questo caso si conferma il trend per le differenze percentuali presenti nei risultati generali, per il raffrescamento si arriva ad una riduzione del picco di raffrescamento 44% passando da Revit ad OpenStudio, mentre per il picco di riscaldamento è presente un aumento del 2%.

ZONE	AREA [m²]	VOLUME [m³]	REVIT		OPENSTUDIO		REVIT		OPENSTUDIO		Δ% COOLING	Δ% HEATING
			PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	PEAK COOLING LOAD [W]	PEAK HEATING LOAD [W]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]	SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]	SPECIFIC HEATING LOAD [W/m²]		
87	49,05	190,29	8036	4626	4511,44	4703	163,83	94,31	91,98	95,88	-44%	2%

tabella 6.37: confronto tra zone edificio W

6.7.16 Zone termiche critiche

Da tutte le zone analizzate si procede all'isolamento dei valori più critici riferiti alle differenze con un maggiore cambiamento. Le due tabelle che seguono, tabella 6.38 e tabella 6.39, riportano gli scostamento percentuali massimi, nonché i valori relativi ai carichi di picco di raffrescamento e riscaldamento tra le simulazioni 1 (Revit) e 3 (OpenStudio) e le corrispettive caratteristiche di area e volume relative alle zone analizzate.

BUILDINGS	ZONE	AREA [m²]	PEAK COOLING LOAD [W]		SPECIFIC COOLING LOAD [W/m²]		Δ% COOLING
			REVIT	OPENSTUDIO	REVIT	OPENSTUDIO	
A1	288	5,4	724	224	135,1	41,7	-69,1%
B1	205	1341,4	108849	19386	81,1	14,5	-82,2%
B2	73	40,3	5152	1864	127,9	46,3	-63,8%
B3	130	42,5	3244	747	76,4	17,6	-77,0%
B4	131	415,2	39762	16395	95,8	39,5	-58,8%
C1	195	250,6	24330	8965	97,1	35,8	-63,2%
C2	222	6,7	1133	438	168,6	65,2	-61,3%
C3	180	41,0	6071	2275	148,0	55,5	-62,5%
E	108	5,3	791	274	149,2	51,7	-65,4%
I	189	5,6	898	309	160,9	55,4	-65,6%
P1	318	16,1	2049	864	127,0	53,6	-57,8%
P2	266	10,8	2118	646	196,3	59,8	-69,5%
P3	222	5,0	733	230	146,3	45,8	-68,7%
P4	214	852,6	76976	35906	90,3	42,1	-53,4%
W	87	49,1	8036	4511	163,8	92,0	-43,9%

tabella 6.38: zone critiche per il picco di carico di raffrescamento

Dalla tabella 6.38 si evidenzia un trend costante di sovrastima dei carichi di picco per il raffrescamento da parte di Revit. Il locale che presenta la massima criticità è la zona 205 dell'edificio B1, con una area ampia di 1341,4 m², nella quale il picco calcolato da Revit è pari a 108849 W (108,9 kW) rispetto ai 19386 W (19,4kW) di OpenStudio, con una differenza di -82,2%.

Questo comportamento conferma i limiti del software BIM nel gestire l'inerzia termica, infatti Revit traduce in modo praticamente istantaneo l'apporto solare e i carichi interni in carico di raffrescamento immediato, al contrario di OpenStudio che risolve rigorosamente le equazioni del bilancio termico in regime transitorio, valorizza l'effetto dell'inerzia termica dell'involucro. Questo sfasamento temporale permette di ridurre i picchi di carico, restituendo dei valori di fabbisogno di raffrescamento decisamente inferiori e più realistici.

Passando invece al regime invernale, la tabella 6.39 mette in evidenza le zone termiche che hanno registrato le massime differenze di carichi di riscaldamento.

BUILDINGS	ZONE	AREA [m ²]	PEAK HEATING LOAD [W]		SPECIFIC HEATING LOAD [W/m ²]		Δ% HEATING
			REVIT	OPENSTUDIO	REVIT	OPENSTUDIO	
A1	308	43,9	604	2512	13,8	57,3	315,9%
B1	142	4,0	70	237	17,5	59,1	238,6%
B2	109	11,9	409	610	34,4	51,3	49,3%
B3	127	12,6	237	669	18,9	53,2	182,2%
B4	229	28,9	593	1735	20,5	60,0	192,6%
C1	219	4,2	71	239	17,0	57,1	236,3%
C2	198	18,2	386	1223	21,2	67,3	216,8%
C3	230	8,2	132	515	16,1	62,9	290,5%
E	263	4,9	56	251	11,5	51,8	348,3%
I	232	4,3	94	354	21,7	81,5	276,1%
P1	365	4,1	65	218	15,8	53,1	235,5%
P2	335	11,7	232	457	19,8	38,9	96,8%
P3	389	119,5	568	9770	4,8	81,7	1620,1%
P4	214	852,6	17586	22846	20,6	26,8	29,9%
W	87	49,1	4626	4703	94,3	95,9	1,7%

tabella 6.39: zone critiche per il picco di carico di riscaldamento

I risultati mostrano come gli scostamenti percentuali invernali assumano valori elevati. Infatti un'altra delle criticità note nel trasferimento dati BIM-BEM è l'incongruenza nella gestione dell'aria di rinnovo.

Il caso della zona 389 dell'edificio P3 risulta emblematico, a fronte di un'area di 119,5 m² e di un volume di 393,37 m³, Revit dimensiona un carico locale di soli 568 W ($4,8 \frac{W}{m^2}$), mentre OpenStudio stima ben 9770 W ($81,7 \frac{W}{m^2}$), generando un divario del +1620,1%. Tale differenza non è da imputare ad un errore di calcolo, bensì ai limiti presenti nei software BIM. Quando in Revit si avvia una simulazione energetica senza prima aver modellato le reti aeratiche nel browser di sistema dedicato, si ottengono sì i carichi energetici ideali, tuttavia sembra che il software non abbia considerato il carico termico necessario per riscaldare l'aria esterna di ventilazione. Al contrario, OpenStudio essendo stato configurato in maniera rigorosa e nativamente con l'impostazione di calcolo con i carichi ideali (Ideal Air Loads), integra perfettamente anche il carico termico sensibile per portare alla temperatura desiderata l'aria esterna, fornendo un valore di $81,7 \frac{W}{m^2}$ perfettamente in linea con i valori forniti dalla pratica.

Questi risultati dimostrano che le simulazioni energetiche eseguite direttamente nei software BIM, se non assistiti da una modellazione dettagliata degli impianti, tendono a nascondere o ignorare l'energia necessaria per il trattamento dell'aria di rinnovo/ventilazione.

Di conseguenza, usare solo questi dati per decidere la taglia dei terminali da installare in una stanza è rischioso e inaffidabile. Per ottenere un calcolo corretto e sicuro, è quindi fondamentale esportare il modello e analizzarlo in un software energetico specializzato (BEM).

7. Conclusioni

Il seguente lavoro di tesi ha avuto come punto di partenza la realizzazione del modello 3D (BIM = Building Information Modeling) del complesso universitario Beato Pellegrino dell'Università degli Studi di Padova, costituito da 15 edifici per una superficie utile complessiva di 16894 m². Questa prima fase di modellazione geometrica è stata condotta in ambiente Autodesk Revit partendo dall'importazione dei disegni relativi alle piante e sezioni di ogni edificio, è quindi stato possibile ricostruire fedelmente l'intero complesso, considerando anche l'involucro edilizio con le reali proprietà termofisiche dei materiali che costituiscono le murature, i solai, le coperture, le superfici vetrate e le schermature solari esterne.

Consolidato il modello BIM, l'attenzione si è spostata sul nucleo centrale della ricerca, ovvero l'analisi energetica e la valutazione dell'interoperabilità tra software. Il percorso di analisi si è sviluppato nei seguenti passaggi fondamentali:

1. *Validazione preliminare*: sono state eseguite delle analisi energetiche preliminari nell'ambiente di simulazione nativo di Revit al fine di convalidare il funzionamento corretto del modello di base.
2. *Calibrazione del modello BIM*: affinamento delle impostazioni energetiche avanzate per allineare le condizioni al contorno e ottenere dei risultati maggiormente attendibili.
3. *Transizione BIM-BEM*: esportazione del modello analitico da Revit a OpenStudio, quest'ultimo rappresenta un ambiente specifico per le simulazioni termodinamiche dinamiche e avanzate, garantendo una libertà maggiore nelle impostazioni e un'attendibilità più elevata dei risultati ottenuti.
4. *Configurazione BEM*: impostazione dettagliata dei parametri di simulazione, dei carichi interni e dei profili di funzionamento all'interno di OpenStudio.
5. *Interoperabilità BIM-BEM*: per mettere in risalto il problema inerente all'interoperabilità, presente durante il passaggio da un modello BIM ad uno BEM, sono stati eseguiti più confronti tra i risultati estratti da Revit e quelli ottenuti in OpenStudio. I confronti sono stati eseguiti sia a livello generale (fabbisogni mensili e carichi termici di picco), sia a livello di singole zone, con l'obiettivo di far emergere le discrepanze e le criticità nel passaggio di dati tra il BIM e il BEM.
6. *Ottimizzazione energetica*: infine per avvicinarsi il più possibile al modello reale sono state implementate gradualmente delle strategie di miglioramento (attenuazione delle temperature e recuperatore di calore) per quantificarne i benefici sui risultati ottenuti.

È quindi possibile trarre le seguenti conclusioni in merito ai temi trattati.

Le verifiche preliminari per convalidare il modello BIM eseguite in Revit hanno fin da subito evidenziato il corretto funzionamento del modello, infatti la modellazione è stata stringente sia in fatto di rispetto delle dimensioni reali sia per le proprietà termofisiche dei materiali utilizzati.

Il valore ottenuto nella simulazione 1 per l'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile è risultato fin da subito in linea con il valore reale di $99,30 \frac{kWh}{m^2 \text{ anno}}$, lo stesso vale anche per i picchi di carico per il raffrescamento e il riscaldamento anch'essi simili ai valori di progetto.

Le numerose simulazioni eseguite, modificando i valori delle condizioni al contorno, hanno permesso di arrivare a convergenza dei risultati, ottenendo un indice di prestazione pari a $135,8 \frac{kWh}{m^2 \text{ anno}}$ e i picchi di carico per il raffrescamento e il riscaldamento, rispettivamente di 1582,1 kW e 1207 kW, permettendo di avvicinarsi ulteriormente ai valori reali, questi risultati sono però da trattare con cautela a causa dei limiti del software BIM Revit, discussi successivamente.

Il passaggio al software di simulazione BEM OpenStudio ha permesso di analizzare in maniera più dettagliata e approfondita i comportamenti termofisici dei 15 edifici del complesso, implementando differenti soluzioni e valutandone gli impatti.

Dopo l'esportazione da Revit in OpenStudio è stata necessaria una verifica della geometria e delle superfici al fine di risolvere eventuali perdite di dati generate nel passaggio dal software BIM al BEM.

Sono stati utilizzati degli strumenti secondari per migliorare il modello analitico e correggere possibili problematiche. Ad esempio, tramite la measure di "Surface Matching" si riuniscono le superfici adiacenti, facilitandone lo scambio di calore tra le zone confinanti. Questo processo garantisce che il modello abbia una geometria valida per integrare correttamente le impostazioni energetiche desiderate.

Proprio il confronto diretto tra i valori dei due software ha messo in evidenza le discrepanze più interessanti, quella più importante riguarda la notevole differenza nel carico di picco per il riscaldamento, più nello specifico il caso che mette a confronto i 1207 kW ottenuti in Revit e i 2220,9 kW di OpenStudio.

Questo divario non è riconducibile a un errore di calcolo o di modellazione diretti, bensì alla natura intrinseca dell'esportazione del modello BIM al modello BEM. I 1207 kW calcolati da Revit rappresentano esclusivamente le dispersioni termiche per trasmissione attraverso l'involucro degli edifici. Eseguendo le simulazioni senza aver definito gli impianti nel browser di sistema, l'algoritmo di Revit non considera totalmente il contributo energetico necessario per il trattamento dell'aria di rinnovo (pari a $10 \frac{\text{litri}}{\text{s-persona}}$).

Al contrario, il picco di 2220,9 kW elaborato da OpenStudio restituisce il reale e completo fabbisogno termodinamico invernale del complesso, integrando nel calcolo il carico sensibile di ventilazione richiesto da normativa (tramite l'impostazione di "Design Specification: Outdoor Air"). Queste considerazioni sono state trattate anche da altri studi di ricerca, tipo il "Analysis of BIM-to-BEM critical parameters and recommendations to solve the current bottlenecks" [6], e presente anche nel manuale ufficiale di EnergyPlus [20], dove sono messi in evidenza i colli di bottiglia presenti nei traduttori automatici da BIM a BEM, in particolare quelli inerenti alle impostazioni di ventilazione e ai parametri degli impianti HVAC i quali vengono persi, scartati o mal interpretati durante le simulazioni eseguite in Revit.

OpenStudio, invece, calcola i reali fabbisogni energetici e i carichi di picco necessari per eseguire correttamente delle valutazioni energetiche e dei possibili dimensionamenti degli impianti e terminali.

A supporto di queste considerazioni, si fa riferimento alla zona 389 dell'edificio P3 con un'area di 119,53 m² e un volume di 393,37 m³ che presenta la maggiore differenza percentuale in fase di riscaldamento, ovvero di 1620%. Potrebbe sembrare un valore irrealistico ma guardando i valori si ha un carico di picco di raffrescamento di 10007 W $\left(83,72 \frac{W}{m^2}\right)$ in Revit e di 8979 W $\left(75,12 \frac{W}{m^2}\right)$ in OpenStudio, un carico di picco di riscaldamento di 568 W $\left(4,75 \frac{W}{m^2}\right)$ in Revit e di 9770 W $\left(81,74 \frac{W}{m^2}\right)$ in OpenStudio. Si ha che OpenStudio riduce del 10% il picco di raffrescamento che è giustificabile dalla diversa e più raffinata gestione dell'inerzia termica, ma aumenta anche del 1620% il picco di riscaldamento. Ponendo maggiore attenzione al valore ottenuto da Revit per il picco di riscaldamento si comprende come questo sia irrealistico per una stanza di quell'area e quel volume, infatti il carico specifico è addirittura inferiore a $5 \frac{W}{m^2}$.

Questo caso specifico conferma come Revit non abbia considerato il rinnovo dell'aria e quindi il relativo carico sensibile, lo stesso carico non viene considerato nemmeno in fase di raffrescamento e infatti i valori ottenuti sono maggiori in Revit rispetto a quelli di OpenStudio.

Questa differenza, però, presenta un secondo limite del software BIM che è legato alla simulazione dell'inerzia termica. Revit infatti converte in modo quasi istantaneo gli apporti solare e interni in carico frigorifero generando dei picchi istantanei elevati, addirittura da mascherare l'assenza dell'aria di rinnovo.

Al contrario, OpenStudio applica il "Heat Balance Method" [21] che si basa sul corretto assorbimento del calore nelle masse termiche e il suo rilascio sfalsato nel tempo. Di conseguenza OpenStudio restituisce carichi estivi di raffrescamento inferiori e più realistici, pur includendo e calcolando in modo corretto il contributo dell'aria di ventilazione di rinnovo.

Oltre all'analisi dei carichi di picco, si sono messi a confronto anche i fabbisogni energetici e gli indici di prestazione energetica globale non rinnovabile, utili per definire anche la classe energetica del complesso di edifici. I valori ottenuti per tali indici, indicati in tabella 6.13 e tabella 6.14, mettono in risalto come Revit ottenga valori sì in linea con quello reale, infatti le differenze rispetto al valore di riferimento reale $\left(99,30 \frac{kWh}{m^2 \text{ year}}\right)$ vanno dal 36,8% al 42,9%. Discrepanze che in OpenStudio partono da un 33% con un impianto generico con teleriscaldamento e teleraffrescamento, fino ad un massimo del 12,8% e di un minimo del 2% per il caso specifico con le pompe di calore Rhoss realmente installate. Questo conferma ulteriormente i limiti presenti in Revit e che vengono ampiamente risolti utilizzando un software BEM dedicato alle sole analisi energetiche come OpenStudio.

Ricollegandosi alle discrepanze tra gli indici di prestazione energetica, si possono notare gli importanti miglioramenti ottenuti impiegando soluzioni come l'attenuazione della temperatura durante i periodi di chiusura sia breve che prolungata, nel periodo di riscaldamento, e il recuperatore di calore con efficienza del 75%, avvicinandosi in maniera molto accurata ai valori reali dell'indice di prestazione energetica, in entrambi i casi analizzati, ovvero considerando le reali pompe di calore Rhoss installate e un impianto generico con teleriscaldamento e teleraffrescamento.

Le soluzioni di attenuazione di temperatura e dell'impiego del recuperatore di calore, prese singolarmente permettono di ridurre in maniera importante i picchi di carico di riscaldamento, passando dai 2220,9 kW di partenza in OpenStudio ai 1707,7 kW. I risultati migliori si ottengono applicando assieme sia l'attenuazione della temperatura sia l'uso del recuperatore di calore in fase di riscaldamento, infatti permette di ridurre il picco di carico fino a 1172,2 kW.

Prendendo in analisi le otto simulazioni eseguite sia in Revit che in OpenStudio e concentrandosi solo sui carichi di picco termici (sia per il raffrescamento che per il riscaldamento) si nota come il picco per il raffrescamento si avvicina ai valori di progetto ($Peak_{cooling} = 1230,8 \text{ kW}$), ma per quanto riguarda il riscaldamento questo inizialmente era calcolato rispetto ad un modello privo di ottimizzazioni (2220,9 kW), arrivando però ad ottenere con la simulazione 8 un valore molto più in linea (1172,2 kW) con il picco di progetto ($Peak_{heating} = 1021,2 \text{ kW}$).

Questo risultato ottenuto da OpenStudio conferma come anche nella realtà queste soluzioni di attenuazione della temperatura e del recupero di calore siano effettivamente utilizzate, riducendo sensibilmente i picchi di carico, i fabbisogni di energia e anche l'energia primaria.

I valori dei carichi di picco ottenuti in OpenStudio dalla simulazione 8 risultano superiori alle potenze nominali di progetto realmente installate, questo non rappresenta un difetto di modellazione ma può essere ricondotto alla raffinatezza del modello o più probabilmente alla differenza tra simulazione dinamica e dimensionamento realmente eseguito.

Per il raffrescamento si ha un aumento del 28% rispetto al valore di progetto e tale differenza può essere spiegata dal fattore di contemporaneità, ovvero che i software di simulazione dinamica ricavano i picchi estivi sommando i picchi massimi per ogni zona di tutti gli edifici, indipendentemente dal momento in cui avviene. Tuttavia le normative (ASHRAE) e la pratica affermano che in un complesso edilizio di ampie dimensioni si ha un impatto dell'irraggiamento solare massimo che non investe mai simultaneamente tutti gli edifici e le zone, così come il tasso di occupazione non risulta mai massimo contemporaneamente in tutte le aule e gli uffici.

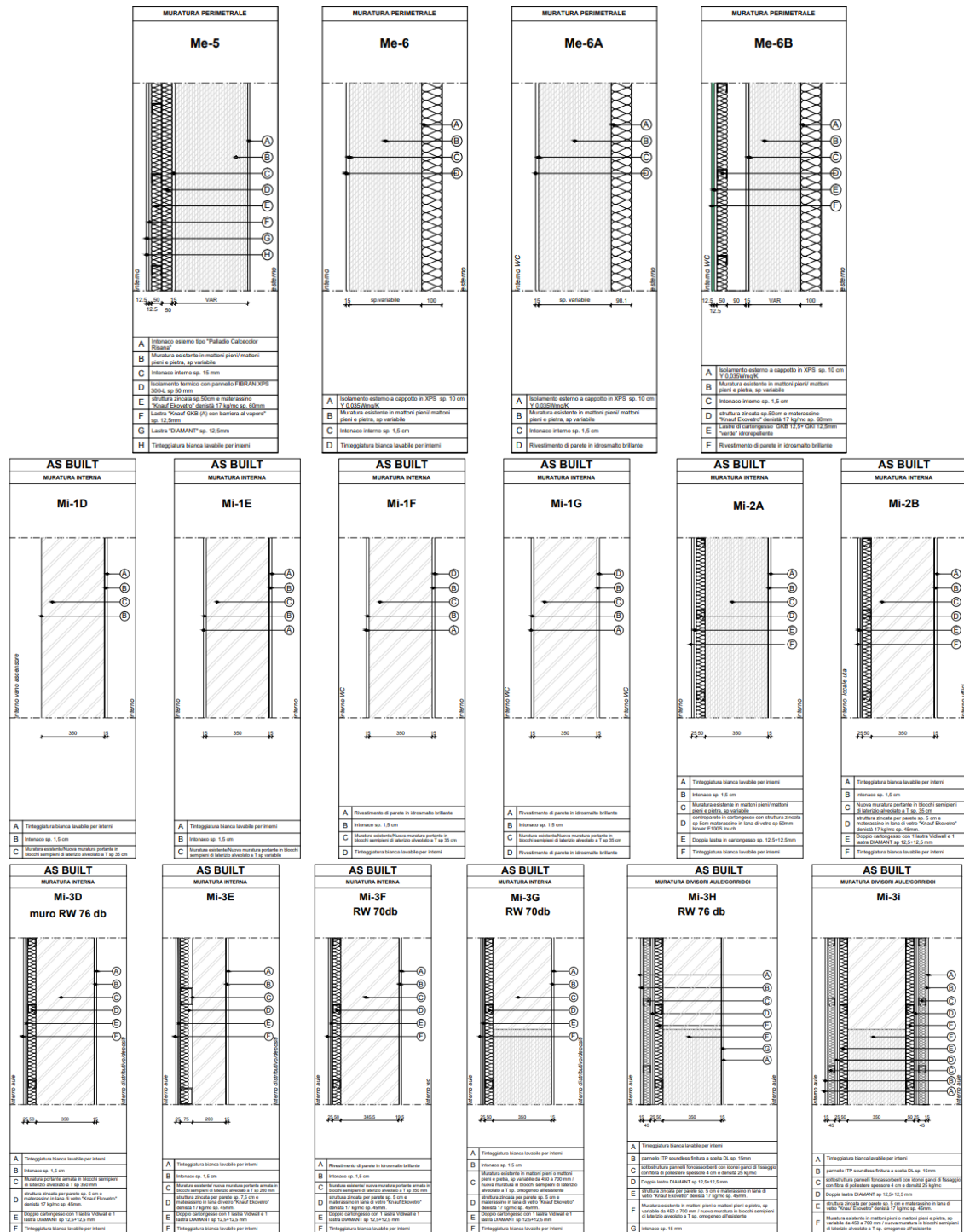
Per il riscaldamento risulta un aumento del 15% che può essere ricondotto allo sforzo istantaneo calcolato da OpenStudio per riportare alla temperatura di comfort invernale di 21°C per l'intero complesso, tale transitorio è definito come potenza di ripresa nella norma UNI EN 12831. Nella realtà, per evitare di sovradimensionare eccessivamente le macchine da usare nell'impianto e avere basse efficienze ai carichi parziali, si preferisce aumentare l'intervallo temporale di tale transitorio in modo da avere più tempo a disposizione per raggiungere la temperatura desiderata e per avere uno sforzo istantaneo minore.

I risultati della seguente tesi pongono solide basi per futuri sviluppi di ricerca. Il modello BIM potrà essere ulteriormente migliorato a livello di dettagli architettonici e impiantistici, integrando i reali impianti HVAC presenti in ogni singolo edificio e quindi eseguire analisi energetiche molto più approfondite per ogni edificio e zona.

Tuttavia lo sviluppo più ambizioso e rilevante consiste nell'evoluzione degli attuali modelli BIM e BEM verso un modello di Digital Twin del complesso. Questa soluzione permetterebbe di interfacciarsi direttamente con il BMS (Building Management System) di Siemens, già presente nel complesso, trasmettendo in tempo reale e continuamente i dati di monitoraggio e dei reali profili di funzionamento dell'intero complesso.

Una corretta integrazione di questo sviluppo porterebbe a calibrare il modello energetico fino a convergere con il modello reale, così facendo sarà possibile ottimizzare le logiche di controllo degli impianti HVAC realmente installati, massimizzando l'efficienza energetica e ridurre sensibilmente i consumi del complesso Beato Pellegrino.

Appendice



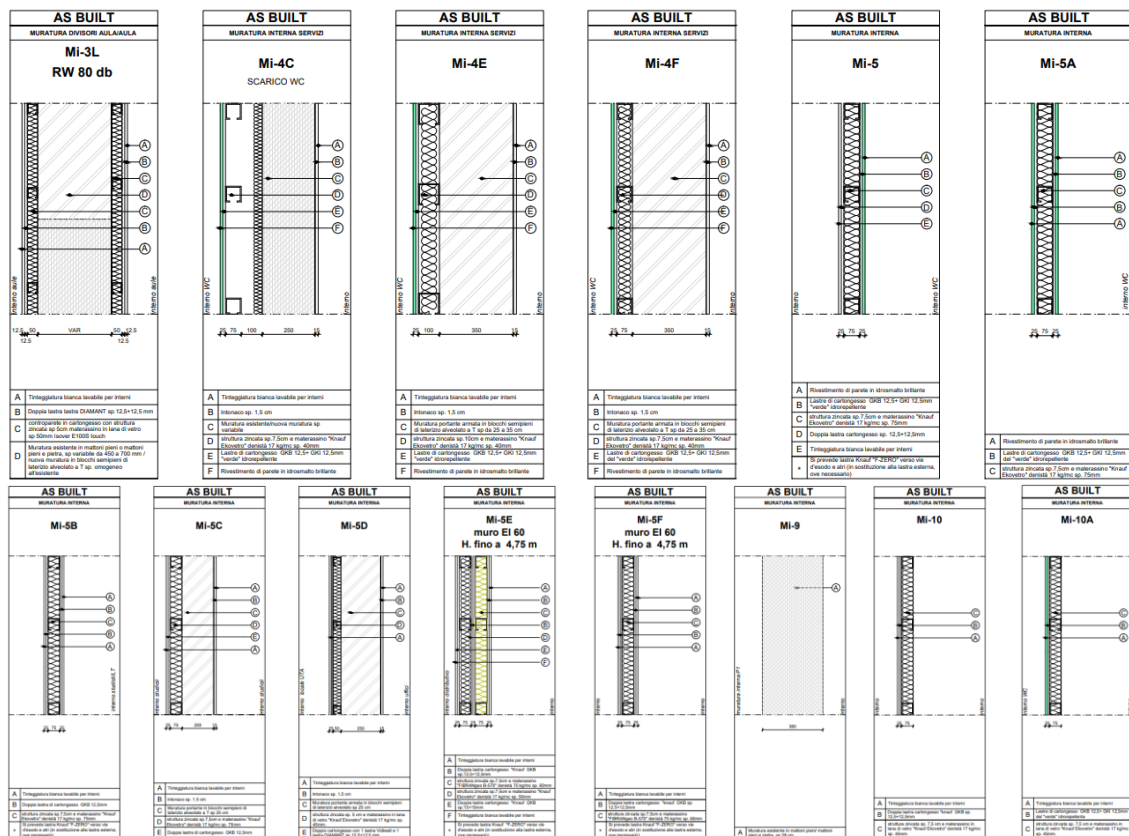


figura 7.1: abaco pareti edificio A1

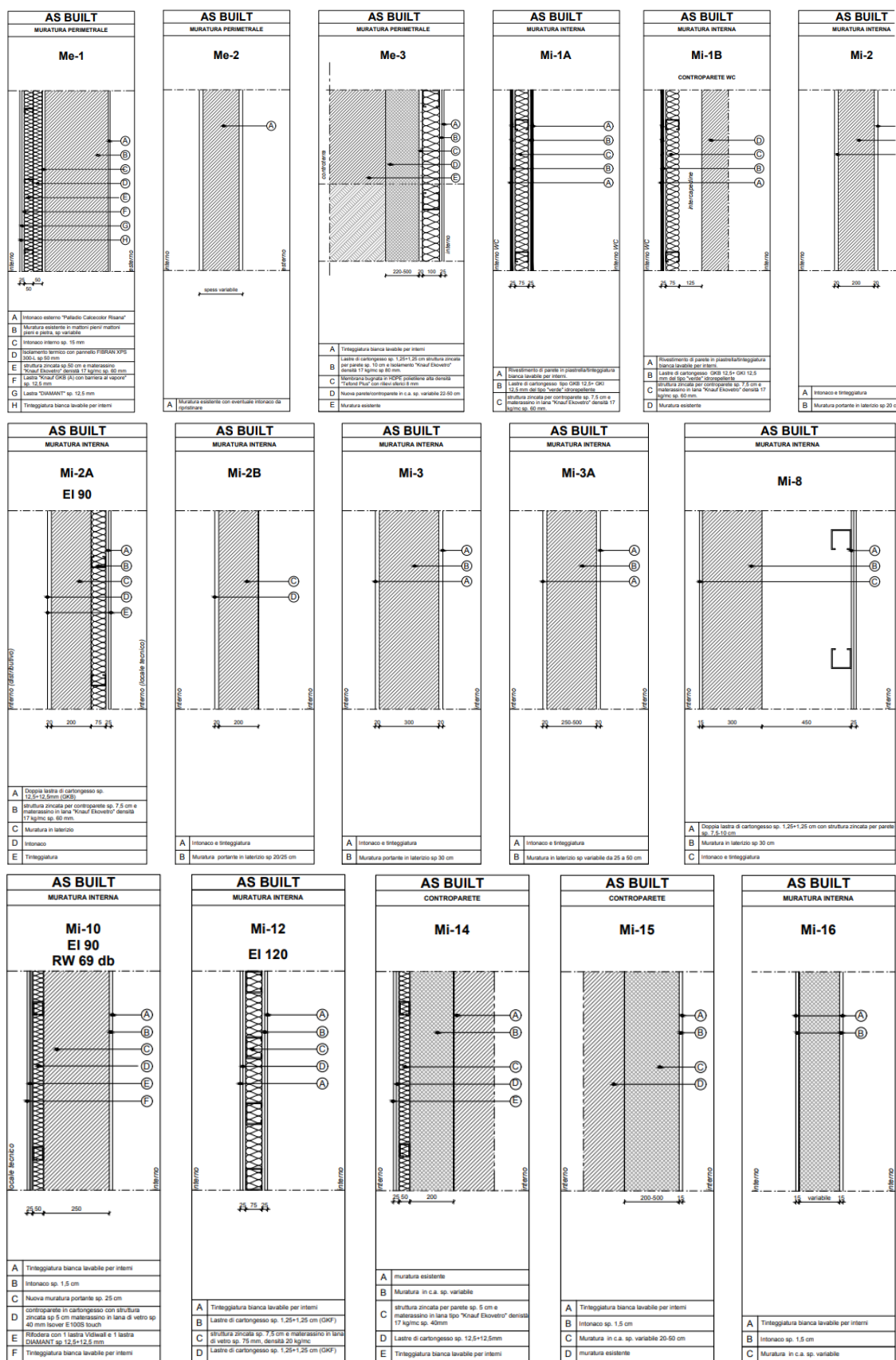


figura 7.2: abaco pareti edificio B1

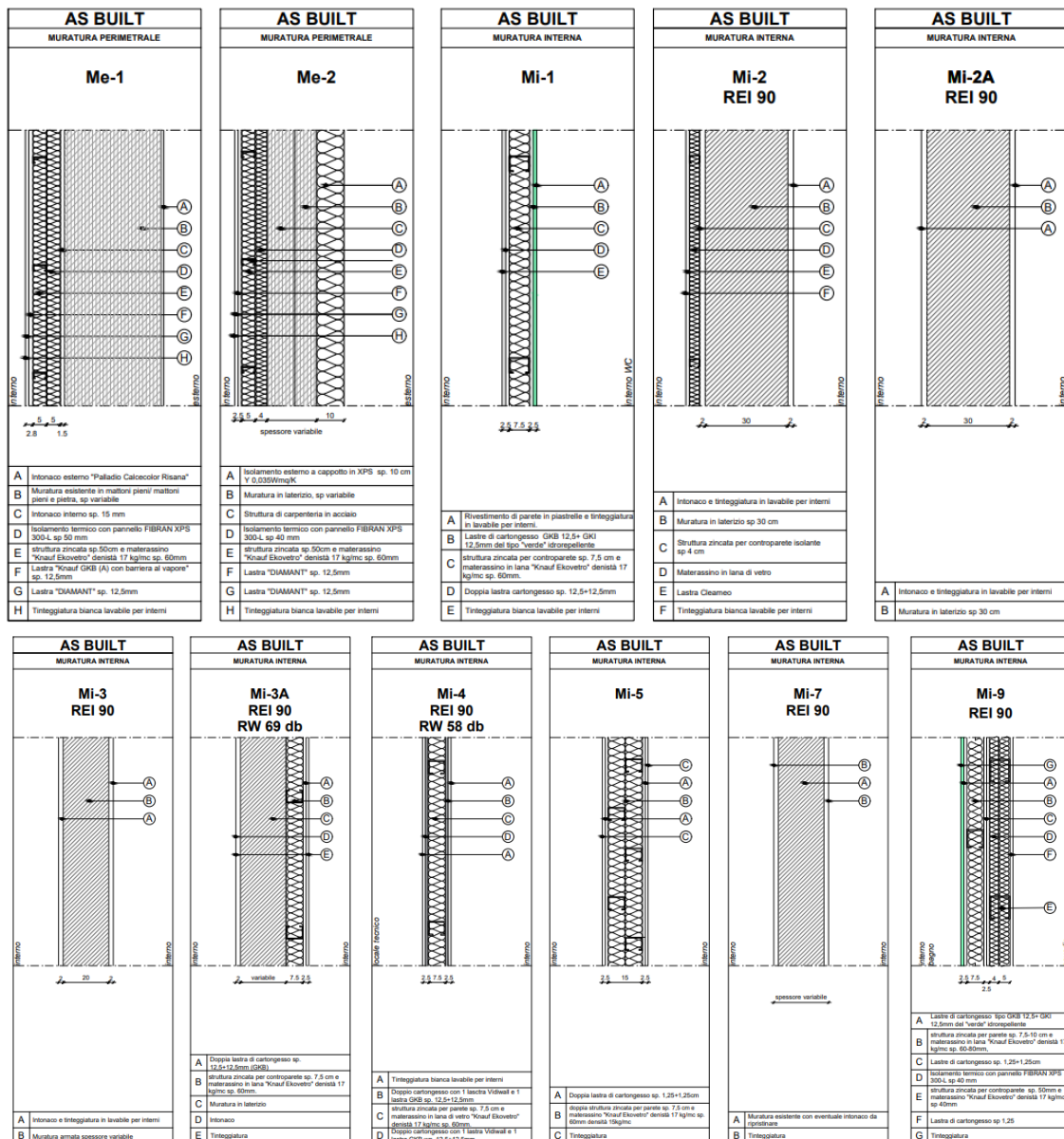


figura 7.3: abaco pareti edificio B2

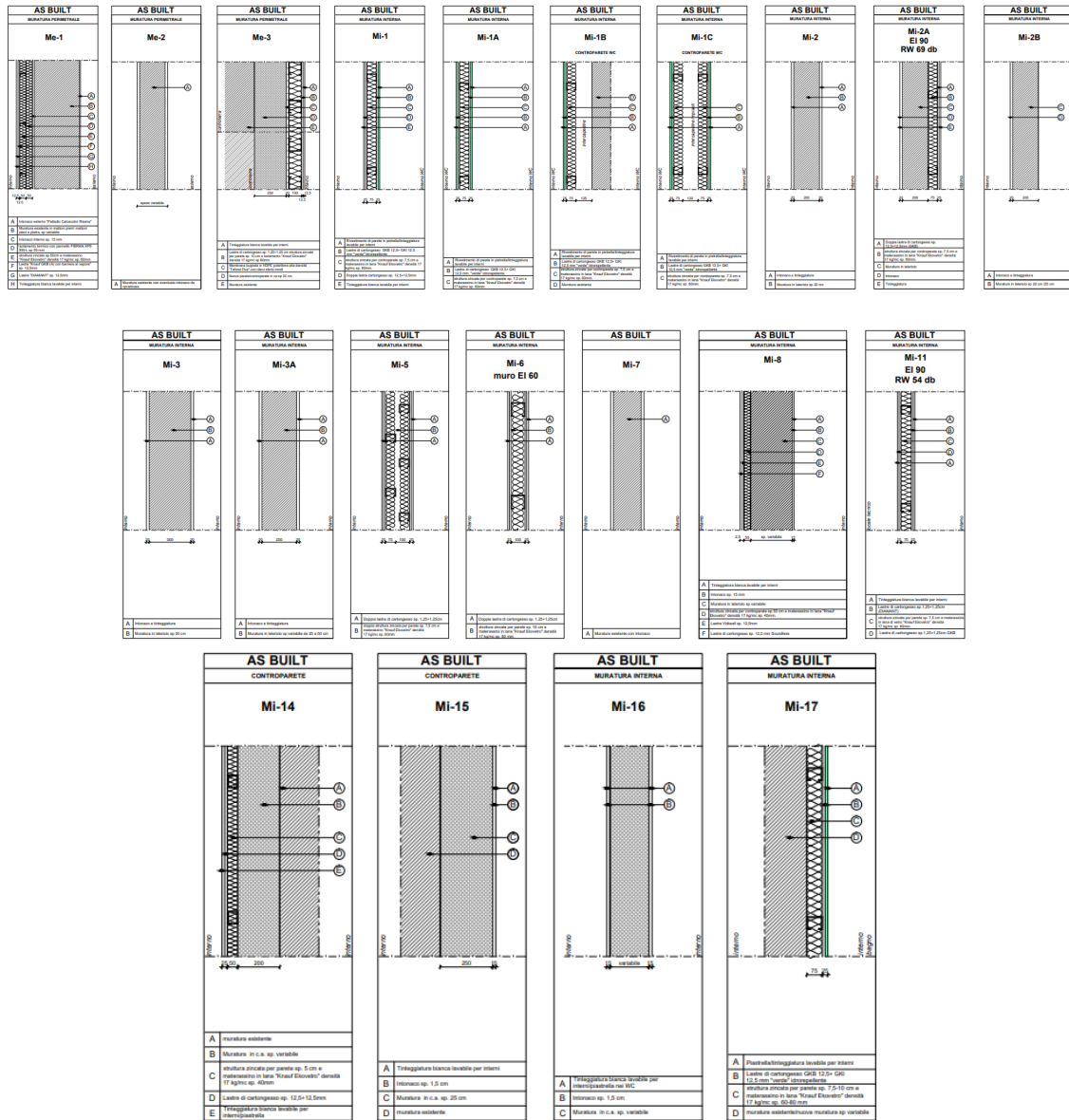


figura 7.4: abaco pareti edificio B3

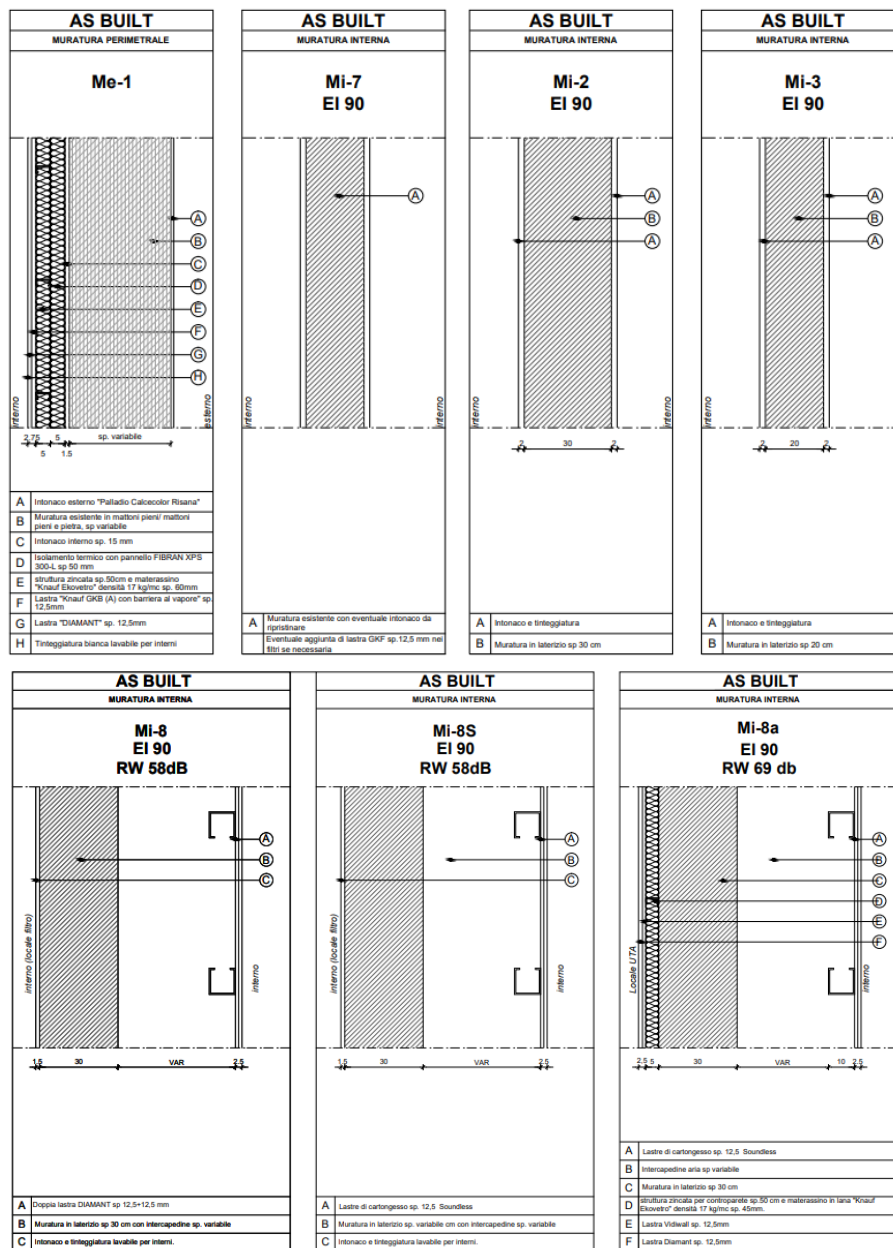


figura 7.5: abaco pareti edificio B4

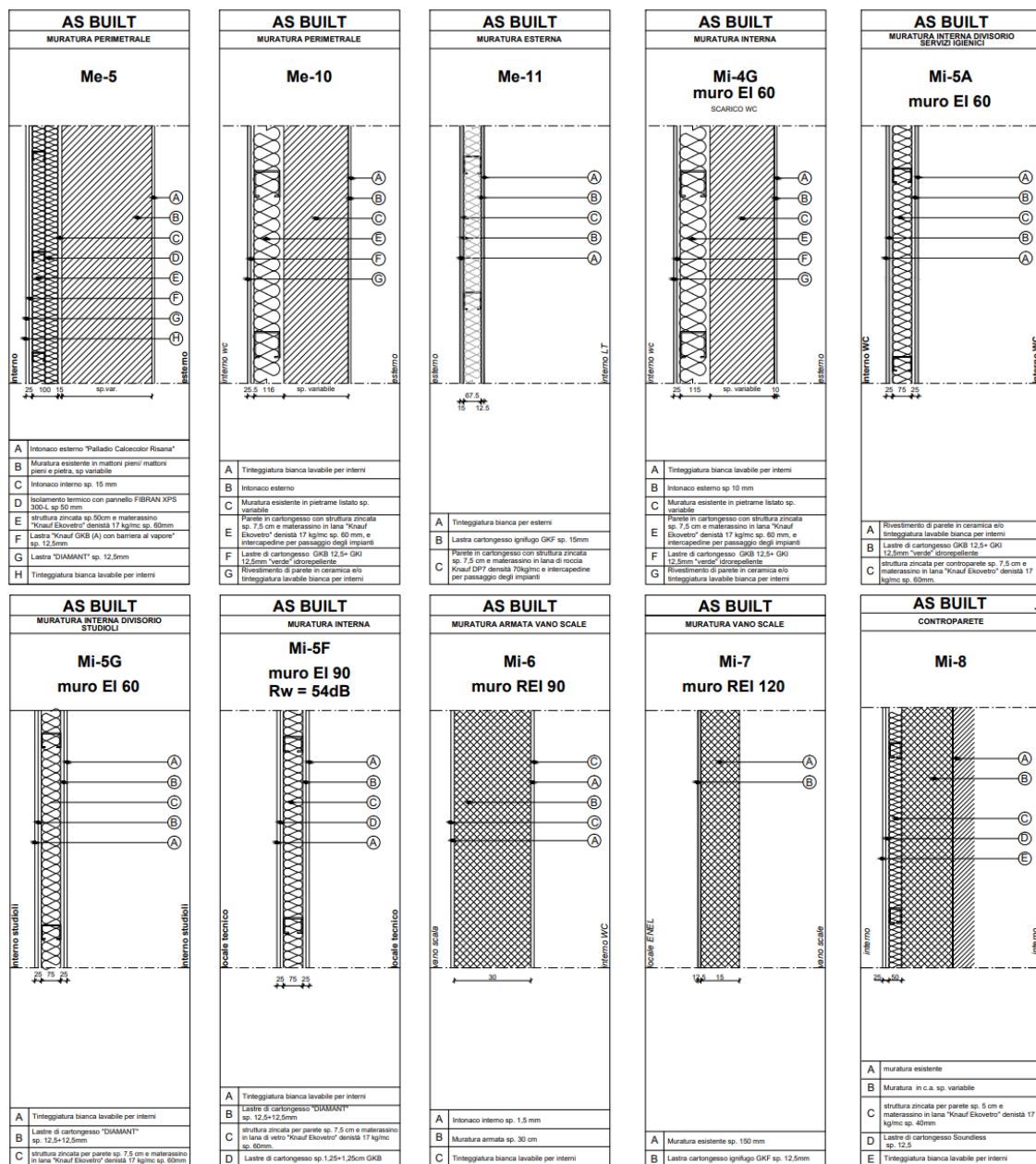


figura 7.6: abaco pareti edificio C1

MURATURA PERIMETRALE	MURATURA INTERNA	MURATURA INTERNA DIVISORIO SERVIZI IGIENICI	MURATURA INTERNA DIVISORIO STUDIOLI
Me-5	Mi-5 muro EI 60	Mi-5A muro EI 60	Mi-5G muro EI 60
A Intonaco esterno "Palladio Calcestruzzo Rissana" finitura scelta da DL B Muratura esistente in mattoni pieni/mattoni pieni a pasta, sp. variabile C Intonaco interno sp. 15 mm D Isolamento termico con pannelli FIBRAN XPS 300-L sp. 50 mm E struttura zincata sp. 50cm e malterascio "Knauf Ekkovest" densità 17 kg/mc sp. 60mm F Lastre "Knauf GKB (A) con barriera al vapore" sp. 12,5mm G Lastre "DIAMANT" sp. 12,5mm H Tinteggiatura bianca lavabile per interni	A Rivestimento di parete in ceramica alto tinteggiatura bianca per interni B Lastre di cartongesso GKB 12,5+ GKI 12,5mm "verde" idrorepellente C struttura zincata per controparete sp. 7,5 cm e malterascio in lana "Knauf Ekkovest" densità 17 kg/mc sp. 60mm D Lastre di cartongesso GKB 12,5+12,5mm	A Rivestimento di parete in ceramica alto tinteggiatura bianca per interni B Lastre di cartongesso GKB 12,5+ GKI 12,5 mm "verde" idrorepellente C struttura zincata per controparete sp. 7,5 cm e malterascio in lana "Knauf Ekkovest" densità 17 kg/mc sp. 60mm	A Tinteggiatura bianca lavabile per interni B Lastre di cartongesso sp. 12,5+12,5mm "DIAMANT" C struttura zincata per parete sp. 7,5 cm e malterascio in lana "Knauf Ekkovest" densità 17 kg/mc sp. 60mm

MURATURA INTERNA	MURATURA INTERNA	MURATURA ARMATA VANO SCALE
Mi-5H muro REI 60	Mi-5L muro EI 60	Mi-6 muro EI 60
A Doppia lastra di cartongesso sp. 1,25+1,25cm B struttura zincata per parete sp. 7,5 cm e malterascio in lana "Knauf Ekkovest" densità 17 kg/mc sp. 60 mm * si prevede lastra Knauf "ekovest" verde in caso di allarme alla lastra esterna, ove necessario	A Rivestimento di parete in ceramica alto tinteggiatura bianca per interni B Lastre di cartongesso GKB 12,5+ GKI 12,5mm "verde" idrorepellente C struttura zincata sp. 7,5 cm e malterascio in lana "Knauf Ekkovest" densità 17 kg/mc sp. 60mm D Doppia lastra cartongesso GKB sp. 12,5+12,5mm E Tinteggiatura bianca lavabile per interni	A Intonaco interno sp. 1,5 mm B Rivestimento di parete in lastra di cartongesso idrorepellente sp. 13 mm C Muratura armata sp. 20 cm D Tinteggiatura bianca lavabile per interni

figura 7.7: abaco pareti edificio C2

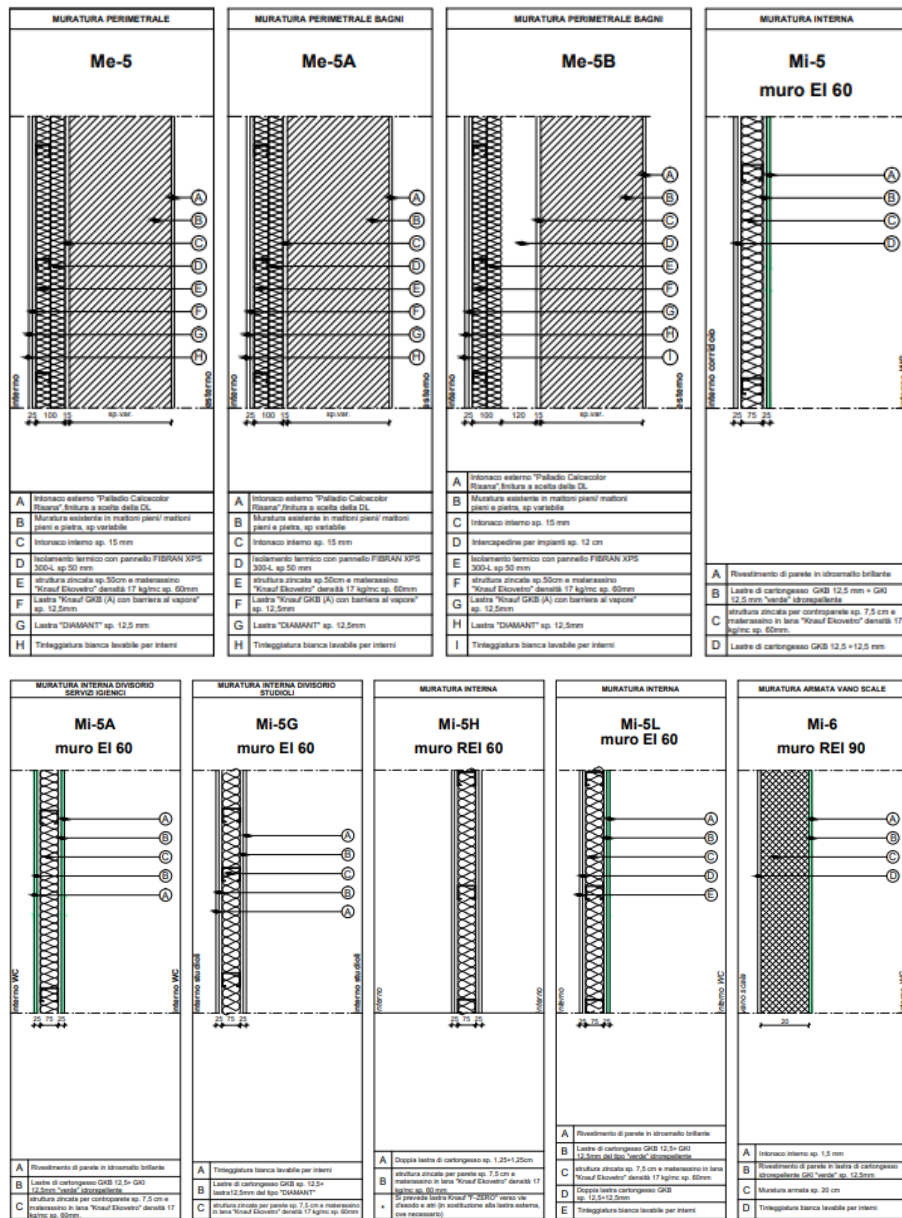


figura 7.8: abaco pareti edificio C3

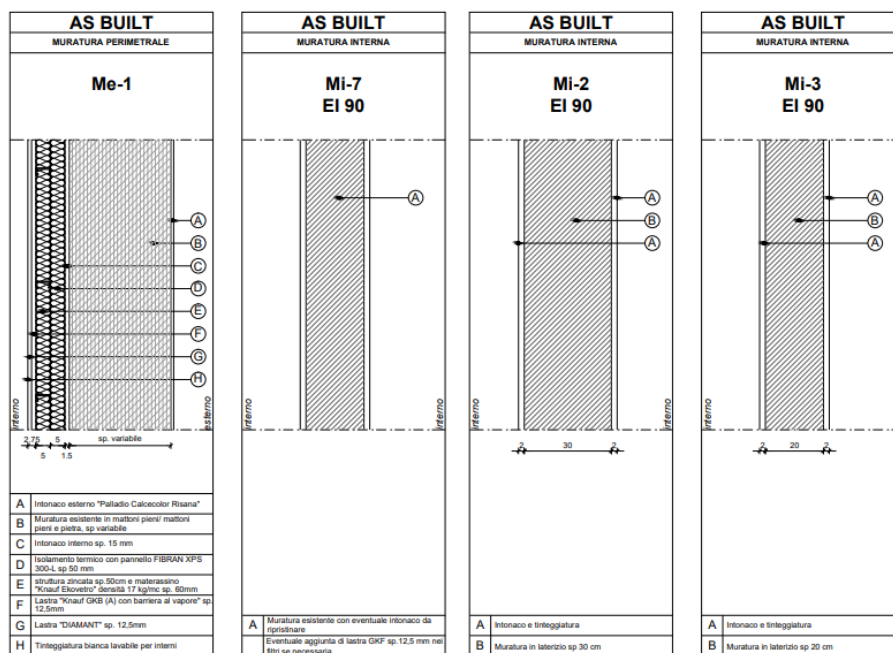


figura 7.9: abaco pareti edificio E

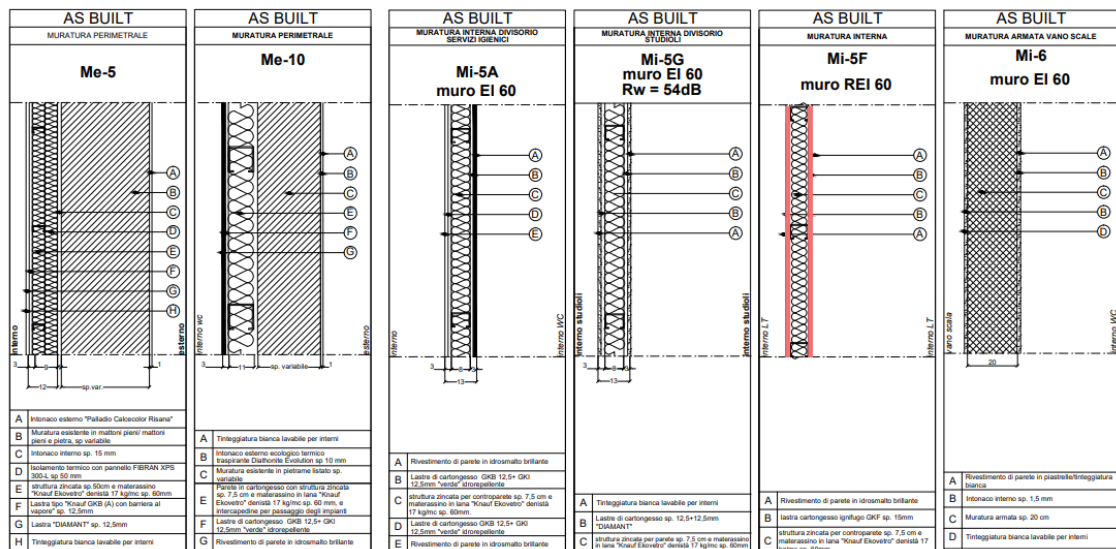


figura 7.10: abaco pareti edificio I

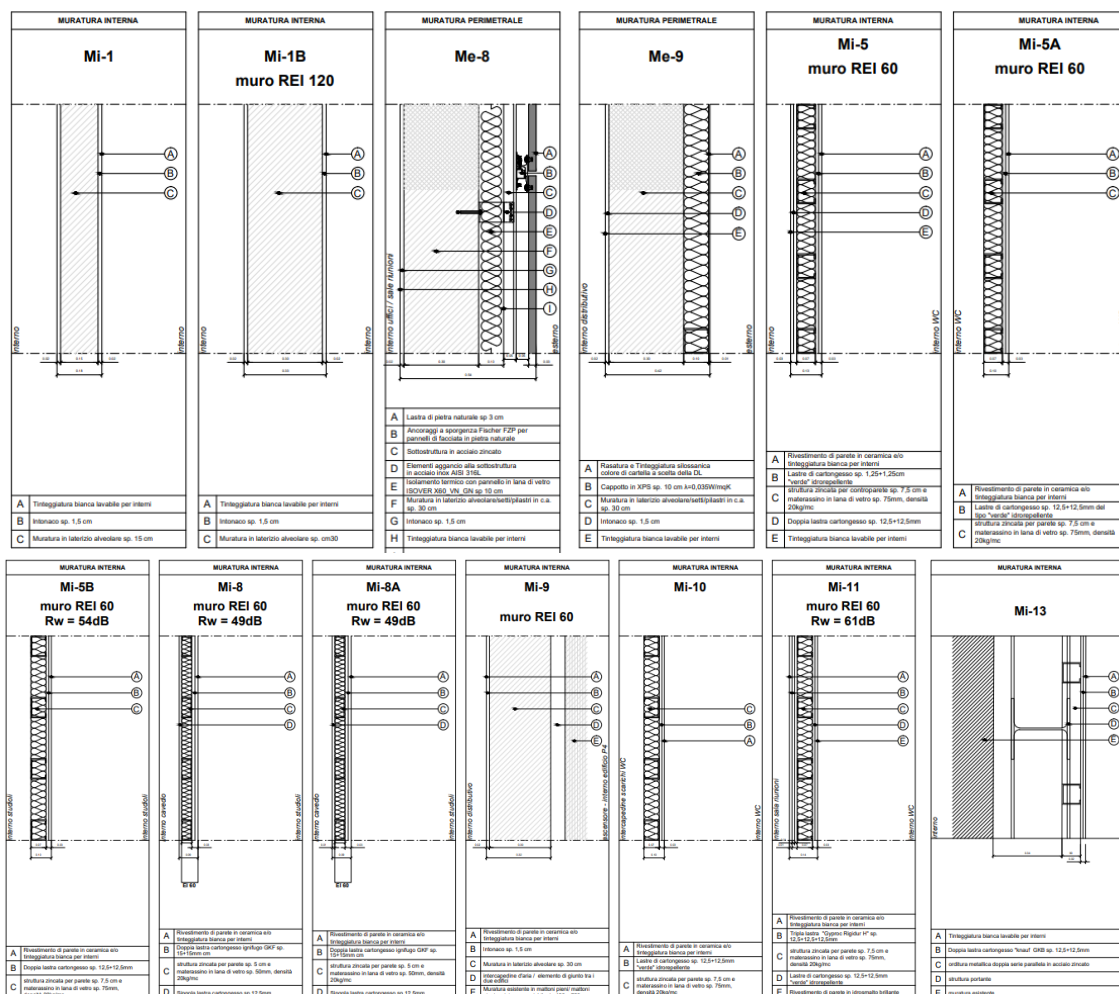


figura 7.11: abaco pareti edificio P1

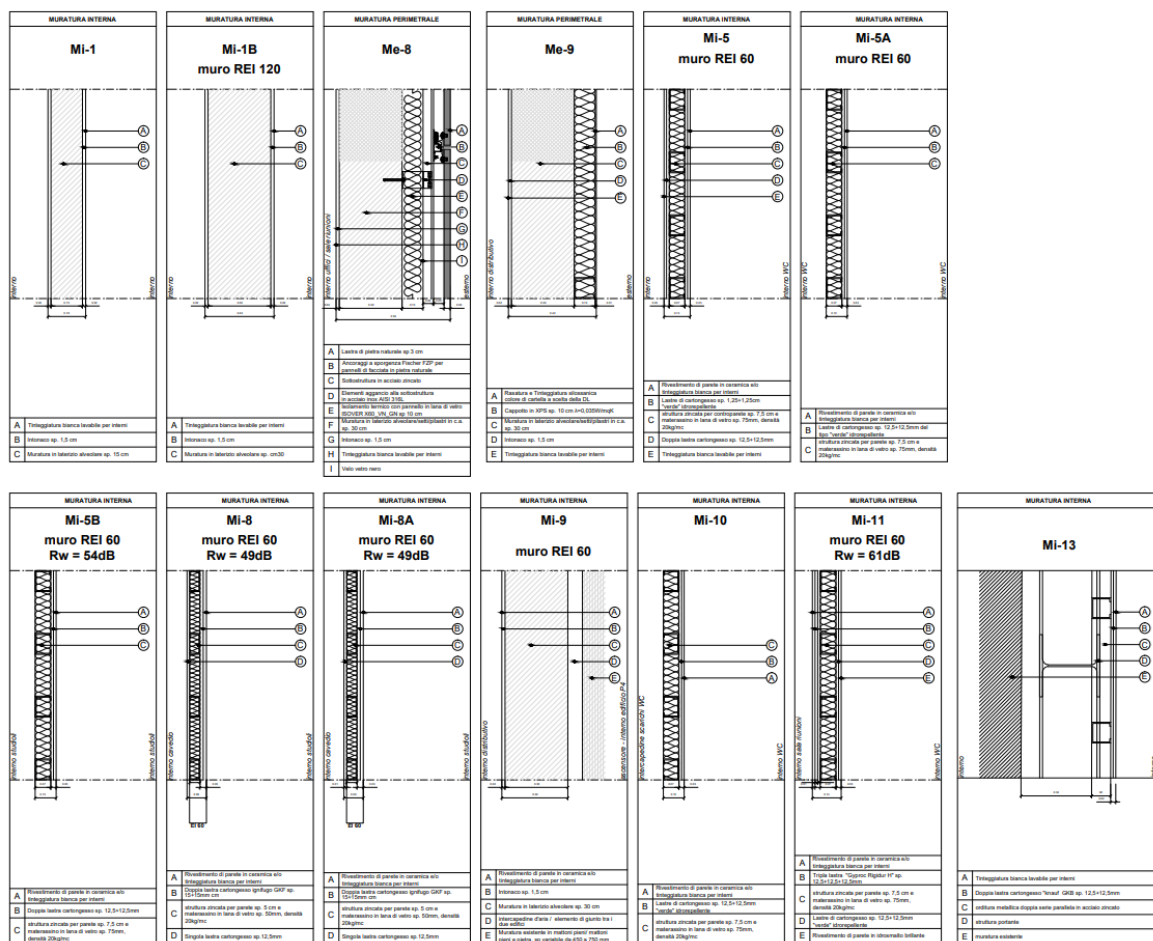
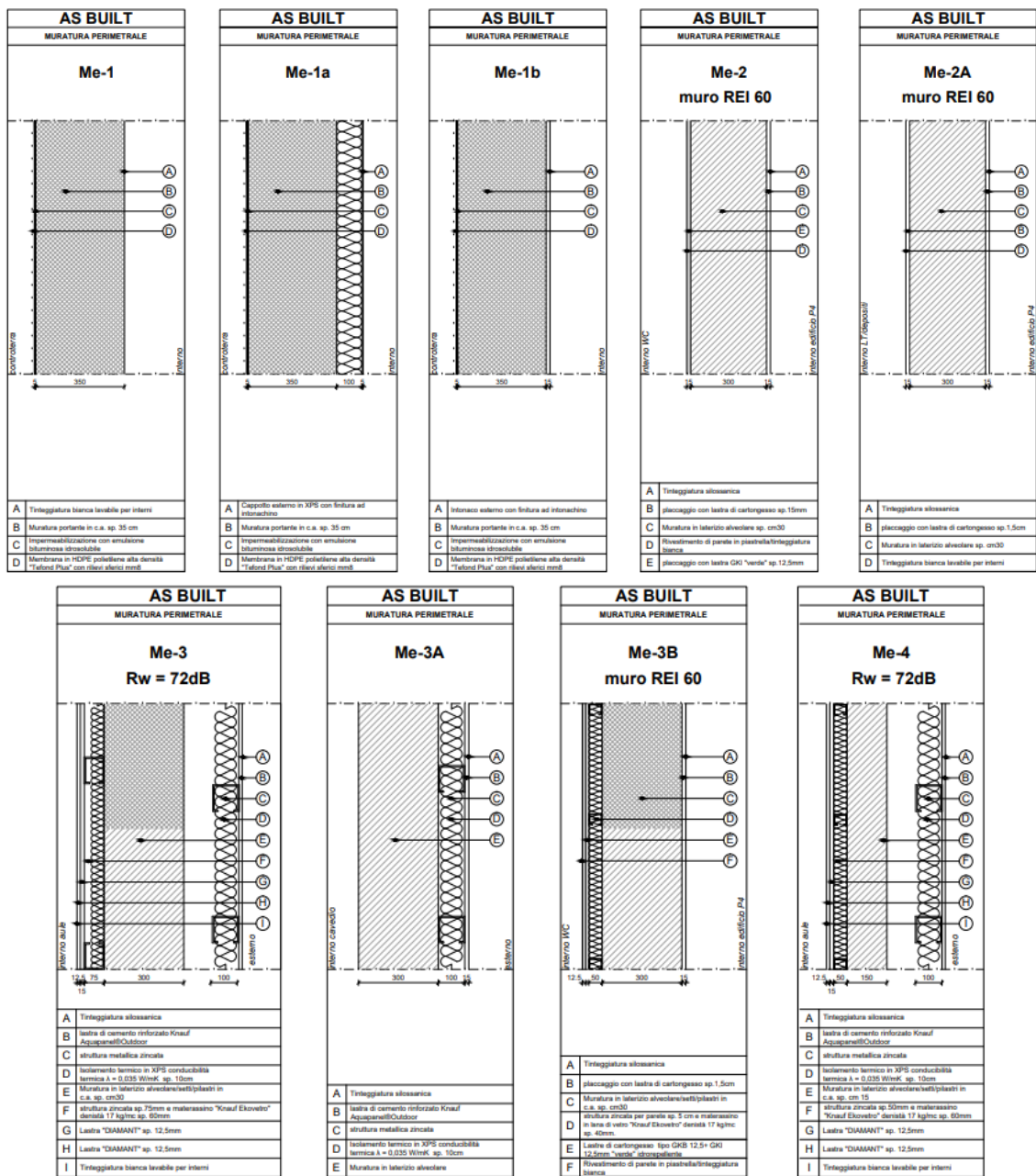


figura 7.12: abaco pareti edificio P2



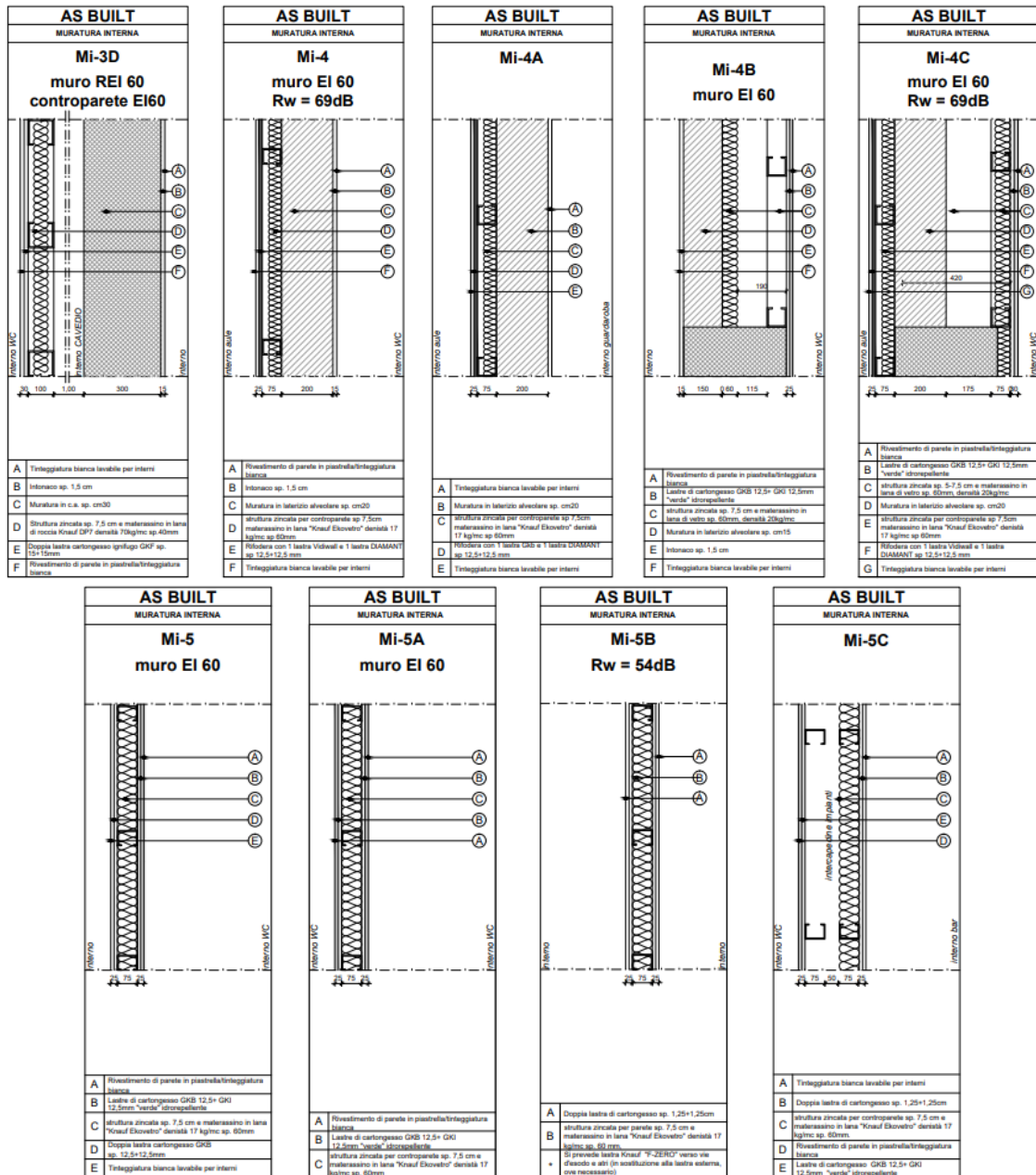
AS BUILT MURATURA INTERNA	AS BUILT MURATURA INTERNA	AS BUILT MURATURA INTERNA	AS BUILT MURATURA INTERNA	AS BUILT MURATURA INTERNA
Mi-1	Mi-1A muro EI 120	Mi-1B muro REI 120	Mi-1C	Mi-2 muro REI 120
A Tinteggiatura bianca lavabile per interni B Intonaco sp. 1,5 cm C Muratura in laterizio alveolare sp. cm15	A Tinteggiatura bianca lavabile per interni B Intonaco sp. 1,5 cm C Muratura in laterizio alveolare sp. cm20	A Tinteggiatura bianca lavabile per interni B Intonaco sp. 1,5 cm C Muratura in laterizio alveolare sp. cm30	A Rivestimento di parete in piastrella/tinteggiatura bianca B Intonaco sp. 1,5 cm C Muratura in laterizio alveolare sp. cm15 D Tinteggiatura bianca lavabile per interni	A Tinteggiatura bianca lavabile per interni B Muratura portante in c.a. sp. da progetto strutturale

AS BUILT	
MURATURA INTERNA	
Mi-3 muro REI 60	
A	Tinteggiatura bianca lavabile per interni
B	Intonaco sp. 1,5 cm
C	Muratura in laterizio alveolare/tefit/piastri in c.a. sp. cm30
D	struttura zincata per parete sp. 5 cm e maltesasso in lana di vetro sp. 40mm lavorati E1005 touch sp. 40mm
E	Isolante con 1 lasta tipo Gb e 1 lasta DIAMANT H sp. 1,25+1,25 cm
F	Tinteggiatura bianca lavabile per interni

AS BUILT	
MURATURA DIVISORI AULE	
Mi-3A muro REI 60	
A	Pannello fonoassorbente prefinito (TP Soundfree sp. 14mm)
B	edificatura pannello fonoassorbente con diafani ganci di fissaggio e lana di vetro lavorati E1005 touch sp. 40mm
C	Tinteggiatura bianca lavabile per interni
D	Intonaco sp. 1,5 cm
E	Muratura in laterizio alveolare/tefit/piastri in c.a. sp. cm30
F	struttura zincata per controperete sp. 5cm maltesasso in lana di vetro sp. 40mm lavorati E1005 touch
G	Rifinitura con 1 lasta tipo Gb e 1 lasta DIAMANT H sp. 1,25+1,25 cm
H	Tinteggiatura bianca lavabile per interni

AS BUILT	
MURATURA INTERNA	
Mi-3B muro REI 60	
A	Tinteggiatura bianca lavabile per interni
B	Intonaco sp. 1,5 cm
C	Muratura in laterizio alveolare/tefit/piastri in c.a. sp. cm30
D	struttura zincata sp. 5 cm e maltesasso in lana "Knauf Ecolowool" densità 17 kg/mc sp. 45mm
E	Cartone di cartongesso tipo GbB 12,5+ GbB 12,5mm "verde" idrorepellente
F	Rivestimento di parete in piastrella/tinteggiatura bianca lavabile per interni

AS BUILT	
MURATURA INTERNA	
Mi-3C muro REI 60	
A	Tinteggiatura bianca lavabile per interni
B	Intonaco sp. 1,5 cm
C	Muratura in c.a. sp. cm30
D	struttura zincata sp. 10 cm e maltesasso in lana "Knauf Ecolowool" densità 17 kg/mc sp. 45mm
E	Cartone di cartongesso GbB 12,5+ GbB 12,5mm "verde" idrorepellente
F	Rivestimento di parete in piastrella/tinteggiatura bianca lavabile per interni



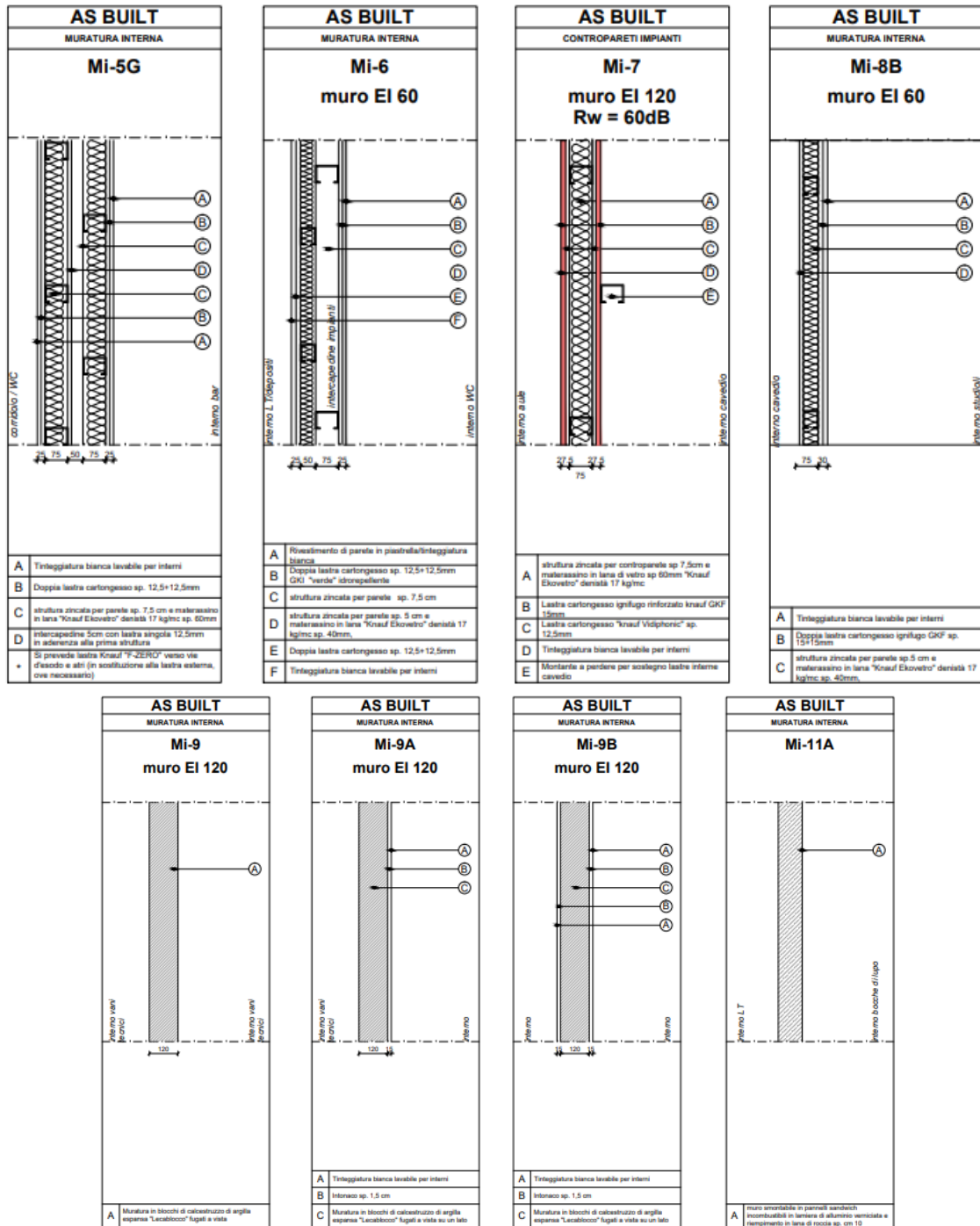


figura 7.13: abaco pareti edificio P3

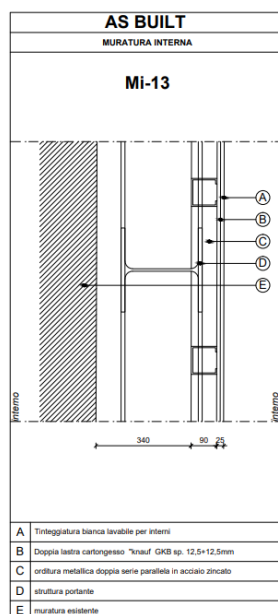
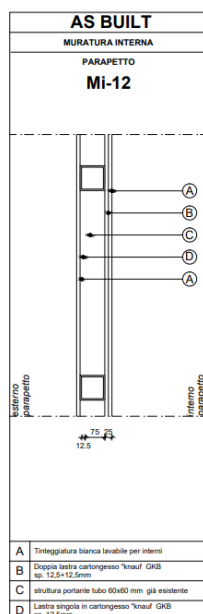
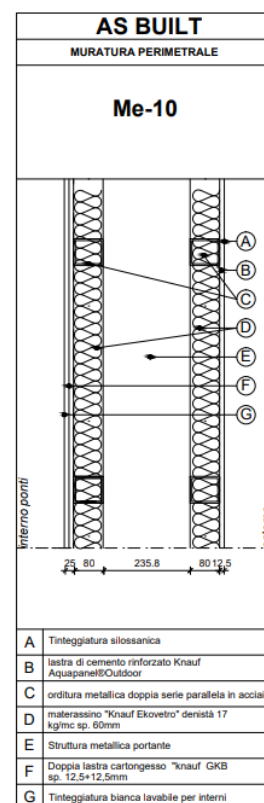
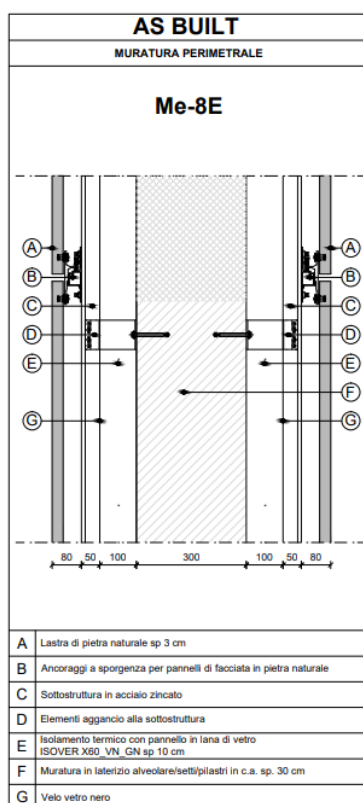
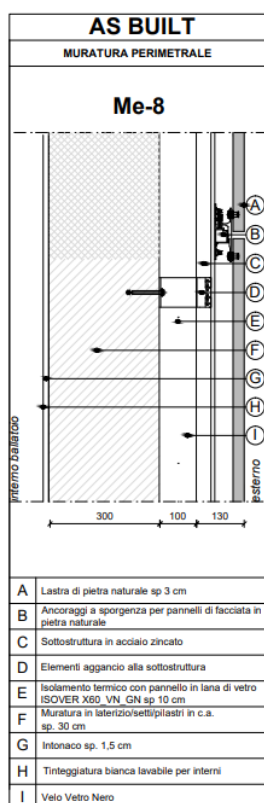


figura 7.14: abaco pareti edificio P4

Model Screen 525

Tessuto tecnico filtrante per uso esterno e interno.

Satinè 5500

Dimensioni (mm)	
Altezza rotoli	2850

4040		0909	
0606		0505	
1111 RAL 7048		6060 RAL 9005	
4949 RAL 9006		5959 RAL 7016	

CARATTERISTICHE TECNICHE			
Composizione	42% Fibra di vetro - 58% PVC		
Classificazione al fuoco, al fumo e altri rapporti di prova*	M1 (F) - NFP 92 503 B1 (DE) - DIN 4102-1 BS (GB) - 476 Pt 6 & 7 Class 0 Euroclass C-s3-d0 (EU) - EN 13501-1 A seconda del montaggio EN 13823 & EN 14716 C UNO (IT) - UNI 9177 IMO - MED 2014/90/EU CLASSE 1 (SP) - EN 13773 FR (US) - NFPA 701 F3 (F) - NF F 16-101 PCS: 13,2 MJ/Kg (6,86 MJ/m²)		
Sicurezza sanitaria	Greenguard® GOLD: qualità dell'aria interna garantita (COV) Resistenza ai batteri: oltre il 99% dei batteri distrutti - ASTM E 2180		
Coefficiente di apertura	4%		
Blocco UV	Fino al 96%		
Larghezza dei rotoli	2000 - 2500 - 2850 - 3200 mm (a seconda dei colori)		
Peso / m²	520 g ± 5% - ISO 2286 - 2		
Spessore	0,75 mm ± 5% - ISO 2286 - 3		
Stabilità del colore alla luce (scala su 8)	7/8 - ISO 105 B02 (colore bianco non rilevato)		
Resistenza meccanica	Rottura	Strappo	Piega
Ordito	> 220 daN/5 cm	≥ 9 daN	≥ 100 daN/5 cm
Trama	> 220 daN/5 cm	≥ 8 daN	≥ 100 daN/5 cm
	ISO 1421	EN 1875-3	ISO 1421 **
Allungamento (ordito e trama)	< 5 % - ISO 1421		
Confezionamento	Rotoli da 52 ml - Larghezza 3200 mm : rotoli da 33 ml		
Confezione	Consulenza su richiesta		

* Contattare il fornitore ** Procedura interna del fornitore derivata dalla norma ISO 1421



Technofabrics - 10

Model System Italia

Model Screen 525

Satinè 5500

Tessuto tecnico filtrante per uso esterno e interno.

Fattore di apertura 4%	Valori termici					Valori ottici
Colori	Tessuto			Tessuto + Vetro / gtot esterno		TV
	Ts	Rs	As	C : gv = 0,59	D : gv = 0,32	
0202 Bianco	21	66	13	0,16	0,09	21
0205 Bianco Canarino	19	58	23	0,14	0,08	18
2002 Bianco Lino	20	56	24	0,14	0,09	18
M36 020207 Bianco Bianco Perla	19	57	24	0,14	0,08	18
0505 Canarino	20	51	29	0,15	0,08	17
2020 Lino	18	53	29	0,13	0,08	16
0207 Bianco Perla	17	50	33	0,12	0,08	16
0702 Perla Bianco	17	45	38	0,12	0,08	16
0210 Bianco Sabbia	17	50	33	0,12	0,08	15
0705 Perla Canarino	16	40	44	0,12	0,08	15
0720 Perla Lino	17	41	42	0,12	0,08	15
M37 200710 Lino Perla Sabbia	16	45	39	0,12	0,07	14
M45 070210 Perla Bianco Sabbia	15	41	44	0,11	0,07	14
0707 Perla	14	38	48	0,11	0,07	13
1002 Sabbia Bianco	16	46	38	0,11	0,07	13
M02 020310 Bianco Turchese Sabbia	17	49	34	0,12	0,08	13
M64 100520 Sabbia Canarino Lino	16	43	41	0,11	0,07	12
0710 Perla Sabbia	14	38	48	0,10	0,07	12
M65 100508 Sabbia Canarino Oro	15	42	43	0,11	0,07	11
0750 Perla Verde	14	33	53	0,10	0,06	11
1010 Sabbia	13	39	48	0,10	0,06	10
4949 RAL 9006 Alluminio Bianco	11	37	52	0,09	0,05	10
0201 Bianco Grigio	12	37	51	0,09	0,06	10
0703 Perla Turchese	14	38	48	0,10	0,06	9
2001 Lino Grigio	12	32	56	0,09	0,06	9
0701 Perla Grigio	11	27	62	0,08	0,06	9
M31 010207 Grigio Bianco Perla	10	28	62	0,08	0,06	8
1001 Sabbia Grigio	10	28	62	0,08	0,06	8
0740 Perla Oltremare	13	28	59	0,10	0,06	8
0706 Perla Bornzo	8	18	74	0,07	0,05	8
0909 Mandarino	18	44	38	0,13	0,07	7
0102 Grigio bianco	10	31	59	0,08	0,05	7
0105 Grigio Canarino	9	28	63	0,07	0,05	7
0108 Grigio Oro	11	26	63	0,08	0,06	7
0110 Grigio Sabbia	10	25	65	0,07	0,05	7
0101 Grigio	8	20	72	0,07	0,05	7
1006 Sabbia Bronzo	8	18	74	0,07	0,05	7
0103 Grigio Turchese	9	26	65	0,07	0,05	6
0150 Grigio Verde	9	23	68	0,07	0,05	6
M01 010330 Grigio Turchese Carbone	8	20	72	0,07	0,05	6



Technofabrics - 11

Model System Italia

Model Screen 525

Satinè 5500

Tessuto tecnico filtrante per uso esterno e interno.

Fattore di apertura 4%	Valori termici					Valori ottici
Colori	Tessuto			Tessuto + Vetro / gtot esterno		TV
	Ts	Rs	As	C : gv = 0,59	D : gv = 0,32	
M38 300120 Carbone Grigio Lino	6	13	81	0,06	0,05	6
0109 Grigio Mandarino	9	25	65	0,07	0,05	5
4040 Oltremare	14	25	61	0,10	0,05	5
0140 Grigio Oltremare	8	22	70	0,07	0,05	5
1111 RAL 7048 Grigio Topo Perlato	5	17	78	0,06	0,05	5
3001 Carbone Grigio	5	10	85	0,06	0,04	5
0130 Grigio Carbone	5	12	83	0,06	0,05	5
0606 Bronzo	5	7	88	0,06	0,05	5
3006 Carbone Bronzo	4	7	89	0,05	0,04	4
5959 RAL 7016 Grigio Antracite	4	7	89	0,05	0,04	4
3030 Carbone	4	6	90	0,05	0,04	4
6060 RAL 9005 Nero Scuro	4	4	92	0,05	0,04	4

VALORI TERMICI ED OTTICI secondo la norma europea EN 14501

gv = 0,59: fattore solare del vetro di riferimento (C), vetrocamera basso emissivo 4/16/4 riempito con Argon (fattore di trasmissione termica $U = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$).

gv = 0,32: fattore solare del vetro di riferimento (D), vetrocamera basso emissivo 4/16/4 riempito con Argon (fattore di trasmissione termica $U = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$).
Campioni testati secondo la norma EN 14500 che stabilisce i metodi di misurazione e calcolo con riferimento alla norma "dispositivi di protezione solare combinati con vetrate - calcolo del fattore di trasmissione solare e luminosa - parte 2: Metodo dettagliato EN 13363-2" e norma EN 410 "vetro in costruzione - Determinazione delle caratteristiche luminose e solari della vetrata".

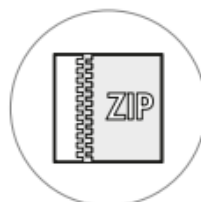
Applicazioni



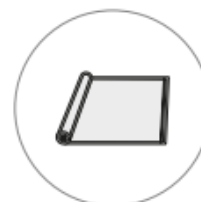
Tende a rullo



Tende a proiezione



Tende con sistema ZIP



Tende orizzontali



Technofabrics - 12

Model System Italia

tabella 7.1: Model Screen 525 - tessuto tecnico filtrante per uso esterno e interno.

Prospetto VIII - Indici di affollamento n_s per ogni metro quadrato di superficie

Classificazione degli edifici per categorie	n_s
EDIFICI ADIBITI A RESIDENZA E ASSIMILABILI	
- abitazioni civili:	
soggiorni, camere letto	0,04
- collegi, luoghi di ricovero, case di pena, caserme, conventi:	
• soggiorni	0,20
• sale riunioni	0,60
• dormitori	0,10
• camere letto	0,05
- alberghi, pensioni:	
• ingresso, soggiorni	0,20
• sale conferenze (piccole)	0,60
• camere letto	0,05
EDIFICI PER UFFICI E ASSIMILABILI	
• uffici singoli	0,06
• uffici open space	0,12
• locali riunione	0,60
• centri elaborazione dati	0,08
OSPEDALI, CLINICHE, CASE DI CURA E ASSIMILABILI	
• degenze (2-3 letti)	0,08
• corsie	0,12
• camere sterili e infettive	0,08
• visita medica	0,05
• soggiorni, terapie fisiche	0,20
EDIFICI ADIBITI AD ATTIVITÀ RICREATIVE, ASSOCIATIVE, DI CULTO	
- cinematografi, teatri, sale congressi	
• sale in genere	1,50
• biglietterie, ingressi	0,20 (medio)
• borse titoli e simili	0,50
• sale attesa stazioni e metropolitane, ecc.	1,00

(segue prospetto)

(segue del prospetto)	
Classificazione degli edifici per categorie	n_s
EDIFICI ADIBITI AD ATTIVITÀ RICREATIVE, ASSOCIATIVE, DI CULTO (segue)	
- musei, biblioteche, luoghi di culto	
• sale in genere	0,30
• luoghi culto	0,80
- bar, ristoranti, sale da ballo	
• bar in genere	0,80
• sale pranzo ristoranti	0,60
• sale da ballo	1,00
ATTIVITÀ COMMERCIALI E ASSIMILABILI	
- grandi magazzini	0,25
- negozi o reparti di grandi magazzini:	
• alimentari, abbigliamento, calzature, mobili, ottici, fioristi, fotografi	0,10
• barbieri, saloni di bellezza, lavasecco, farmacie, zona pubblico banche	0,20
- quartieri fieristici	0,20
EDIFICI ADIBITI AD ATTIVITÀ SPORTIVA	
- piscine, saune e assimilabili	
• piscine (sala vasca)	0,30
• saune	0,50
• ingressi	0,20
- palestre e assimilabili	
• campi gioco	0,20
• zone spettatori	1,50
• bowling	0,60
• ingressi	0,20
EDIFICI ADIBITI AD ATTIVITÀ SCOLASTICHE	
- asili nido e scuole materne	0,40
- aule scuole elementari, medie inferiori e superiori	0,45
- aule universitarie	0,60
- altri locali:	
• aule musica e lingue	0,50
• laboratori	0,30
• sale insegnanti	0,30

tabella 7.2: indici di affollamento n_s per ogni metro quadrato di superficie (UNI 10339)

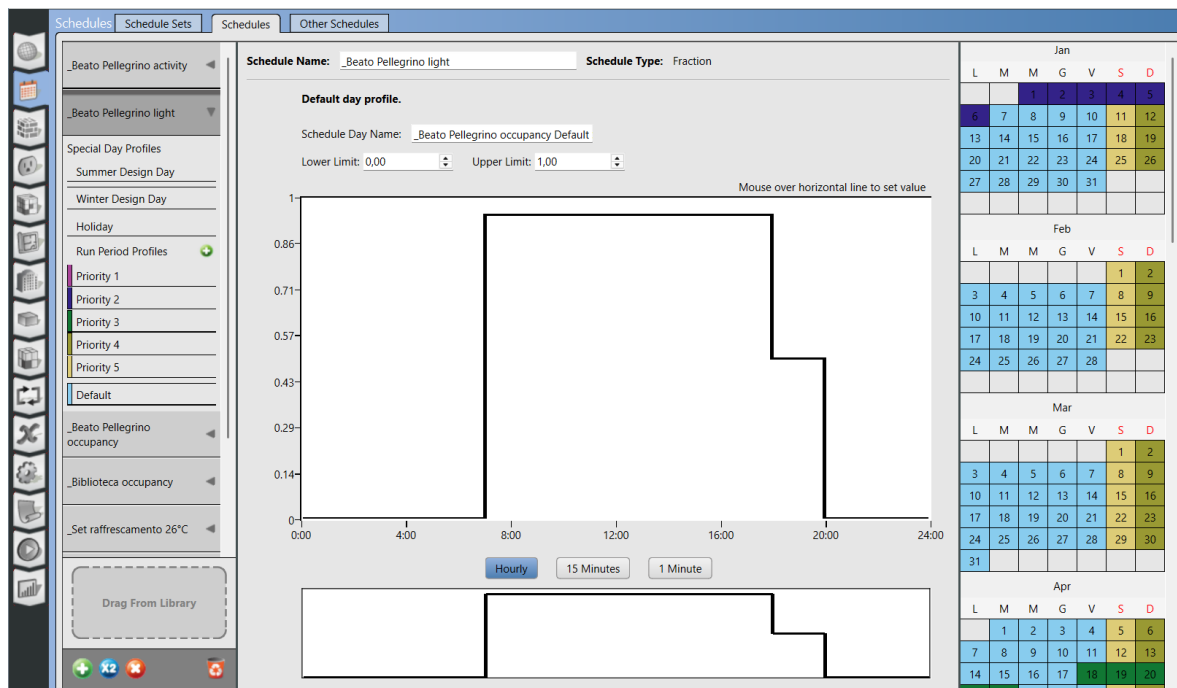


figura 7.15: schedulazione inerente all'illuminazione nel complesso

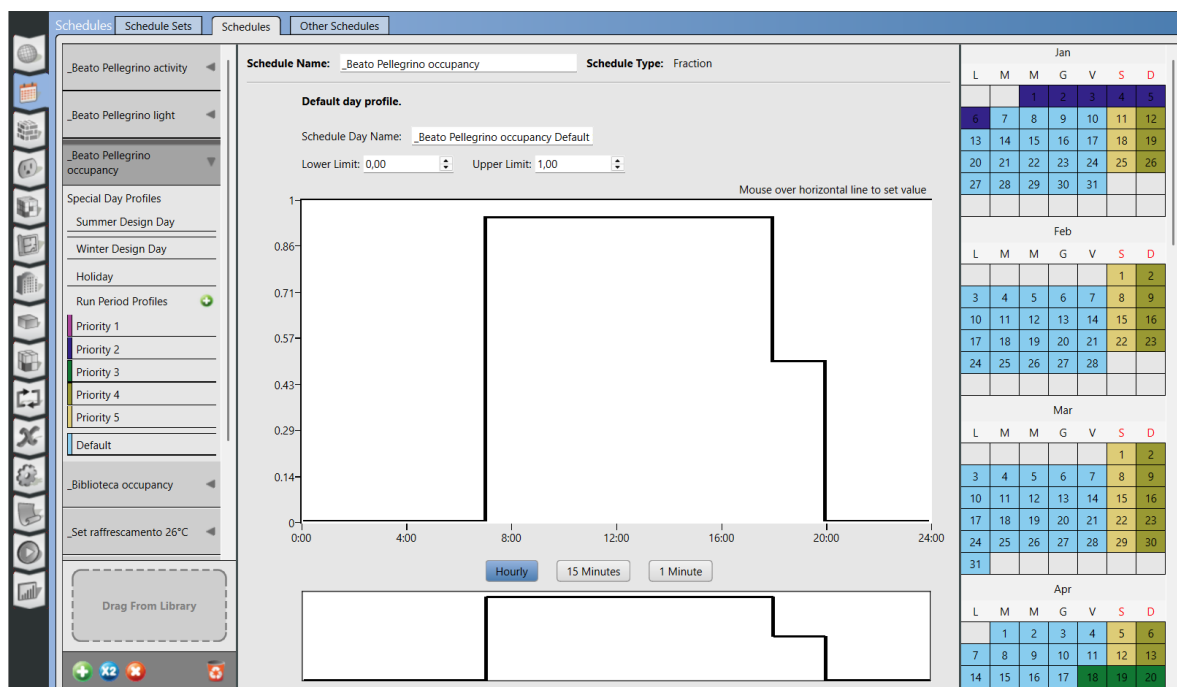


figura 7.16: schedulazione inerente all'occupazione delle persone negli uffici e aule

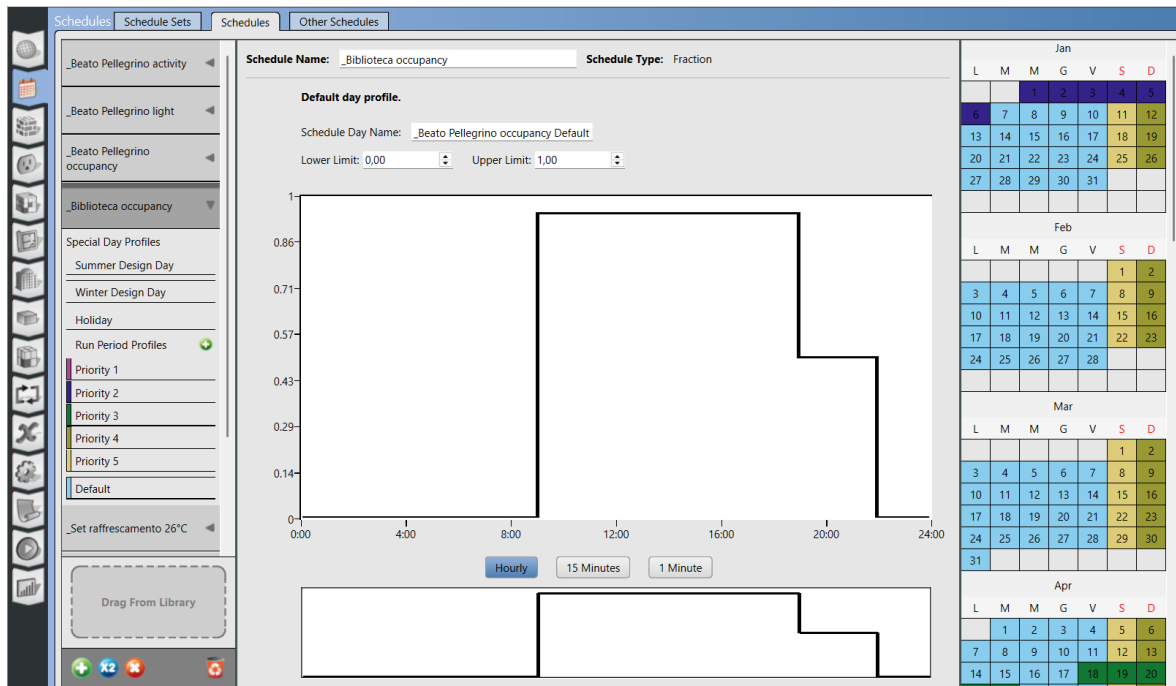


figura 7.17: schedulazione inerente all'occupazione delle persone nelle biblioteche

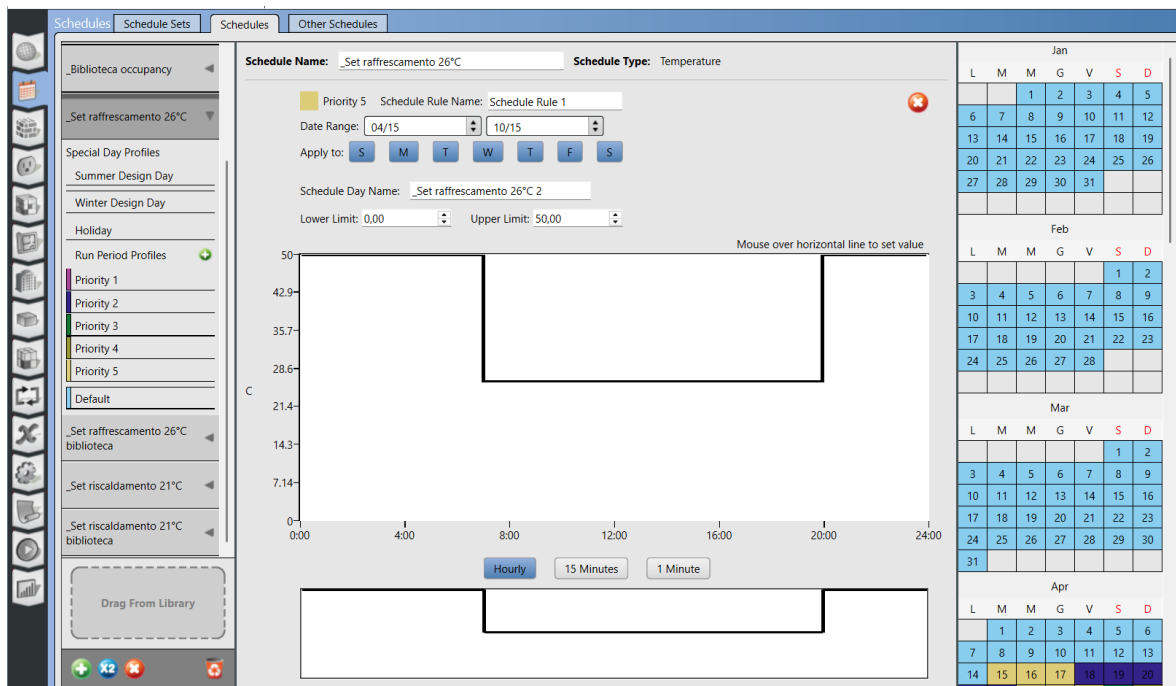


figura 7.18: schedulazione per la temperatura di raffreddamento negli uffici e aule

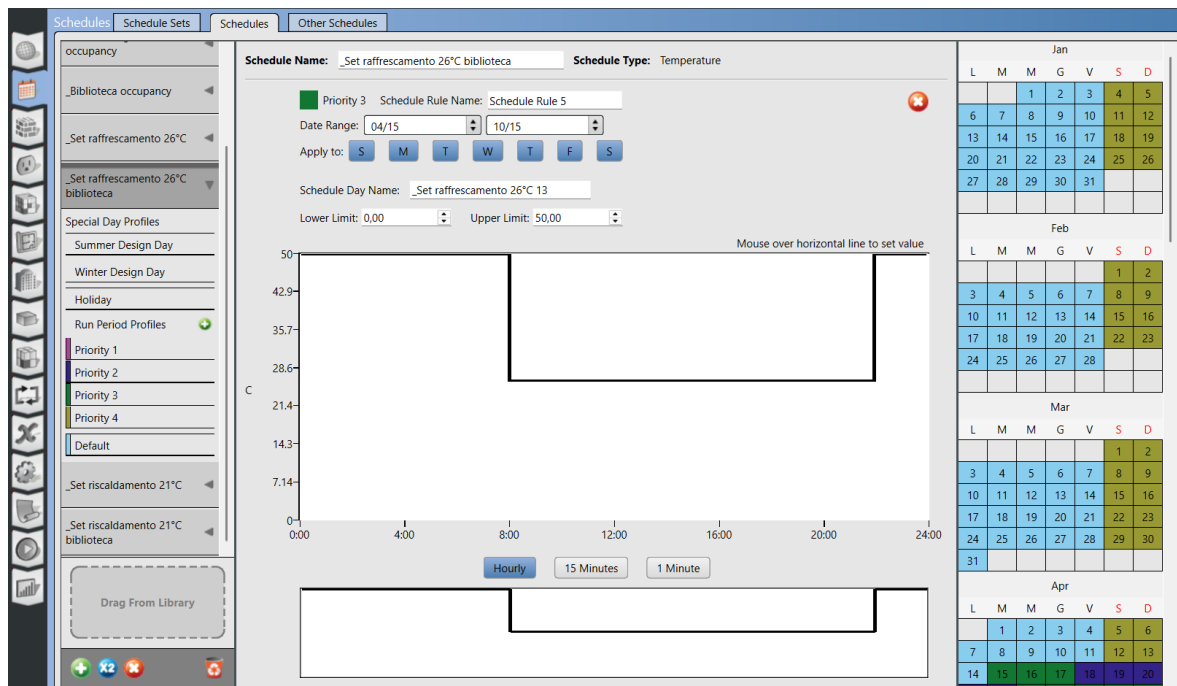


figura 7.19: schedulazione per la temperatura di raffreddamento nelle biblioteche

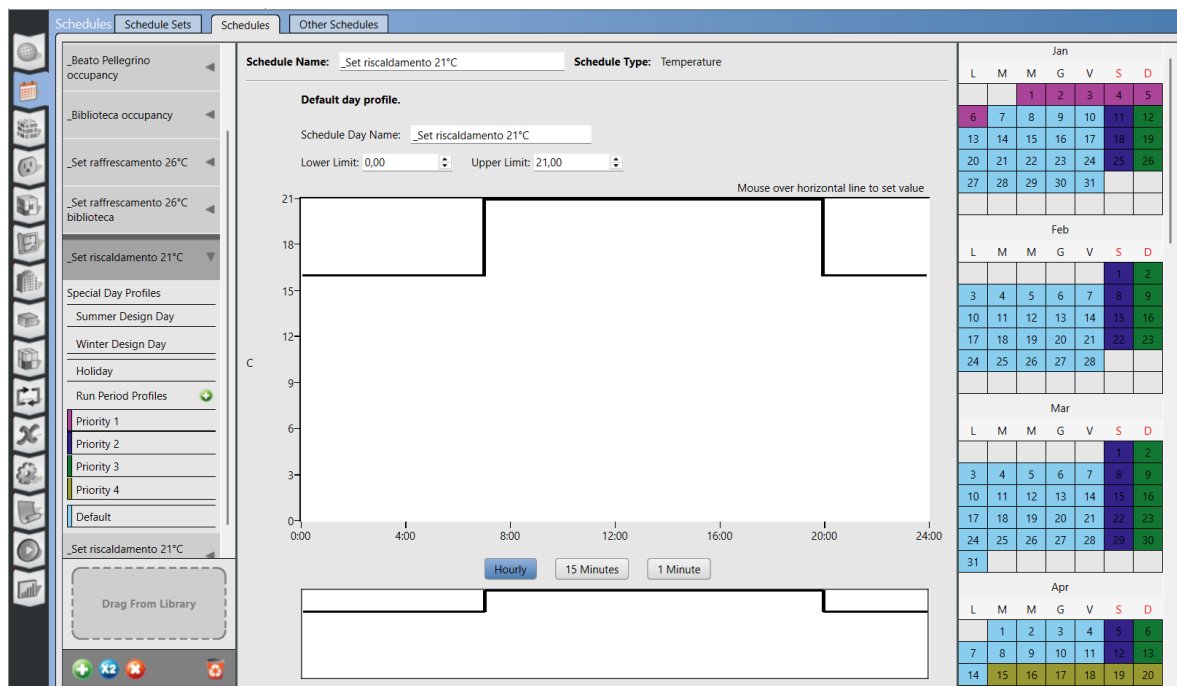


figura 7.20: schedulazione per la temperatura di riscaldamento negli uffici e aule

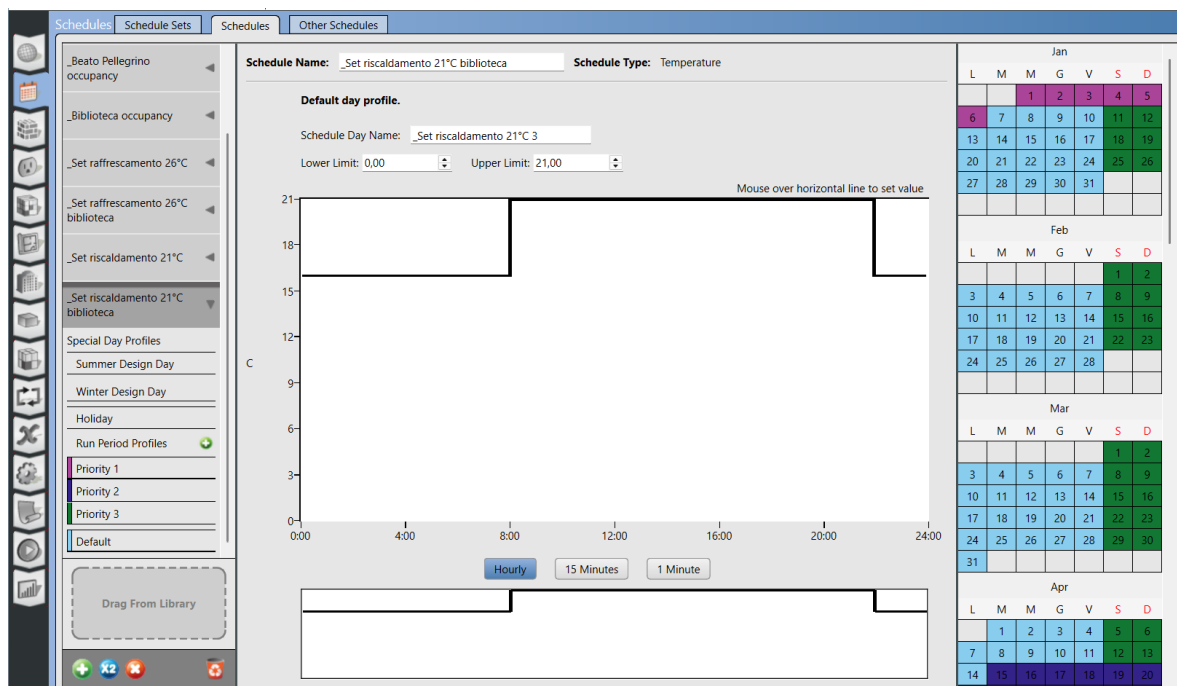


figura 7.21: schedulazione per la temperatura di riscaldamento nelle biblioteche

Loads

Name:

Number of People:

People per Space Floor Area: people/m²

Space Floor Area per Person: m²/person

Fraction Radiant:

Sensible Heat Fraction:

Carbon Dioxide Generation Rate: L/s-W

Enable ASHRAE 55 Comfort Warnings: ☐

Mean Radiant Temperature Calculation Type:

Aggiungi/Rimuovi Gruppi Estensibili  

figura 7.22: carichi relativi alle persone

Name:

Lighting Power: W

Watts Per Space Floor Area: W/m²

Watts Per Person: W/person

Fraction Radiant:

Fraction Visible:

Return Air Fraction:

figura 7.23: carichi relativi all'illuminazione

Name:

Design Level: W

Watts Per Space Floor Area: W/m²

Watts Per Person: W/person

Fraction Latent:

Fraction Radiant:

Fraction Lost:

figura 7.24: carichi relativi alle apparecchiature elettriche

Bibliografia

- [1] David Průša, Stanislav Št'astník, Karel Šuhajda, Jiří Psota, Katerina Svobodová, Zuzana Sochorová – From BIM to BEM – “Modern Thermal Simulations Using a Building Information Management Model: A Case Study”
- [2] SARA ANTUNES – “WORKFLOW FOR IMPLEMENTING ENERGY ANALYSIS ACROSS A BIM DESIGN LIFECYCLE”
- [3] Yikun Yang, Yiqun Pan, Fei Zeng, Ziran Lin and Chenyu Li - “A gbXML Reconstruction Workflow and Tool Development to Improve the Geometric Interoperability between BIM and BEM”
- [4] Rim Afa, Issam Sobhy and Abderrahim Brakez - “Application of BIM-Driven BEM Methodologies for Enhancing Energy Efficiency in Retrofitting Projects in Morocco: A Socio-Technical Perspective”
- [5] Giuseppe Piras and Francesco Muzi - “BIM for Sustainable Redevelopment of a Major Office Building in Rome”
- [6] Eva Raggi (RINA C) - “Analysis of BIM-to-BEM critical parameters and recommendations to solve the current bottlenecks”
- [7] Annamaria Ciccozzi, Tullio de Rubeis, Domenica Paoletti and Dario Ambrosini - “BIM to BEM for Building Energy Analysis: A Review of Interoperability Strategies”
- [8] Isabella Wolkart, Luciana Aparecida Netto de Jesus - “BIM-BEM integration: Evaluation of the Revit® Systems Analysis tool for thermoenergetic simulation and building labeling”
- [9] AUTODESK REVIT – “<https://help.autodesk.com/view/RVT/2026/ITA/?guid=GUID-36B2F66A-E423-4D9C-B266-3ABA57573F4A>”
- [10] AUTODESK REVIT – “<https://help.autodesk.com/view/RVT/2016/ITA/?guid=GUID-48509199-F248-4B61-9DC6-CEFB2E302F2>”
- [11] UNIPD - “<https://www.unipd.it/calendario-accademico-2024-2025>”
- [12] UNI TS 11300
- [13] UNI EN ISO 52016
- [14] UNI EN 16798-1
- [15] UNI EN ISO 7730
- [16] UNI 10339
- [17] UNI EN 12464-1
- [18] ASHRAE 90.1 e standard NREL
- [19] Edwin Guerra Castrejon, Associated Engineering Ltd - “Data-driven Load Calculations for MEP Analysis in Revit”
- [20] U.S. Department of Energy - “EnergyPlus™ Version 25.2.0 Documentation - Input Output Reference”
- [21] U.S. Department of Energy - “EnergyPlus™ Version 25.2.0 Documentation – Engineering Reference”