

POLITECNICO DI TORINO

I Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea di Ingegneria Edile

Tesi di Laurea Magistrale

**Interoperabilità  
BIM to BEM  
per l'efficiamento energetico  
degli edifici pubblici**

Relatore:

Prof. Anna Osello

Correlatore:

Ing. Francesca Maria Ugliotti

Candidato:

Giuseppe Regano

Luglio 2018



*“Non voglio sentirti parlare,  
voglio sentire parlare di te”*

**Alfredo a Totò, Nuovo Cinema Paradiso**

*Alla mia famiglia che mi ha insegnato che la volontà sta sopra a ogni cosa, che non bisogna mai accontentarsi e che non si deve mai smettere di apprendere, che si è sempre preoccupata per me e che mi ha sempre sostenuto in tutte le mie scelte e decisioni.*

*Alla professoressa Anna Osello e Francesca che sanno tirare fuori le migliori capacità dalle persone, non potrò mai ringraziare abbastanza se alla fine di questo percorso so cosa voglio e qual'è la mia strada.*

*A tutto il DrawingtotheFuture con cui ho condiviso e continuo a condividere momenti di vita.*

*A Valeria e Luca e tutto il dipartimento di EDILOG in cui sono potuto crescere lavorativamente e come persona.*

*A tutti i miei amici che mi hanno sopportato e supportato soprattutto durante questi ultimi mesi grazie Marco, Mattia, Mirella, Rachele, Mimmo, Ottavio, Andrea, Federico, Riccardo e Alessandro.*

*Allo studio Settanta7 Daniele e Elena, con cui sto vivendo una delle migliori esperienze lavorative di sempre.*

## **Abstract**

Lo scopo di questo lavoro di tesi è illustrare come predisporre un intervento di efficienza energetica su un edificio esistente mediante la metodologia BIM, presentando l'esperienza della Città di Torino utilizzando come caso studio, un edificio scolastico. Dal rilievo e raccolta dati fino alla restituzione digitale del modello BIM dell'edificio. La diagnosi energetica è stata eseguita con un software di simulazione dinamica ed è stata validata mediante confronto diretto con i dati reali. Classificato energeticamente l'edificio vengono proposti scenari di efficientamento energetico, stimandone l'impatto economico e i tempi di ammortamento. Il metodo di lavoro adoperato prevede l'analisi e la verifica dei processi di interoperabilità del modello digitale BIM verso i software di simulazione dinamica e di computazione metrica.

# Sommario

## Sommario

<b>Introduzione</b>	10
<b>Presentazione del caso studio e restituzione digitale</b>	12
1.1 // Il progetto di digitalizzazione del Comune di Torino	12
1.2 // Obiettivi	13
1.3 // Individuazione del caso studio	13
1.4 // Rilievo speditivo e raccolta delle informazioni	15
1.5 // Restituzione finale del modello BIM	17
<b>Pianificazione di un analisi energetica: dal BIM al BEM</b>	19
2.1 // Concetto di simulazione energetica dinamica	19
2.2 // Come si struttura un'analisi energetica	20
2.3 // Formati di scambio: il gbXML	21
2.4 // Il passaggio da BIM a BEM	22
2.5 // Gestione di un modello semplificato per l'analisi energetica	24
2.6 // Strategie di semplificazione del modello BIM	27
2.6.1 // Gestione delle discontinuità geometriche	29
2.6.2 // Stratigrafie ipotizzate	32
2.6.3 // Gestione ponti termici e trasmittanze dei serramenti	33
2.6.4 // Risoluzione delle adiacenze multiple con il terreno	35

2.6.5 // Modello EAM: Vani o Locali?	35
2.7 // Criticità nel loop di ottimizzazione	36
2.7.1 // Risoluzioni delle superfici “intercapedini”	37
2.7.2 // Script Dynamo e modelli di vista per la gestione delle unioni	39
2.7.3 // Frammentazione e semplificazione dei volumi complessi	41
2.7.4 // Confronto superfici BIM-EAM	42
<b>Building Energy Model: configurazioni pre-simulazione</b>	44
3.1 // Struttura del file DesignBuilder	44
3.2 // Attività	45
3.3 // Costruzione	50
3.4 // Aperture	53
3.5 // Illuminazione	53
3.6 // Impianto HVAC	54
3.6.1 // Schema funzionale della centrale termica	55
3.6.2 // Sistema HVAC in DesignBuilder	56
3.6.3 // Calcolo della potenza nominale di un radiatore	62
3.7 // Gestione delle semplificazioni nel modello BEM	64
<b>Analisi dei risultati della simulazione energetica</b>	66
4.1 // Impostazioni di simulazione	66
4.2 // Simulazione dinamica dello stato di fatto	67
4.2.1 // Analisi puntuale delle temperature dei vani	68
4.2.2 // Analisi delle dispersioni	71
4.3 // Metodi di validazione del modello	73
4.4 // Validazione dei consumi per il riscaldamento	73
4.4.1 // Confronto con APE	74

4.4.2 // Comparazione con consumi di riscaldamento mensili	76
4.5 // Validazione dei consumi elettrici	77
<b>Proposte di scenari di efficientamento energetico</b>	<b>81</b>
5.1 // Criticità dello stato attuale	81
5.1.1 // Involucro verticale non coibentato	82
5.1.2 // Serramenti a vetro singolo	83
5.1.3 // Volumi ad alto tasso disperdente	84
5.2 // Possibili scenari di miglioramento	87
5.3 // Accesso ai fondi del GSE	90
5.3.1 // Requisiti tecnici per l'accesso agli incentivi	91
5.4 // Soluzioni tecniche per l'efficientamento energetico	94
5.4.1 // Cappotto sismico	95
5.4.2 // Serramenti a taglio termico	97
5.4.3 // Sistema di frangisole integrato	98
5.4.4 // Coibentazione del sottotetto	99
5.5 // Simulazione energetica dello scenario di efficientamento	100
5.6 // Stima del costo dell'intervento	102
5.6.1 // Implementazione fasi di progetto	103
5.6.2 // Interoperabilità Revit -PRIMUS mediante Archvision	103
5.7 // Costo totale e ritorno dell'investimento	106
<b>Conclusioni e bibliografia</b>	<b>110</b>
5.1 // Bibliografia	111

## 5 // Introduzione

Il processo di digitalizzazione del patrimonio edilizio avviato dal Comune di Torino nel 2015 rappresenta un importante passo avanti per la conoscenza e la gestione dei beni immobili.

Le restituzioni BIM degli edifici comunali ottenute negli anni hanno restituito al Comune di Torino la piena conoscenza del suo patrimonio, grazie a metodologie di rilievo ben collaudate e pensate per adempiere all'obiettivo finale di una gestione integrata del patrimonio edilizio. L'uso di modelli digitali permette, infatti, l'integrazione dei modelli con diverse piattaforme interoperabili, dai software CAFM di gestione ai software di simulazione energetica, strutturale ecc..

L'obiettivo della seguente tesi è quello dello studio energetico relativo all'edificio situato in corso Vercelli 157, nel Comune di Torino, una scuola primaria attualmente in uso. Il fabbricato come già detto rientra nel progetto di "Digitalizzazione degli edifici della Città di Torino", ed è ritenuto uno degli edifici più energivori.

In questa tesi si è stato diagnosticato e analizzato lo stato di fatto dell'edificio rilevando le criticità relative all'attuale consumo energetico dell'edificio. La prima fase di analisi si è allineata allo standard progettuale del progetto di digitalizzazione del Comune di Torino e ha previsto una fase di rilievo e restituzione in BIM del manufatto oggetto di studio. La fase successiva prevede invece un'analisi più approfondita

dell'edificio dal punto di vista energetico sviluppando e testando l'interoperabilità tra il software di modellazione BIM Revit e DesignBuilder. Sono state prodotte delle simulazioni energetiche con l'obiettivo di validare il modello BIM ottenuto e le relative stratigrafie e geometrie. A seguito delle opportune valutazioni in merito alle analisi energetiche, è stato sviluppato uno scenario di efficientamento energetico computando il costo dell'intervento e analizzandone i benefici.

# **1 // Presentazione del caso studio e restituzione digitale**

## **1.1 // Il progetto di digitalizzazione del Comune di Torino**

Il Comune di Torino dal 2015 ha avviato un processo di evoluzione della gestione del patrimonio edilizio. Questa rivoluzione digitale si inserisce nel contesto più ampio dell'iniziativa Torino Smart City e ha l'obiettivo di fornire un modello di gestione informativa avanzato.

La comunicazione e la gestione tradizionale del patrimonio edilizio ha mostrato evidenti criticità con l'avanzare del tempo, come la perdita di informazioni e la mancata conoscenza degli spazi disponibili. Il progetto di digitalizzazione prevede di restituire al Comune di Torino la conoscenza del suo patrimonio e di affrontare in maniera più cosciente eventuali opere di riqualificazione energetica o di ampliamento edilizio. Questi obiettivi sono perseguibili grazie all'evoluzione tecnologica in campo edilizio, avviata ormai da anni a partire dall'introduzione della metodologia BIM.

## 1.2 // Obiettivi

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è quello di allinearsi agli standard progettuali del progetto di digitalizzazione del Comune di Torino e di approfondire la tematica relativa ai consumi energetici di uno specifico manufatto. L'obiettivo generale del progetto del Comune di Torino è il rilievo speditivo e la raccolta delle informazioni di un edificio e la sua restituzione in forma BIM.

Il modello BIM deve contenere tutte le informazioni aggiornate dell'edificio e essere compatibile il modello generale gestione del Comune di Torino. I modelli BIM all'interno di questo progetto vengono prodotti con il software Revit Autodesk seguendo opportuni standard di codifica e implementazione di dati utili alla gestione. L'approfondimento relativo alla valutazione energetica vede invece come obiettivo la sperimentazione dell'interoperabilità tra il BIM e un software di simulazione dinamica. A seguito della validazione delle simulazioni ottenute saranno proposti gli scenari di efficientamento energetico stimandone costi e ricavi.

## 1.3 // Individuazione del caso studio



L'edificio oggetto di studio prescelto è una scuola primaria, situata nella sesta circoscrizione torinese. La scuola è intitolata "Albert Sabin" un noto medico del 900 attivo ricercatore nell'ambito dei vaccini.

La scuola è situata in una zona periferica ed è parte di un complesso scolastico suddiviso in due plessi: la scuola primaria "Albert Sabin" e il plesso "Cascina Marchesa" scuola d'infanzia, quest'ultima non sarà oggetto di analisi.

L'edificio è stato costruito negli anni 50, presenta una struttura a telaio in calcestruzzo armato, serramenti a nastro e murature a vista in paramano ed è costituito da tre blocchi principali.



I tre blocchi sono collegati da un connettivo principale e non vi sono compartimentazioni. I blocchi ad L ospitano le aule e i bagni e si sviluppano su due livelli con una copertura a due falde con pendenza differente. I due livelli comunicano tra loro mediante un vano scala aperto e non compartimentato. L'altezza totale fuori terra dei due blocchi è di circa 10,00m. La hall principale è contenuta all'interno di un blocco connettivo in cui sono anche predisposti uffici, portineria e segreteria. La copertura del connettivo è piana su due livelli e rivestita con una guaina bitumi-

nosa. I due livelli sono ad altezze diverse e sono connesse da una copertura a falda. All'interno del plesso scolastico sono presenti una mensa con annessa cucina e una palestra accessibili entrambe dalla hall principale, la prima a livello interrato e la palestra invece al primo piano. Queste costituiscono un ultimo blocco adiacente agli spazi di residenza del custode.



#### **1.4 // Rilievo speditivo e raccolta delle informazioni**

Per la realizzazione di un modello BIM dell'edificio che rispettasse lo stato di fatto dell'edificio è stato necessario organizzare un rilievo speditivo in situ. L'organizzazione del rilievo e la metodologia operativa sono ormai consolidate e standardizzate

dal progetto di digitalizzazione del Comune di Torino. Il rilievo degli edifici del comune in generale prevede la raccolta di dati su :

- terminali dei sistemi HVAC;
- terminali di illuminazione;
- occupazione;
- destinazione d'uso;
- capacità dei locali;
- accessibilità;
- direzione operativa;

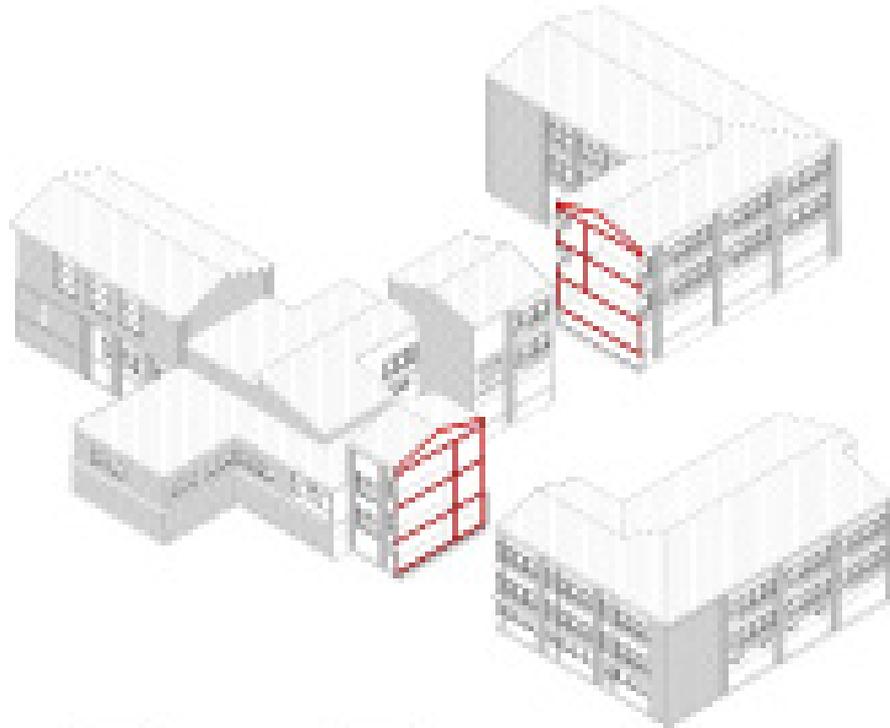
I dati raccolti sono la base informativa del modello BIM, ma è stato fondamentale raccogliere anche le informazioni geometriche confrontando lo stato di fatto con i documenti di archivio o i disegni a progetto di cui la Committenza disponeva. Per i serramenti è stato effettuato un rilievo specifico considerando specificatamente le dimensioni del telaio e dei moduli di serramento, queste informazioni hanno un'importante valenza in ambito energetico. A corredo di queste informazioni raccolte è stato effettuato inoltre un rilievo fotografico per facilitare e garantire un riscontro continuo in fase di modellazione.



## **1.5 // Restituzione finale del modello BIM**

La restituzione dei modelli BIM è anch'essa una procedura standard e ormai consolidata nell'ambito del progetto del Comune di Torino. I modelli BIM del progetto di digitalizzazione si basano su dei template di modellazione standardizzati in modo da garantire una lettura e una gestione univoca. Il template dei modelli BIM sono inoltre implementati con gli opportuni parametri condivisi che consentono di trasferire all'interno dei modelli i dati raccolti in fase di rilievo. Questi parametri vengono associati a livello di locali e di equipment, i risultati finali ottenibili sono piante temattizzabili per tipologia di locale, categoria, direzione ecc. Si possono inoltre impostare campi calcolati all'interno degli abaci di Revit per il calcolo delle potenze termiche e di illuminazione dei singoli locali. La gestione dei database informativi di ogni singolo modello è regolamentata da un linguaggio di codifica univoco per tutti i modelli per cui l'identificazione di un piano, locale, finestra, destinazione d'uso ecc. si legge in maniera inequivocabile e identica in tutti i modelli.

Tuttavia la modellazione è stata notevolmente influenzata dagli obiettivi di valutazione energetica, che necessitano di un approccio strettamente differente in fase di modellazione, e che come si vedrà nei prossimi capitoli richiedono notevoli semplificazioni per garantire l'interoperabilità con i software di simulazione energetica.



## **2 // Pianificazione di un'analisi energetica: dal BIM al BEM**

### **2.1 // Concetto di simulazione energetica dinamica**

Prima di illustrare la metodologia operativa adoperata per la costruzione di un modello energetico si vuole fare chiarezza sul concetto di simulazione energetica dinamica. Essa si basa su un algoritmo di calcolo avanzato che permette all'utente di valutare dal livello orario a giornaliero fino a mensile e annuo le prestazioni e i consumi energetici di un edificio.

Nel corso della simulazione si analizza il reale comportamento dell'edificio in relazione alle componenti sia esterne che interne, tenendo conto di tutte le variabili termiche dell'edificio da apporti a dispersioni.

L'obiettivo principale di una simulazione dinamica consiste nella determinazione del fabbisogno energetico di un edificio mediante l'utilizzo di step temporali riferiti all'ora piuttosto che al singolo mese, esaminando il riscaldamento, il raffrescamento, la ventilazione, l'illuminazione, l'occupazione e l'attività prevista o presente,

e tutte le variabili coinvolte nel comportamento reale dell'edificio che non vengono considerate in una analisi di tipo stazionario. In questo modo si ottiene una graficizzazione del comportamento delle temperature e di altre variabili interne all'edificio in relazione alle componenti impiantistiche molto vicina all'andamento reale.

## **2.2 // Come si struttura un'analisi energetica**

Il processo edilizio oggi giorno è il risultato di una sinergia di discipline che collaborano per il raggiungimento di obiettivi prefissati e il soddisfacimento di determinati requisiti.

Il fattore chiave della progettazione per edifici di nuova costruzione o esistenti è il coordinamento, è necessario che il flusso di informazioni sia bidirezionale e soprattutto interdisciplinare. Sicuramente il BIM favorisce la progettazione integrata e la collaborazione multidisciplinare ma solo se le procedure e le metodologie di interazione sono ben programmate.

L'analisi energetica applicata a edifici di nuova costruzione o esistenti si basa su concetti e procedure standard, la lettura dei risultati però nel caso un edificio esistente è vincolata a valori reali e misurati. Nel caso degli edifici di nuova costruzione l'analisi energetica consente di simulare e prevedere il comportamento dell'edificio in termini di prestazioni energetiche.

I dati per strutturare un'analisi energetica, sono regolati da normative europee e nazionali e sono imprescindibili. È necessario disporre di informazioni sulle:

- A. Caratteristiche termiche dell'edificio (involucro, partizioni, aperture, ecc.)
- B. Impianto ACS e di riscaldamento

- C. Impianto di condizionamento
- D. Ventilazione naturale e/o meccanica
- E. Illuminazione
- F. Clima esterno e localizzazione dell'edificio
- G. Schermature solari
- H. Condizioni climatiche interne

Una volta chiari questi parametri, è necessario disporre:

- di software di simulazione;
- di un modello geometrico dell'edificio.

All'interno di questo lavoro di tesi il software di simulazione prescelto è DesignBuilder. Il modello geometrico può essere realizzato all'interno del software di simulazione o può essere importato da altri software di modellazione mediante opportuni formati di scambio. Nell'ambito di questa tesi il modello geometrico è stato ottenuto direttamente dal modello dell'edificio restituito in BIM.

### **2.3 // Formati di scambio: il gbXML**

Il formato Green Building XML, più comunemente definito GBXML, facilita lo scambio di informazioni provenienti da un BIM verso i software di simulazione energetica. Negli anni questo formato di scambio è diventato la chiave comunicativa tra la disciplina architettonica e quella energetica e l'interfaccia di esportazione proposta dalle varie case produttrici di software BIM ha subito una notevole evoluzione; introducendo infatti la visualizzazione grafica in fase di esportazione.

Il gbXML è il più indicato formato di scambio in ambito energetico perché a

differenza del formato IFC richiede la definizione di Vani o Locali all'interno del modello, in generale per uno schema gbXML sono imprescindibili la definizione dei volumi dell'edificio. Definiti i volumi si possono riconoscere le superfici che li delimitano e distinguere automaticamente gli elementi d'involucro, le partizioni interne e le superfici esterne non adiacenti e delimitanti. Riconosciuti i volumi, le superfici che li delimitano, vengono di conseguenza riconosciute le caratteristiche termiche. Questo riconoscimento delle informazioni viene fatto al momento dell'esportazione e nelle versioni Revit Autodesk più recenti è possibile tenere sotto controllo l'esportazione in forma grafica, verificando il corretto riconoscimento dei volumi, e delle superfici del modello, impostando anche differenti livelli di complessità di esportazione.

## **2.4 // Il passaggio da BIM a BEM**

Affinché le caratteristiche architettoniche siano correttamente importate all'interno delle piattaforme di simulazione energetica, occorre che nel modello BIM vengano risolte o semplificate tutte le criticità a livello geometrico (nodi, stratigrafie, morfologie di locale..) . Le semplificazioni architettoniche giocano un ruolo fondamentale, perché riducono la complessità del modello e facilitano la comunicazione tra i software. Un modello BIM così semplificato nei suoi livelli di dettaglio diviene la base per il successivo sviluppo di un Energy Analysis Model: un EAM contiene solo i dati energetici di rilevanza e soprattutto è descritto unicamente dalle superfici disperdenti dell'edificio. Per poter costituire il modello EAM è necessario che il BIM semplificato contenga le seguenti informazioni:

1. Ubicazione del modello

2. Caratteristiche tecniche dell'involucro, partizioni, chiusure orizzontali;
3. Volumi delle zone riscaldate e non.

Il modello EAM durante la fase di esportazione colleziona queste informazioni, che diverranno i dati di input della simulazione energetica. Questa collezione di informazioni deve avvenire in loop, ottimizzando via via le semplificazioni geometriche e gli errori di esportazione che possono generarsi. Lo step successivo è il passaggio definitivo dall'ambiente BIM all'ambiente specifico della disciplina energetica, con la definizione del BEM, Building Energy Model. Questo è supportato interamente dal relativo software di simulazione e al suo interno verranno settati ulteriori dati specifici per la determinazione delle prestazioni energetiche. Questo passaggio avviene mediante due formati di scambio, IFC o gbXML, quest'ultimo attualmente il formato più utilizzato.

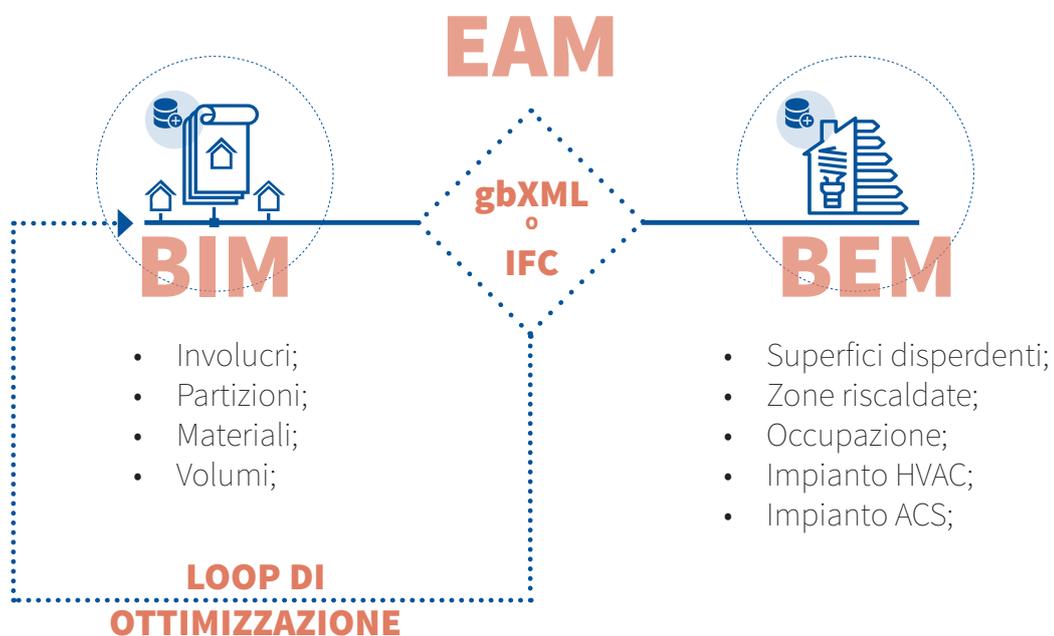


Fig.1: Schema del loop di ottimizzazione del modello EAM prima dell'importazione in un software di

*simulazione energetica*

Il formato Green Building XML, più comunemente definito GBXML, facilita lo scambio di informazioni provenienti da un BIM verso i software di simulazione energetica. Negli anni questo formato di scambio è diventato la chiave comunicativa tra la disciplina architettonica e quella energetica e l'interfaccia di esportazione proposta dalle varie case produttrici di software BIM ha subito una notevole evoluzione; introducendo infatti la visualizzazione grafica in fase di esportazione.

Il gbXML è il più indicato formato di scambio in ambito energetico perché a differenza del formato IFC richiede la definizione di Vani o Locali all'interno del modello, in generale per uno schema gbXML sono imprescindibili la definizione dei volumi dell'edificio. Definiti i volumi si possono riconoscere le superfici che li delimitano e distinguere automaticamente gli elementi d'involucro, le partizioni interne e le superfici esterne non adiacenti e delimitanti. Riconosciuti i volumi, le superfici che li delimitano, vengono di conseguenza riconosciute le caratteristiche termiche. Questo riconoscimento delle informazioni viene fatto al momento dell'esportazione e nelle versioni Revit Autodesk più recenti è possibile tenere sotto controllo l'esportazione in forma grafica, verificando il corretto riconoscimento dei volumi, e delle superfici del modello, impostando anche differenti livelli di complessità di esportazione.

**2.5 // Gestione di un modello semplificato per l'analisi energetica**

Come già precedentemente discusso il passaggio dal BIM al BEM, implica una semplificazione consistente del modello.

Le semplificazioni condizionano il processo BIM, implicando in molti casi la scissione del modello BIM in due tipi di rappresentazione. Questa è una delle

criticità del processo di interoperabilità nell'ambito energetico, perché non è metodologicamente corretto disporre di due modelli BIM in funzione delle finalità. Nel caso studio preso in esame le finalità del modello sono basate su un unico file, e sono state gestite mediante le fasi di progetto.

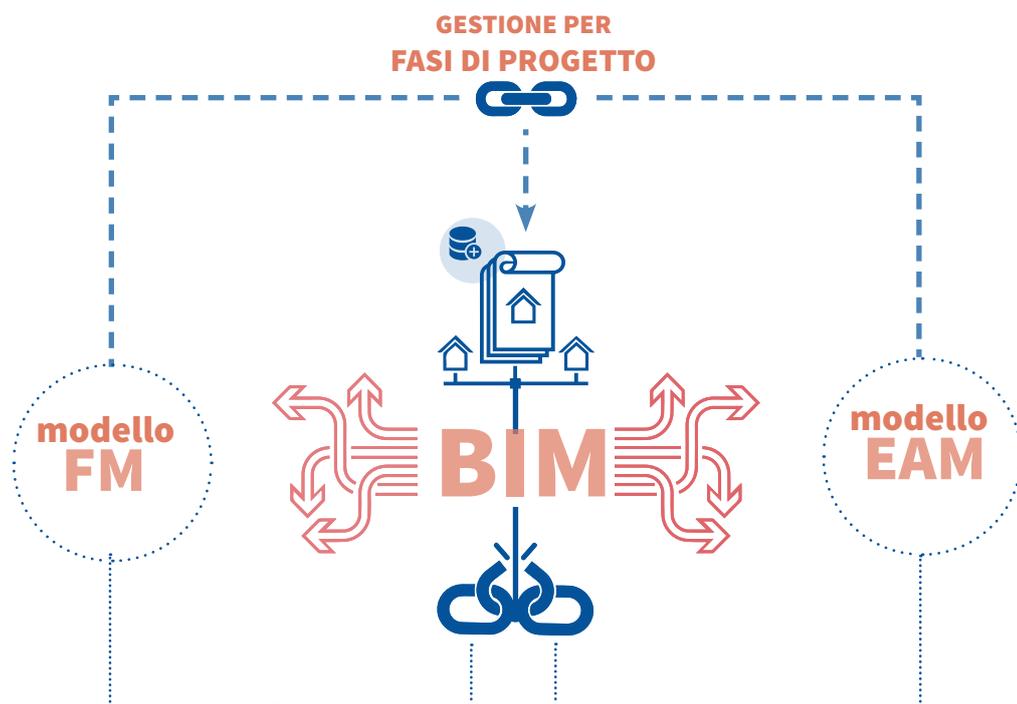


Fig.2: Schema di coordinamento di diverse discipline in un unico BIM mediante le fasi

L'obiettivo è quello di avere un file in cui può coesistere il modello reale privo di semplificazioni con lo standard progettuale del progetto di digitalizzazione del comune di Torino, e la sua versione semplificata utile per effettuare le opportune valutazioni energetiche dell'edificio. Il coordinamento delle due finalità è reso possibile dall'impostazione di un modello di progetto per fasi.

Le fasi in Revit vengono generalmente utilizzate per scandire le varie fasi costruttive di un progetto, nel caso studio sono state utilizzate per gestire i due livelli

di dettaglio del modello BIM.

La scelta di organizzare la modellazione per fasi deriva dalla possibilità di esportare il modello in formato gbXML utilizzando una specifica fase di progetto. Sono state quindi create 3 fasi principali all'interno del modello, con standard di modellazione differente, si ha quindi:

1. **Fase STR:** si riferisce alla fase strutturale, all'interno di questa fase sono essere gestiti tutti gli elementi strutturali presenti all'interno del progetto e che non necessitano alcuna definizione all'interno del modello energetico;
2. **Fase GE:** in questa fase vengono modellati e gestiti tutti gli elementi di involucro dell'edificio. Inoltre possono essere utilizzati tutti gli espedienti costruttivi che consentono di ottimizzare il loop gbXML.
3. **Fase FM:** è la fase di Facility Management, quella in cui devono essere reperibili tutte le informazioni dell'edificio (spazi, asset, equipments..) e dove devono essere caratterizzati in maniera puntuale e dettagliata i volumi semplificati nella fase di Gestione Energetica.

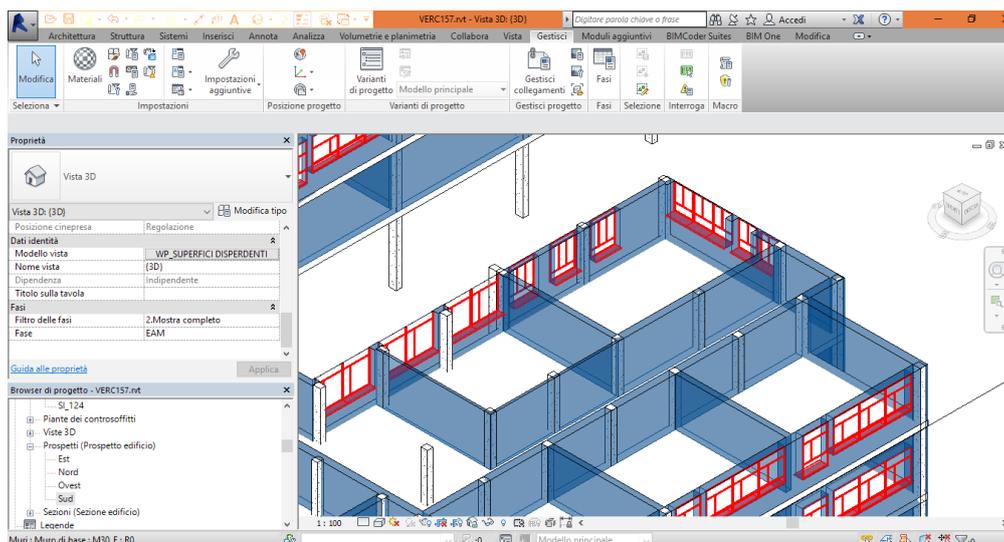
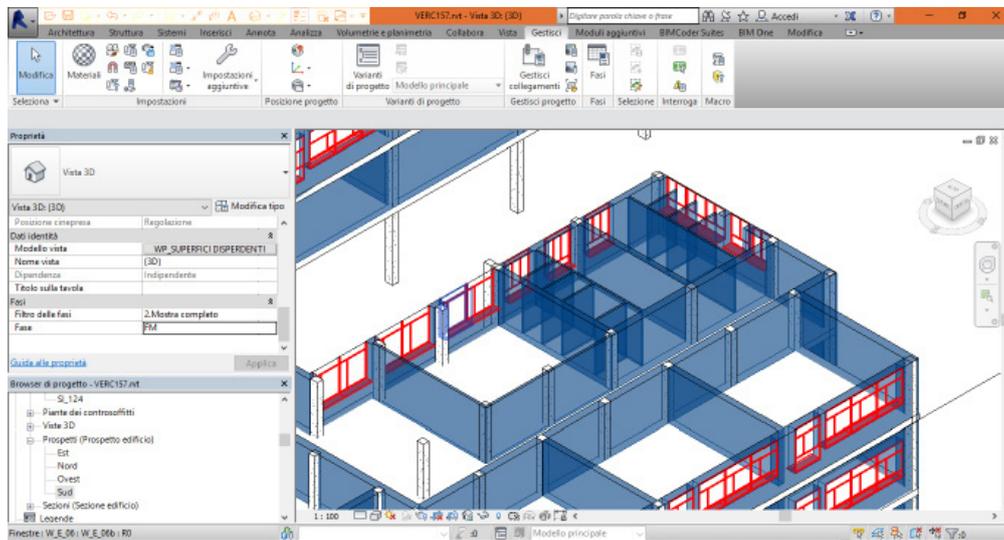


Fig.3: Le due immagini mostrano la differenza tra la fase FM e la fase GE dove le zone termiche a ugual temperatura vengono assemblate in unico spazio/volume.

## 2.6 // Strategie di semplificazione del modello BIM

Il modello BIM è il risultato di opportune considerazioni preliminari, che vanno a soddisfare gli obiettivi delle finalità d'utilizzo prefissate. In questo paragrafo si vo-

glio illustrare in che modo sono state decise le semplificazioni per migliorare il loop di ottimizzazione del modello EAM.

L'edificio di Corso Vercelli 157, è un edificio scolastico, con una tipica struttura di involucro verticale a cassa vuota e un telaio strutturale in calcestruzzo armato. Dai rilievi speditivi e dai documenti reperiti in archivio, un'importante osservazione è da riferirsi alle discontinuità geometriche delle murature esterne che subiscono una variazione considerevole in prossimità dei pilastri, queste discontinuità generano innumerevoli ponti termici, che non sono valutabili all'interno dei programmi di simulazione.

Altra criticità evidenziata si riferisce alla struttura dei serramenti, di tipo a nastro, in cui nell'intersezione tra i telai dei moduli sono presenti dei montanti in alluminio a tutt'altezza sull'edificio, dello spessore di 50 mm. Questi elementi metallici comunicano direttamente con l'ambiente interno, e al pari delle discontinuità geometriche precedentemente descritte costituiscono dei rilevanti ponti termici.

Il volume energetico considerato si sviluppa su diverse quote di campagna, quindi si hanno adiacenze multiple con il terreno. La copertura a falde presenta due inclinazioni differenti compensate da una muratura e la gestione in fase di esportazione di questo tipo di copertura, può risultare critica.

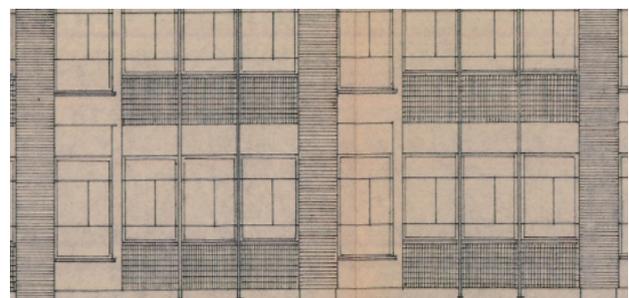
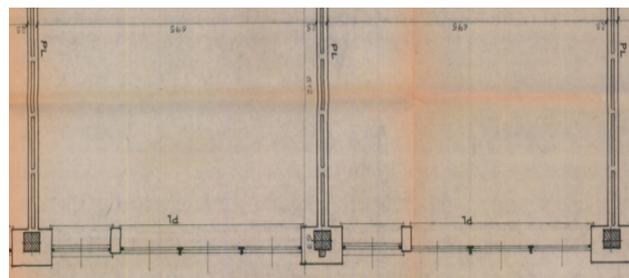
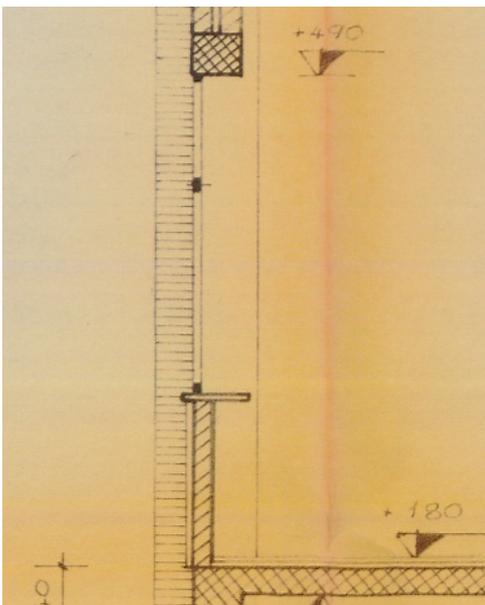
Riassumendo, la fase di semplificazione del modello è stata opportunamente supportata da test e valutazioni, in merito ai seguenti punti:

1. Discontinuità geometriche dell'involucro verticale;
2. Montanti verticali in alluminio;
3. Adiacenza multipla con il terreno.
4. Utilizzo dei Vani o Locali
5. Ipotesi delle stratigrafie

### 2.6.1 // Gestione delle discontinuità geometriche

L'involucro verticale dell'edificio subisce variazioni di spessore repentine in prossimità dei pilastri. Si ha una muratura da 150 mm in presenza di serramenti, che passa ad essere una muratura a cassa vuota (380 mm) in assenza di serramenti e in presenza del pilastro in calcestruzzo si ha un doppio rivestimento in mattoni paramano intonacati verso l'interno e a faccia vista verso l'esterno (spessore totale 500 mm).

Queste discontinuità determinano valori di trasmittanza, molto differenti tra loro, a parità di esposizione le dispersioni che ne derivano sono quindi molto diverse tra loro. Sulla base di queste indicazioni sono state testate due strade possibili per una valutazione realistica delle discontinuità in fase di simulazione.



### TEST 1 (scartato)

Per rappresentare in modo veritiero le discontinuità precedentemente descritte queste sono state testate su modelli semplici, realizzando edifici con diverse tipologie di muro e differenti spessori. Si è notato che al momento dell'importazione in DesignBuilder, il software non è in grado di recepire variazioni di spessore e di tipologie di muro su un'unica superficie del suo volume. Il formato gbXML associa a ogni superficie del volume di locale/vano una superficie univoca, quindi è possibile avere per ogni lato del volume un solo valore di trasmittanza.

Per ovviare a questa problematica si è pensato di gestire le murature esterne con una linea di muratura concatenata che seguisse il filo interno dei locali, in questo modo le varie superfici vengono recepite perché effettivamente ad ogni superficie del volume corrisponde a una muratura. Per gestire le diverse tipologie, basta selezionare ogni singola superficie di muratura creata e attribuirgli spessore e trasmittanza di riferimento.

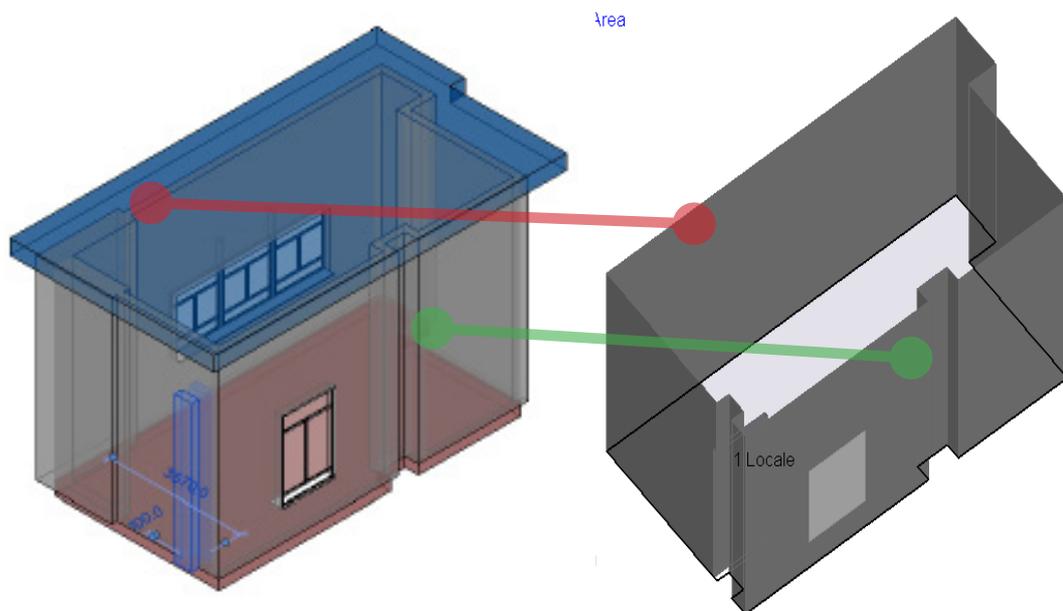


Fig.4: In verde la ricostruzione del ponte termico del pilastro opportunamente riconosciuta. In rosso

*il cambio di spessore della muratura non riconosciuto in fase di importazione*

Questa procedura seppur funzionale a livello teorico, si è rivelata molto complessa ed è onerosa in termini di tempo, motivo per cui dopo alcuni test è stata scartata. Rimane comunque un espediente valido per valutare i ponti termici.

### **TEST 2 (validato)**

La seconda possibilità ha tenuto conto del principio di semplificazione del livello di dettaglio del modello EAM. A livello di modellazione è stata abbandonata la possibilità di frammentare le diverse tipologie di muratura, perché aumentano la complessità del modello EAM, usando uno spessore unico e una stratigrafia univoca per l'intero edificio. Questa soluzione sicuramente può portare dietro di sé una percentuale di errore perché modifica le geometrie riconoscibili dell'edificio.

In termini energetici, però è valida la possibilità di assegnare all'involucro principale una trasmittanza equivalente, calcolata in questo caso sulla base di una tipica striscia di facciata dell'edificio, in cui avviene la discontinuità geometrica precedentemente descritta.

Per ogni tipologia di chiusura verticale si è calcolata l'area di competenza e la relativa trasmittanza, con un media pesata sull'area totale della striscia di facciata si è quindi ottenuta la trasmittanza equivalente da utilizzare nel modello BEM.

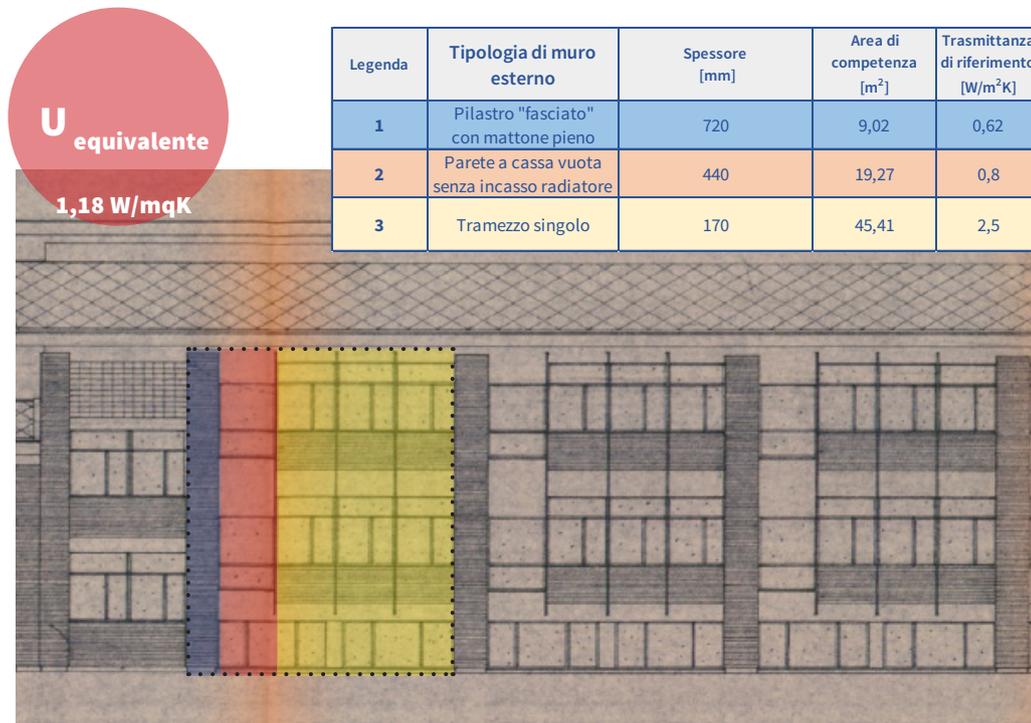


Fig.5: Esempio di facciata dell'edificio dove [ possibile notare la modularità architettonica

### 2.6.2 // Stratigrafie ipotizzate

Come spiegato in precedenza per l'involucro verticale esterno è stata determinata una trasmittanza equivalente, alla quale bisogna associare una stratigrafia equivalente. Le stratigrafie sono state analizzate all'interno del modello BIM, importando per ogni materiale le proprietà termiche proposte dalla libreria di Autodesk.

Parallelamente sono stati verificati i valori di trasmittanza ottenuti da Revit, calcolando con Termus (un software di simulazione energetica della software house Acca) i valori di trasmittanza con le stesse tipologie di muratura. I risultati ottenuti in ambiente Revit e Termus sono risultati distanti.

$$U = \frac{1}{R_{se} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3} + \dots + \frac{s_n}{\lambda_n} + R_{si}}$$

La libreria di Termus è aggiornata ai valori standard della normativa italiana, e una prima differenza si può già notare nei valori di conducibilità termica di ogni singolo strato. Inoltre la distanza tra i valori ricavati da Revit e quelli ricavati da Termus è data da una criticità nel calcolo della trasmittanza, che nel software Autodesk non tiene conto dei coefficienti liminari di scambio termico.

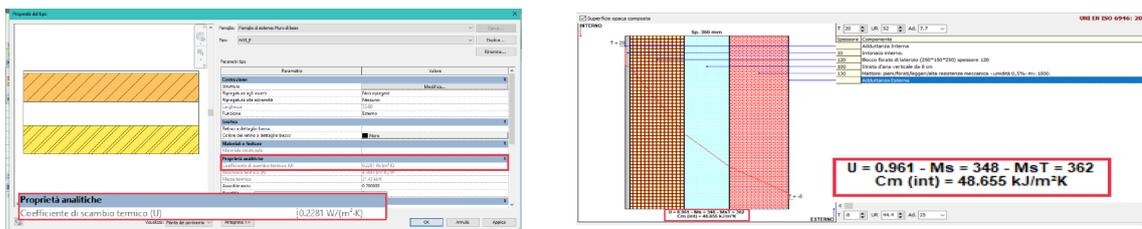


Fig.6: Nella figura il confronto tra le trasmittanze calcolate in ambiente Revit e in Termus

È molto importante lavorare con delle stratigrafie definite e non con murature generiche perché attraverso stratigrafie in quanto è possibile ricavare le temperature superficiali degli involucri, che incidono sui valori di Temperatura media radiante e Temperatura operativa, parametri fondamentali nel calcolo del comfort termico.

### 2.6.3 // Gestione ponti termici e trasmittanze dei serramenti

I montanti metallici in alluminio presenti all'interno del caso studio sono stati modellati all'interno della famiglia di finestra. Per una corretta gestione del modello e per verificare che questi elementi metallici che costituiscono un ponte termico lineare consistente sull'edificio, è stata testata la sua importazione all'interno

dell'ambiente di DesignBuilder. I risultati hanno comprovato come sia impossibile oggi giorno all'interno dei software di simulazione gestire i ponti termici.

Motivo per cui anche in questo caso è stata calcolata la trasmittanza del serramento considerando un ampliamento dello spessore del telaio, in modo ridistribuire lo spessore del montante in alluminio sui traversi e i montanti serramento complessivo.

Una criticità di Revit è il calcolo della trasmittanza del serramento, infatti nonostante questi siano stati modellati rispettando le geometrie reali rilevate, il valore di trasmittanza non viene calcolato in base agli elementi che lo compongono (telaio e vetro singolo). La trasmittanza del serramento viene stabilita invece nella sezione del tipo di serramento alla voce proprietà analitiche, scegliendo la tipologia di serramento, per il suo calcolo sono stati effettuati calcoli al di fuori del modello BIM, e successivamente sono state scelte le proprietà analitiche che maggiormente rispecchiassero i calcoli effettuati.

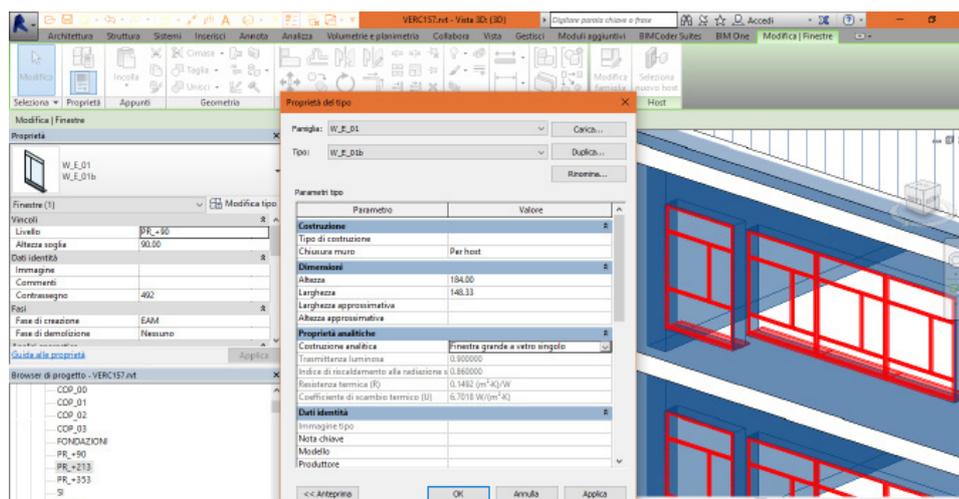


Fig. 7: Evidenziazione della trasmittanza del serramento in base alle proprietà analitiche

### 2.6.4 // Risoluzione delle adiacenze multiple con il terreno

Come precedentemente illustrato l'edificio in questione presenta diversi piani di campagna, quindi l'adiacenza al terreno avviene a quote differenti in base al blocco edificio preso in considerazione. Al momento dell'esportazione, una criticità evidenziata è quella relativa alla scelta del piano di contatto con il terreno. Di default Revit dà la possibilità di riconoscere un unico piano di contatto con il terreno.

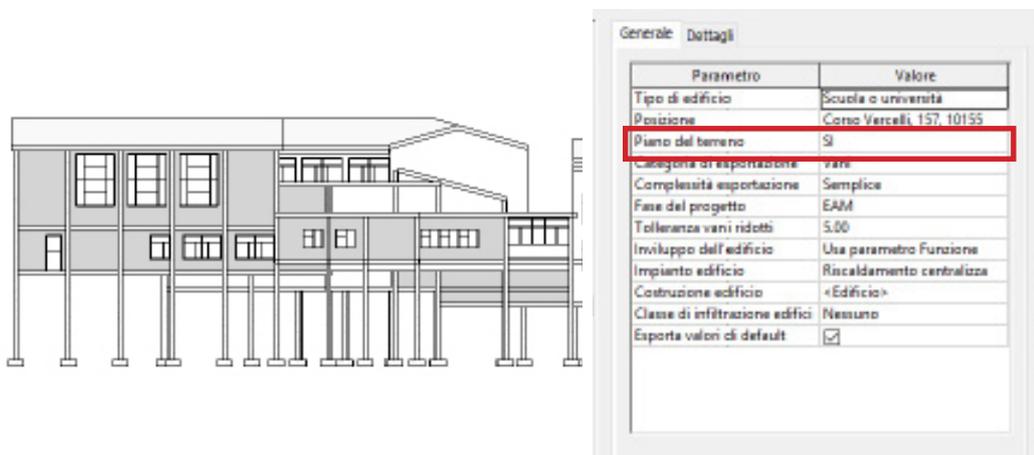


Fig.8: Indicazione univoca del piano a contatto col terreno di riferimento durante l'esportazione

Al momento dell'importazione in ambiente DesignBuilder, le superfici adiacenti con il terreno vengono riconosciute solo per il livello di riferimento impostato precedentemente, in fase di esportazione. E' possibile quindi a quel punto andare a selezionare le singole zone termiche, e passare da "adiacenza automatica" a "adiacente con il terreno".

### 2.6.5 // Modello EAM: Vani o Locali?

La distinzione tra vani e locali in termini di formato gbXML, sta nella natura di queste categorie di modello. I vani e i locali sono componenti indipendenti all'interno del modello e vengono utilizzate per ambiti differenti. I vani sono utilizzabili esclu-

sivamente per l'analisi dei volumi energetici, contengono a corredo informazioni e parametri utili per la definizione dei carichi di riscaldamento e raffreddamento. Le informazioni dei vani non sono trasferibili all'interno di DesignBuilder, per i software di simulazione della suite Autodesk (Green building studio) invece questo è già possibile. I locali sono invece anche utilizzabili per la determinazione dei volumi energetici, ma lo scopo di utilizzo è da riferirsi più all'ambito architettonico.

A livello di interoperabilità e flessibilità del modello energetico, è consigliabile l'utilizzo dei Vani, perché in fase di lavoro strumenti come Insight 360, possono offrire un monitoraggio costante sulla qualità della modellazione energetica e sui consumi. Il report finale di questo applicativo gratuito della Autodesk è infatti un consumo per kWh/m<sup>2</sup> anno, che riesce a dare un'idea complessiva dell'andamento energetico dell'edificio. In termini di interoperabilità, i vani risultano più precisi in fase di esportazione del modello gbXML e riducono in maniera significativa gli errori di visualizzazione del modello derivanti dall'interoperabilità.

## **2.7 // Criticità nel loop di ottimizzazione**

Nonostante le considerazioni preliminari e le semplificazioni del modello BIM per per l'esportazione, il flusso di lavoro non è risultato totalmente lineare.

Il passaggio dal BIM al EAM è reso complesso dall'esportazione nel formato gbXML. La complessità dei vani incide sul riconoscimento delle superfici disperdenti, uno degli errori più tipici è il riconoscimento di una superficie disperdente come "intercapedine", ovvero un vuoto d'aria. Questo errore genera dei locali non completamente racchiusi al momento dell'importazione in DesignBuilder, e il BEM

così strutturato non è utilizzabile per simulazioni energetiche. Per risolvere questa criticità è stato necessario eseguire il loop di ottimizzazione del modello BIM nella fase EAM del modello.

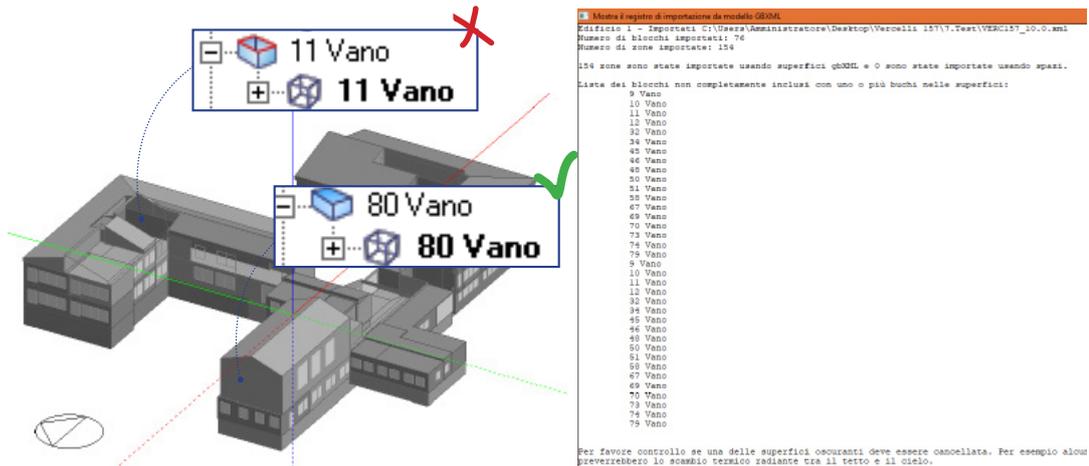


Fig.9: Corretto riconoscimento di un locale esportato

### 2.7.1 // Risoluzioni delle superfici “intercapedini”

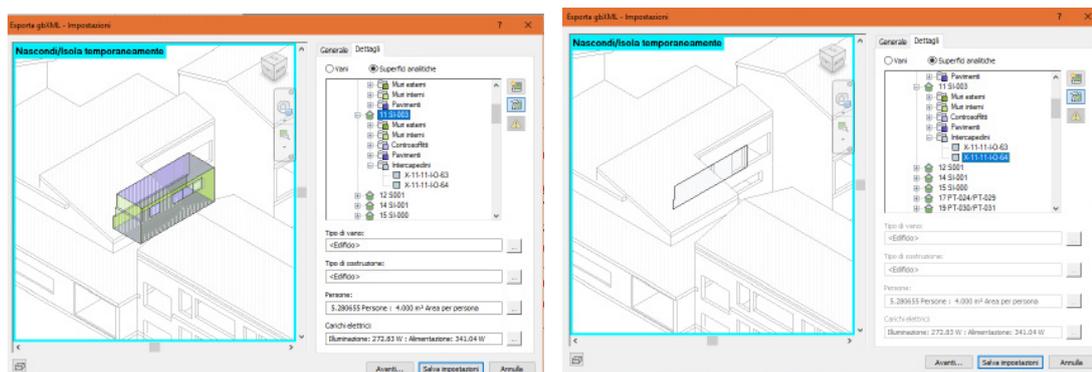


Fig.10: Riconoscimento delle intercapedini che generano i locali non delimitati nel EAM

È importante comprendere in quale modo si generano le superfici intercapedine al momento della creazione dell'EAM. Durante l'esportazione gbXML come già pre-

cisato vengono riconosciuti i volumi dei vani/locali posizionati all'interno del modello e sulla base delle superfici degli elementi che li delimitano (tetti, muri, bordo pavimento, bordo muro, ecc.) vengono create le superfici di dispersione del modello EAM. Le superfici intercapedini si generano quando i locali non sono correttamente delimitati, a causa di giunti aperti o di mancate unioni tra gli elementi. Sicuramente durante la modellazione bisogna tenere a mente 4 regole fondamentali:

- Correzione istantanea di errori e avvisi nel modello;
- Unione degli elementi costruttivi;
- Volume vano/locale completamente delimitato;
- Giunto angolare per i muri.

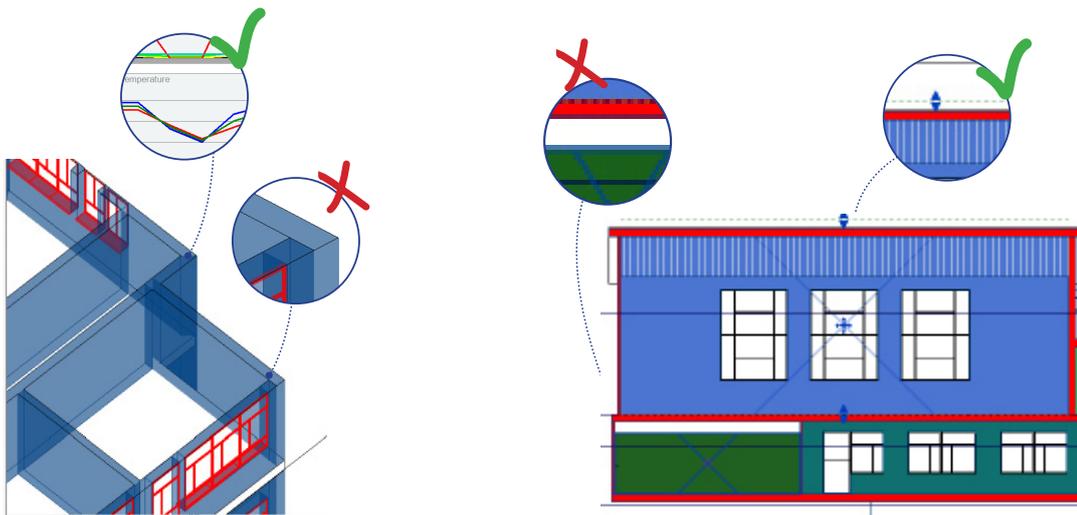


Fig.11: Accorgimenti di modellazione per ottimizzare l'esportazione

Con questi accorgimenti è possibile risolvere la problematica relativa al riconoscimento delle superfici di intercapedine. Bisogna comunque specificare che al momento dell'esportazione e dell'importazione del modello gbXML, ci sono delle impostazioni che se correttamente settate generano risposte differenti in termini di

interoperabilità tra i software. La tolleranza è un fattore fondamentale, all'interno dell'ambiente Revit, ma soprattutto in ambiente DesignBuilder. Un modello gbXML può generare intercapedini al momento di esportazione, ma queste possono essere eliminate settando una corretta tolleranza in DesignBuilder. Si consiglia un valore di tolleranza in DesignBuilder di 0,05 m.

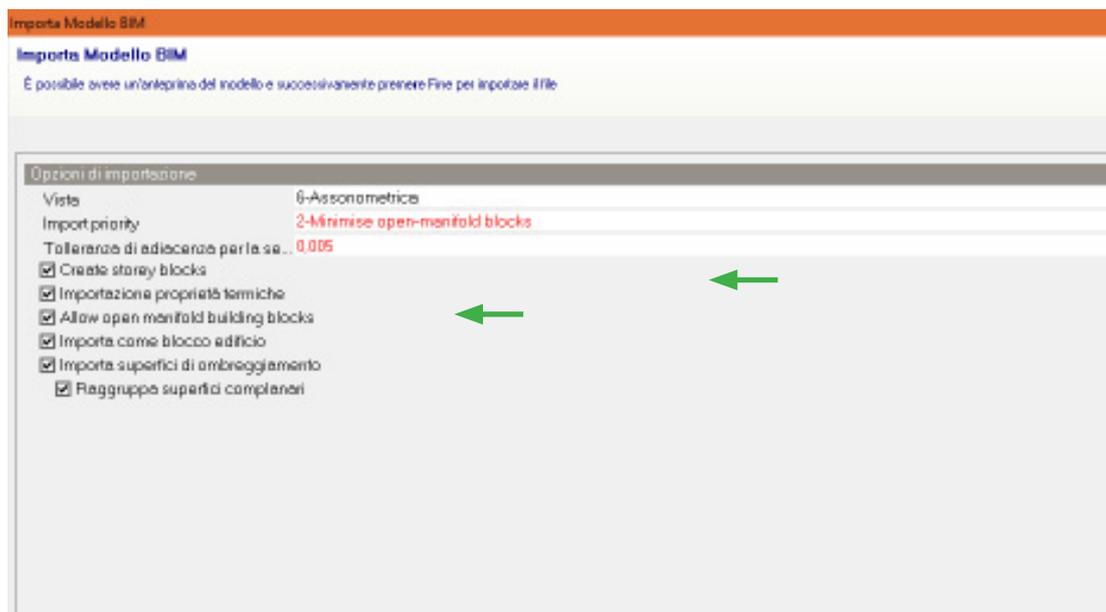


Fig.12: Valori di tolleranza all'interno della schermata di importazione di DesignBuilder

### 2.7.2 // Script Dynamo e modelli di vista per la gestione delle unioni

Nel modello ottimizzato è importante che le murature abbiano dei giunti a 45°, perché in questo modo vengono recepite in maniera corretta le chiusure tra i muri. Questa correzione si può effettuare manualmente in maniera massiva selezionando tutti i giunti e impostandoli come tipologia "ad angolo".

Per risolvere in maniera massiva alcune operazioni è possibile utilizzare Dynamo. Si tratta di un applicativo open-source compatibile con Revit è una risorsa gratuita

e libera, viene aggiornata costantemente ed è legata a community attive, un risorsa fondamentale per chi si avvicina alla metodologia BIM. Si basa sul visual programming e consente di realizzare elementi architettonici e/o strutturali senza una conoscenza approfondita di linguaggi di programmazione.

Al momento dell'esportazione in gbXML, un consueto accorgimento richiede di unire gli elementi architettonici mediante lo strumento "unisci", questa operazione può risultare ripetitiva soprattutto se bisogna gestire unioni tipo:

- Muro- Pavimento;
- Pavimento – Copertura;
- Muro – Copertura.

Per velocizzare questa pratica ripetitiva è stato creato un semplice script che permette di selezionare a due a due le categorie di elementi che si desidera unire, lo script avvia in automatico il comando unione all'interno del modello.

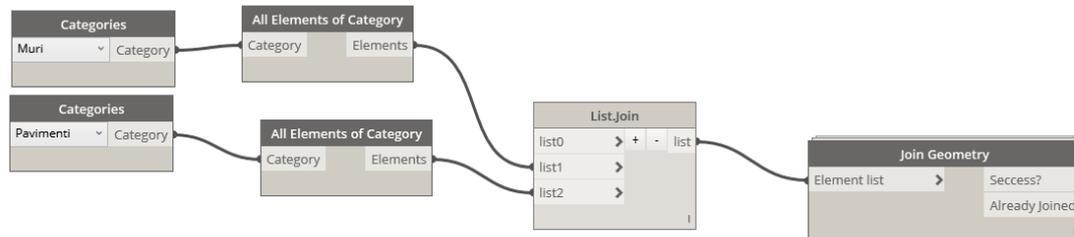


Fig.13: Script per l'unione degli elementi generato in Dynamo

Il comando principale di questo script è il `join.geometry`, che fa parte di un packaging (Hot gear) scaricabile dalla libreria open source di Dynamo ed esegue in automatico l'unione di due elementi prefissati. Basta impostare al principio la selezione di due elementi un muro e un pavimento per esempio, e lo script unisce tutti i muri e pavimenti che hanno superfici in comune.

Oltre allo script di unione è stato molto utile impostare un modello di vista che consentisse di monitorare in tempo reale e durante la modellazione le unioni e i giunti delle murature all'interno del modello. Per lavorare a un modello BIM semplificato per la fase energetica si consiglia l'utilizzo di un modello di vista con elementi costruttivi in trasparenza. Come già visto in alcune immagini precedenti questo modello di vista consente di investigare in tempo reale se le regole di modellazione utili alle finalità di simulazione energetica vengono rispettate. È possibile avere inoltre un controllo diretto sulle murature e le relative connessioni verso il soffitto o il tetto.

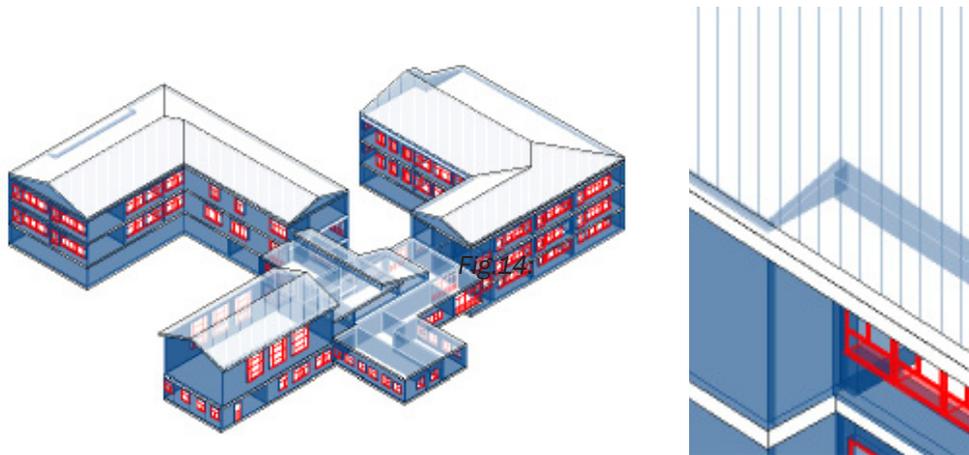


Fig.15: Esempi di visualizzazione in trasparenza generati con i modelli di vista

### 2.7.3 // Frammentazione e semplificazione dei volumi complessi

Il loop di ottimizzazione del modello gbXML ha richiesto dopo innumerevoli test, semplificazioni drastiche al modello nella sua fase di progetto EAM. Essendo l'edificio sviluppato su livelli differenti e con altezze differenti, si generano locali di altezze variabili, questo anche a causa di morfologie di locali variabili all'interno dello stesso spazio. L'atrio per esempio è stato il vano in cui sono state rilevate maggiori criti-

rità in fase di esportazione. All'interno di questo locale infatti abbiamo ben tre altezze differenti e oltre a soffitti piani anche un porzione a falda. L'adiacenza con gli altri vani è priva di murature per cui sono stati posizionati diversi delimitatori di vano. Il vano così articolato ha generato superfici di intercapedine e quindi non risultava accettabile e esportabile in gbXML. Per risolvere queste problematiche sono state create delle superfici di pavimento ausiliarie che hanno consentito così di frammentare questo ed altri volumi complessi in modo da renderli recepibili dal software di simulazione. Questi elementi ausiliari sono stati creati nella fase di progetto EAM e demoliti nella fase FM, e hanno consentito di migliorare i risultati di esportazione del modello EAM. La copertura a falde è stata semplificata in un comune tetto a due falde, con la stessa inclinazione.

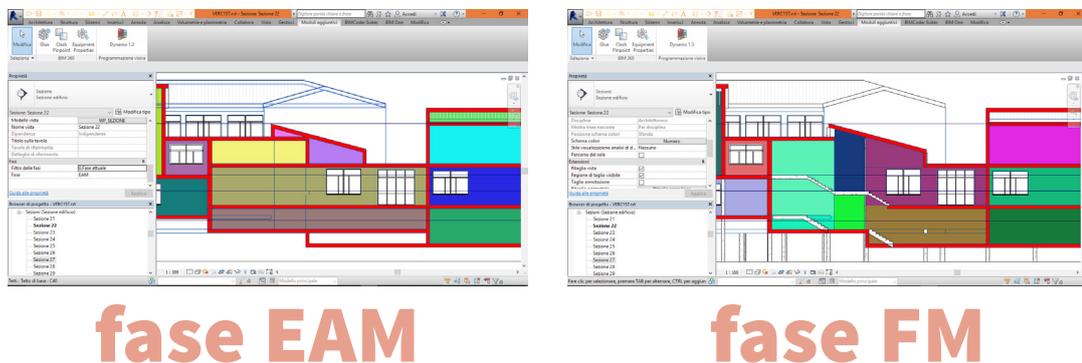


Fig.16: Differenza tra la fase energetica e di facility, con i vani complessi frammentati nella fase EAM

#### 2.7.4 // Confronto superfici BIM-EAM

Prima di iniziare a strutturare la simulazione energetica all'interno di DesignBuilder, per ottenere un'analisi accurata è importante effettuare un controllo sul possibile discostamento ottenuto in fase di semplificazione del modello BIM.

Per effettuare questo confronto sono stati redatti due abachi, uno è stato strutturato sulla base delle superfici analitiche proprie del modello EAM, mentre il secondo abaco è stato strutturato sulla base del modello BIM, valutando le differenze fra le superfici calcolate nei due modelli.

Per ogni voce analizzata si è ritenuto accettabile uno scarto massimo del 10% tra i due modelli; anche la differenza media totale deve essere inferiore al 10%. Se la differenza tra i due modelli supera la soglia imposta, è necessario apportare delle modifiche affinché tutti i campi rientrino nei valori prestabiliti. Questo processo ha consentito di validare le semplificazioni effettuate sul modello e procedere con la successiva fase di simulazione.

<b>componenti EAM</b>	<b>BIM</b>	<b>EAM</b>	<b>Errore %</b>
Pavimenti interni [m <sup>2</sup> ]	3872	3539	-8,60%
Pavimenti di fondazione[m <sup>2</sup> ]	1961	2055	4,79%
Murature esterne [m <sup>2</sup> ]	1908	1990	4,30%
Murature interrato[m <sup>2</sup> ]	953	983	3,15%
Partizioni interne [m <sup>2</sup> ]	2210	2319	4,93%
Coperture [m <sup>2</sup> ]	2163	2248	3,93%
Superfici finestrate [m <sup>2</sup> ]	747	754	0,94%



## **3 // Building Energy Model: configurazioni pre-simulazione**

### **3.1 // Struttura del file DesignBuilder**

Una volta importato il modello gbXML, in forma ottimizzata e privo di errori è possibile cominciare la fase di settaggio all'interno di DesignBuilder. Il software si presenta un'interfaccia grafica, una barra di navigazione in cui si possono selezionare gli il sito, l'edificio, il piano e il singolo vano. Il banner superiore presenta invece nove schede in cui è possibile settare le impostazioni pre-simulazione. E' di fondamentale importanza settare i valori contenuti all'interno delle schede:

-Occupazione;

-Costruzione;

-Aperture;

-Illuminazione;

-HVAC.



Fig.17: Schema di navigazione all'interno di DesignBuilder

## 3.2 // Attività

In questa scheda sono state impostate tutte le informazioni relative alla destinazione d'uso dell'edificio, e i rispettivi indici occupazionali, le temperature di set point, orari di occupazione, ecc.

In DesignBuilder sono precaricati diversi template di riferimento, per tutte le tipologie di edificio ma in molti casi conviene duplicarli per settarli ad hoc.

Bisogna ricordare che ogni scheda può essere settata a livello di edificio, di blocco o di singolo locale, la scelta dipende dal grado di dettaglio delle informazioni di cui si dispone e soprattutto dalla disomogeneità delle destinazioni d'uso interne all'edificio.

Nel caso in esame, all'interno del manufatto sono presenti una palestra e un area mensa con annesse cucine che hanno temperature di set-point e classi di utilizzo differenti rispetto ad altri spazi presenti all'interno dell'edificio. Per cui sono state

distinti 4 profili di occupazione, uno per la palestra, uno per la mensa, uno per la cucina e uno per l'intera scuola.

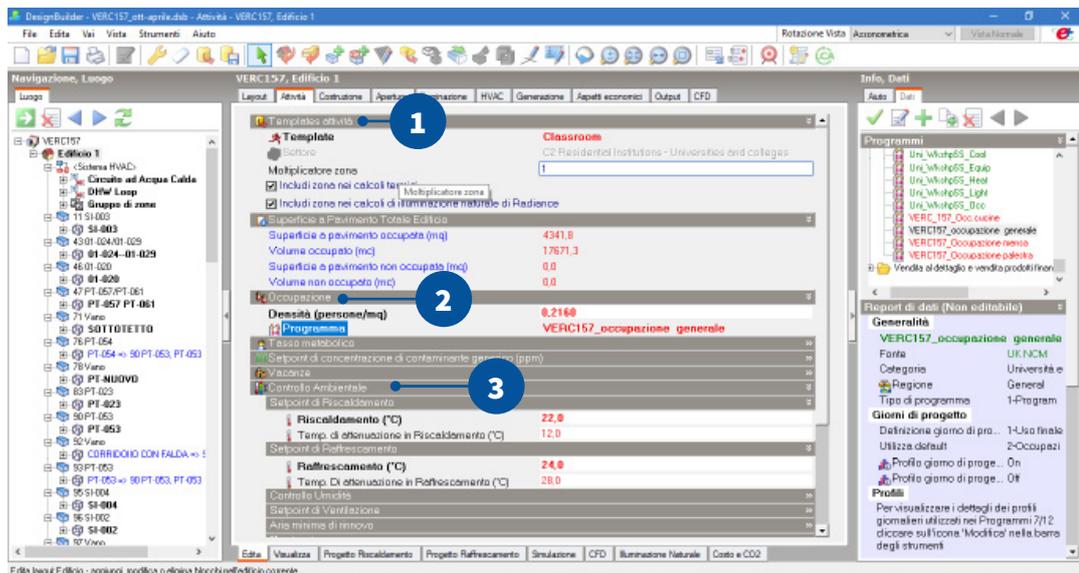


Fig.18: Schema generale della scheda attività

## 1.Template attività

L'impostazione del template di attività consente di impostare i valori standard di riferimento associati al tipo di destinazione d'uso dell'edificio. La scelta del template ci aiuta a costruire una base informativa dell'edificio, per esempio, valori tipo il tasso metabolico, periodi di spegnimento dell'impianto per le chiusure comandate e altre indicazioni standard, vengono settate automaticamente. Successivamente in base alle informazioni di cui si dispone si va a caratterizzare in forma dettagliata l'edificio.

## 2.Occupazione

Il periodo di occupazione dell'edificio è il valore che più incide sugli apporti gratuiti dell'edificio, per questo motivo occorre conoscere gli orari di attività dell'edificio. L'occupazione generale della scuola è dalle ore 8:00 alle 17:00 tutti i giorni, viene

impostato un programma mensile/settimanale e poi si definiscono le fasce orarie di utilizzo per singolo giorno. In DesignBuilder è possibile settare oltre alle fasce orarie di occupazione, anche la percentuale di occupazione di ogni ora, significa che è possibile indicare quando l'edificio è a pieno regime di attività e quando invece si riduce il numero di occupanti.

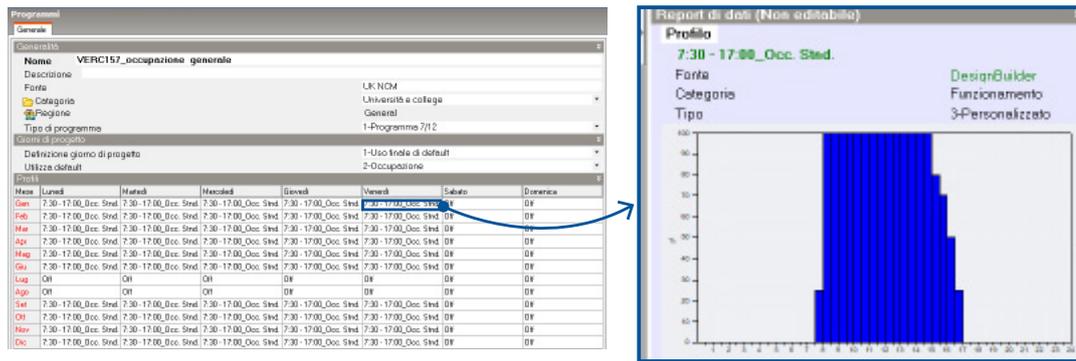


Fig.19: Profilo occupazionale generale dell'edificio

Come si può notare il profilo occupazionale generale dell'edificio è stato impostato indicando i valori percentuali collegati più bassi nelle ore di apertura e chiusura della scuola, in modo da simulare il riempimento graduale della struttura. Per le aule è stato settato il profilo generale dell'edificio in modo da considerare l'effettiva occupazione continua al pari degli spazi di distribuzione e gli uffici.

Per il vano palestra e l'area mensa, sono stati modificati i template di attività, perché i valori standard relativi all'occupazione, alle temperature di set point, e agli apporti gratuiti variano in maniera considerevole rispetto ad altri locali come aule e uffici che hanno condizioni interne molto simili. Per la palestra è stato impostato un profilo occupazionale ridotto rispetto all'interno edificio, simulando gli orari di utilizzo della palestra dalle ore 9:00 alle ore 15:00 con relativa pausa pranzo. Ragionamenti analoghi sono stati fatti per l'area mensa in cui sono stati impostati

profili occupazionali relativi agli orari di pranzo e merenda e temperature di set point di una tipica area di ristoro. Infine per le cucine è stato impostato il rispettivo template di riferimento, principalmente per calibrare con valori di default gli apporti gratuiti derivanti dalla preparazione degli alimenti .

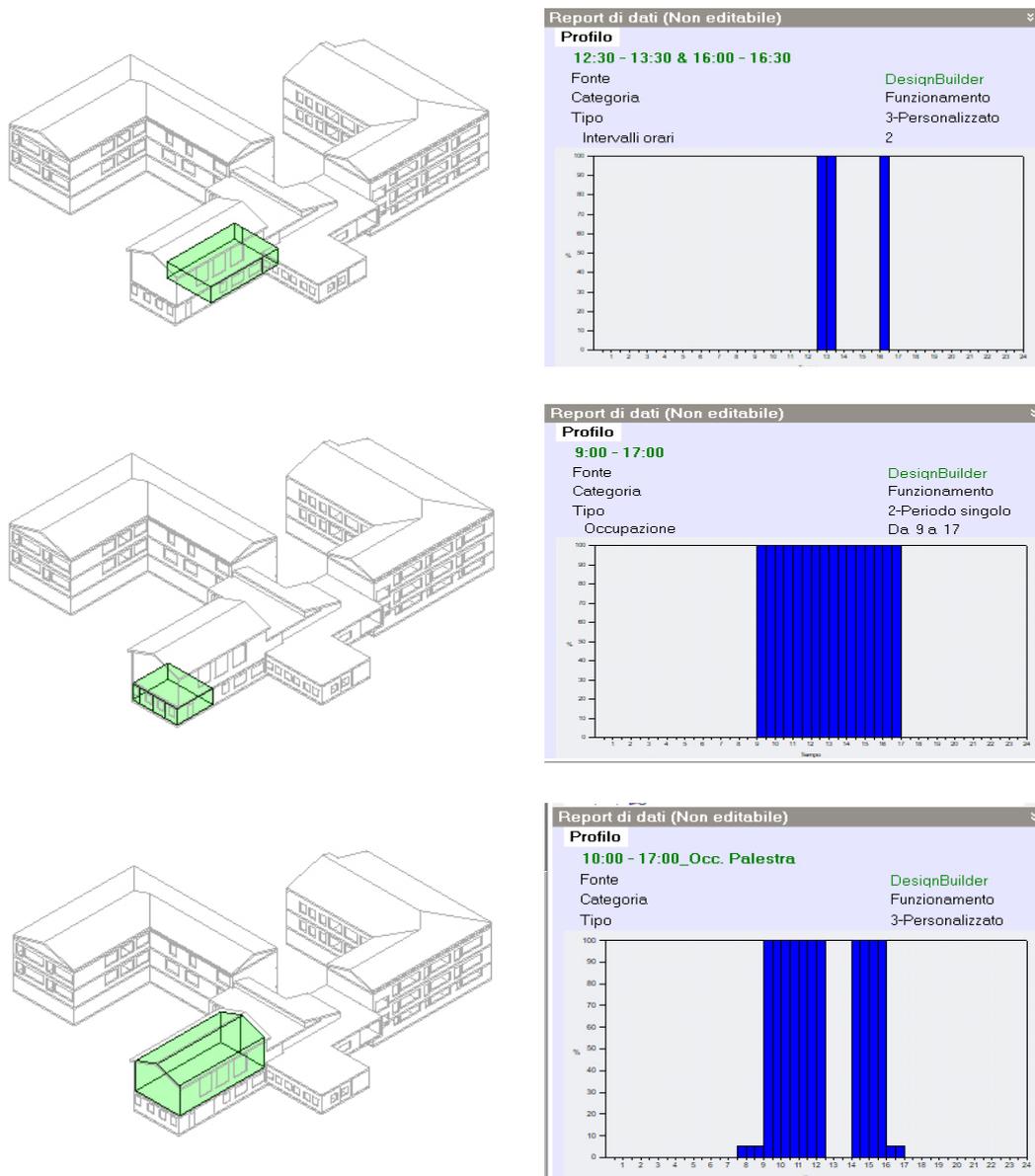


Fig.20: Nelle figure dall'alto verso il basso il grafico occupazionale dell'area mensa, della zona cucina e della palestra. Ogni ambiente si suppone occupato per 100% negli orari fissati.

Oltre ai singoli profili occupazionali è interessante valutare come le destinazioni d'uso di un vano presentano valori che incidono in maniera particolare all'interno della simulazione energetica come le diverse temperature di setpoint di una cucina, il tasso metabolico all'interno di una palestra e infine gli apporti gratuiti e i consumi elettrici derivanti dalla preparazione degli alimenti, che senza specifiche impostazioni sarebbero tralasciati.

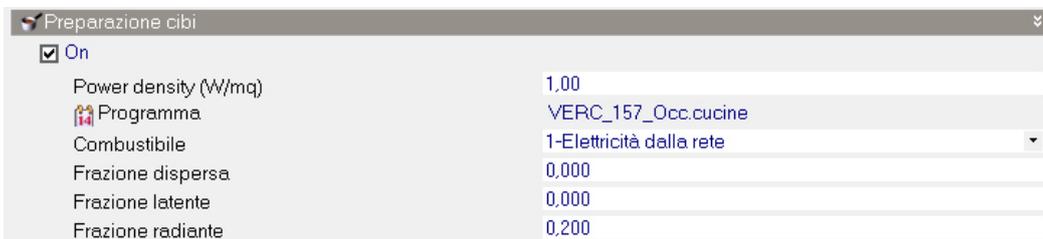


Fig.21: Impostazione da settare in maniera on sugli apporti generati dalla preparazione dei cibi

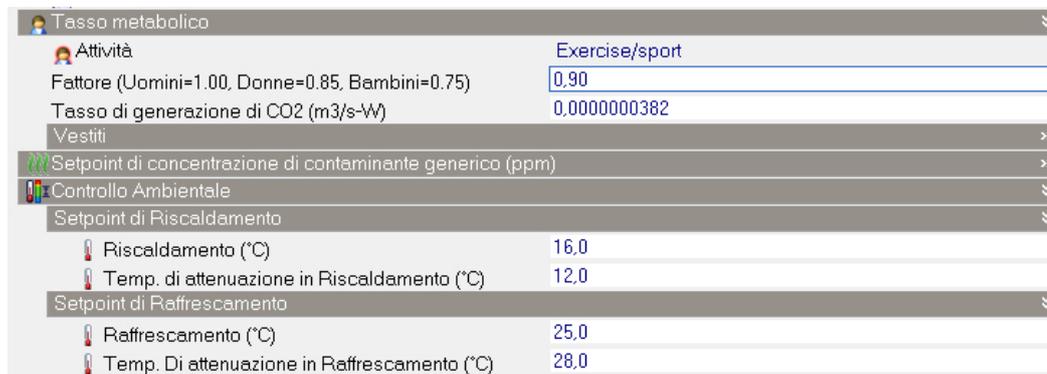


Fig.22: Variazione del tasso metabolico e dei met in base al tipo di attività

## 2. Controllo ambientale

Per il controllo della temperatura ambientale si è fatto riferimento alla normativa

UNI EN 12831, e sono state fissate le temperature interne generali delle aule in condizioni di riscaldamento e raffrescamento. In particolare per il riscaldamento è stata impostata una temperatura di 22°, il valore di temperatura di controllo è un ottimo parametro di controllo in fase di simulazione per verificare il corretto funzionamento dell'impianto dell'intero edificio.

### **3.3 // Costruzione**

All'interno della scheda di costruzione devono essere settate tutte le caratteristiche delle superfici disperdenti dell'edificio. In questa fase l'obiettivo è riuscire a gestire le stratigrafie provenienti dal modello Revit e importate all'interno di DesignBuilder nella sezione Importato. Nel caso studio questo passaggio è avvenuto correttamente, rilevando una criticità rispetto al riconoscimento dei materiali. Non si è potuto approfondire perchè i materiali provenienti da Revit in questo modello non venissero recepiti, di sicuro ha facilitato la configurazione degli involucri il fatto di avere già dei "layer", strati già definiti in termini dimensionali a cui sono stati associati i materiali presenti all'interno della libreria del software di simulazione.

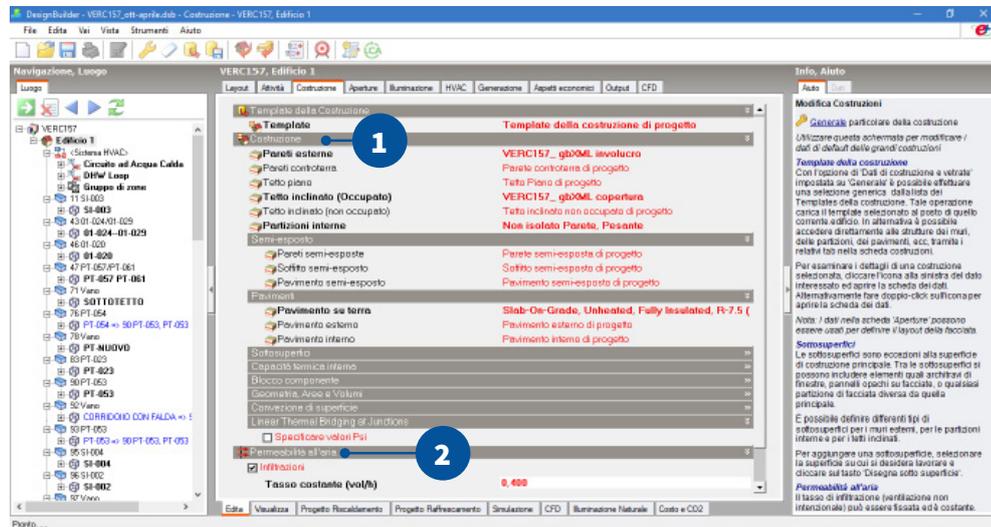


Fig.23: Visualizzazione della scheda costruzione

## 1.Costruzione

Come già specificato nella scheda di costruzione si vanno a settare le caratteristiche di tutti gli involucri. Nel BEM sono state importate sia le informazioni termiche che le informazioni dimensionali riguardo lo strato, purtroppo è stata rilevata la criticità relativa alla caratterizzazione dei materiali, di cui non sono state importate le proprietà termiche.

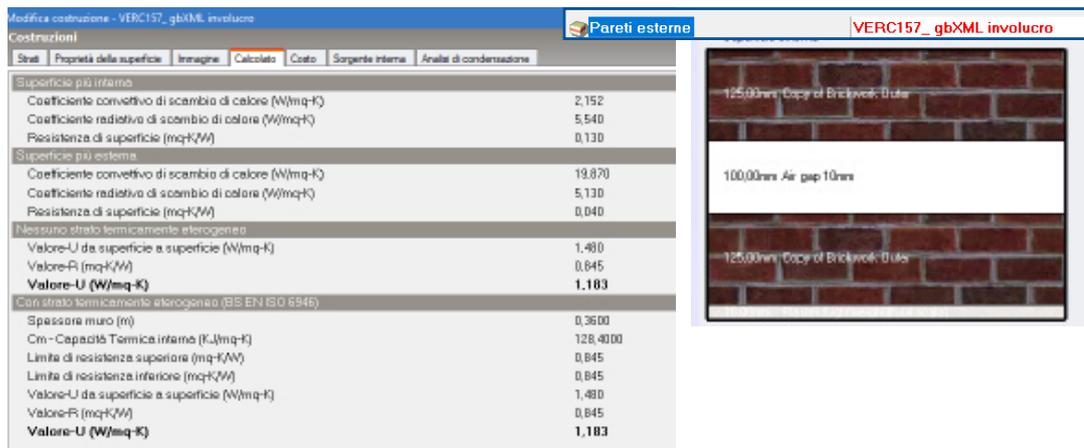
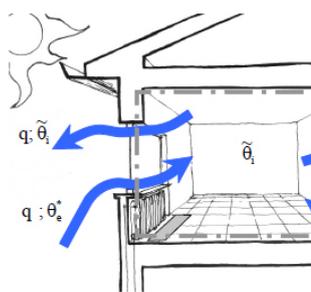


Fig.24: Configurazione dell'involucro esterno in DesignBuilder

## 2. Permeabilità all'aria

Il fattore di infiltrazione dell'edificio è un valore normato anch'esso nella UNI EN 11831. Le infiltrazioni di aria nell'involucro edilizio generano forti dispersioni di calore dovute agli eccessivi ricambi d'aria nell'ambiente, possono avvenire tramite canaline della luce, tramite i dispositivi di areazione forzata ma soprattutto come avviene nel caso studio, attraverso serramenti privi di guarnizioni.

La normativa fornisce un metodo per il calcolo standard delle infiltrazioni nell'edificio:



$$q_{inf} = 2 \cdot V \cdot n_{50} \cdot e_i \cdot \varepsilon_i$$

- $V$  = volume interno dello spazio riscaldato
- $n_{50}$  = numero di ricambi d'ora convenzionale riferito ad una differenza di pressione fra interno ed esterno dell'edificio pari a 50 Pa.  $n = [1/h]$
- $e_i$  = coefficiente di schermatura del vento (dovuto alla presenza di ostacoli nell'intorno dell'edificio considerato)
- $\varepsilon_i$  = fattore di correzione dovuto all'altezza (tiene conto del fatto che la velocità del vento aumenta al crescere dell'altezza del suolo a causa dell'effetto del *boundary layer* e/o di elementi schermanti posti attorno all'edificio).

Fig.25: Calcolo secondo normativa delle infiltrazioni per ventilazione

Apparte il volume, tutti i valori sono tabellati. I valori di infiltrazione di un edificio si aggirano intorno agli 0,36 volumi/ora. Nel caso in esame essendo l'edificio rivestito principalmente da serramenti di bassa tenuta, abbiamo incrementato il valore di infiltrazione a 0,40 vol/h, per tenerne in considerazione le maggiori dispersioni che ne derivano.

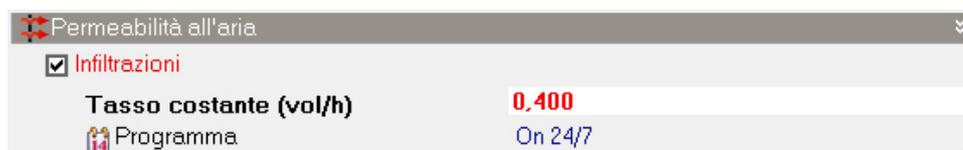


Fig.26: Impostazione maggiorata delle infiltrazioni in DesignBuilder

Il programma delle infiltrazioni è impostato h24, perchè non dipende dagli occupanti e le infiltrazioni sono costantemente presenti all'interno dell'edificio.

### 3.4 // Aperture

Per quanto riguarda le aperture sono state rilevate le stesse criticità delle muraure, le vetrate importate non rispettavano i livelli di trasmittanza associati in Revit. In maniera uniforme e alivello di edificio sono stati impostati dei nuovi serramenti dalla libreria di progetto di DesignBuilder, con trasmittanza analoga a quella stabilita in fase di modellazione. I serramenti sono stati impostati seguendo un sistema di schermatura integrato interno azionabile in caso di abbagliamento. Per ottenere dei risultati di simulazione realistici conviene settare “no glazing” sui vetri in mododa riuscire a graficizzare in maniera reale l'andamento degli apporti solari.



Fig.27: Inserimento delle proprietà termiche del vetro

### 3.5 // Illuminazione

Nella scheda di illuminazione si impostano le tipologie di illuminazione che caratterizzano l'edificio, i W/m<sup>2</sup> di illuminazione e infine i programmi di accensione. In fase di simulazione l'illuminazione si aziona quando all'interno degli ambienti non sono rispettati i valori di illuminazione interna, in funzione della luce proveniente

dall'esterno. Il programma di illuminazione è stato impostato sull'occupazione standard dell'edificio, settata in precedenza all'interno della scheda attività.

Rimane da definire il calcolo dei W /m<sup>2</sup> di illuminazione, per questo calcolo sono stati considerati i W totali di illuminazione rilevati all'interno di un aula e sono stati divisi per la superficie totale della stessa, ottenendo un valore medio di 1,8 W/m<sup>2</sup>.

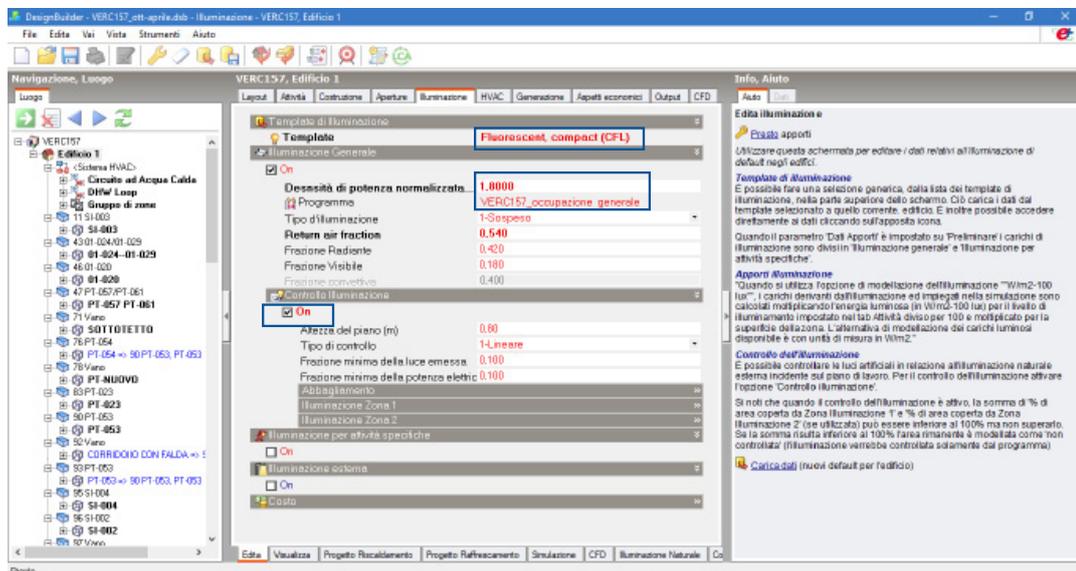


Fig.28: Impostazione di accensione del sistema di illuminazione e configurazione della potenza

### 3.6 // Impianto HVAC

La sezione impiantistica è una parte fondamentale della configurazione del modello BEM. In DesignBuilder è possibile lavorare su due livelli di dettaglio, utilizzando una configurazione semplice o dettagliata dell'impianto.

Per ottenere una simulazione più realistica è consigliato l'utilizzo di un impianto dettagliato, soprattutto se, come nel caso in esame si dispongono di informazioni

relative ai terminali e alle componenti principali dell'impianto.

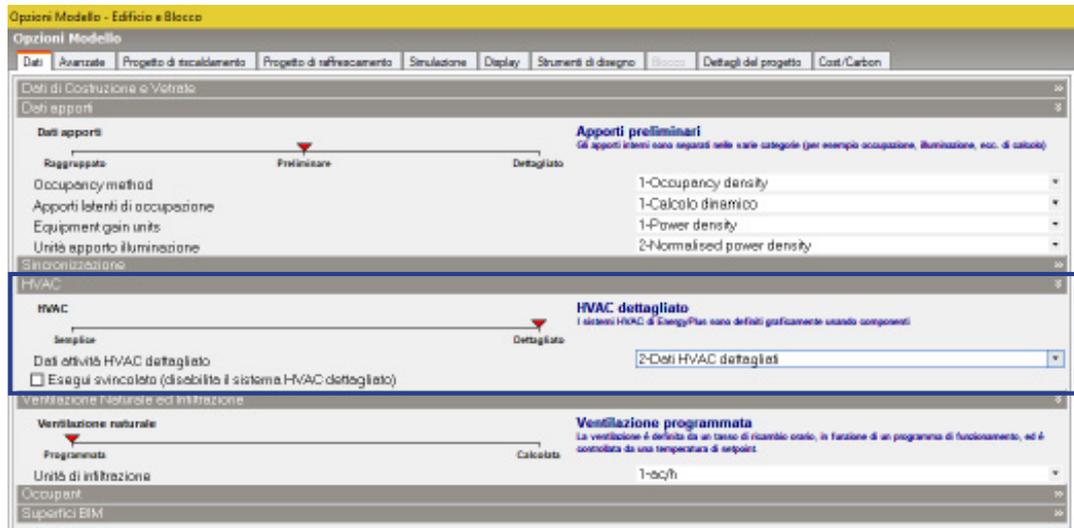


Fig.29: Configurazione dell'impianto dettagliato

### 3.6.1 // Schema funzionale della centrale termica

L'impianto di riscaldamento dell'edificio è gestito da due gruppi di caldaie a condensazione di ultima generazione, installate nel 2016. Le caldaie sono alimentate a gas metano, e ogni gruppo di caldaia è costituito da 4 generatori di calore. L'impianto è inoltre dotato di uno scambiatore di calore a piastre in acciaio inox che consente aumentare l'efficienza dell'impianto.

La centrale termica alimenta radiatori di potenza media radiante per locale di circa 8.000W, per un totale di volume riscaldato di 13.000 m<sup>3</sup>.

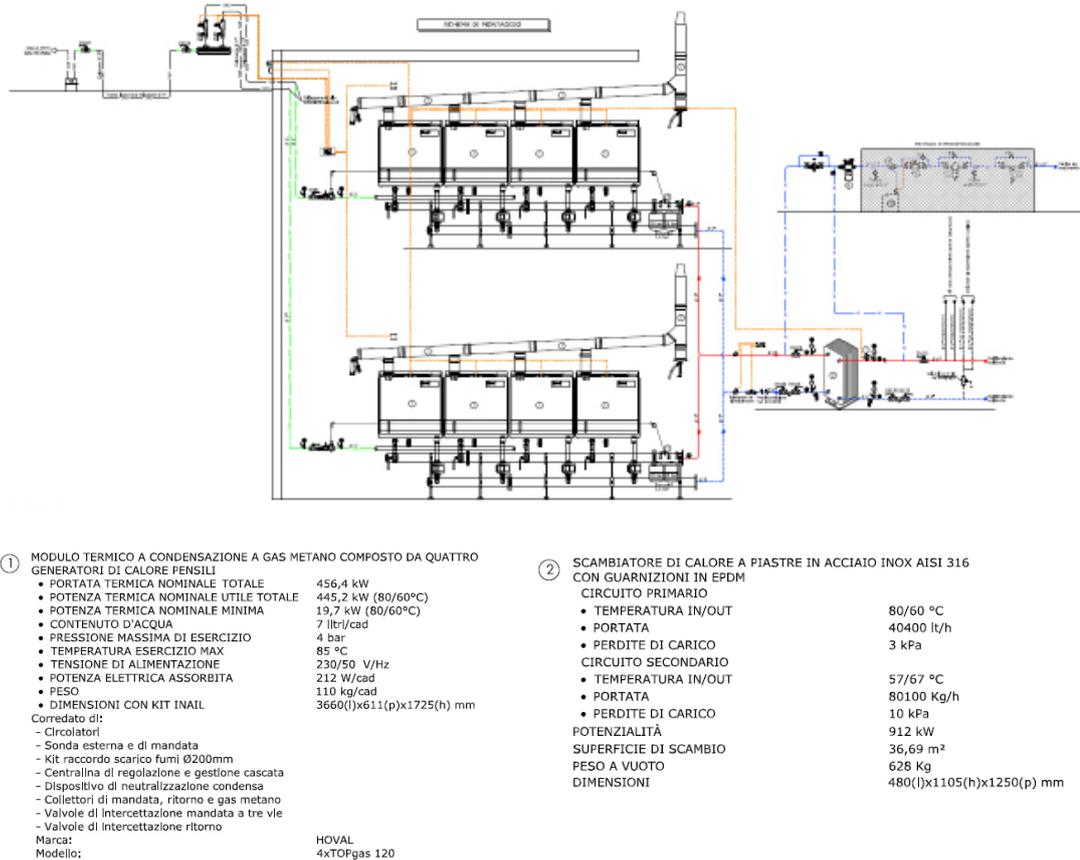


Fig.30: Schema di progetto dell'impianto di riscaldamento

Dallo schema impiantistico si possono ricavare le informazioni dettagliate di ogni singolo componente, per la sua configurazione in DesignBuilder. È fondamentale semplificare i dati reali dello schema impiantistico allineandoli ai template proposti.

### 3.6.2 // Sistema HVAC in DesignBuilder

Il modello BEM richiede una semplificazione dello schema di impianto, per poter gestire in maniera pratica il riscaldamento degli ambienti. Lo schema funzionale

presentato in presenza in DesignBuilder si riduce a un circuito semplice :

caldaia - pompa di circolazione - setpoint-acqua di mandata- terminali. L'impianto viene associato all'intero edificio e la sua configurazione si divide in quattro step fondamentali :

- Configurazione caldaia;
- Configurazione pompa;
- Configurazione setpoint manager;
- Associazione vani riscaldati.

In assenza di dati di progetto relativi allo stato di fatto è possibile lasciare le impostazioni su autosize, in questo modo si ottengono dei risultati accettabili ma molto spesso non validabili. Nel caso in esame sono stati sostituiti i valori in autosize con i dati provenienti dallo schema funzionale.

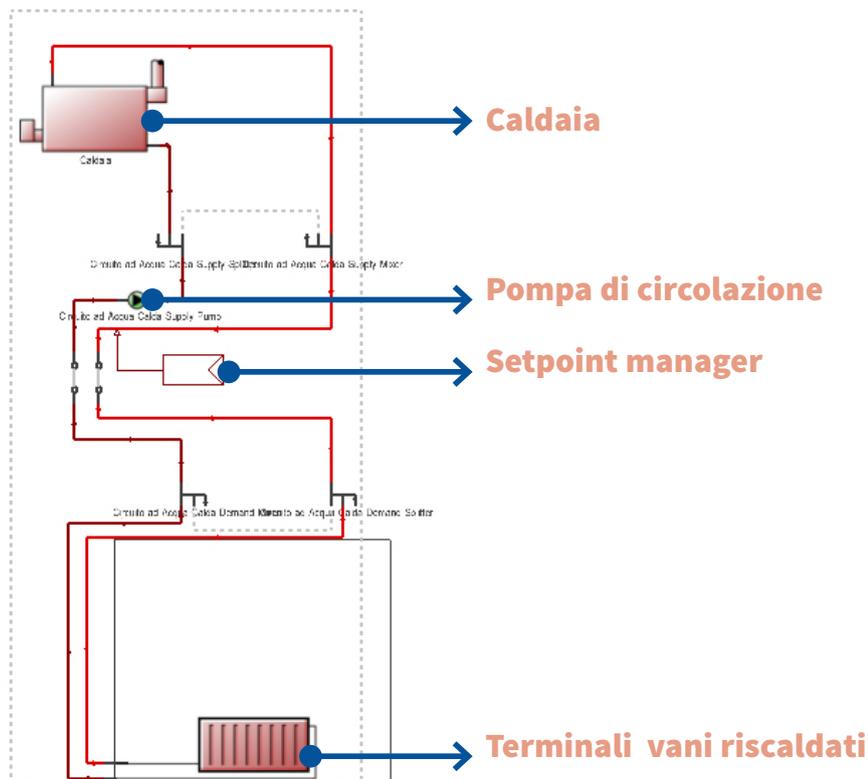


Fig.31: Indicazione delle componenti di impianto dettagliato in DesignBuilder

### Configurazione caldaia

Per settare le caratteristiche della caldaia è necessario considerare i due gruppi termici composti dai quattro generatori di calore come un unico oggetto. Si devono quindi sommare tutte le potenze ausiliarie e nominali, per definire le caratteristiche della caldaia presente nel circuito di DesignBuilder.

Il singolo gruppo termico consta una potenza termica nominale di 445 kWh, nel modello BEM la caldaia è settata con una potenza termica nominale di 990 kWh, data dalla somma dei due gruppi termici.

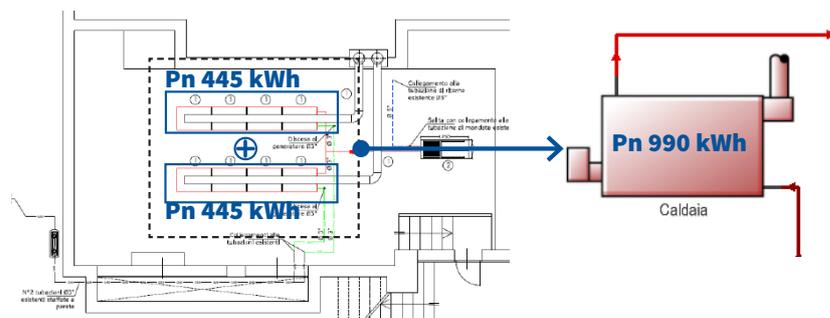


Fig.32: Calcolo semplificato della potenza termica complessiva della caldaia da inserire in DB

Ragionamento analogo va fatto per il calcolo della potenza ausiliaria della caldaia, mentre per l'efficienza basta inserire il valore riportato nella scheda tecnica. una volta settati questi valori il componente caldaia non necessita di ulteriori modifiche e si procede al dimensionamento della pompa.



Fig.33: Configurazione delle proprietà della caldaia

### Configurazione pompa

La pompa di circolazione non è rappresentata all'interno dello schema di impianto. Per dimensionare questo elemento si è fatto riferimento al libretto della centrale termica, in cui oltre a comprovare i dati relativi al gruppo termico delle caldaie, è stato possibile riscontrare i valori di riferimento per il dimensionamento della pompa. Il circuito è dotato di tre pompe di circolazione che descrivendo la medesima funzione si possono sommare in un unico valore di potenza ausiliaria, dalle schede tecniche invece si ricavano la prevalenza e l'efficienza.



Fig.34: Configurazione delle proprietà della pompa di circolazione

### Setpoint Manager

Il circuito di acqua calda lavora in media tra i 60° e gli 80°, in questo caso però

non sono state reperite informazioni dettagliate riguardo il funzionamento di questo termostato. Si è deciso quindi di impostare un controllo delle temperature h24 che mantenga il circuito sempre sugli 80°.

### Associazione dei vani riscaldati

Una volta calibrate le diverse componenti di impianto, si imposta il loop di attivazione della caldaia h24 durante le stagioni di riscaldamento. Questo impone al sistema di funzionare in continuo, ma di rendere effettivamente potenza solo secondo il programma occupazionale e di attività dell'edificio e dei singoli locali.

Lo step successivo richiede la definizione delle zone termiche riscaldate da questo impianto, va precisato che nel momento in cui viene generato l'impianto dettagliato la prima richiesta è proprio riferita alla definizione dei locali riscaldati, ma conviene gestire queste informazioni in ultima battuta.

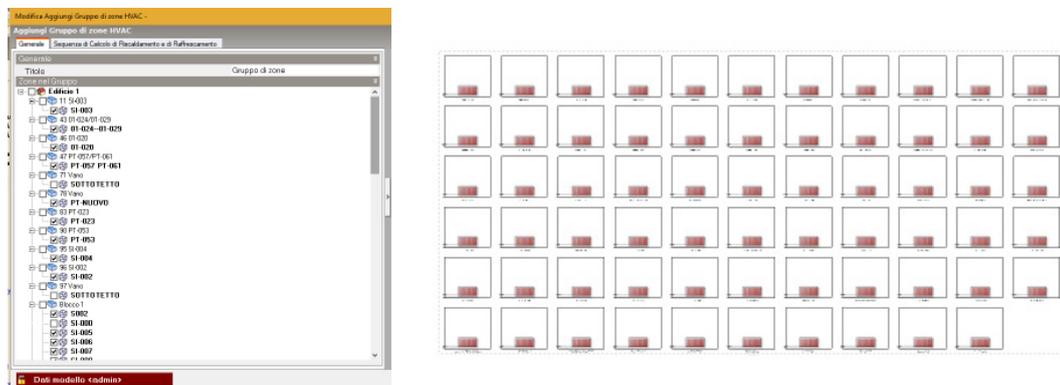


Fig.35: Associazione delle zone termiche riscaldate dall'impianto

Una volta selezionato il singolo locale viene generato un radiatore a cui vengono associate le caratteristiche termiche totali del singolo vano e le informazioni riguardanti gli orari di funzionamento. Per tutto l'edificio l'orario di funzionamento

dell'impianto di riscaldamento è dalle 0:04 alle 17:00, a eccezione dei locali del casa del custode , riscaldati dallo stesso impianto che invece funzionano fino alle 22.

Questa distinzione di funzionamento va settata all'interno della zona termica di pertinenza del custode perché incide sui consumi di gas. Una volta selezionato il vano riscaldato bisogna anche ridefinire la temperatura di setpoint interna richiesta per le aree riscaldate, questo perché un volta impostato un impianto dettagliato, lo schema impiantistico generato è quello di riferimento in fase di simulazione.

La definizione delle zone termiche riscaldate è un momento fondamentale perché consente di fare delle valutazioni più dettagliate sui vani semplificati nella fase di modellazione BIM.

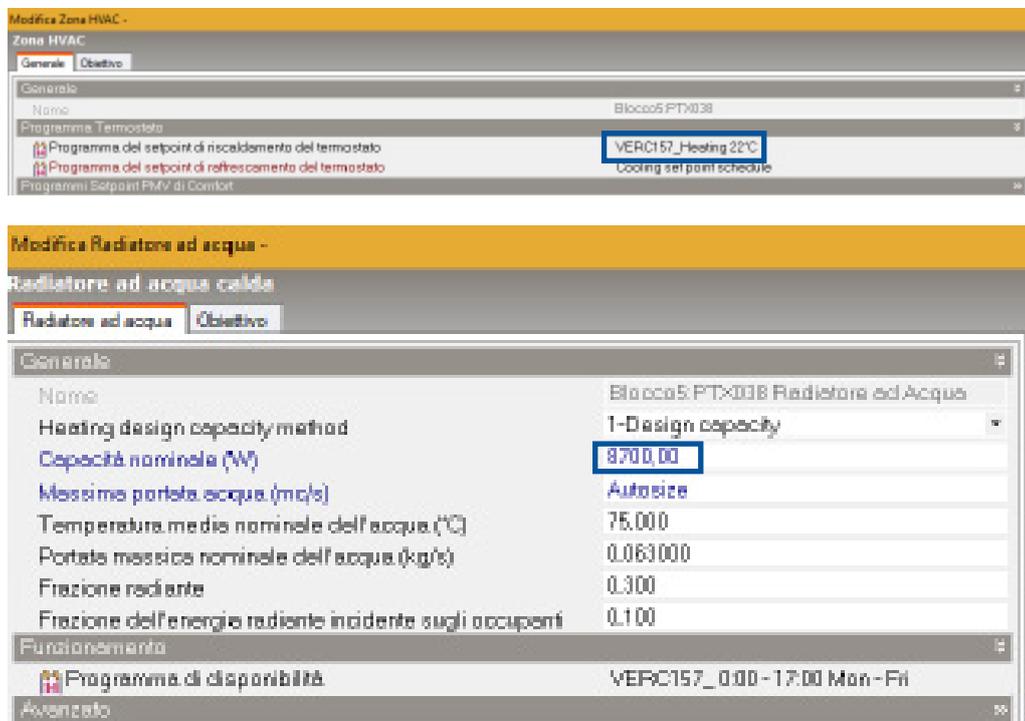


Fig.36: Configurazione delle proprietà del radiatore per zona

### 3.6.3 // Calcolo della potenza nominale di un radiatore

Il calcolo della potenza nominale dei radiatori è standardizzato dalla norma UNI 10200. Il metodo di calcolo è applicabile soltanto per corpi scaldanti a convezione naturale. Il calcolo richiede come dati di input le dimensioni dei corpi scaldanti che sono state rilevate in fase di sopralluogo. La potenza termica di un corpo scaldante, si può riferire alla potenza definita nella UNI EN 442-2, in corrispondenza di un  $\Delta t$  di  $60^{\circ}\text{C}$ , espressa in watt, è data da:

$$Q_{nv} = (314 * S) + (C * V)$$

dove:

il termine  $(314 * S)$  rappresenta la componente radiante in cui:

$S$  è la superficie che delimita i corpi scaldanti, espressa in  $\text{m}^2$ :

$$S = 2 * h * l + 2 * l * p + 2 * p * h$$

in cui:

$h$ : altezza totale del corpo scaldante, in metri;

$p$ : profondità del corpo scaldante, in metri;

$l$ : lunghezza totale del corpo scaldante in metri;

il termine  $(C * V)$  rappresenta la componente convettiva in cui:

$V$ : volume del corpo scaldante

$C$ : parametro sperimentale, indicato in watt al metro cubo, riportato nel prospetto A.1. della normativa.

Valori di  $C$  per diversi corpi scaldanti

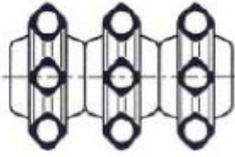
Materiale	Tipologia	Descrizione		$C^*$ (W/m <sup>2</sup> )
Ghisa		Colonne piccole sezione <math>30 \times 30 \text{ mm}</math>	mozzo 50 mm	18 000
			mozzo 50 mm	16 900

Fig.37: Parametro  $C$  tabellato da normativa

Specificata la tipologia di radiatori e le norme di riferimento in base ai dati di rilievo è stato possibile ricavare la potenza termica totale per singolo vano, data dalla somma delle potenze termiche scaldanti di tutti i radiatori associati a quel vano. Per facilitare il calcolo è stata creata una tabella in cui vengono riassunti tutti gli standard e le tipologie di radiatori presenti nello stato di fatto.

H [m]	L [m]	P [m]	n° elementi	S [m <sup>2</sup> ]	V [m <sup>3</sup> ]	C [W/m <sup>3</sup> ]	P [W]
0,7	0,19	0,17	5	0,5686	0,02261	18000	585,52
0,7	0,63	0,17	16	1,3342	0,07497	18000	1768,40
0,7	1,43	0,17	36	2,7262	0,17017	18000	3919,09
0,7	0,71	0,17	18	1,4734	0,08449	18000	1983,47
0,7	0,83	0,17	21	1,6822	0,09877	18000	2306,07
0,7	0,87	0,17	22	1,7518	0,10353	18000	2413,61
0,7	0,83	0,17	21	1,6822	0,09877	18000	2306,07
0,7	1,11	0,17	28	2,1694	0,13209	18000	3058,81
0,7	1,43	0,17	36	2,7262	0,17017	18000	3919,09
0,7	0,55	0,17	14	1,195	0,06545	18000	1553,33
0,7	0,95	0,17	24	1,891	0,11305	18000	2628,67

Fig.38: Potenza termica dei radiatori, dati estratti e calcolati in Revit

### 3.7 // Gestione delle semplificazioni nel modello BEM

Una volta settate le impostazioni e configurato il modello BEM per la simulazione, è stato necessario effettuare un check sui singoli ambienti importati nel modello per verificare la corretta predisposizione alla simulazione.

Ovviamente prima di raggiungere dei risultati accettabili sono state svolte delle simulazioni di “test” per controllare il corretto andamento del modello.

Una delle problematiche principali rilevate è da riferirsi alla gestione degli occupanti all'interno dell'edificio che generano degli apporti rilevanti all'interno degli ambienti. Per esempio l'indice di occupazione al m<sup>2</sup> di un aula è molto distante dall'indice di occupazione di un corridoio o di un'ufficio, per questo motivo si è cercato di affinare il più possibile l'indicazione di questo valore in base alla destinazione d'uso. Per quanto riguarda i locali non abitabili è stato necessario intervenire in maniera specifica sulle superfici di pavimento impostandole “non calpestabili”. Questa condizione fa sì che gli apporti gratuiti derivanti dalle persone vengano azzerati. Questi infatti incidono sulle temperature degli ambienti, infatti i grafici derivanti dalle simulazioni di test, mostravano un andamento delle temperature medie interne troppo alto per locali non riscaldati.

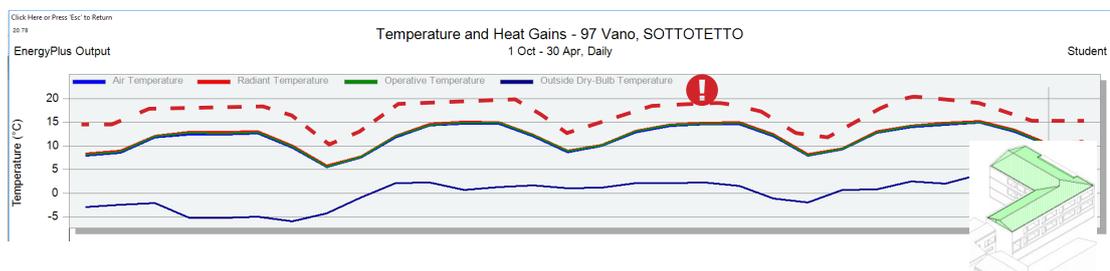


Fig.39: Nel grafico l'andamento reale delle temperature del sottotetto e quello erroneo a confronto

Un'altra criticità si riferisce alla gestione dei locali “frammentati” nel modello

EAM, ovvero i locali con morfologia complessa e che sono divisi da superfici ausiliarie. Questi all'interno di DesignBuilder vengono recepiti come locali distinti. L'atrio principale è stato gestito come un locale unico all'interno del modello BEM attraverso un espediente di modellazione utilizzato in DesignBuilder. È stato possibile rendere le diverse suddivisioni del di vano comunicanti creando dei vuoti sulle rispettive superfici di pavimento e soffitto, una volta creati questi vuoti si rendono le suddette superfici non calpestabili e si uniscono le zone mediante il comando unisci zone. DesignBuilder riconoscerà nel locale calpestabile, il riferimento principale di questa unione considerando i locali precedentemente uniti come locale unico.

La semplificazione così strutturata ha consentito di avvicinare i risultati ottenuti dalla simulazione ai dati reali perché con la stessa potenza termica sono stati riscaldati volumi più ampi, e quindi i consumi effettivi simulati sono aumentati avvicinandosi a quelli reali di riferimento.

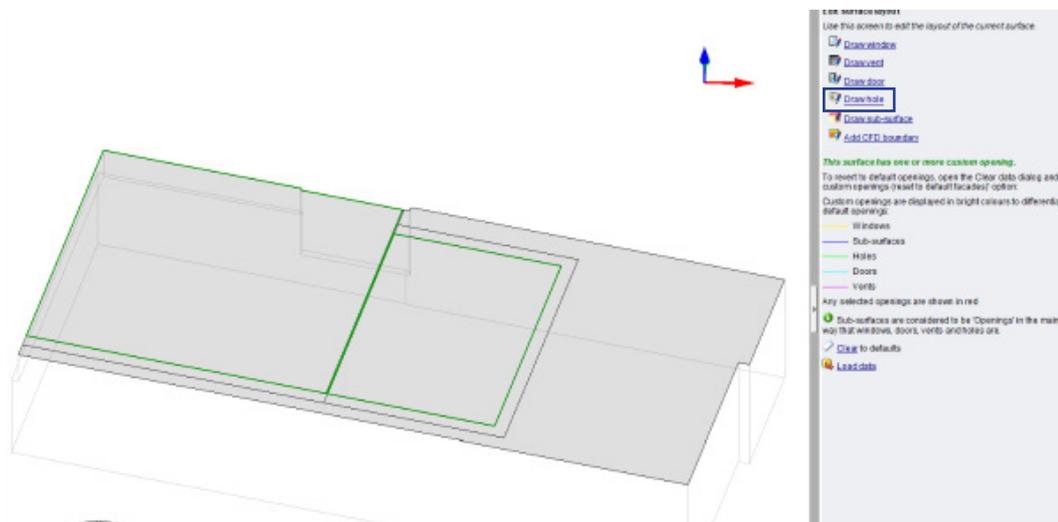


Fig.40: Creazione di aperture sul pavimento per generare l'unione dei vani

## **4 // Analisi dei risultati della simulazione energetica**

### **4.1 // Impostazioni di simulazione**

Una volta completata la configurazione del modello è possibile avviare la fase di simulazione energetica dell'edificio. È importante ricordare come le simulazioni di DesignBuilder avvengano a regime dinamico, seguendo quindi l'andamento delle temperature orarie diversamente dalle simulazioni a regime stazionario che fanno riferimento alle temperature medie mensili.

In DesignBuilder è possibile fissare la frequenza di simulazione tra sub oraria, oraria, mensile o annuale a seconda del dettaglio dei risultati che si vuole ottenere. La simulazione dinamica permette di considerare l'inerzia termica dell'edificio e di valutare l'andamento delle temperature in maniera precisa e in funzione della qualità dei dati di input precedentemente settati. I dati relativi all'occupazione, agli apporti e al comfort ambientale in funzione delle destinazioni d'uso condizionano il profilo della temperatura della simulazione e di conseguenza avendo delle temperature di setpoint prestabilite, incidono anche sui consumi dell'impianto.

## 4.2 // Simulazione dinamica dello stato di fatto

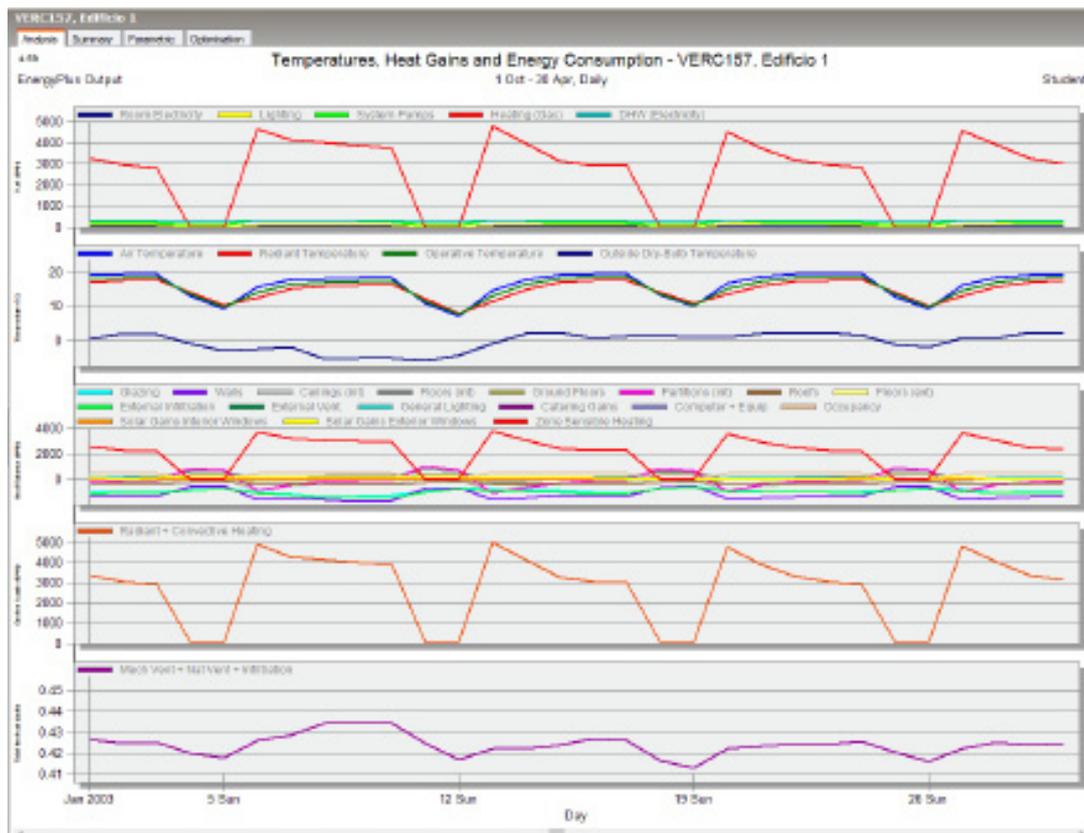


Fig.41: Grafico generale di output in DesignBuilder a livello di edificio. Dall'alto verso il basso: grafico della potenza di riscaldamento, grafico delle temperature, apporti dispersioni, energia radiante, infiltrazioni

I primi risultati dopo la simulazione sono i grafici complessivi a livello di edificio in cui è possibile da subito, in base all'andamento, capire se ci sono problemi all'interno della simulazione. La schermata sopra mostra i risultati di una simulazione semestrale effettuata sull'intera stagione di riscaldamento, nello specifico la scher-

mata fa riferimento al mese di Gennaio. Il primo grafico riportato, profila i consumi principali in KWh dell'edificio, essendo il riscaldamento la principale fonte di consumo dell'edificio è possibile notare il notevole distacco tra i picchi di consumo per il riscaldamento e l'andamento simile dei consumi di ACS, elettricità, illuminazione ecc. Il secondo grafico va a illustrare l'andamento delle temperature interne dell'edificio tra cui :

- Temperatura operativa;
- Temperatura radiante;
- Temperatura dell'aria.

L'andamento di queste temperature interne all'edificio è molto simile perché dipendono l'una dall'altra, ma soprattutto va a compensare l'andamento della temperatura esterna avvicinandosi le temperature di setpoint interno fissate. L'analisi dell'andamento delle temperature a livello di edificio non è utile per via della sua generalità, considera le temperature interne di tutti i locali, compresi i non riscaldati e ne fa una media, per cui non è possibile valutare se in determinate zone viene rispettata la temperatura di setpoint.

Nel terzo grafico è possibile valutare gli apporti e le dispersioni attraverso l'edificio. Anche in questo grafico spiccano gli apporti derivanti dall'impianto di riscaldamento ma non sono trascurabili i vari apporti derivanti dall'occupazione dall'illuminazione e soprattutto dall'elevata superficie finestrata. Il quarto e il quinto grafico mostrano rispettivamente L'andamento singolare del carico termico per il riscaldamento e l'andamento delle infiltrazioni d'aria durante il periodo preso in considerazione.

#### **4.2.1 // Analisi puntuale delle temperature dei vani**

Per valutare in maniera più decisa i risultati della simulazione è necessario fare delle verifiche puntuali sui locali in cui sono noti i dati di input, e quindi in cui si prevede un determinato comportamento in fase di simulazione. Analizzando per esempio un'aula si prevede un profilo delle temperature interne che nei periodi di occupazione raggiunga le temperature di setpoint prefissate. Si possono verificare anche i consumi in rapporto alla temperatura esterna e l'occupazione, e verificare la presenza di picchi di consumo nei mesi più rigidi.

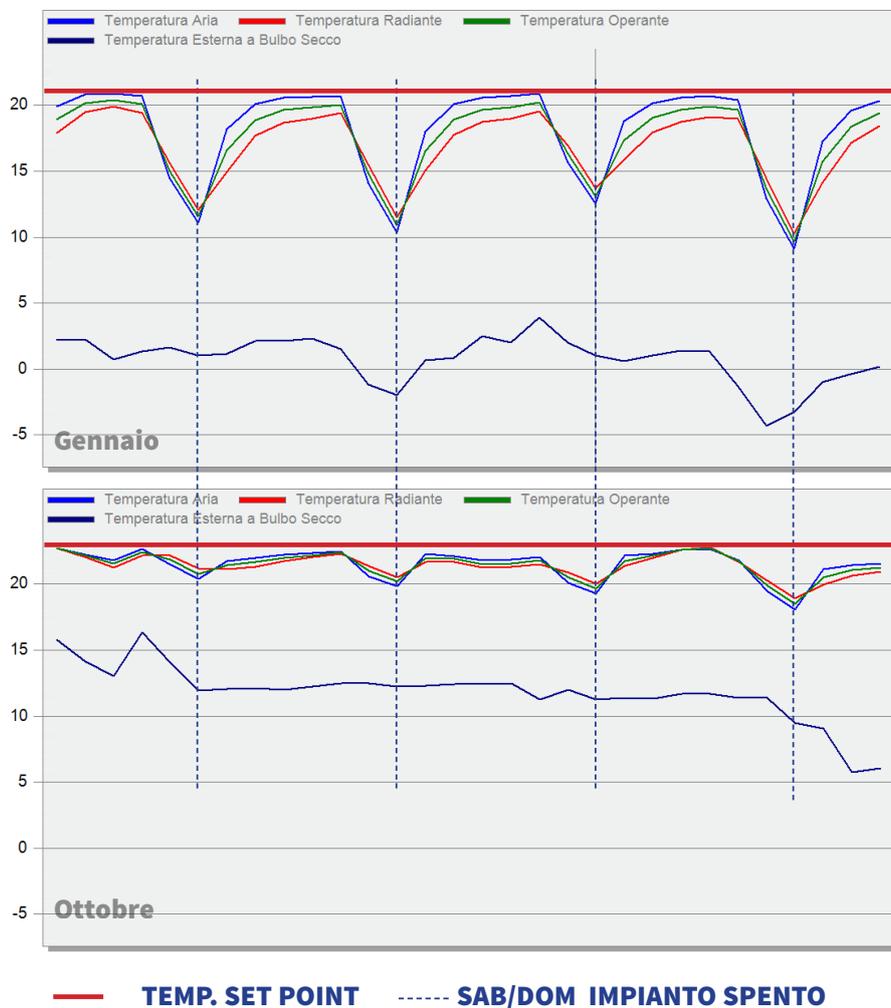


Fig.42: Andamento delle temperature in una aula (PT-035). Le fasi discendenti e i minimi dell'andamento del grafico rappresentano i giorni di spegnimento dell'impianto

Il grafico illustra l'andamento delle temperature all'interno di un aula generica dell'edificio. Si nota subito la differenza tra i due grafici che rappresentano l'uno il profilo delle temperature nel mese di Gennaio, l'altro il profilo delle temperature nel mese di Ottobre. L'andamento delle temperature interne di Ottobre è sicuramente più costante rispetto alle temperature interne simulate nel mese di Gennaio, in cui l'edificio risente delle basse temperature esterne. In Ottobre l'andamento costante è dato da delle condizioni esterne di temperatura relativamente alte che per buona parte del mese non richiedono il riscaldamento degli ambienti interni.

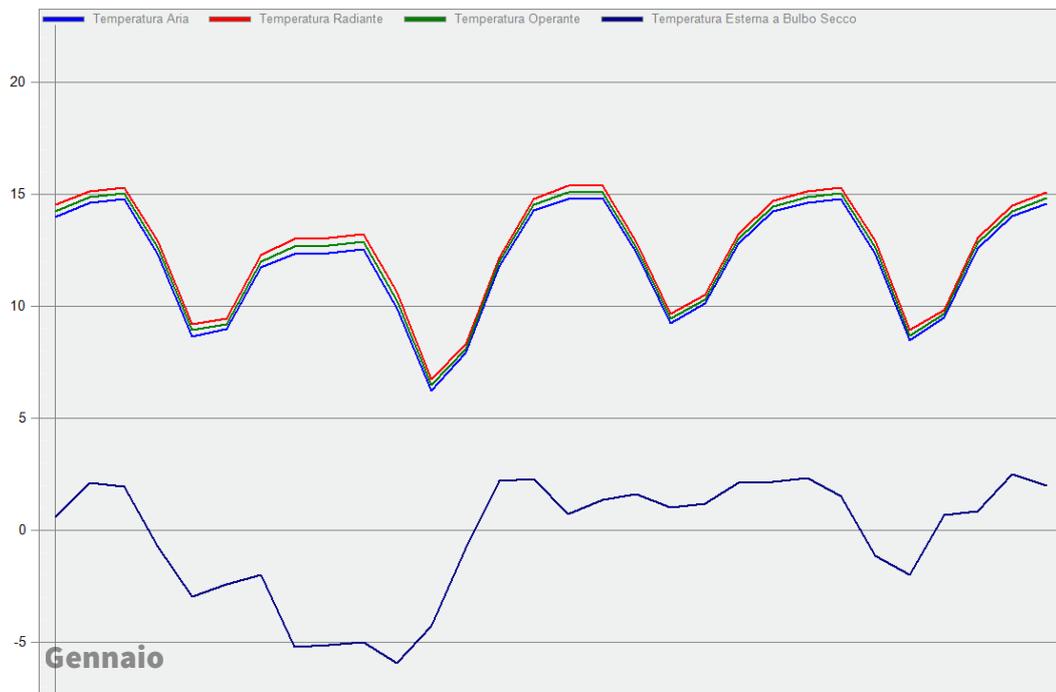


Fig.43: Grafico delle temperature all'interno del sottotetto

Un'altra importante considerazione si può fare per i locali non riscaldati, come nel caso dei sottotetti. Nel grafico si può notare come nel mese di gennaio, l'andamento delle temperature nel sottotetto subisca l'influenza degli apporti provenienti

dai locali sottostanti, infatti se i locali sottostanti non fossero riscaldati l'andamento delle temperature nel sottotetto sarebbe più lineare, presentando uno sfasamento solo di 5-6 C° dall'andamento delle temperature esterne.

I grafici delle temperature sono degli ottimi indicatori della buona riuscita di una simulazione, un grafico delle temperature interne con risultati accettabili implica anche una graficizzazione dei consumi coerenti.

#### 4.2.2 // Analisi delle dispersioni

Un ulteriore elemento di valutazione della buona riuscita di una simulazione è dato dai profili degli apporti termici. Esaminando i profili degli apporti termici ci si può fare un'idea di quanto l'edificio sia efficiente e della qualità degli involucri.

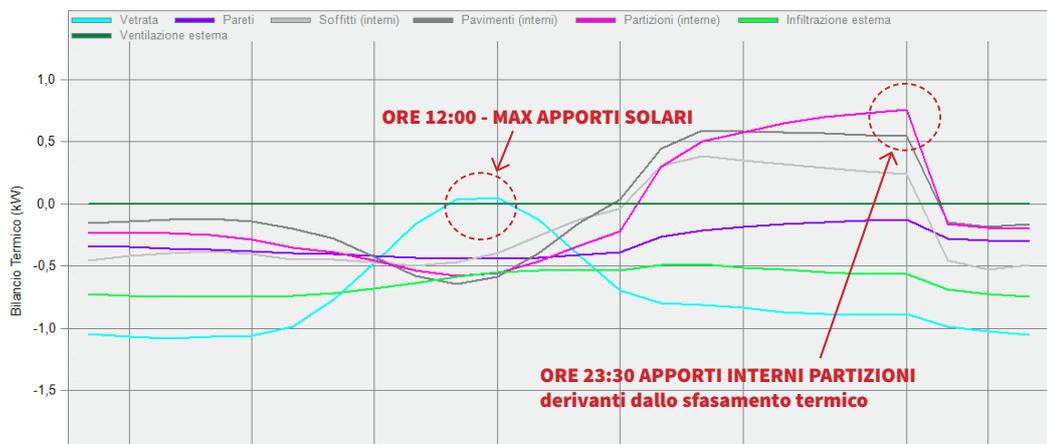


Fig.44: Grafico giornaliero (9 Gennaio) all'interno di un'aula (PT-035), sono apprezzabili i picchi degli apporti solari e degli apporti interni

Per gli apporti è molto interessante fare delle analisi di tipo giornaliero per poter apprezzare in maniera chiara i risultati ottenuti. Il grafico nella figura soprastante, rappresenta l'andamento degli apporti durante il 9 gennaio, si possono apprezzare

l'andamento dei vari grafici. In particolare si nota come la curva degli apporti solari gratuiti derivanti dai serramenti subisca un incremento considerevole intorno alle ore 12:00 del mattino. Il dato è assolutamente corretto, infatti essendo il locale considerato esposto a sud l'irradiazione solare è massima proprio in quella fascia oraria e di conseguenza è maggiore l'apporto solare che ne deriva.

Volendo quindi analizzare un'altra curva si può osservare l'andamento relativo agli apporti derivanti dalle pareti interne. Come si può notare questa subisce un incremento nella fascia oraria serale, anche questo andamento è spiegabile, infatti le murature interne finché dividono ambienti riscaldati alla stessa temperatura accumulano calore, nel momento in cui l'impianto di riscaldamento viene spento cominciano a rilasciare il calore accumulato in maniera graduale generando degli apporti termici all'interno del locale.

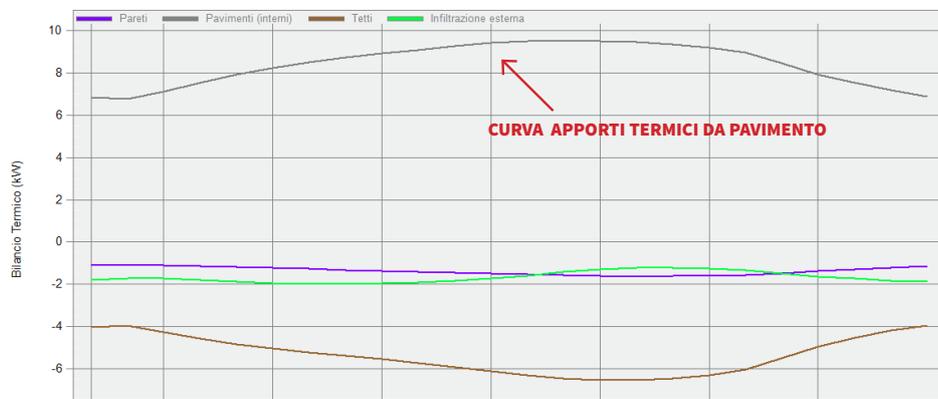


Fig.45: Grafico degli apporti termici del sottotetto: gli unici apporti apprezzabili sono generati dai pavimenti che confinano con ambienti riscaldati

Il grafico soprastante rappresenta l'andamento degli apporti termici per il sottotetto, si può notare come in questo locale tutte le curve hanno andamento negativo, e quindi si parla di dispersioni, queste vengono però bilanciate dagli apporti deri-

vanti dalle pavimentazioni, queste ultime confinanti con locali riscaldati.

### **4.3 // Metodi di validazione del modello**

La simulazione dinamica di un edificio esistente è un tema delicato, richiede assoluta precisione nella configurazione dei parametri e nella modellazione. Come precedentemente spiegato la comunicazione tra Revit e DesignBuilder, implica semplificazioni significative, che possono influire sulla buona riuscita delle simulazioni. E' fondamentale stabilire un metodo di validazione dei risultati basandosi su parametri noti. La validazione di un modello si può attuare utilizzando sensori di temperatura che monitorano durante un dato periodo di tempo le temperature all'interno dell'edificio, una volta creato il modello BEM e lanciata la simulazione dinamica e possibile confrontare l'andamento delle temperature monitorate con le temperature simulate. Questa è la procedura più efficace e affidabile per la validazione dei modelli.

Un'altra via percorribile e altrettanto valida è il confronto tra i consumi simulati e i consumi reali dell'edificio, che sono i dati più facilmente reperibili e utili alla validazione in assenza di sistemi di monitoraggio. Il caso studio esaminato disponeva inoltre di un importante documento di prestazione energetica, l'APE, che ha consentito di avere un confronto diretto e più generale del profilo dei consumi dell'edificio.

### **4.4 // Validazione dei consumi per il riscaldamento**

La fase di analisi precedentemente proposta, è fondamentale per capire se le simulazioni ottenute sono coerenti con i dati di input, consentono di comprendere

al meglio come si comporta l'edificio nella sua totalità e a livello puntuale. In assenza però di strumenti di monitoraggio come nel caso studio, l'unico dato che ha una valenza in termini di validazione del modello è il dato relativo al consumo. Per validare il modello mediante i consumi la via migliore è la validazione sulla base delle bollette energetiche mensili, in alternativa si può fare una comparazione diretta con documenti di prestazione energetica, se presenti.

#### 4.4.1 // Confronto con APE

Un primo confronto per la verifica dei consumi energetici simulati ha coinvolto il l'attestato di prestazione energetica recentemente rilasciato per l'edificio nell'anno 2017.

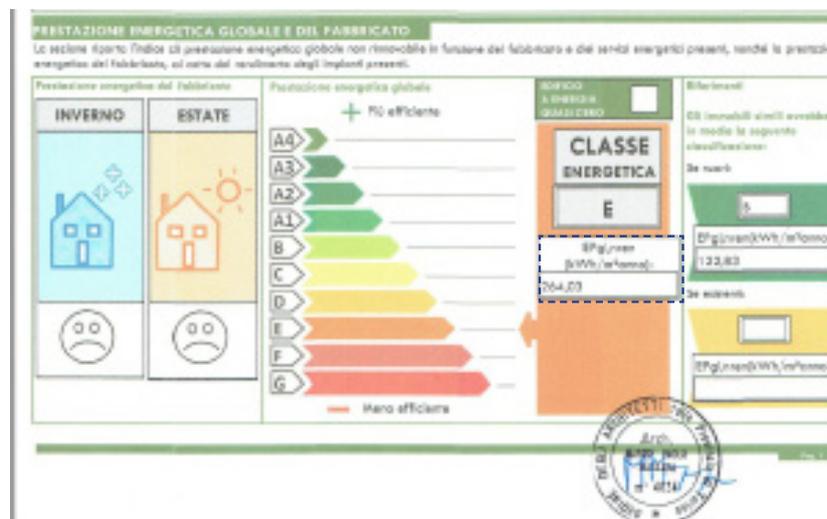


Fig.46: Attestato di prestazione energetica dell'edificio oggetto di studio

Un primo parametro reperibile all'interno dell'APE è il fabbisogno dell'edificio e la sua classificazione. L'edificio considerato ha classe energetica E e ha un consumo richiesto di 264.03 kWh m<sup>2</sup> annuo. Questo dato è subito confrontabile con i risultati

della simulazione, in cui già delle prime tabelle ritroviamo i valori di consumo energetico per edificio riscaldato e non riscaldato. Ovviamente nel nostro caso il valore da comparare è quello relativo all'edificio riscaldato, che nella simulazione è pari a 194.03 kWh m<sup>2</sup> annuo, ed è ricavato dalla sola stagione di riscaldamento. Si ritiene questo valore accettabile ai fini della validazione, infatti, nonostante si basi su una porzione dell'intero anno (la più dispendiosa) raggiunge già un valore molto vicino.

	Total Energy [kWh]	Energy Per Total Building Area [kWh/m2]	Energy Per Conditioned Building Area [kWh/m2]
Total Site Energy	466127.96	86.08	124.33
Net Site Energy	466127.96	86.08	124.33
Total Source Energy	730237.94	134.85	194.77
Net Source Energy	730237.94	134.85	194.77

Una seconda verifica è stata fatta considerando i consumi di gas metano dell'edificio necessari ad alimentare il sistema di riscaldamento. Dal documento di prestazione energetica risulta che il caso studio consuma per il riscaldamento dell'edificio 77.926 m<sup>3</sup> standard, si tratta di un'unità di misura utilizzata per quantificare i metri cubi di gas forniti all'impianto. I valori di consumo ottenuti dalla simulazione non sono confrontabili con quelli reali, perchè in DesignBuilder sono espressi in kWh. Per convertire i valori ottenuti dalla simulazione, espressi in kWh, in Sm<sup>3</sup> (metri cubi standard) si deve tenere conto che 1 Sm<sup>3</sup>= 10,944kWh.

Dalla simulazione l'edificio risulta aver consumato circa 33.000Sm<sup>3</sup>, meno della metà del consumo stimato all'interno dell'APE. L'errore relativo è vicino al 50%, motivo per cui è stato necessario effettuare dei controlli approfonditi su base mensile per verificare che il modello BEM non riportasse criticità nel dimensionamento dell'impianto di riscaldamento.

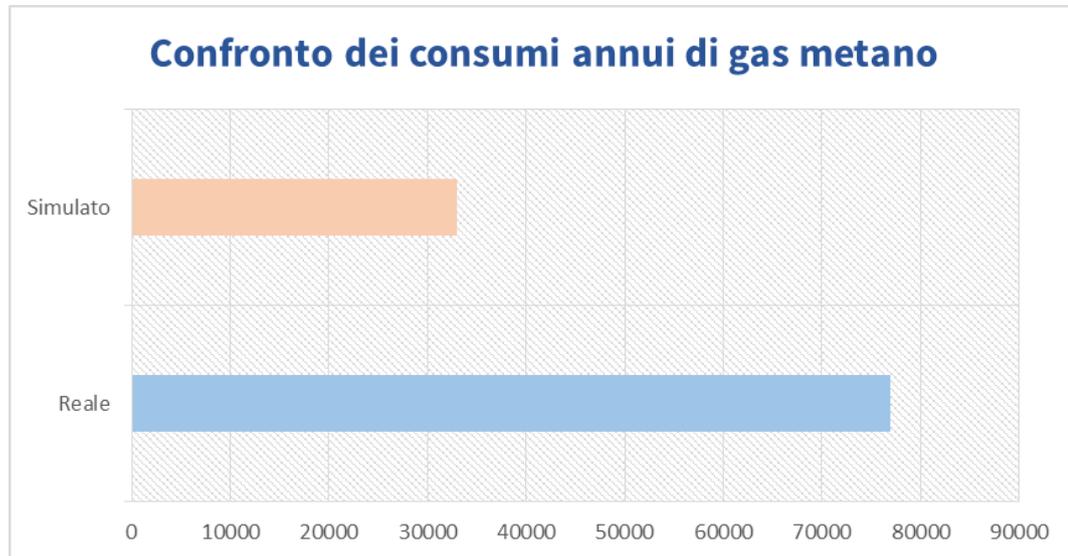


Fig.47: Grafico di confronto tra i consumi simulati e dei consumi riportati all'interno dell'APE

#### 4.4.2 // Comparazione con consumi di riscaldamento mensili

Il dato sul fabbisogno e quindi consumo di gas naturale annuo è un dato complessivo che in termini di comparazione anche se verificato ha poco valore. E' particolarmente interessante invece apprezzare l'andamento della curva dei consumi simulati, registrarne i valori mensili e compararli con le bollette reali dell'edificio. Nel caso studio di corso Vercelli 157 è stata effettuata questa comparazione, e i risultati ottenuti hanno ampiamente superato la prova di validazione, l'errore medio percentuale si aggira intorno al 3 %, e consente di affermare che il modello BEM è perfettamente in linea con il comportamento del manufatto reale. Nel grafico illustrato si può notare come nei mesi di aprile e ottobre i picchi di consumo si dimezzano improvvisamente, questo è dovuto al funzionamento dell'impianto limitato alla sola metà del mese di aprile e ottobre.

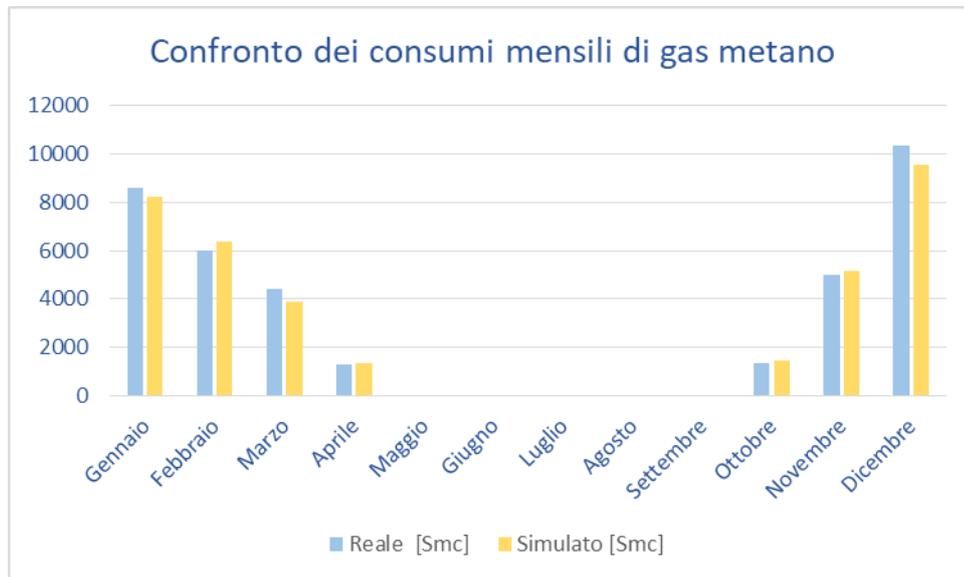


Fig.48: Confronto tra i consumi simulati e i consumi reali dell'edificio

	Consumo gas metano mensile			
	Reale [Smc]	Reale [kWh]	Simulato [Smc]	Simulato [kWh]
Gennaio	8599	85990	8220,5	82205
Febbraio	5999	59990	6357,9	63579
Marzo	1410	14100	1371,2	13712
Aprile	1282	12820	1338,6	13386
Maggio	0	0	0	0
Giugno	0	0	0	0
Luglio	0	0	0	0
Agosto	0	0	0	0
Settembre	0	0	0	0
Ottobre	1373	13730	1450,4	14504
Novembre	4979	49790	5144,3	51443
Dicembre	10355	103550	9579,8	95798
TOTALI	33997	339970	33462,7	334627

#### 4.5 // Validazione dei consumi elettrici

Per validare i consumi elettrici simulati è stato necessario fare riferimento alle

bollette energetiche provenienti dall'anno 2017. Il consuntivo mensile offre la stima dei kWh/m<sup>2</sup> medi misurati per l'edificio oggetto di studio, nello specifico i consumi elettrici si riferiscono sia ai consumi simulati per l'illuminazione e gli equipement interni, ma soprattutto ai consumi per gli ausiliari ai sistemi di riscaldamento. Una prima validazione dei consumi elettrici è stata ottenuta sempre mediante il confronto diretto con i valori contenuti all'interno dell'APE.

Prestazioni energetiche degli impianti e stima dei consumi di energia

	FONTI ENERGETICHE UTILIZZATE	Quantità annua consumata in uso standard (specificare unità di misura)	
<input checked="" type="checkbox"/>	Energia elettrica	69.417	kWh
<input checked="" type="checkbox"/>	Gas naturale	77.926	Sm <sup>3</sup>

Fig.49: Riassuntivo sui consumi elettrici dell'APE

Il consumo annuo totale di energia elettrica secondo l'attestato di prestazione energetica rileva un consumo totale annuo di 69.417 kWh per l'energia elettrica.

I consumi simulati sono circa 74.000 kWh, anche in questo caso si può ritenere soddisfacente il risultato della simulazione, per via dell'errore ridotto. Per avere un feedback sui risultati ottenuti è fondamentale fare anche dei confronti di tipo puntuale, per questo motivo sono state messe a confronto le bollette energetiche relative alla fornitura di corrente elettrica nell'anno 2017 con i consumi simulati mensilmente.

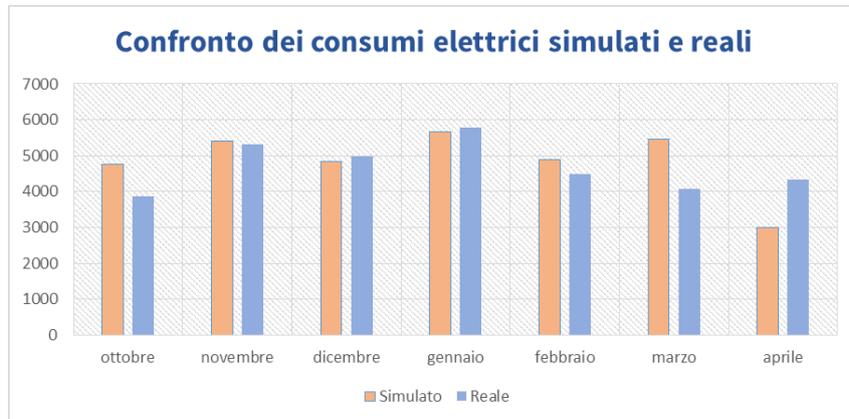


Fig.50: Grafico dei consumi elettrici mensili misurati nella stagione di riscaldamento

## **5 // Proposte di scenari di efficientamento energetico**

### **5.1 // Criticità dello stato attuale**

Validata la simulazione energetica del modello BEM dell'edificio oggetto di studio, si possono fare ulteriori considerazioni sul comportamento in termini energetici dell'edificio. Nelle simulazioni del BEM validato è possibile commentare in maniera più dettagliata e comprendere da vicino le criticità dell'edificio. Attualmente l'edificio è individuato dal Comune di Torino tra i più energivori. Da uno studio approfondito sulla causa di questi consumi elevati emergono 3 grandi criticità:

- Involucro non coibentato;
- Serramenti a vetro singolo e senza taglio termico;
- Ambienti voluminosi poco riscaldati;

Queste criticità incidono sul fattore di utilizzo e di consumo dell'intera batteria di caldaie a gas predisposte per il riscaldamento. Queste devono funzionare in maniera continuata per tutto il tempo di occupazione dell'edificio, e per riscaldare l'ambiente e prepararlo all'apertura giornaliera devono azionarsi alla mezzanotte, restando quindi attive 17 h su 24.

La presenza di termo valvole garantisce una gestione più controllata degli ambienti interni, ma vista la notevole dispersività dell'involucro sono rare le condizioni per cui si abbia una riduzione del carico termico sull'impianto.

### 5.1.1 // Involucro verticale non coibentato

Si è ricavato per la realizzazione di un modello semplificato una trasmittanza equivalente, nella realtà abbiamo evidenziato diverse tipologie stratigrafiche. Le murature di involucro che caratterizzano le aule e gli uffici sono le più disperdenti, hanno uno spessore di 17 cm e non sono coibentate, perché su di esse sono posati i serramenti a nastro e sotto la soglia del serramento risiedono i radiatori. Va ricordato che essendo il caso studio un edificio scolastico gli spazi adibiti ad aule scolastiche e segreterie costituiscono il 70 % della superficie utile.



Fig.51: Esempio delle discontinuità geometriche delle pareti

Dalle analisi energetiche risulta che in media un aula da 45 m<sup>2</sup> e capienza 25 alunni, disperde nel mese di gennaio, solo per mezzo dell'involucro verticale circa 5 KWh

di energia termica, facendo un confronto immediato, ogni aula è fornita di circa 18 kW di potenza termica, quasi il 30 % della potenza termica fornita al vano viene disperso per mezzo delle pareti, la restante parte è dispersa per mezzo dei serramenti, i maggiori responsabili delle dispersioni termiche.

Murature di questo tipo risultano un pericolo evidente in caso di sisma, un'evidente problematica per un edificio pubblico viste le normative restrittive sugli adeguamenti sismici.

### 5.1.2 // Serramenti a vetro singolo



*Fig.52: Esempio della complessità dei serramenti e vista prospettica di un'ala dell'edificio*

Le superfici vetrate sono l'elemento caratterizzante del caso studio, non soltanto a livello architettonico soprattutto a livello energetico. Le tecnologie dei serramenti dell'epoca sono ormai fuori norma, per la sicurezza degli occupanti (la normativa richiede che siano stratificati) e per l'alto tasso dispersivo che inducono. La struttura del serramento è inoltre molto complessa e presenta numerosi montanti e traversi, che essendo in ferro e privi di una sezione con taglio termico incidono in negativa sulla trasmittanza totale che come illustrato in precedenza è di circa  $6 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

I valori standard in questo momento secondo normativa nazionale richiedono un minimo di  $1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ , quindi anche a livello energetico la tecnologia di serramenti attualmente presente in corso Vercelli 157 è da ritenersi fuori norma. In termini di dispersioni se si vuole fare un ragionamento analogo a quello fatto per le murature, si osserva che i serramenti in un generico vano/aula dell'edificio disperdono circa 13 kWh di energia termica quasi il 70 % dell'energia termica fornita dal riscaldamento centralizzato per singolo vano.

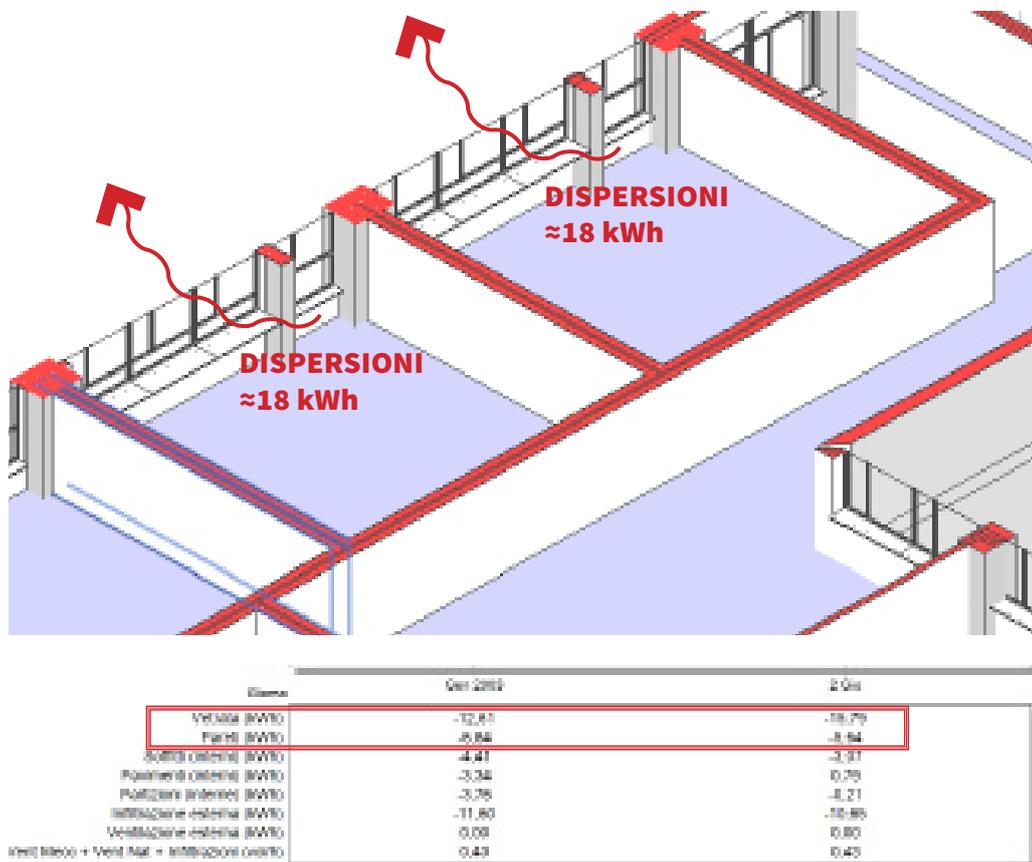
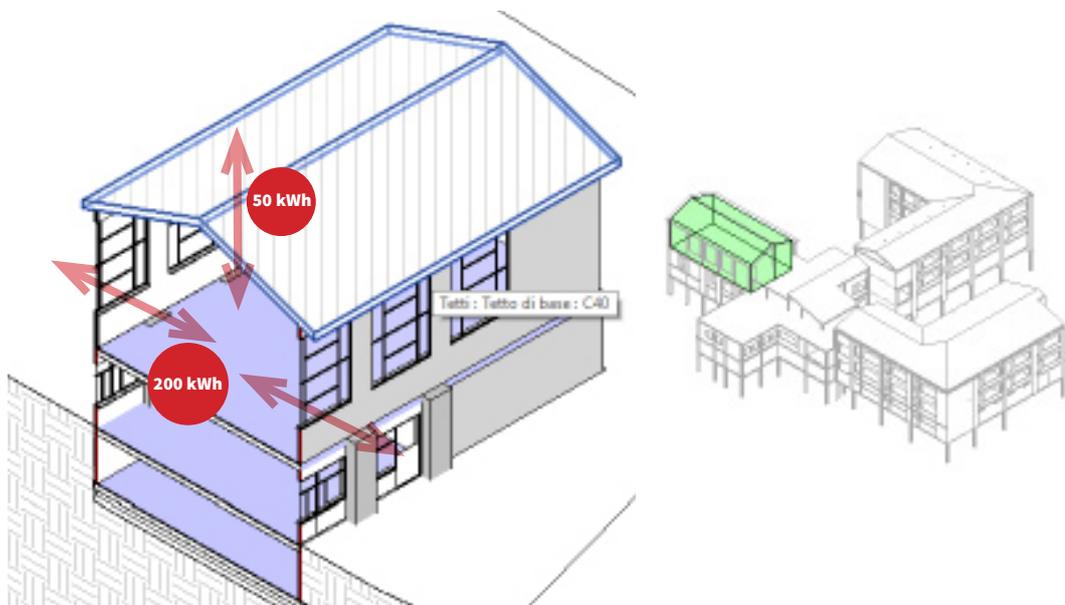


Fig.53: Indice di dispersione attraverso le chiusure verticali confinanti con l'esterno (finestre e murature)

### 5.1.3 // Volumi ad alto tasso disperdente

Osservando le simulazioni si possono individuare i volumi che più incidono sulle dispersioni globali dell'edificio. Il blocco palestra/ mensa è la parte dell'edificio che viene utilizzata solo per alcune frazioni della giornata, ma è comunque riscaldato dalla stessa batteria di caldaie. Nel vano palestra ritroviamo la stessa tipologia di murature descritte in precedenza, e in questo caso le dispersioni sono elevatissime, perché a un ambiente voluminoso corrisponde una elevata superficie disperdente, inoltre la palestra è a diretto contatto con l'ambiente esterno per via del tetto non controsolfittato.



Descrizione	01/01/2020	01/01/2020
Vetrate (kWh)	-78,50	-88,87
Pareti (kWh)	-129,29	-113,03
Pavimenti (interni) (kWh)	5,98	23,53
Partizioni (interni) (kWh)	0,45	1,53
Tetti (kWh)	-49,27	-49,38
Infiltrazione esterna (kWh)	-34,72	-77,98
Ugelli Miscel + Vent. Miscel + Infiltrazioni (voci)	0,43	0,43

Fig.54: Indicazione delle dispersioni attraverso le superfici d'involucro della palestra, le stesse vengono indicate anche nella tabella estratta da DesignBuilder nella visualizzazione dei risultati giornalieri

Per mantenere le condizioni di comfort in un ambiente come la palestra l'impianto

to di riscaldamento deve impiegare un quantitativo di energia elevatissimo, il carico termico di questo vano è di circa 300 kWh giornalieri. Analizzando il grafico dei consumi del locale palestra si può notare che il consumo totale del mese di Gennaio è di circa 7.900 kWh, circa il 10 % del consumo mensile di riscaldamento totale dell'edificio, per fare un confronto immediato basti pensare che un locale generico come un aula consuma nel mese di Gennaio circa 790 kWh, ovvero l'1% .

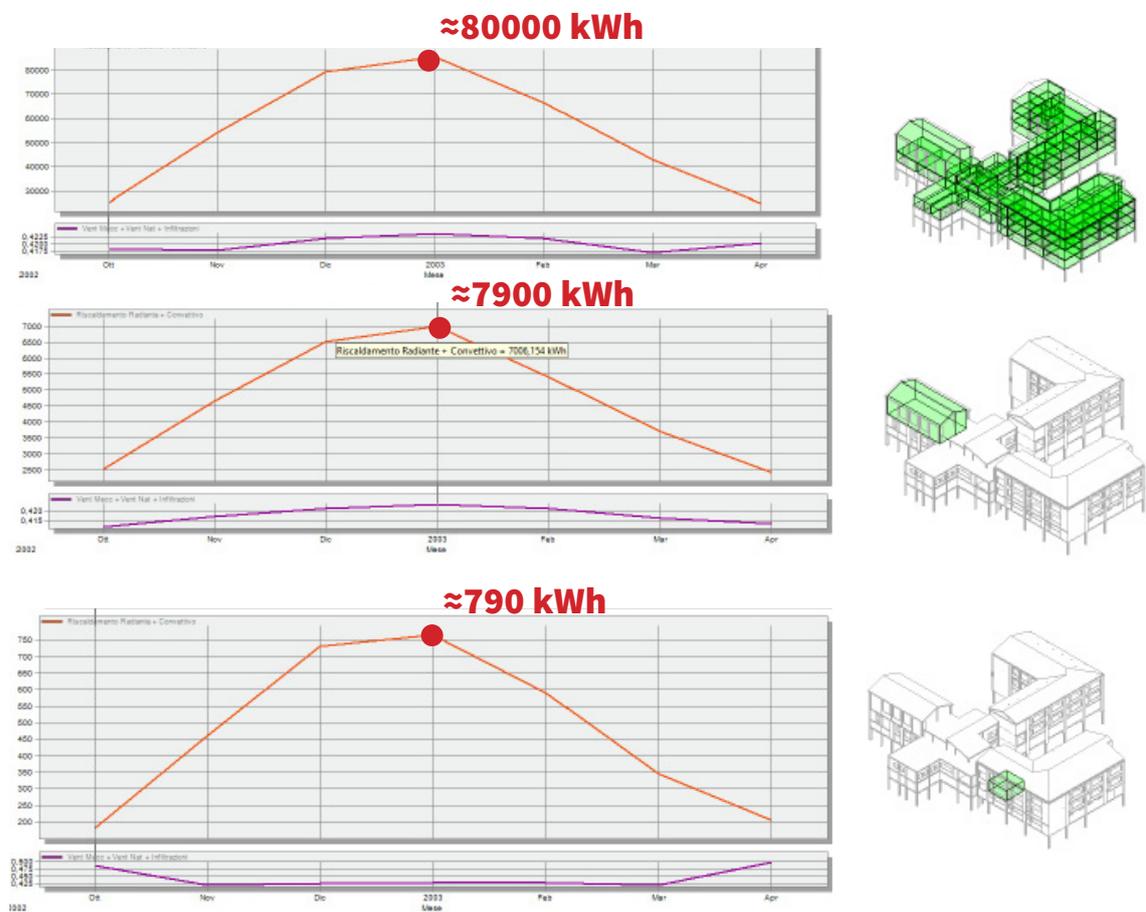


Fig.55: Consumo mensile dell'edificio rapportato ai consumi di una generica aula e del vano palestra

## 5.2 // Possibili scenari di miglioramento

Sulla base delle considerazioni fatte sullo stato attuale dell'edificio oggetto di studio si possono ipotizzare diversi scenari di miglioramento da proporre al comune di Torino come soluzione per l'adeguamento energetico dell'edificio.

I diversi scenari si valutano in termini di riduzione dei consumi energetici ma soprattutto in termini di costi e finanziamenti per la loro realizzazione.

### Scenario 1

L'elemento costruttivo più dannoso per il consumo energetico è chiaramente il serramento, per la sua struttura ormai datata e per lo stato manutentivo in cui versa, infatti oltre alle dispersioni attraverso le superfici vanno indicate le innumerevoli dispersioni dovute alle infiltrazioni, causate dalla bassa tenuta degli stessi.



Fig.56: Il grafico illustra i totali delle dispersioni misurate a livello di edificio. Si possono evidenziare le criticità relative ai serramenti.

Risulta quindi imprescindibile, la scelta di sostituire i serramenti in un'ottica di miglioramento energetico.

### Scenario 2

Altro dettaglio fondamentale che deriva dalla lettura di questo grafico sono le dispersioni derivanti dagli involucri verticali a spessore ridotto. Sicuramente la so-

luzione che propone la sola sostituzione dei serramenti può indurre benefici all'edificio riducendone le dispersioni, ma l'impatto sui consumi non è efficace se questa miglioria non viene adoperata assieme alla realizzazione di un cappotto.

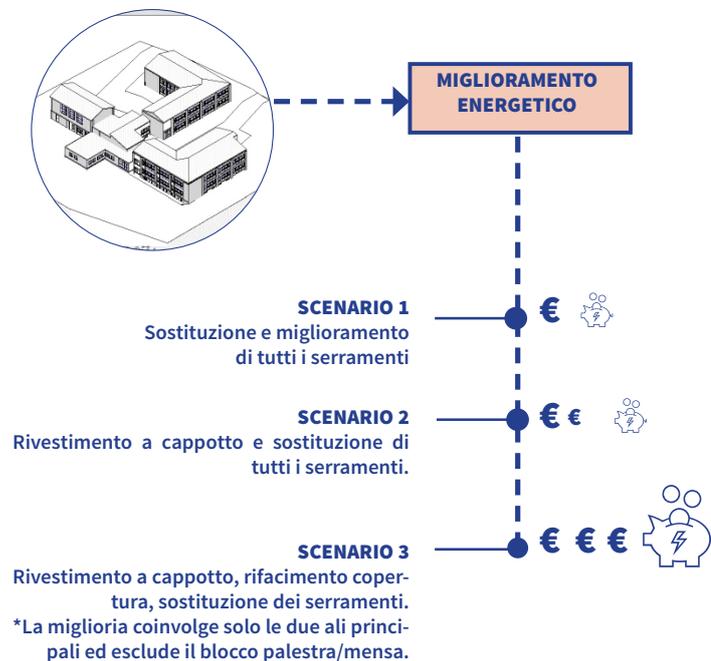
### **Scenario 3**

Le soluzioni migliorative inoltre possono essere valutate sull'intero edificio o su una parte di esso. Dalla precedente analisi risulta evidente come il blocco palestra a causa del suo volume e della sua morfologia sia uno degli ambienti più dispersivi all'interno dell'edificio, oltre ad essere il meno utilizzato.

In un terzo scenario possibile, infatti, si può prevedere di stralciare in due fasi principali l'intero adeguamento energetico. L'idea è quella di mantenere allo stato attuale il blocco palestra/mensa e lavorare sull'adeguamento energetico dei due blocchi aule e dell'area uffici, isolandoli termicamente dal volume più dispersivo del complesso.

L'intervento di adeguamento energetico così proposto include :

- rivestimento a cappotto;
- coibentazione delle coperture;
- sostituzione dei serramenti.



La diverse soluzioni sono state valutate in maniera spanometrica ragionando con valori di massima basati sui m<sup>2</sup> ricavati dal modello BIM. I primi due scenari in termini di spesa sono facilmente affrontabili dalla Committenza ma non garantiscono il salto di qualità in termini di consumi energetici, perché lavorando sull'intero edificio si lavora con un basso tasso di miglioramento, per rimanere in linea con i costi. Il terzo scenario consta un investimento più oneroso ma garantisce una riduzione dei costi più consistente. Resta comunque la problematica relativa al costo dell'intervento. Tuttavia consentirebbe di raggiungere l'obiettivo di miglioramento energetico, garantendo il salto di classe energetica. Stralciando l'intervento si può puntare ai finanziamenti per l'efficientamento energetico, lavorando però con standard e parametri tecnici elevati. Questo consentirebbe possibilmente di dimezzare la spesa dell'intervento, e dedicare la fase successiva alla realizzazione di un nuovo nucleo mensa/palestra, più funzionale e accessibile.

### **5.3 // Accesso ai fondi del GSE**

Lo scenario prescelto prevede un investimento importante, ma esistono diverse soluzioni di finanziamento che supportano azioni di efficientamento energetico. Una soluzione particolare su cui ci vuole concentrare nell'ambito di questo studio fa riferimento ai finanziamenti provenienti dal GSE.

Il GSE (Gestore dei servizi energetici GSE S.p.A.) è una società per azioni italiana, controllata dal Ministero dell'Economia e delle Finanze, e gestisce tutti gli incarichi pubblici nel settore energetico. L'accesso ai finanziamenti del GSE è normato da bandi con requisiti differenziati per regione, e i finanziamenti variano in base alla zona climatica. La modalità prescelta per il caso studio è il "Conto termico", consiste nell'incentivazione per la produzione di energia termica da fonti rinnovabili e per interventi di efficienza energetica per l'amministrazione pubblica. Il Conto Termico prevede incentivi che variano dal 40% al 65% della spesa sostenuta.

Nello specifico:

- fino al 65% per la demolizione e ricostruzione di edifici a energia quasi zero (nZEB);
- fino al 40% per gli interventi di isolamento delle pareti e coperture, per la sostituzione di chiusure finestrate con altre più efficienti, per l'installazione di schermature solari, per la sostituzione dei corpi illuminanti, per l'installazione di tecnologie di building automation e per la sostituzione di caldaie tradizionali con caldaie a condensazione;
- fino al 50% per gli interventi di isolamento termico nelle zone climatiche E/F e fino al 55% nel caso di isolamento termico e sostituzione delle chiusure finestrate, se abbinati ad altro impianto (caldaia a condensazione, pompe di calore, solare termico);

- fino al 65% per la sostituzione di impianti tradizionali con impianti a pompe di calore, caldaie e apparecchi a biomassa, sistemi ibridi a pompe di calore e impianti solari termici.

Il Conto Termico è inoltre cumulabile con altri incentivi di natura non statale.

### **5.3.1 // Requisiti tecnici per l'accesso agli incentivi**

In riferimento al bando scaricabile gratuitamente dal sito del GSE, il nostro edificio ricade nella categoria 1. Si riporta di seguito un estratto di quanto espressamente dichiarato nel bando:

*Tipologie degli interventi incentivabili*

*All'articolo 4, il Decreto classifica gli interventi in due Categorie:*

- 1. interventi di incremento dell'efficienza energetica in edifici esistenti (art. 4, comma 1);*
- 2. interventi di piccole dimensioni di produzione di energia termica da fonti rinnovabili e di sistemi di alta efficienza in edifici esistenti (art. 4, comma 2).*

*Gli interventi di incremento dell'efficienza energetica (Cat. 1) e gli interventi di piccole dimensioni di produzione di energia termica da fonti rinnovabili e di sistemi di alta efficienza in edifici esistenti (Cat. 2) devono essere realizzati in edifici esistenti, parti di edifici esistenti o unità immobiliari esistenti di qualsiasi categoria catastale, ad esclusione di quelli in costruzione (categoria F/3), dotati di impianto di climatizzazione e devono riguardare:*

*Categoria 1:*

- a) isolamento termico di superfici opache delimitanti il volume climatizzato;***
- b) sostituzione di chiusure trasparenti comprensive di infissi delimitanti il volume climatizzato;***

c) sostituzione di impianti di climatizzazione invernale esistenti con impianti di climatizzazione invernale utilizzanti generatori di calore a condensazione;

**d) installazione di sistemi di schermatura e/o ombreggiamento di chiusure trasparenti con esposizione da Est-Sud-Est a Ovest, fissi o mobili, non trasportabili;**

e) trasformazione degli edifici esistenti in «edifici a energia quasi zero»;

f) sostituzione di sistemi per l'illuminazione d'interni e delle pertinenze esterne degli edifici esistenti con sistemi efficienti di illuminazione;

g) installazione di tecnologie di gestione e controllo automatico (building automation) degli impianti termici ed elettrici degli edifici.

La categoria 2 si riferisce in maniera più dettagliata alle componenti impiantistiche per il riscaldamento dell'acqua e degli ambienti, ma il caso studio non necessita miglioramenti di questo tipo vista la recente installazione di caldaie a condensazione. Successivamente nel bando viene esplicitato "Gli incentivi per gli interventi di incremento dell'efficienza energetica, (Categoria 1), sono riservati agli edifici di proprietà delle Amministrazioni Pubbliche.", a maggior conferma della finanziabilità dell'opera.

**Tabella 6 - Chiusure trasparenti: valori limite massimi di trasmittanza termica**

[Tabella 1 – Allegato I – DM 16.02.16]		
Tipologia di intervento	Requisiti tecnici di soglia per la tecnologia	
Sostituzione di chiusure trasparenti, comprensive di infissi (calcolato secondo le norme UNI ENISO 10077-1), se installate congiuntamente a sistemi di termoregolazione o valvole termostatiche ovvero in presenza di detti sistemi al momento dell'intervento	Zona climatica A	≤ 2,60 W/m <sup>2</sup> K
	Zona climatica B	≤ 2,60 W/m <sup>2</sup> K
	Zona climatica C	≤ 1,75 W/m <sup>2</sup> K
	Zona climatica D	≤ 1,67 W/m <sup>2</sup> K
	Zona climatica E	≤ 1,30 W/m <sup>2</sup> K
	Zona climatica F	≤ 1,00 W/m <sup>2</sup> K

[Tabella 1 - Allegato 1 - DM 18.07.18]		
Tipologia di intervento	Requisiti tecnici di soglia per la tecnologia	
Strutture opache orizzontali: isolamento coperture	zona climatica A	≥ 0,27 W/m <sup>2</sup> /K
	Zona climatica B	≥ 0,27 W/m <sup>2</sup> /K
	zona climatica C	≥ 0,27 W/m <sup>2</sup> /K
	Zona climatica D	≥ 0,23 W/m <sup>2</sup> /K
	<b>zona climatica E</b>	<b>≥ 0,20 W/m<sup>2</sup>/K</b>
	Zona climatica F	≥ 0,19 W/m <sup>2</sup> /K
Strutture opache orizzontali: isolamento pavimenti	zona climatica A	≥ 0,48 W/m <sup>2</sup> /K
	Zona climatica B	≥ 0,40 W/m <sup>2</sup> /K
	Zona climatica C	≥ 0,30 W/m <sup>2</sup> /K
	zona climatica D	≥ 0,28 W/m <sup>2</sup> /K
	<b>Zona climatica E</b>	<b>≥ 0,25 W/m<sup>2</sup>/K</b>
	zona climatica F	≥ 0,21 W/m <sup>2</sup> /K
Strutture opache verticali: isolamento pareti perimetrali	Zona climatica A	≥ 0,50 W/m <sup>2</sup> /K
	zona climatica B	≥ 0,48 W/m <sup>2</sup> /K
	zona climatica C	≥ 0,40 W/m <sup>2</sup> /K
	Zona climatica D	≥ 0,28 W/m <sup>2</sup> /K
	<b>zona climatica E</b>	<b>≥ 0,21 W/m<sup>2</sup>/K</b>
	Zona climatica F	≥ 0,21 W/m <sup>2</sup> /K

Gli incentivi vengono erogati ogni qualvolta uno di questi requisiti viene rispettato, per esempio non è obbligatorio effettuare un efficientamento di copertura murature e pavimenti esterni, ogni miglioria viene incentivata e valutata in forma separata secondo lo schema indicato in tabella. Inoltre gli edifici nella fascia E ,hanno diritto a una maggiorazione del 10 % dell'incentivo, con un finanziamento finale del 50% del costo totale dell'intervento.

**Tabella 5 - Strutture opache: valori necessari per il calcolo dell'incentivo**

[Tabella 5 – Allegato II - DM 16.02.16]				
Tipologia di intervento	Percentuale incentivata della spesa ammissibile (% <sub>spesa</sub> )	Costo massimo ammissibile (C <sub>max</sub> )	Valore massimo dell'incentivo (I <sub>max</sub> ) [€]	
<b>i. Strutture opache orizzontali<sup>13</sup>: isolamento coperture</b>				
Esterno	40 (*) (**)	200 €/m <sup>2</sup>	(I <sub>max</sub> ) ≤ 400.000	
Interno	40 (*) (**)	100 €/m <sup>2</sup>		
Copertura ventilata	40 (*) (**)	250 €/m <sup>2</sup>		
<b>ii. Strutture opache orizzontali: isolamento pavimenti</b>				
Esterno	40 (*) (**)	120 €/m <sup>2</sup>		
Interno	40 (*) (**)	100 €/m <sup>2</sup>		
<b>iii. Strutture opache verticali: isolamento pareti perimetrali</b>				
Esterno	40 (*) (**)	100 €/m <sup>2</sup>		
Interno	40 (*) (**)	80 €/m <sup>2</sup>		
Parete ventilata	40 (*) (**)	150 €/m <sup>2</sup>		

(\*) Per interventi realizzati nelle zone climatiche E e F la percentuale incentivata della spesa ammissibile è pari al 50%.

(\*\*) Per interventi che prevedano, oltre all'isolamento termico delle superfici opache, almeno un intervento, a scelta, tra le tipologie 1.C, 2.A, 2.B, 2.C, 2.E, la percentuale incentivata della spesa ammissibile è pari al 55%.

**Tabella 7 - Chiusure trasparenti: valori necessari per il calcolo dell'incentivo**

[Tabella 5 – Allegato II - DM 16.02.16]			
Tipologia di intervento	Percentuale incentivata della spesa ammissibile (% <sub>spesa</sub> )	Costo massimo (C <sub>max</sub> )	Valore massimo dell'incentivo I <sub>max</sub> [€]
Sostituzione di chiusure trasparenti, comprensive di infissi, se installate congiuntamente a sistemi di termoregolazione o valvole termostatiche ovvero in presenza di detti sistemi al momento dell'intervento	40 (**)	350 €/m <sup>2</sup> per le zone climatiche A, B, C	75.000
	40 (**)	450 €/m <sup>2</sup> per le zone climatiche D, E, F	100.000

(\*\*) Per interventi che prevedano, oltre alla sostituzione di chiusure trasparenti (1.B), anche l'isolamento termico delle superfici opache (1.A) e almeno un intervento, a scelta, tra le tipologie 1.C, 2.A, 2.B, 2.C, 2.E, la percentuale incentivata della spesa ammissibile è pari al 55%.

Fig.57: In figura vengono evidenziate le percentuali di finanziamento per la zona E

## 5.4 // Soluzioni tecniche per l'efficientamento energetico

Stabilito lo scenario di riferimento e le modalità di recupero dei finanziamenti, è possibile definire gli aspetti tecnici dei lavori di efficientamento energetico.

Si prevede di ottenere un miglioramento dell'involucro attraverso le seguenti azioni:

- realizzazione di un cappotto sismico, rasato;

- sostituzione dei serramenti con telai a taglio termico e vetrocamera;
- coibentazione del sottotetto.

L'intervento è rivolto al miglioramento delle due ali principali del complesso scolastico, in questa prima fase verranno escluse la palestra e l'area uffici e segreterie per le quali verrà proposto un scenario di demolizione e ricostruzione.

#### 5.4.1 // Cappotto sismico

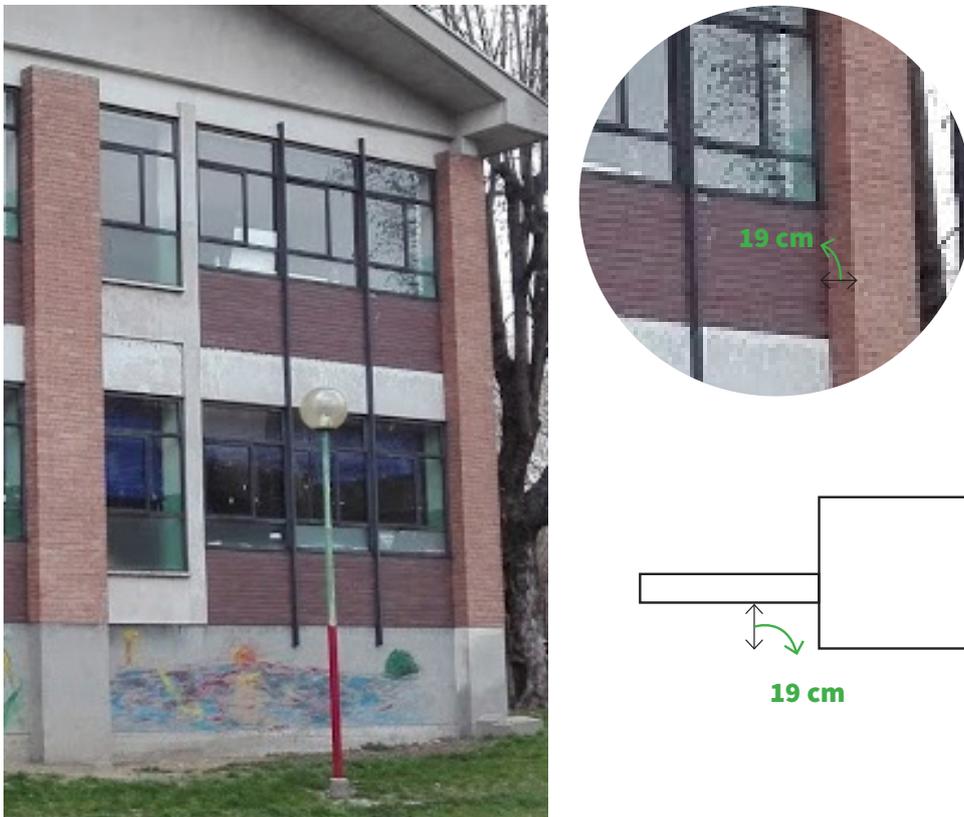


Fig.58: Esempio del delta murario disponibile per la realizzazione di cappotto sismico

Gli involucri verticali verranno rivestiti con un cappotto sismico in eps grafitato, andando a compensare la risega generata tra la muratura e i pilastri presenti in

facciata. La soluzione di un cappotto sismico sfrutta l'esigenza dell'efficientamento energetico per adeguare sismicamente l'edificio, che come evidenziato in precedenza con il ridotto spessore delle sue murature perimetrali risulta particolarmente a rischio in caso di sisma.

Per la realizzazione di un cappotto sulle facciate dell'edificio sono disponibili 19 cm. In questi 19 cm va tenuto conto che 1/2 cm devono essere lasciati come margine di ritiro rispetto il filo esterno dei pilasti, quindi l'aumento effettivo di spessore per le pareti è di 17 cm. In uno spessore di 17 cm è possibile gestire la stratigrafia di un cappotto sismico tipo quello proposta dalla rofix con :

- rete biassiale ,
- calce sisma;
- eps garfitato;
- rasatura con intonaco fino.



Il GSE per finanziare fornitura e posa del sistema a cappotto richiede che la soluzione porti la trasmittanza dell'involucro a 0,23 W/m<sup>2</sup>K. Per verificare che la soluzione descritta sono state ricalcolate le trasmittanze ottenendo risultati prestazionali al di sopra degli standard richiesti.

## 5 // Proposte di scenari di efficientamento energetico

Ordine	DESCRIZIONE DELLO STRATO (dall'interno all'esterno)	s (mm)	C (W/m²K)	M.V. (Kg/m²)	Px10 <sup>10</sup> (Kg/msPa)	R (m²K/W)
	Adduttanza interna		7.7			0.13
1	Intonaco di calcè e gesso	10	0.7000	1400	18.00	0.014
2	Tavelloni in laterizio per divisori	150	0.3640	1800	20.57	0.412
3	Piastrelle	10	1.0000	2300	0.94	0.01
4	Malta di cemento	20	1.4000	2000	8.50	0.014
5	Polistirene espanso con graffile-EPS (lastre stampate)	140	0.0330	30	3.15	4.242
	Adduttanza esterna		25.0		<b>PACCHETTO CAPPOTTO SISMICO</b>	0.04

s = Spessore dello strato, C = Conduttività termica del materiale, M.S. = Massa superficiale, P = Permeabilità al vapore, R = Resistenza termica

Trasmittanza (W/m²K): **0.206** < 0.3 (Valore di legge)

Massa superficiale (Kg/m²): **351**

Resistenza termica (m²K/W): **4.863**

Spessore totale (mm): **330**

Il valore della trasmittanza (0.206) è all'interno dei termini di legge (0.3)

Comune di Torino  
Zona Climatica: E, Gradi Giorno 2017

T interna (°C): **20.0**

T esterna (°C): **-8.0**

U interna (%): **52.0**

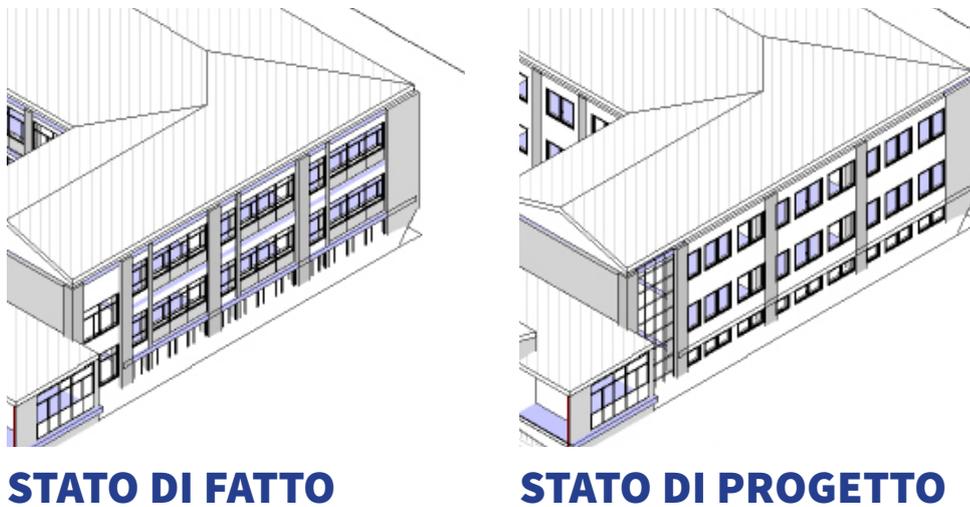
U esterna (%): **44.4**

Fig.59: Verifica della trasmittanza tramite l'applicativo di pontarolo engineering produttore di eps

### 5.4.2 // Serramenti a taglio termico

Si ipotizza di sostituire i serramenti con dei telai shueco aws75 si a taglio termico . Il nuovo serramento è composto dal telaio shueco, e doppio vetro con camera da 20 mm. Queste caratteristiche consentono di raggiungere una trasmittanza del serramento totale di 1,2 W/m²K.

Le geometrie del serramento verranno semplificate in maniera drastica per ridurre al minimo i ponti termici, i telai proposti sono ad anta doppia o singola apribili entrambe a vasistas o verso l'interno, con una percentuale di apertura pari al 30 % per ragioni di sicurezza. Il vetro verso l'esterno sarà realizzato con un vetro stratificato per garantire gli standard di sicurezza richiesti dalla normativa.



*Fig.60: Nell'immagine è possibile notare la notevole semplificazione dei serramenti in facciata*

Nei vani scale verranno demoliti i serramenti e le murature e verranno realizzate delle facciate vetrate. Questa soluzione consentirà di aumentare gli apporti solari nel vano scale nella stagione di riscaldamento e aumentare il volume di ventilazione durante le stagioni più calde, oltre che a ridurre i consumi per illuminazione.

#### **5.4.3 // Sistema di frangisole integrato**

Nello stato di fatto è stata rilevata la presenza di veneziane interne poco efficaci perché ridotte in pessimo stato o non funzionanti. Va segnalato inoltre che essendo questi elementi in alluminio aumentano la pericolosità per i soggetti occupanti.

Gli standard di miglioramento energetico stabiliti nel GSE offrono incentivi anche per la fornitura e posa di sistemi oscuranti, motivo per cui nell'ambito di questo efficientamento energetico si è deciso di intervenire anche sui sistemi di schermatura solare sulle facciate sud dell'edificio. Sono stati scelti dei sistemi di schermatura integrabili nella camera del vetro del serramento tipo Pellini screen line, questo si-

stema favorisce una maggiore durabilità di questi elementi oltre una riduzione dei costi di manutenzione degli stessi riducendo al minimo la manutenzione ordinaria di pulizia delle lamelle.



*Fig.61: Stato attuale dei serramenti e possibile miglioramento proposto*

#### **5.4.4 // Coibentazione del sottotetto**

In merito alle coperture non si dispongono di molte informazioni, ma da un'attenta analisi dello stato di fatto non vi è traccia di infiltrazione e la copertura metallica delle falde attualmente presenta sembra versi in ottimo stato. Per ridurre le dispersioni verso l'esterno attraverso al copertura si è scelta una soluzione molto semplice e economica, ma altamente efficace. I vani di sottotetto non sono riscaldati quindi, anche migliorando la trasmittanza termica della copertura a falde non sarebbe possibile risolvere le problematiche derivanti dallo scambio termico tra due ambienti a diversa temperatura. In quest'ottica si è scelto di coibentare il pavimento di sottotetto non calpestabile, con materassini in lana di roccia da 16 cm ottenendo la trasmittanza di  $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$  richiesta dal GSE per il finanziamento.

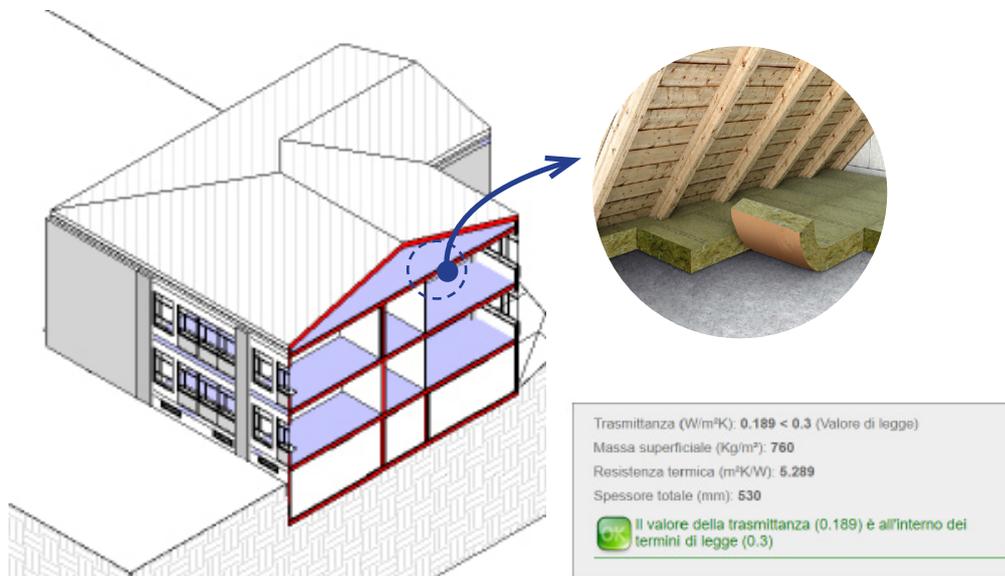


Fig.62: Soluzione di coibentazione del sottotetto con lana di roccia

## 5.5 // Simulazione energetica dello scenario di efficientamento

Per valutare e prevedere l'impatto di questo miglioramento energetico è stato utilizzato il modello BEM creato in precedenza mantenendo invariate le condizioni dell'impianto, i profili di occupazione dell'edificio, ecc. Sono state modificate solo le stratigrafie delle coperture, le caratteristiche tecniche dei serramenti e le stratigrafie degli involucri.

I risultati ottenuti hanno consentito di effettuare un salto di classe energetica raggiungendo la classe C con un consumo annuo di 126 kW/m<sup>2</sup> annuo, l'edificio attualmente ha un rendimento annuo di 264 kWh/m<sup>2</sup> annuo.

Il consumo di gas naturale si è ridotto del 60 %, infatti per la simulazione dell'edificio efficientato energeticamente sono stati modificati gli orari di attività e la percentuale di potenza erogata, perché da alcune prove iniziali si sono creati fenomeni

di surriscaldamento degli ambienti interni, infatti avendo migliorato la qualità degli involucri l'edificio non necessita più un profilo di funzionamento continuo.

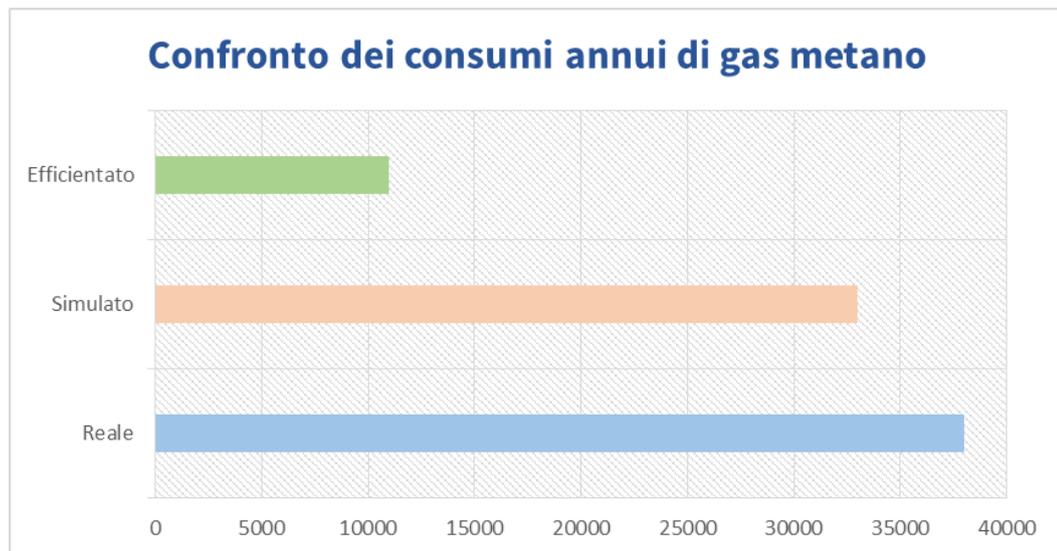


Fig.63: Confronto su scala annuale dei diversi consumi

Risulta particolarmente interessante apprezzare i miglioramenti ottenibili dall'efficientamento energetico confrontando le due simulazioni dello stato di fatto e dello stato efficientato. Si può per esempio ragionare per singolo vano e confrontare l'andamento degli apporti interni o misurare la differenza delle dispersioni per visualizzare in maniera grafica e la variazione dell'andamento dei parametri termo-fisici dell'edificio. Considerando per esempio una generica aula esposta a sud dell'edificio si può visualizzare il confronto tra apporti solari e potenza termica fornita dai radiatori per mantenere le condizioni ambientali all'interno della stessa.

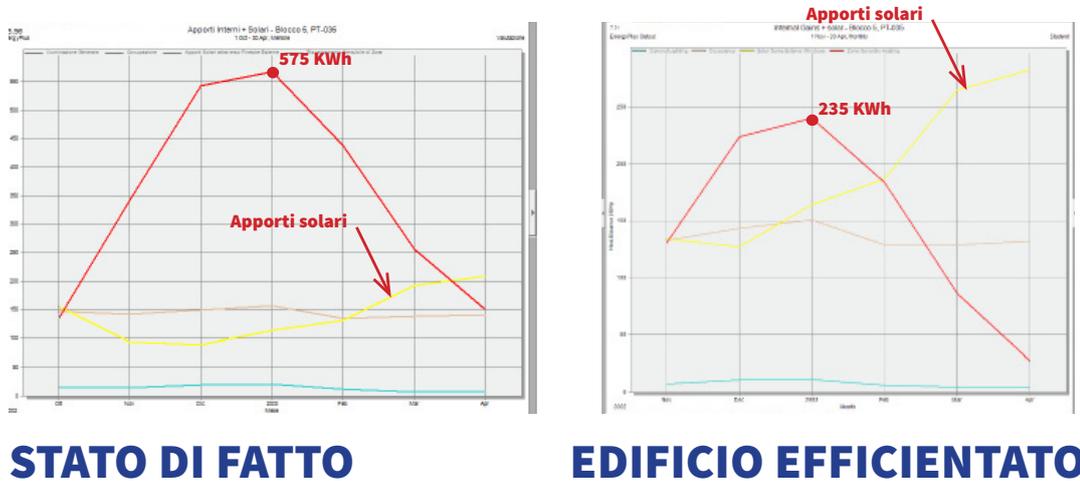


Fig.64: Differenza del consumo mensile tra lo stato di fatto e l'edificio efficientato. Si può notare come migliorino gli apporti solari con i nuovi serramenti

I risultati mostrano come il picco dei consumi di potenza termica fornita si riduca notevolmente, ma soprattutto come il miglioramento dei serramenti abbia elevato considerevolmente il contributo degli apporti solari.

## 5.6 // Stima del costo dell'intervento

Per stimare il costo dell'intervento è stata testata l'interoperabilità del modello BIM con i software di computo metrico offerti dal mercato. Attualmente risulta complesso gestire un computo metrico direttamente in Revit, ma esistono diversi applicativi esterni con cui il modello può comunicare attraverso formati di scambio o mediante opportuni plug-in. Nell'ambito di questa tesi si è utilizzato il plug-in Archvision che mette in comunicazione il modello BIM con il software di computazione metrica della Acca, Primus.

### 5.6.1 // Implementazione fasi di progetto

E' stata introdotta una nuova fase di progetto nella quale sono stati demoliti gli elementi costruttivi e sono stati ricreati nella forma progettuale precedentemente definita. Quindi la fase di progetto diventa la fase in cui devono essere quantificate e computate tutte le migliorie effettuate.

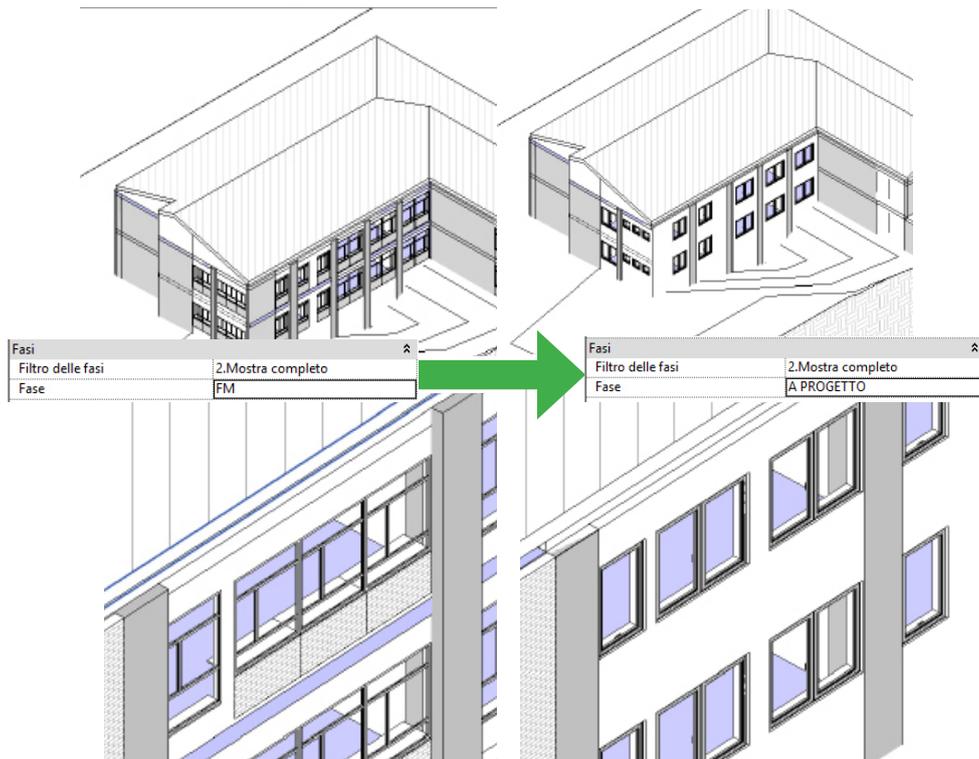


Fig.65: Evoluzionelle fasi in Revit

### 5.6.2 // Interoperabilità Revit -PRIMUS mediante Archvision

Per computare i materiali il software più utilizzato al momento è il software della Acca ,PRIMUS. Attualmente la comunicazione tra i due software in termini di esportazioni ifc è stata migliorata ma molto spesso non è possibile ottenere i risultati separati. Esiste tuttavia un plug-in che consente di mettere in comunicazione Revit e Pri-

mus in maniera semplicissima, e si tratta dell'applicativo Archvision RP.

Questo plug in consente di mettere in comunicazione le voci dei vari listini prezzi presenti all'interno di PRIMUS con i tipi di famiglia in Revit attraverso un semplice "drag and drop" ovvero trascinamento delle voci di prezziario all'interno del modello. Queste vengono associate a opportuni parametri condivisi che Archvision RP introduce per tutte le famiglie.

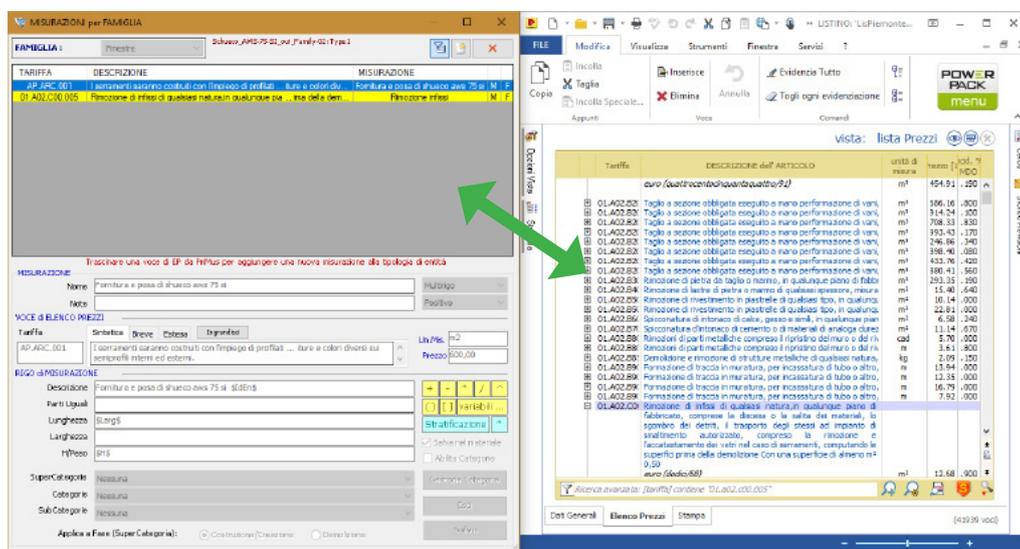


Fig.66: Collegamento tra lo schermo di archvision(sinistra) e l'elenco prezzi in Primus(destra)

Per caricare le voci di prezzo devono essere aperti contemporaneamente Revit e PRIMUS, si introduce una nuova misurazione selezionando un tipo di famiglia e si cominciano a trascinare le voci di prezzo che devono essere computate all'interno della famiglia. Una volta che le voci di prezzo sono trascinate all'interno dell'ambiente di misurazione per famiglia di Archvision RP, queste vanno a compilare i parametri condivisi che sono stati generati per ogni singolo tipo di famiglia. I parametri ospitano le voci provenienti dai campi di PRIMUS, codice di tariffa, descrizione sintetica, prezzo al mq, ecc.

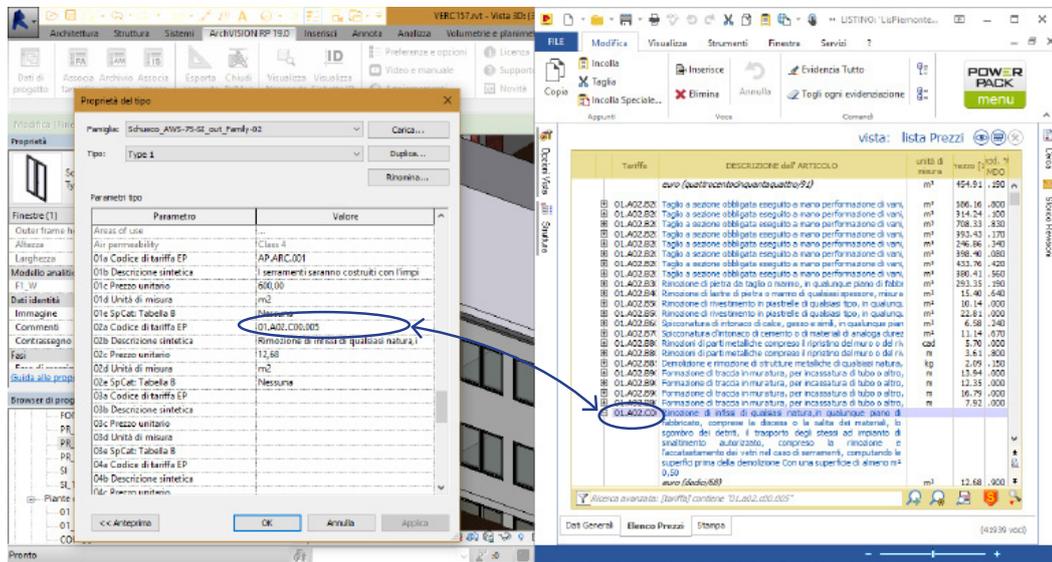


Fig.67: Verifica della corretta compilazione dei parametri condivisi

Una volta fatta l'associazione bisogna sapere che ogni tipo di famiglia può contenere al suo interno più voci di computo. Per esempio nel caso illustrato nelle figure il serramento contiene già due voci una relativa alla demolizione del serramento generico presente nello stato di fatto e una relativa alla posa in luogo di quel serramento di una nuova finestra.

Resta da definire la modalità di computazione metrica, anche questo passaggio è molto semplice, si possono associare alla misurazione i parametri di progetto del tipo di famiglia come la lunghezza, l'altezza o direttamente l'area. Particolarmente interessante è l'associazione anche del codice di identità dell'oggetto, questa funzione consente di dare maggiore trasparenza alla lettura del computo. Infatti ogni misurazione si porterà con se il codice di identità del relativo oggetto misurato in modo da garantire una facile lettura delle informazioni presenti nel computo. Con

questo meccanismo sono stati computati tutti gli elementi costruttivi oggetto di miglioramento all'interno del modello ed è stato esportato il computo metrico estimativo direttamente tramite il plug-in di Archvision RP.

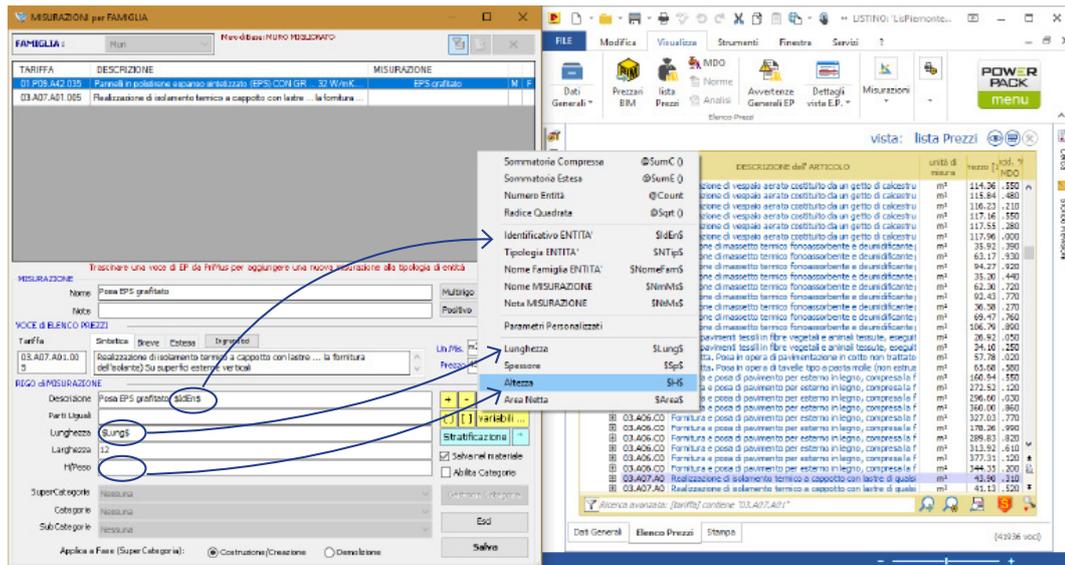


Fig.68: Associazione dei parametri di progetto per la computazione degli elementi

## 5.7 // Costo totale e ritorno dell'investimento

Grazie ad Archvision RP è stato possibile prevedere il costo totale dell'intervento. Per realizzare l'efficientamento energetico dei due blocchi aule sono necessari circa 400.000 €, seguendo quindi gli standard progettuali in linea con i requisiti del GSE. Essendo la cifra ottenuta dalle sole opere di efficientamento energetico è possibile prevedere un riduzione del costo totale dell'intervento del 55%. Il costo finale ottenibile è quindi di 180.000 €.

Volendo considerare il risparmio che questo miglioramento energetico genera possiamo fare un confronto diretto sulla spesa annuale relativa al consumo di gas

metano e di energia elettrica. Da una ricerca di mercato effettuata il costo del gas metano registrato all'anno 2017 è di 23,25 eurocent/Smc (23 centesimi per standard di metro cubo). Sulla base di questo valore è stato calcolato il costo annuale del gas metano sia nello stato di fatto che nello scenario di miglioramento energetico.

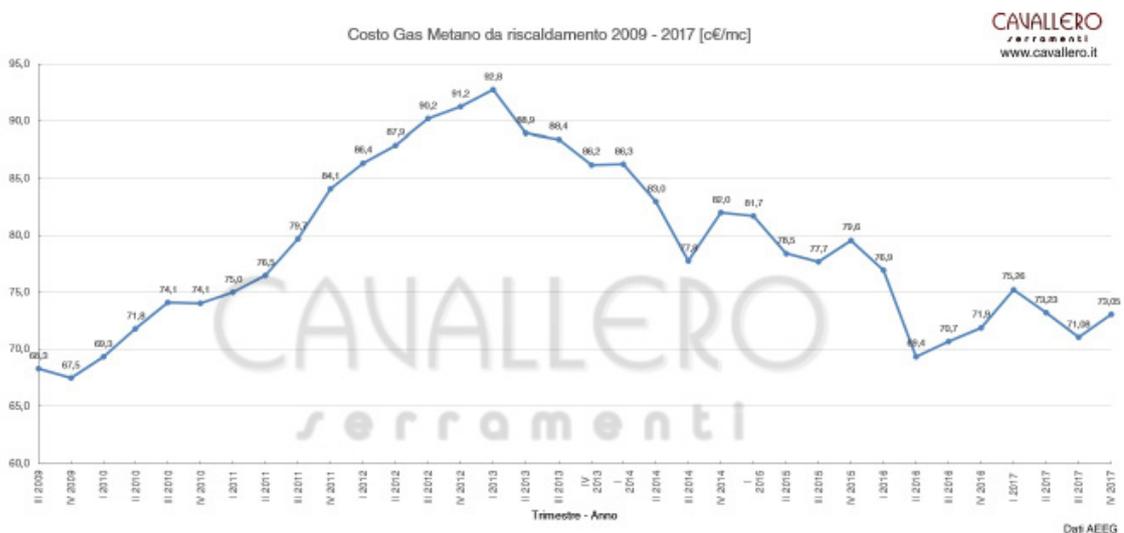


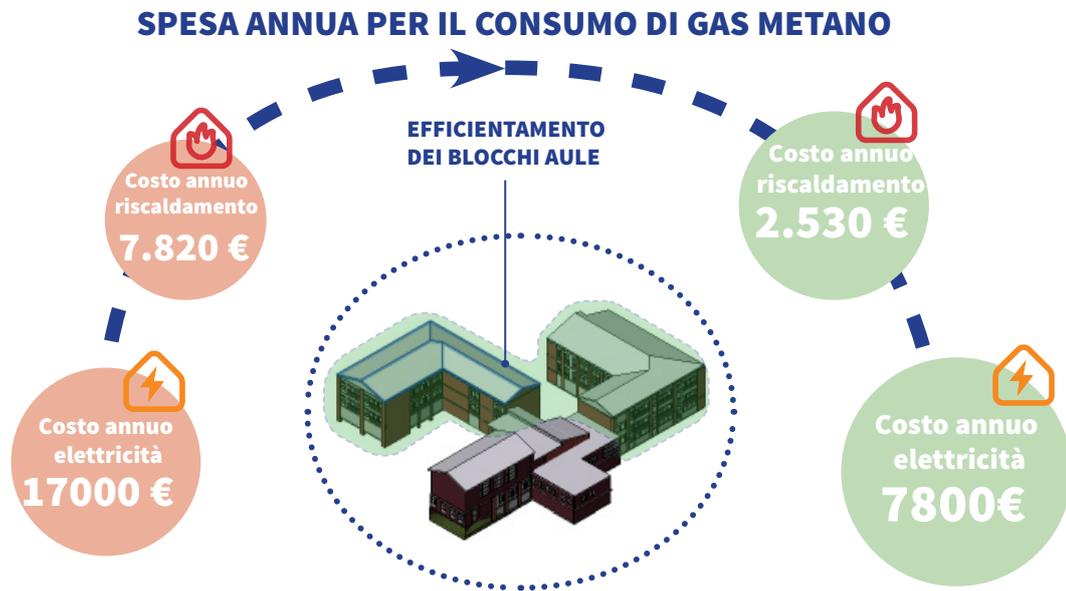
Fig.69: Il grafico mostra l'andamento del costo del gas metano durante gli anni.  
Fonte Cavallero serramenti

I consumi passano da 7.820 € /annui a 2.530 € /annui garantendo un risparmio annuale solo sulla bolletta del gas di circa 5.300 €/annui, che in 35 anni garantiscono di coprire l'intera spesa sostenuta per l'efficientamento energetico.

Questa stima è da ritenersi puramente indicativa visto che per esempio non si tiene conto della riduzione dei consumi elettrici che potrebbero ulteriormente ridurre i tempi di ammortamento dell'intervento. Andando quindi a considerare i consumi elettrici e il relativo risparmio garantito dall'efficientamento energetico, si può ipotizzare una spesa 25 eurocent kWh/m<sup>2</sup>. Questo dato è un valore medio ottenuto sulla

base dei costi annuali registrati negli ultimi anni e non tiene conto di eventuali offerte di contratto ad hoc per edifici pubblici. Risulta comunque un dato utile al fine di effettuare valutazioni economiche e di ritorno dell'investimento di massima.

L'edificio consuma attualmente 68.000 Kwh annui di energia elettrica, l'efficientamento energetico previsto sui due edifici ridurrebbe del 30 % i consumi elettrici, con consumi annuali (simulati) di 40.000 Kwh. Il risparmio annuale ottenibile è di 7800 € che sommati ai 5.290€ risparmiati per il riscaldamento generano un ritorno annuale di 13090 €. Volendo stimare i tempi di ritorno dell'investimento e facendo riferimento ai dati precedentemente ottenuti si prevede un tempo di ammortamento massimo dell'investimento di 15 anni.



**RISPARMIO ANNUALE : 13.090€**

**COSTO COMPLESSIVO DELL'OPERA : 400.000€**

**SPESA FINANZIABILE CON FONDI GSE : 220.000€**

**COSTO FINALE DELL'OPERA : 180.000€**

**TEMPO DI AMMORTAMENTO MASSIMO : 15 anni**

## 5 // Conclusioni e bibliografia

Il processo illustrato in questo lavoro di tesi conferma come la metodologia BIM sia ormai uno strumento consolidato per un progettista. Il lavoro e la pianificazione di un modello BIM richiedono sicuramente molto tempo, ma se correttamente impostato il modello BIM è uno strumento versatile e capace di interagire e relazionarsi con tutte le discipline. Nel caso studio esaminato in questa tesi per esempio è stato prodotto un modello che ha potuto relazionarsi con un software di simulazione energetica e che in funzione della sua base di dati può già relazionarsi con piattaforme di gestione integrata degli immobili CAFM. Il processo di interazione e interoperabilità del modello è stato ampliato con l'utilizzo di un software di computazione metrica per la stima dei costi dell'intervento, riducendo le tempistiche relative a questa operazione tipiche del sistema CAD tradizionale.

Tuttavia il processo ad oggi non è totalmente lineare, e molto spesso la comunicabilità tra i software di simulazione energetica e i modelli BIM richiede accorgimenti e semplificazioni che molto spesso non sono in linea con la filosofia BIM. Queste criticità sono comprensibili vista la diversità dell'offerta delle softwarehouse, ma lo sviluppo e il miglioramento della struttura di formati di scambio universali quale l'IFC sta col tempo risolvendo queste criticità.

Per il momento il formato di scambio più idoneo per la gestione di modelli ener-

getici è sicuramente il gbXML, in questa tesi sono state illustrate le criticità e sono state avanzate ipotesi risolutive opportunamente verificate che consentono linearizzare il più possibile il processo di interoperabilità senza dover ricorrere a infiniti loop di ottimizzazione.

Infine volendo commentare il risultato economico ottenuto, si può confermare quanto soluzioni migliorative e investimenti opportunamente ponderati in un corretto processo edilizio possano offrire spunti per il miglioramento energetico affrontando spese sostenibili e recuperabili in tempi ridotti.

## **5.1 // Bibliografia**

- Ciribini A., BIM e Digitalizzazione dell'ambiente costruito - Building Information Modelling e la Digitalizzazione del settore delle costruzioni, GRAFILL editore, 2016.
- Osello A., Building Information Modelling - Geographic Information System - Augmented Reality per il Facility Management, Dario Flaccovio editore, 2015.
- Osello A., Il futuro del disegno con il BIM per ingegneri e architetti, Dario Flaccovio editore, 2012.
- Garber R., BIM Design – Realising the creative potential of Building Information Modelling, John Wiley & Sons editore, 2014.
- Garzino, Giorgio, (a cura di), DISEGNO (E) IN\_FORMAZIONE. Disegno Politecnico DRAWING (AND) INFORMATION. Polytechnic Drawing. Santarcangelo di Romagna: Maggioli, 2011.
- Argiolas C., Prenza R.; Quaquero E., BIM 3.0 dal disegno alla simulazione –

Nuovo paradigma per il progetto e la produzione edilizia, GANGEMI EDITORE, 2015.

- Filippi M., Fabrizio E., Introduzione alla simulazione termoenergetica dinamica degli edifici, Guida Aircarr editore, 2012.
- Clarke J., Energy Simulation in Building Design, Butterworth-Heinemann editore, 2001.
- Levring, A., Nielsen, D. Schematic Strategies and Workflows for Sustainable Design Development. Autodesk University 2011 Conference. Las Vegas, Nevada, 2011.
- Hensen J., Lamberts R., Building Performance Simulation for Design and Operation, Taylor and Francis Group editore, 2011.
- McClain L., Design-Build interoperability and conceptual design and development of a design-built management control system, Georgia Institute of Technology, 2007.
- EnergyPlus, EnergyPlus, Engineering Reference- The Reference to EnergyPlus Calculations, University of Illinois and University of California, 2011