

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Energetica

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Energetica e Nucleare**

Tesi di Laurea Magistrale

BIM e analisi energetica: interoperabilità tra software

Il caso studio di FCA Mirafiori



Relatore

Prof.ssa Anna Osello

Correlatore

Prof. Marco Carlo Masoero

Candidato
Rodolfo Rotti

Anno accademico 2017/2018

Abstract

La presente tesi ha come obiettivo quello di analizzare nel dettaglio il percorso progettuale che dalla modellazione BIM porta all'analisi energetica del modello BEM, mettendo in evidenza le potenzialità, i vantaggi e le criticità della metodologia, da un punto di vista della validazione dei risultati e dell'interoperabilità tra i software adottati.

Parallelamente, lo scopo del progetto è quello di intraprendere un percorso formativo mirato all'apprendimento del metodo di progettazione collaborativo rappresentato dal BIM.

Il progetto di tesi è stato sviluppato in collaborazione con il laboratorio di ricerca "Drawing to the future" coordinato dalla Professoressa del dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Anna Osello, con il supporto del Professor Marco Carlo Masoero del Dipartimento di Ingegneria Energetica.

Nel corso dell'elaborato verrà proposta una sezione introduttiva, con lo scopo di inquadrare meglio l'ambito applicativo all'interno del quale è stato svolto il progetto.

In seguito, seguirà un capitolo inerente allo stato dell'arte, nel quale saranno presentati la metodologia BIM, etimologia e nascita nell'ambito delle costruzioni, e i software utilizzati, ponendo attenzione sulle differenze tra questi e sui principali vantaggi e svantaggi in termini di interoperabilità e condivisione tra i vari professionisti coinvolti nel processo di progettazione.

Successivamente, verrà esposta la metodologia con la quale è stato condotto l'intero lavoro sulla base dell'analisi del caso studio in esame, presentato nella sezione successiva, inerente allo stabilimento di FCA Mirafiori, a Torino.

Saranno poi proposti i risultati ottenuti e le conseguenti osservazioni che condurranno l'elaborato alle conclusioni finali.

Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare la Prof.ssa Anna Osello e il Prof. Marco Carlo Masoero, rispettivamente relatrice e correlatore della presente tesi di laurea, per la disponibilità dimostratami durante l'intero percorso di stesura dell'elaborato.

Inoltre, ringrazio sentitamente Vincenzo Donato e Laura Rietto per avermi seguito passo a passo e per aver dato un contributo importante al mio periodo di apprendimento preliminare.

Intendo poi ringraziare i membri del Drawing to the Future che mi hanno permesso di condurre il lavoro di tesi in un clima di totale collaborazione.

Inoltre, vorrei ringraziare Francesca, la mia ragazza, che mi è stata vicino soprattutto per tutto l'ultimo periodo di studi e ha saputo supportarmi e motivarmi in ogni occasione, dimostrandosi orgogliosa di me e dei miei traguardi e condividendo con me la gioia di questo giorno.

Un grande ringraziamento va alla mia famiglia, a mia madre, mio padre e mia sorella, che mi hanno dato la possibilità di affrontare tutto questo percorso universitario, rivelatosi più lungo del previsto, col loro sostegno morale ed economico, contribuendo alla mia formazione.

Per ultimi, ma non meno importanti, i miei amici. Ringrazio tutti coloro che mi sono sempre stati vicino, che hanno condiviso con me i momenti più difficili e quelli più felici, che sono stati una componente fondamentale per tutto il mio percorso formativo e non solo. In particolare voglio ringraziare Alby, Alessio, Anna, Arcie, Bokkia, Dario, Davide, Dosso, Edo, Germa, Gianotta, Guido, Ivan, Jack, Kua, Loris, Marco, Mari, Matti, Simo, Stefy, Vigo e gli Omertosi (Andre, Davide, Enri, Fabio e Ignà).

Lista Simboli

F_{12}	Fattore di vista (o di forma) [-]
F_ε	Fattore di emissività [-]
h_c	Coefficiente di Scambio Termico Convettivo [$W/(m^2K)$]
h_r	Coefficiente di Scambio Termico Radiativo [$W/(m^2K)$]
i	Indice
n	Ricambio orario [h^{-1}]
\dot{Q}	Flusso di calore [W]
R	Resistenza termica [$\frac{m^2K}{W}$]
S	Superficie [m^2]
s	Spessore [m]
T	Temperatura [K]
U	Trasmittanza termica [$\frac{W}{m^2K}$]
V	Volume [m^3]
\dot{V}	Portata d'aria volumetrica [m^3/s]
ΔT	Differenza di temperatura [$^\circ C$]
λ	Conducibilità termica [$\frac{W}{m \cdot K}$]
σ	Costante di Stefan Boltzmann, $5,67 \cdot 10^{-8}$ [$W/(m^2 \cdot K^4)$]

Pedici

<i>a</i>	Aria
<i>amb</i>	Ambiente
<i>m</i>	Media
<i>o</i>	Operativa
<i>panel</i>	Pannello radiante
<i>se</i>	Superficiale esterna
<i>si</i>	Superficiale interna
<i>tot</i>	Totale
<i>mr</i>	Media Radiante

Acronimi

AHU	Air Handling Unit
BEM	Building Energy Modeling
BIM	Building Information <i>Model/Modelling/Modeling</i>
CAD	Computer Aided <i>Design/Drafting</i>
CFD	Computation Fluid Dynamics
DOE	Department of Energy
EAM	Energy Analysis Model
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
LOD	Level of <i>Definition/Development</i>
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predictive Percentage Dissatisfied
UTA	Unità di Trattamento Aria
VAV	Variable Air Volume
2D	Two Dimensions
3D	Three Dimensions

Sommario

1.	Introduzione.....	1
2.	Stato dell'arte.....	3
2.1	Dal CAD al BIM.....	3
2.2	Il BIM.....	4
2.3	Il BEM.....	6
2.4	Il BIM in Italia.....	7
2.5	Interoperabilità.....	8
2.6	Formati di scambio.....	9
2.7	Software.....	10
3.	Metodologia.....	14
3.1	Data collection.....	15
3.2	Modello BIM.....	16
3.2.1	Level Of Development (LOD).....	17
3.2.2	Geometria.....	18
3.2.3	Materiali.....	20
3.2.4	Vani, Locali, Aree e Zone.....	21
3.3	Modello EAM.....	23
3.3.1	Esportazione del modello energetico.....	23
3.3.2	Insight 360.....	26
3.3.3	Esportazione vani.....	28
3.3.4	Plug-in per DesignBuilder.....	30
3.3.5	Data loss.....	31
3.4	Modello BEM.....	32
3.4.1	La simulazione energetica dinamica.....	32
3.4.2	Analisi energetica.....	33
3.5	Output.....	38
4.	Caso studio.....	42
4.1	Data collection.....	44

4.2	Modello BIM.....	46
4.3	Modello EAM.....	56
4.4	Modello BEM.....	58
4.5	Problemi di interoperabilità.....	66
5.	Risultati.....	68
6.	Conclusioni.....	84
	Bibliografia.....	87

Indice delle figure

Figura 1 – Flusso di lavoro dal BIM al BEM	14
Figura 2 – Planimetria d’esempio (Revit).....	18
Figura 3 – Vista frontale finestra parametrica	19
Figura 4 – Vista 3D finestra parametrica in modalità wireframe (a) e realistica (b)	19
Figura 5 – Modello 3D visualizzazione wireframe.....	20
Figura 6 – Stratigrafia componente (Revit).....	20
Figura 7 – Modello 3D visualizzazione realistica.....	21
Figura 8 – Sezione “Proprietà” di un vano (Revit).....	22
Figura 9 – Impostazioni energetiche preliminari (a) e avanzate (b) (Revit)	24
Figura 10 – Visualizzazione 3D modello energetico	25
Figura 11 – Esportazione tramite file di scambio (Revit).....	25
Figura 12 – Esportazione gbXML (Revit).....	26
Figura 13 – Visualizzazione 3D su Insight 360.....	27
Figura 14 – Editor di Insight 360.....	28
Figura 15 – Esportazione vani tramite gbXML (Revit)	29
Figura 16 – Dettaglio vano in esportazione vani tramite gbXML (Revit).....	30
Figura 17 – Input località (DesignBuilder).....	34
Figura 18 – Sezione “Info, Help” (DesignBuilder).....	34
Figura 19 – Dettagli del progetto (DesignBuilder).....	35
Figura 20 – Importazione file gbXML (DesignBuilder).....	36
Figura 21 – Schema impianto HVAC e modello 3D	37
Figura 22 – Profili di temperatura senza impianto.....	38
Figura 23 – Profili di temperatura con impianto	38
Figura 24 – Profili di temperatura e umidità relativa (con impianto)	40
Figura 25 – Profilo dei carichi interni.....	40
Figura 26 – Vista satellitare FCA Mirafiori (Google Maps).....	42
Figura 27 - Vista satellitare FCA Mirafiori (Google Maps)	43
Figura 28 – Pianta AutoCAD di FCA Mirafiori (materiale di FCA)	44
Figura 29 – Schema impianto di FCA Mirafiori (materiale di FCA).....	44
Figura 30 – Griglia schematica con planimetria di FCA Mirafiori (Revit).....	46
Figura 31 – Stratigrafia muri esterni (Revit).....	47
Figura 32 – Stratigrafia tetto (Revit).....	48
Figura 33 – Stratigrafia pavimento (Revit).....	49
Figura 34 – Stratigrafia muri lucernari (Revit).....	51
Figura 35 – Visualizzazione wireframe (a) e realistica (b) di un lucernario	52
Figura 36 – Visualizzazione realistica di un lucernario in plexiglass.....	53

Figura 37 – Vista frontale delle facciate a Nord-Ovest (a) e a Sud-Ovest (b)	53
Figura 38 – Sovrapposizione pianta AutoCAD e vista satellitare	54
Figura 39 – Visualizzazione 3D del modello BIM di FCA Mirafiori (Revit).....	54
Figura 40 - Visualizzazione 3D del modello BIM della Lastratura (Revit)	55
Figura 41 – Esportazione vani della Lastratura tramite gbXML (Revit)	56
Figura 42 – Visualizzazione 3D del modello BEM della Lastratura (DesignBuilder)	58
Figura 43 – Importazione modello BIM (DesignBuilder)	58
Figura 44 – Dati di input relativi all’attività (DesignBuilder).....	59
Figura 45 – Dati di input relativi alla costruzione (DesignBuilder).....	60
Figura 46 - Dati di input relativi alle aperture (DesignBuilder).....	61
Figura 47 - Dati di input relativi all’illuminazione (DesignBuilder).....	61
Figura 48 – Visualizzazione 3d delle zone virtuali della Lastratura (DesignBuilder)	62
Figura 49 – Schema dell’impianto HVAC della Lastratura	63
Figura 50 – Schema impiantistico UTA	65
Figura 51 – Schema impiantistico terminale di riscaldamento	65
Figura 52 – Profili di temperatura annuali	68
Figura 53 – Profili di temperatura mese di Gennaio	68
Figura 54 – Profili di temperatura mese di Luglio	69
Figura 55 – Profilo annuale dell’umidità relativa	70
Figura 56 – Profilo annuale dei carichi interni	70
Figura 57 – Profilo annuale del consumo di combustibile.....	71
Figura 58 – Dettaglio della zona 8 della Lastratura	73
Figura 59 – Predicted Mean Vote e Predictive Percentage Dissatisfied	74
Figura 60 – Profili di temperatura e andamento del PMV della zona 8 (con aerotermi)	75
Figura 61 – Visualizzazione 3D del modello BEM della zona 8	78
Figura 62 – Zone virtuali con pannelli radianti.....	78
Figura 63 – Schema impianto HVAC con pannelli radianti	79
Figura 64 – Profili di temperatura e andamento del PMV del piano più inferiore	80
Figura 65 - Profili del PMV di una zona con pannello radiante sovrastante (piano terra)	81
Figura 66 - Profili del PMV di una zona con pannello radiante sovrastante (piano terra)	81
Figura 67 - Profili del PMV di una zona con pannello radiante sovrastante (piano 2)	81
Figura 68 - Profili del PMV di una zona con pannello radiante sovrastante (piano 3)	82
Figura 69 - Profili del PMV di una zona con pannello radiante sovrastante (piano 4 – con pannelli)	82
Figura 70 - Profili del PMV di una zona con pannello radiante sovrastante (piano 5)	82
Figura 71 - Profili del PMV di una zona con pannello radiante sovrastante (piano 6)	83

Indice delle tabelle

Tabella 1 – Confronto tra i principali software BIM	12
Tabella 2 – Calcolo trasmittanza muri esterni	48
Tabella 3 – Calcolo trasmittanza tetto	49
Tabella 4 – Calcolo trasmittanza pavimento	50
Tabella 5 – Riepilogo tipologie di lucernari	52
Tabella 6 – Analisi accuratezza del modello EAM	57
Tabella 7 – Portate di UTA e aerotermi	64
Tabella 8 – Usi finali di energia	72
Tabella 9 – Fattori di conversione	72
Tabella 10 – Dati di targa del boiler	72
Tabella 11 – Dati di targa delle pompe	72
Tabella 12 – Dati sulle potenze della zona 8 della Lastratura	75

1. Introduzione

Il mondo delle costruzioni si è ormai avviato verso una vera e propria digitalizzazione della progettazione, coinvolgendo dunque soggetti provenienti da ambiti professionali differenti.

Per una corretta progettazione risulta ormai indispensabile la disponibilità di svariate informazioni di natura geometrica, strutturale ed energetica, e una collaborazione efficace e organizzata tra tutte le figure professionali chiamate in causa.

Dal punto di vista energetico, in particolare, durante l'intera fase progettuale i progettisti si concentrano prevalentemente sull'analisi dettagliata della forma di un edificio, del contesto all'interno del quale esso è inserito, dei materiali che lo caratterizzano e di tutto ciò che riguarda i sistemi elettrico, meccanico e idraulico.

Ad oggi, per giungere allo scopo finale quale l'efficienza energetica, lo studio di quelle che sono le prestazioni energetiche proprie dell'edificio oggetto di analisi può avvenire in condizioni stazionarie, assumendo cioè costanti le condizioni climatiche esterne e di conseguenza anche il comportamento dell'edificio (intervallo temporale stagionale), oppure tramite un'analisi dinamica, in grado di identificare le proprietà dinamiche dell'edificio in conseguenza al contributo della radiazione solare e dei carichi interni sensibili e latenti (intervallo temporale orario).

I modelli dinamici prevedono la risoluzione di equazioni termodinamiche considerando tutti i fenomeni fisici in funzione del tempo che nei modelli stazionari non possono essere risolti, quali ad esempio[1]:

- Conduzione termica in regime transitorio (processo per mezzo del quale il calore si trasferisce da un'estremità all'altra di un materiale con una fluttuazione sfasata nel tempo per via dell'inerzia termica del materiale stesso);
- Irraggiamento interno ed esterno agli ambienti ad elevata lunghezza d'onda (scambio radiativo tra superfici interne o tra superfici esterne e volta celeste, oppure ancora con il terreno);
- Irraggiamento a bassa lunghezza d'onda (apporto energetico della radiazione solare);
- Ombreggiature esterne (ombreggiatura dovuta ad ostacoli esterni, alla proiezione di alcuni elementi fisici dell'edificio stesso, o dovuta alla presenza di ostruzioni proprie dell'ambiente circostante);
- Flussi d'aria dall'ambiente esterno verso l'interno oppure reciprocamente tra gli ambienti interni (in particolare infiltrazioni ed eventuale ventilazione forzata);
- Guadagni gratuiti interni (carichi termici interni dovuti a sorgenti luminose, apparecchi elettronici, occupanti);
- Controllo degli impianti (previsione del reale comportamento degli impianti in funzione);
- etc.

Come è possibile intuire, un'analisi energetica dinamica risulta quindi la miglior soluzione progettuale, in grado di definire la "taratura del modello energetico" avvicinandosi con buona approssimazione ai reali consumi dell'edificio e fornendo quindi le basi per poter ipotizzare eventuali interventi di efficientamento energetico.

Oggi, i progettisti hanno a disposizione tutto il supporto necessario da parte di molteplici software per i diversi ambiti applicativi, ma il miglior compromesso in termini di semplicità ed efficienza sembrerebbe essere rappresentato dai software per la modellazione BIM, i soli in grado di coadiuvare la collaborazione tra più professionisti col fine di ottimizzare il processo progettuale. Tali software offrono la possibilità di creare una rappresentazione digitale dettagliata dell'edificio ponendo la massima attenzione a tutte le informazioni e i dati che ne caratterizzano l'involucro, dalla geometria ai vincoli strutturali, dalle proprietà termiche a quelle meccaniche.

Nasce, quindi, una nuova metodologia di progettazione digitale caratterizzata da una fase di modellazione in grado di rappresentare virtualmente e, allo stesso tempo, fedelmente la realtà. Tutto questo è rappresentato dal Building Information Modeling (BIM) e, nel corso dell'elaborato, ne verrà proposta un'interpretazione più dettagliata, fornendo delle linee guida per lo sviluppo di un modello energetico partendo da uno parametrico.

2. Stato dell'arte

2.1 Dal CAD al BIM

Per comprendere più a fondo il nuovo scenario introdotto dal BIM è opportuno fare un passo indietro per analizzare come nel corso degli anni progettazione e modellazione abbiano assunto diverse sfaccettature e si siano sviluppate.

Inizialmente, l'edilizia faceva affidamento sul disegno per quanto riguarda la rappresentazione dei dati in ambito progettuale, sviluppando così modelli in due dimensioni (2D).

Nel corso degli anni '60 e '70 l'industria ha iniziato ad intravedere le potenzialità dei vantaggi derivanti dall'uso del Computer-Aided Design/Drafting (CAD), settore informatico che supporta l'attività di progettazione ("Design") e disegno tecnico ("Drafting") con l'impiego di appositi software di grafica computerizzata.

I sistemi CAD si presentano con lo scopo di creare modelli, tipicamente 2D, del disegno tecnico rappresentante il manufatto e modelli in tre dimensioni (3D) in termini di progettazione assistita. Negli anni '90, diventano alla portata di tutti i professionisti, grazie soprattutto alla diffusione di computer con interfacce utente grafiche.

Si assiste così alla sostituzione dei tecnografi, che lasciano spazio a disegni realizzati al computer, per poi giungere all'avvento della modellazione parametrica ad oggetti nella seconda metà degli anni '80.

Mentre nei tradizionali CAD 2D e 3D ogni aspetto geometrico ha bisogno di essere editato dall'utente, nel caso di oggetti parametrici questo processo avviene in maniera del tutto automatica in base ai cambiamenti del contesto.

Inoltre, tali oggetti presentano la particolare capacità di aggiornarsi autonomamente, oltre al fatto di poter rappresentare molteplici proprietà al di là di quelle geometriche.

Questo nuovo modo di pensare, progettare e modellare porta di fatto alla formulazione di questa nuova tecnologia, quale il BIM.

2.2 Il BIM

Il termine BIM è stato coniato negli Stati Uniti nel 2002 e, per evitare interpretazioni errate relative all'acronimo, è opportuno porre attenzione ai suoi diversi significati forniti dalla letteratura[2]:

- BIM come *Building Information Modelling/Modeling*
 - *Building information Modeling is one of the most promising developments in the architecture, engineering and construction (AEC) industries. With BIM technology, an accurate virtual model of a building is constructed digitally. When completed, the computer-generated model contains precise geometry and relevant data needed to support the construction, fabrication, and procurement activities needed to realize the building[3].*
 - *Building Information Modelling [...] is a method that is based on a building model containing any information about the construction. In addition to the contents of the 3D object-based models, this is information such as specifications, building elements specifications, economy and programmes[4].*
 - *Building Information Modeling has become a valuable tool in some sectors of the capital facilities industry. However in current usage, BIM technologies tend to be applied within vertically integrated business functions rather than horizontally across an entire facility lifecycle. Although the term BIM is routinely used within the context of vertically integrated applications, the NBIMS Committee has chosen to continue using this term while evolving the definition and usage to represent horizontally integrated building information that is gathered and applied throughout the entire facility lifecycle, preserved and interchanged efficiently using open and interoperable technology for business, functional and physical modelling, and process support and operations[5].*
 - *[...] a model needs only two essential characteristics to be described as a BIM model. The first is that it must be a three-dimensional representation of a building (or other facility) based on objects, and second, it must include some information in the model or the properties about the objects beyond the graphical representation[6].*

- BIM come *Building Information Model*
 - *A Building Information Model (BIM) is a digital representation of physical and functional characteristics of a facility. As such it serves as a shared knowledge resource for information about a facility forming a reliable basis of decisions during its lifecycle from inception onward. A basic premise of BIM is collaboration by different*

stakeholders at different phases of the life cycle of a facility to insert, extract, update or modify information in the BIM to support and reflect the roles of that stakeholder. The BIM is a shared digital representation founded on open standards for interoperability[7].

- *The Building Information Model is a data-rich, object-oriented, intelligent and parametric digital representation of the facility, from which views and data appropriate to various users' needs can be extracted and analysed to generate information that can be used to make decisions and improve the process of delivering the facility[8].*

- BIM come *Beyond Information Models*
 - *BIM is not a software application. BIM is an information-based system that builds long-term value and advances innovation. It improves how projects get designed and built. It builds economic value in many areas. It improves the environment and people's lives. BIM is an evolutionary change in how people relate to the built environment. The speed of this change creates many opportunities for ambiguity. [...] we define BIM as Beyond Information Models to align with the universal nature of the concept[9].*

Nel corso dell'elaborato il termine BIM verrà interpretato sia come modello che come metodologia. Più precisamente, Building Information Model verrà inteso come rappresentazione 3D vera e propria del manufatto in esame al quale vengono collegati attributi e informazioni appartenenti ad ogni oggetto coinvolto. D'altra parte, invece, Building Information Modeling farà riferimento ad un ambito più ampio, quale quello della metodologia, col fine di effettuare lo scambio di informazioni per ottenere rappresentazioni dell'edificio non solo da un punto di vista architettonico, bensì anche strutturale ed energetico.

2.3 Il BEM

Il termine BEM, Building Energy Modeling, indica la metodologia alla base di molti software per l'analisi energetica.

I software BEM, tramite un'analisi energetica dinamica condotta per mezzo di equazioni e principi termodinamici, stimano il consumo di energia degli edifici basato sulle simulazioni dei flussi energetici e di massa [10] e fanno affidamento ad una geometria di input puramente parametrica.

I migliori software BEM possono essere suddivisi in due gruppi: quelli che utilizzano il motore di calcolo sviluppato dal US Department of Energy (DOE-2) e quelli che invece usano il proprio motore di calcolo [11].

DOE-2 è un programma per computer per la progettazione di edifici ad alta efficienza energetica. Sviluppato per il Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti dal Lawrence Berkeley National Laboratory's Simulation Research Group, il DOE-2 calcola l'utilizzo orario dell'energia e il costo energetico di un edificio commerciale o residenziale, date le informazioni sul clima dell'edificio, la costruzione, l'operatività e l'impianto HVAC [12].

Il software più diffuso che utilizza il motore di calcolo del DOE-2 è senz'altro EnergyPlus.

Il Building Energy Model nasce dalla creazione di un modello per l'analisi energetica, frutto dell'esportazione in qualunque tipo di formato, generalmente IFC o gbXML, di un modello BIM.

Con il BEM risulta possibile realizzare simulazioni energetiche in regime dinamico per la valutazione dei fenomeni termofisici di un edificio, integrando dunque la modellazione BIM nel processo di analisi energetica.

2.4 Il BIM in Italia

In Italia, a differenza di molti Paesi europei, non vi è una vera e propria politica industriale e per i costruttori italiani il BIM viene visto come un nuovo strumento interessante, ancora poco utilizzato, ma in forte via di sviluppo.

L'avvento del BIM nel mondo delle costruzioni ha trascinato con sé perplessità ed incertezze, colmabili esclusivamente con una forte incentivazione volta a formare i professionisti interessati e a implementare i software a supporto della digitalizzazione, in maniera semplice e allo stesso tempo efficace.

Il Nuovo Codice Appalti (Decreto Legislativo 18/04/2016 n. 50) ha introdotto l'obbligo di specifici metodi di modellazione per l'edilizia e le infrastrutture, in linea con la normativa europea. L'obbligo entrerà in vigore dal 2019 per i lavori relativi a opere di importo maggiore o uguale a 100 milioni di euro e dal 2025 per tutte le nuove opere.

La progettazione BIM risulterà quindi obbligatoria per garantire una completa disponibilità in formato digitale dei dati relativi a qualunque costruzione.

Tutto ciò rappresenta dunque una grande opportunità per l'industria italiana delle costruzioni, che assiste alla formazione di uno scenario futuro caratterizzato da soluzioni più innovative in termini di organizzazione del lavoro e di una migliore integrazione tra i professionisti coinvolti.

La prima sfida richiesta è portare tutti a pensare in termini di ciclo di vita [2]: l'obiettivo finale delle parti coinvolte nel processo di modellazione non sarà più rappresentato esclusivamente dal completamento del progetto, bensì dovrà adottare una visione più ampia dell'edificio oggetto dell'analisi, andando quindi a concentrare l'intera fase di progettazione anche sul futuro del modello, sui mutamenti che subirà e prevedendo, inoltre, l'intervento di altri professionisti durante l'intero ciclo di vita.

2.5 Interoperabilità

Il termine fondamentale per comprendere al meglio i meccanismi alla base del BIM come metodologia di progettazione e modellazione è sicuramente “interoperabilità”, intesa come possibilità di scambiare in maniera del tutto automatica e senza perdita le informazioni e i dati tra le diverse applicazioni per poter permettere a ciascun professionista di continuare a lavorare col proprio software, purché condivida un formato di scambio standard accessibile a tutti da un unico database.

È necessario porre attenzione sul fatto che questa possibilità di condivisione non riguarda esclusivamente la fase di realizzazione dell’opera, bensì anche l’intero ciclo di vita, comprendendo quindi manutenzione e dismissione finale.

Alla luce di quanto esposto, è opportuno sottolineare l’essenzialità dell’interoperabilità come collante tra BIM inteso come modello e, allo stesso tempo, come metodologia di modellazione.

Si può, quindi, constatare come il BIM offra questa possibilità di gestione digitale dell’informazione con conseguenti benefici in termini di efficienza e costi nell’ambito della progettazione.

Infine, è possibile concludere che, nonostante l’adozione di molteplici strumenti di progettazione da parte dei singoli professionisti per lo sviluppo dell’intera fase del processo edilizio, oggi è possibile effettuare uno scambio utile di informazioni per mezzo di diversi formati standard, in grado di preservare i dati originali automaticamente senza alcun rischio di perdita.

Come verrà esposto più nel dettaglio nel capitolo seguente, ad oggi, i principali formati di scambio sono l’IFC e il gbXML.

2.6 Formati di scambio

Con l'avvento dei software di modellazione BIM è nata così l'inevitabile esigenza di affidare lo scambio e, quindi, la conservazione di tutte le informazioni proprie del progetto in esame a particolari formati.

Viene presentata ora una breve introduzione su quelli che sono gli aspetti più significativi dei formati di scambio, analizzando le loro funzionalità in maniera tale da comprendere al meglio le differenze tra i vari software di modellazione, proposte poi nel capitolo successivo.

Il formato di scambio deve risultare affidabile e, allo stesso tempo, universale, per poter garantire un totale mantenimento dei dati senza alcun tipo di perdita e deve rappresentare, inoltre, una soluzione "smart" per l'avanzamento del progetto, caratterizzato perciò da un grado di interoperabilità molto efficiente.

D'altra parte, come verrà meglio esplicitato nel corso dell'elaborato, risulta pressoché impossibile mantenere tutte le informazioni relative a un progetto senza avere anche solo una minima percentuale di perdita.

Ad oggi, l'unico formato di scambio riconosciuto su scala internazionale è l'IFC (Industry Foundation Classes), ma tuttavia in alcuni casi presenta ancora qualche limitazione.

L'IFC deriva dal formato STEP, maggior riferimento nel mondo dell'edilizia che consente lo scambio dei dati, non solo geometrici, necessari alla costruzione [13]. Il formato IFC permette lo scambio di dati tra diversi software CAD o BIM, in termini di geometria ma anche di informazioni ad essa associate. D'altra parte, l'IFC non è ancora in grado di conservare il concetto di insieme dei parametri dei componenti, o famiglie Revit, poiché durante l'esportazione le proprietà e i valori associati vengono conservati, ma non saranno più in grado di guidare o influenzare la geometria. Inoltre, in seguito ad alcuni test effettuati importando ed esportando uno stesso file IFC con un'applicazione BIM, il formato non è risultato del tutto affidabile, o comunque non con una precisione del 100%. [13]

Infine, è opportuno sottolineare il rispetto della normativa ISO 16739:2013 da parte di IFC.

Un altro importante formato di scambio è l'xml, un'estensione di HTML, in grado di fornire tag definibili dall'utente per specificare un significato prestabilito dei dati trasmessi.

Il gbXML è uno schema sviluppato da Green Building per trasferire le informazioni necessarie per l'analisi energetica preliminare di involucri edilizi e per la simulazione degli impianti meccanici [14].

Nel progetto di tesi è stato utilizzato maggiormente quest'ultimo formato di scambio per via della limitazione di importazione da parte di DesignBuilder.

2.7 Software

Oggi, lo scambio di dati tra due software avviene in quattro modi differenti: in modo diretto; con collegamenti proprietari tra specifici strumenti BIM; con formati di scambio proprietari, principalmente focalizzati sulla geometria; con formati modello di scambio di dati di prodotto pubblici, come ad esempio l'IFC, o formati di scambio basati su XML [2].

Per completezza verrà di seguito fornita una presentazione di quelli che sono i software principali per la modellazione, focalizzando l'attenzione sulle loro caratteristiche e i formati di scambio disponibili.

Come già accennato, mentre fino a qualche anno fa risultava indispensabile che un progettista avesse nel proprio studio un tecnografo, al giorno d'oggi è essenziale disporre di programmi di computer grafica per la realizzazione di disegni tecnici.

I software CAD (Computer Aided Drafting) sono potenti strumenti di progettazione e di disegno tecnico che permettono all'utente di lavorare sia sul 2D che sul 3D.

Nell'ultimo decennio hanno assunto particolare importanza i software BIM, non più incentrati unicamente sulla progettazione basata su dimensioni spaziali, bensì su un tipo di modellazione parametrica a oggetti caratterizzata anche da una dimensione temporale, concentrandosi quindi sull'andamento del processo di costruzione e su tutto ciò che va a definire il "ciclo di vita" del progetto.

Il software BIM più utilizzato è sicuramente **Autodesk Revit**, programma in grado di supportare un processo di progettazione multidisciplinare per la progettazione collaborativa e di coordinare ogni elemento dell'edificio in un unico database. Revit, inoltre, include funzionalità per tutte le specializzazioni coinvolte in un progetto edilizio, consentendo di importare, esportare e collegare i dati con i formati più comuni, tra cui IFC, DWG e gbXML.

Infine, con Revit è possibile eseguire una intuitiva analisi energetica tramite il plug-in Autodesk Insight, col quale si accede alle informazioni sulle prestazioni energetiche dell'edificio in esame e, inoltre, valutarne e modificarne i fattori operativi e progettuali in maniera da migliorarne le prestazioni energetiche.

Un altro software che trova largo impiego nell'ambito della progettazione architettonica è **ArchiCAD**, programma in grado di permettere all'utente di lavorare con oggetti ai quali sono applicate proprietà e dati parametrici.

Un modello di ArchiCAD può essere descritto come un database BIM centralizzato e accessibile a tutti i partecipanti alla progettazione. Anche in questo caso, il software offre fluidità di collaborazione senza rischiare di perdere informazioni con la gestione integrata delle proprietà IFC, DXF e DWG.

Ad oggi, ArchiCAD risulta lo strumento di modellazione BIM più vecchio.

Inoltre, ArchiCAD dispone di due funzionalità per il calcolo energetico: una incorporata, “Valutazione Energetica”, che permette una diagnosi energetica preliminare dinamica, attendibile ma limitata ed esportabile solo nei formati PDF (Portable Document Format) e XLS (Microsoft Excel), e una aggiuntiva (ma non ancora disponibile in Italia), conforme alle normative standard ed esportabile nei formati PDF, XLS, IFC, gbXML e PHPP.

AllPlan è un altro strumento BIM universale per il settore delle costruzioni e offre la possibilità di lavorare in totale collaborazione tramite la piattaforma Allplan Share, basata nuovamente su un’accurata disponibilità dei dati in grado di regolamentare in maniera precisa i ruoli e i diritti d’accesso di tutte le parti coinvolte nel progetto.

Anche in questo caso si ha la garanzia che nessuna informazione vada persa e, al fine di garantire uno scambio di dati affidabile tra i progettisti coinvolti, il software dispone di interfacce di alta qualità per tutti i formati tradizionali, tra i quali DWG, IFC e PDF.

Infine, con caratteristiche affini ai software precedentemente analizzati, è possibile menzionare **Digital Project**, programma CAD molto simile a Revit e ArchiCAD, che consente di inviare informazioni direttamente al produttore invece che processarle separatamente per prepararle all’invio, diversamente da alcuni software CAD.

Per la trattazione è stato utilizzato il software Autodesk Revit 2017 e, nel corso dell’elaborato verranno presentate ancor più nel dettaglio le caratteristiche di funzionamento del programma, fornendo un quadro completo di come sia stato adoperato passo a passo per la modellazione del caso studio adottato.

Viene ora proposta una tabella riassuntiva inerente al confronto tra i sopraccitati software:

Title and developer	Latest release date and version	2D/3D or specialty fields	Academic version?	User Interface language/s	Support for BIM?	Support for Industry Foundation Classes?	Support for AutoCAD DXF?	Imports	Exports
Allplan	2018	2D/3D BIM AEC	Free	pt-BR, en, cs, fr, de, hu, it, ja, ko, ru, zh-Hans, es	Yes	Yes	Yes(2D + 3D)	<i>DXF, DWG, AutoCAD-data, DGN, PDF, IFC, CINEMA 4D, SketchUp, Rhino, STL, VRML, XML</i>	DXF, DWG, DWF, DGN, PDF, IFC, CINEMA 4D, RIB iTWO, SketchUp, Rhino, VRML, Collada, Google Earth, STL, Universal 3D, Hpgl, SVG, 3ds Max, xlsx, docx, cdk
ArchiCAD by Graphisoft	June 14, 2017 / Version 21	2D/3D Architecture, BIM	Free	en, de, es, fr, it, pt, ru, ja, pl, cs, hu, nl, fi, sv, no, da, tr, el, zh-Hans, ko, zh-Hant	Yes	Import and export. Import certified. Export certified	Yes(2D + 3D)	<i>3D Studio, ACIS SAT, BMP, DGN, DWF, DWG, DXF, EMF, EPS, GIF, HPGL/PLT, IFC/IFCXML, JP2, JPEG, PDF, PICT, PNG, PSD, QTIF, SketchUp, TGA/Targa, TIF/TIFF, WMF</i>	3D Studio, Artlantis/ATL, AVI, BMP, DGN, DWF, DWG, DXF, EMF, EPS, EPX - Piranesi, FACT - ElectricImage, GIF, HPGL/PLT, IFC/IFCXML, JP2, JPEG, MOV, LP - Lightscape, OBJ, PDF, PICT, PNG, PSD, QTIF, SGI, SketchUp, TGA/Targa, TIF/TIFF, U3D, WRL, WMF
Digital Project by Gehry Technologies	2013, Version R5	2D/3D/4D AEC	Free	en	Yes	Yes	Yes(2D + 3D)	<i>SDNF, DWG, DXF, IFC, IGES, HSF, 3DXML</i>	SDNF, DWG, DXF, IFC, IGES, HSF, 3DXML
Revit by Autodesk	January 27, 2017 / 2017.2	2D/3D BIM AEC	Free	pt-BR, en, cs, fr, de, hu, it, ja, ko, ru, zh-Hans, es	Yes	Import and export. Import certified. Export certified	Yes(2D + 3D)	<i>DXF, DWG, SAT, SKP, DGN, JPEG, PNG, TIFF</i>	DWG, DXF, SAT, FBX, IFC, DGN, DWF, JPEG, PNG, TIFF, AVI, PDF, GBXML

Tabella 1 – Confronto tra i principali software BIM

Così come è stato appena fatto per i software di modellazione BIM, segue una descrizione dei principali programmi BEM adibiti alla simulazione energetica dinamica degli edifici.

Il calcolo energetico dinamico comprende diverse metodologie dettagliate che processano un ingente numero di dati, rappresentando quindi un problema sia dal punto di vista della complessità degli algoritmi di calcolo, sia per quanto riguarda il tempo necessario per una completa simulazione.

Risulta quindi evidente come, fin da subito, sia nata la necessità di implementare tali metodologie in software appositi.

Il motore di calcolo più diffuso in commercio ed opensource è sicuramente **EnergyPlus**, software dotato di un notevole grado di dettaglio per la simulazione termica e la diagnosi energetica in regime dinamico. Tale programma è privo di interfaccia grafica, non permettendo dunque alcun tipo di modellazione solida o di output grafico dei risultati e tutti gli input si presentano sotto forma di tabelle dati.

EnergyPlus è strutturato in moduli di programma che calcolano simultaneamente il fabbisogno energetico di riscaldamento e raffrescamento, fornendo inoltre i parametri prestazionali dell'edificio oggetto dell'analisi.

Come accennato in precedenza, siccome l'interfaccia grafica di EnergyPlus non risulta del tutto intuitiva e "user-friendly", esistono in commercio altri software che rappresentano a tutti gli effetti l'interfaccia grafica di EnergyPlus, come ad esempio DesignBuilder.

DesignBuilder è dunque un software che implementa il motore di calcolo EnergyPlus per simulazioni energetiche dinamiche e, di fatto, ne rappresenta l'interfaccia utente più completa, in grado inoltre di modellare virtualmente qualunque tipo di edificio.

Con DesignBuilder è possibile fare un computo dei consumi totali e separati dell'edificio, delle emissioni, del bilancio termico, degli apporti interni e molto altro ancora, il tutto con la possibilità di selezionare il periodo temporale di riferimento più adatto alla tipologia di analisi (sub-orario, orario, giornaliero, mensile e annuale).

Un'alternativa a DesignBuilder è rappresentata da **OpenStudio**, comprendente diversi strumenti software per il supporto della modellazione energetica degli edifici. Come in precedenza, anche OpenStudio utilizza EnergyPlus e, inoltre, include il plug-in OpenStudio SketchUp, estensione dello strumento di modellazione 3D SketchUp, in grado di creare la geometria utile per EnergyPlus.

Così come DesignBuilder, OpenStudio supporta l'importazione di file gbXML e IFC.

Infine, un ulteriore software nell'ambito delle simulazioni energetiche è rappresentato da **Simergy**, programma sviluppato dalla Digital Academy, del tutto autonomo poiché dotato di una propria interfaccia grafica e con funzionalità integrate con EnergyPlus.

Anche in questo caso il software risulta facilmente utilizzabile, nonostante la modellazione geometrica appaia meno veloce e poco intuitiva.

Ancora una volta sono disponibili l'importazione e l'esportazione dei formati IFC e gbXML.

Nel corso della trattazione una sezione sarà dedicata esclusivamente a DesignBuilder, software utilizzato per l'analisi energetica del caso studio di FCA Mirafiori.

Infine, tra i software BEM che utilizzano il proprio motore di calcolo, è possibile menzionare IES anche Virtual Environment (IESVE).

IESVE è un programma destinato a ingegneri, architetti e progettisti e consente all'utente di analizzare nel dettaglio il consumo di energia, il comfort, le emissioni e molto altro. Supporta tutti i formati per l'importazione ed è compatibile con Autodesk Revit.

3. Metodologia

Nel capitolo corrente verrà presentato il percorso metodologico adottato durante l'intero progetto di tesi, dalla fase preliminare inerente alla raccolta dati alla modellazione BIM, fino all'analisi del modello energetico BEM (Building Energy Model).

La Figura 1 rappresenta il flusso di lavoro seguito nel corso del progetto ed è possibile individuare 5 step, attraverso i quali, a partire dal caso reale (real asset), si è giunti alla realtà virtuale (virtual asset):

- Data collection
- Modello BIM
- Modello di analisi energetica (EAM)
- Modello energetico (BEM)
- Output

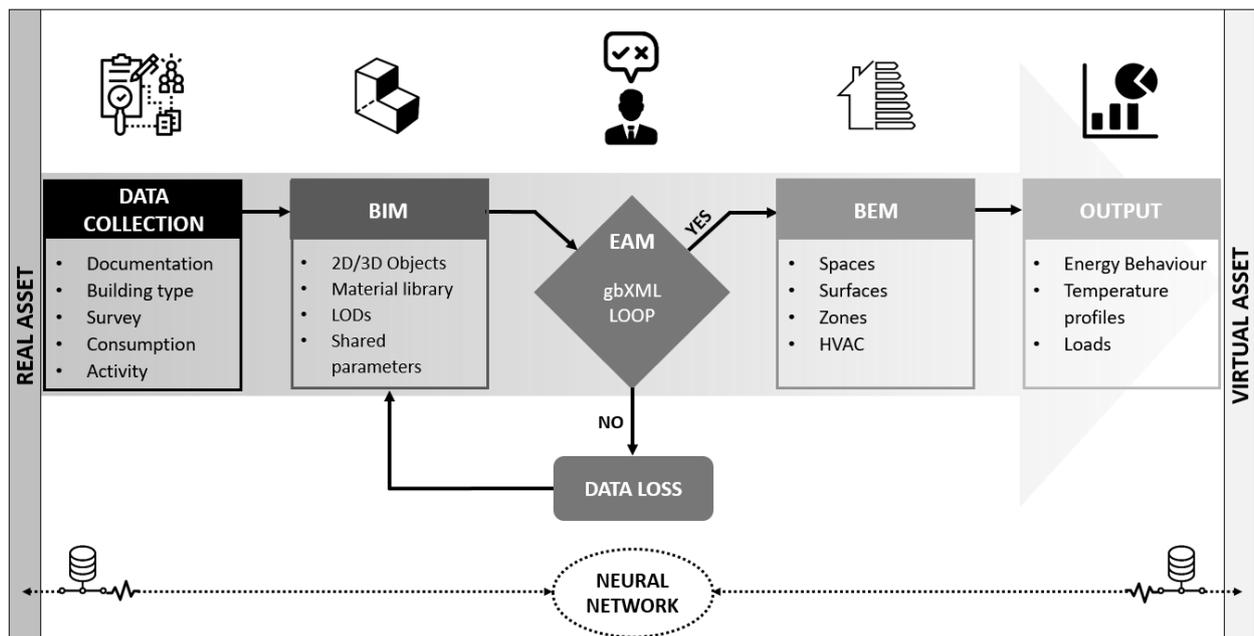


Figura 1 – Flusso di lavoro dal BIM al BEM

Seguendo la metodologia rappresentata dal diagramma di flusso nella figura precedente (Figura 1), è stato quindi possibile elaborare il caso studio e, partendo dalle informazioni di base utilizzate come input per la modellazione BIM, è stata ottenuta una rappresentazione virtuale del comportamento energetico dell'edificio, giungendo dunque ad un modello approssimabile in maniera accurata alle realtà coinvolte nel progetto.

Le due modellazioni, parametrica ed energetica, sono strettamente legate tra loro tramite una fase di verifica e controllo dell'accuratezza dei dati ottenuti durante la creazione del modello

energetico, che verrà poi esportata da un software all'altro; si ha così la possibilità di riscontrare e risolvere eventuali incongruenze e criticità che, altrimenti, discosterebbero troppo il modello virtuale finale da quello reale.

3.1 Data collection



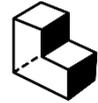
Questa fase iniziale del processo di lavoro adottato è risultata essere fondamentale e imprescindibile, poiché caratterizzata dalla raccolta di tutti i dati inerenti all'edificio oggetto di analisi.

Più precisamente, affinché lo scopo finale sia quello di progettare un modello efficiente in termini di affidabilità, risulta estremamente importante reperire la maggior quantità di informazioni possibile, in maniera tale da avvicinarsi fedelmente alla realtà.

Per iniziare la creazione di un modello parametrico, realizzato durante la fase successiva rappresentata dalla modellazione BIM, è necessario selezionare dati di input di diversa natura: geometria, tipologia occupazionale dell'edificio, attività svolte al suo interno, consumi reali in termini di energia, eventuali carichi interni definiti dalla presenza di macchinari, caratteristiche strutturali e collocazione geografica della struttura.

Tuttavia, nonostante questa fase preliminare rappresenti le fondamenta di tutto il processo descritto nel presente elaborato, non sempre risulta facile reperire tutte le informazioni di cui si necessita, col rischio quindi di riscontrare problemi in termini di validazione dei risultati ottenuti.

3.2 Modello BIM



Prima di descrivere nel dettaglio la fase di modellazione BIM, viene proposta un'analisi del software adottato, in modo tale da facilitare la comprensione dei meccanismi alla base del flusso di lavoro proposto.

Autodesk Revit è un software parametrico che lavora per oggetti e si integra perfettamente al processo di progettazione BIM.

Revit offre potenti mezzi per permettere all'utente di intraprendere un processo completo di progettazione, collaborazione, controllo e gestione di qualunque edificio.

Inoltre, indipendentemente dalla natura dei professionisti coinvolti, è possibile lavorare in maniera del tutto multidisciplinare, poiché Revit comprende in un'unica piattaforma funzionalità adatte a qualunque tipologia di specializzazione interessata dal progetto.

Nasce, dunque, il concetto di interoperabilità, in concomitanza con la necessità di preservare informazioni utili e indispensabili e di consentire ai vari membri coinvolti di lavorare con un unico modello condiviso.

Più nel dettaglio, se da un lato l'architetto ha a disposizione tutti gli strumenti necessari all'elaborazione del progetto partendo dalla documentazione di costruzione, dall'altro la figura dell'ingegnere strutturale può progettare nei minimi dettagli i componenti e la struttura di un edificio in linea con le normative di riferimento; ancora, se da una parte al progettista MEP (Mechanical, Electrical and Plumbing) è consentito di dimensionare e modellare una qualunque tipologia di impianto sulla base del modello architettonico e strutturale, dall'altra un professionista dell'edilizia ha quindi modo di operare partendo dalla fase di pre-costruzione delineatasi dal coordinamento delle figure professionali precedenti.

Il software in sé si presenta con un'interfaccia intuitiva, con schede suddivise per tematiche ("Architettura", "Struttura", "Sistemi").

Inoltre, può essere variato il livello di dettaglio per qualunque scala di vista (Basso, Medio, Alto), in maniera tale da modificare la visualizzazione di un qualsiasi oggetto in base alle esigenze.

Una funzionalità fondamentale per comprendere al meglio Revit è rappresentata dal concetto di "Famiglia". Una famiglia è un gruppo di elementi caratterizzati da un insieme di parametri, intesi come proprietà comuni (geometriche ma non solo); ciò non vuol dire, però, che tutti gli elementi all'interno di una stessa famiglia siano uguali, ma i parametri che la caratterizzano sono, nel loro insieme, identici. Infine, ad ogni famiglia corrisponde una stessa rappresentazione grafica e, ogni qualvolta venga creato un oggetto con una famiglia, si crea un'istanza, un insieme di proprietà.

Per l'inizio di un nuovo progetto è possibile importare un file Autocad (DWG) o creare direttamente la geometria dell'edificio su Revit con gli strumenti messi a disposizione nelle schede "Architettura" e "Struttura".

Inquadro l'ambito applicativo del software, vengono proposte ora le tematiche di maggior interesse che caratterizzano la modellazione parametrica.

A tal proposito, vengono forniti brevi esempi applicativi, in modo da entrare più nel dettaglio nelle fasi di progettazione.

Gli ambiti di maggior interesse durante la creazione del modello parametrico su Revit riguardano principalmente, la geometria, i materiali, le proprietà termiche, meccaniche e strutturali dell'edificio, la distinzione tra vani, locali, aree e zone, il tutto parallelamente al concetto di "Livello di definizione" (LOD).

3.2.1 Level Of Development (LOD)

Il LOD rappresenta il livello di dettaglio (o di sviluppo/definizione) degli oggetti parametrici coinvolti nel modello BIM e varia nel corso della progettazione.

Infatti, per ogni fase del progetto, è necessario che il livello di dettaglio sia ben definito e che aumenti la quantità e la qualità delle informazioni in base allo stadio progettuale interessato.

Nella fase iniziale di una qualunque modellazione BIM, l'entità delle informazioni contenute nel modello è per lo più di natura concettuale, mentre negli step successivi il modello diviene più dettagliato e diventa di fatto virtuale e operativo.

D'altra parte, bisogna porre attenzione a non fraintendere il LOD con il dettaglio grafico: il LOD differisce dal dettaglio grafico per il semplice fatto che, in linea con la metodologia BIM, le informazioni non riguardano esclusivamente aspetti puramente grafici, bensì di varia natura, in termini di materiale utilizzato, caratteristiche tecniche, fase progettuale, aspetti strutturali, composizione dei componenti, geolocalizzazione, proprietà termiche e così via.

3.2.2 Geometria

In generale, la prima fase di modellazione è caratterizzata dalla creazione di una griglia virtuale di partenza (dal gruppo “Riferimenti” della scheda “Architettura”) per meglio definire la geometria del progetto, individuando inoltre i vari livelli d’interesse con le relative altezze.

Successivamente, vengono quindi disegnati i muri con l’accorgimento delle diverse opzioni inerenti alla linea di ubicazione in base alla linea dell’asse, alla superficie di finitura (interna o esterna) o alla superficie del nucleo del muro stesso (soluzione ottimale: superficie esterna del nucleo).

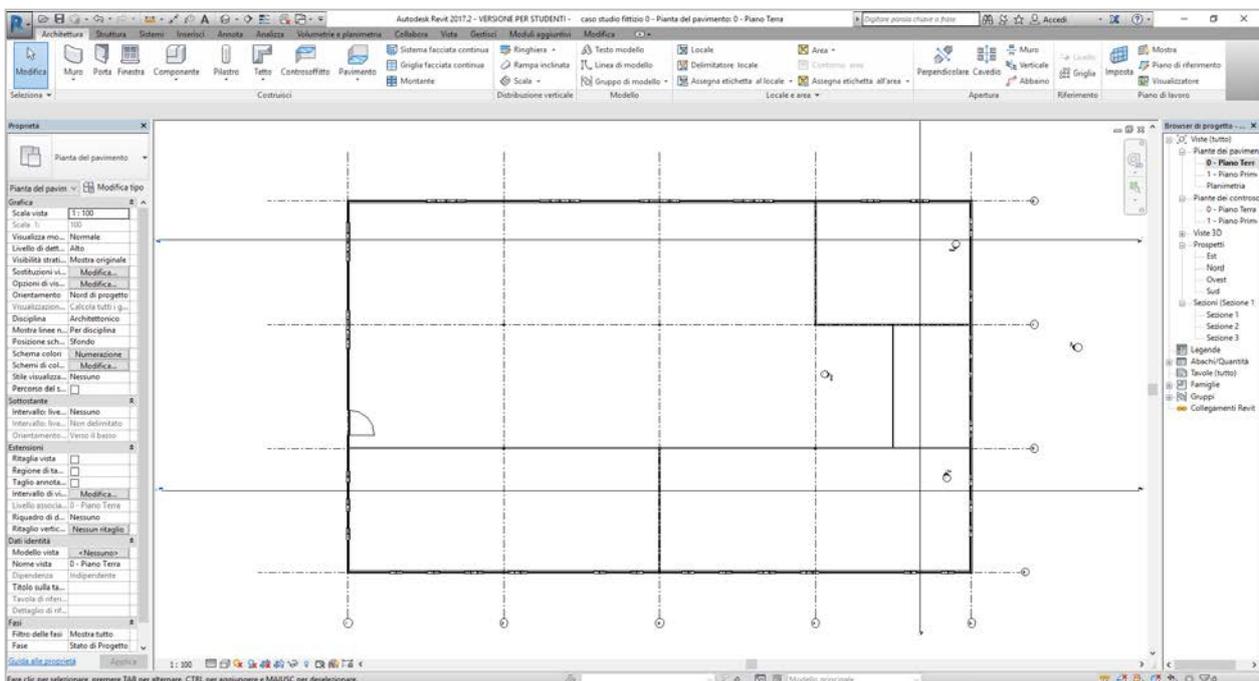


Figura 2 – Planimetria d’esempio (Revit)

Per entrare più nel dettaglio riguardo al concetto di famiglia in Revit, dopo aver valutato la possibilità di riscontrare la presenza di lucernari nel caso studio analizzato nel prosieguo dell’elaborato, situazione in linea con la maggior parte dei complessi industriali, si è deciso di modellizzare parametricamente a titolo di esempio una nuova famiglia per la creazione di una finestra ad alto dettaglio adattabile a un tetto a falde.

Dopo aver scelto un modello di partenza, è stata definita la struttura comprensiva dei vari piani e linee di riferimento, utili poi come “appoggio” per la creazione della geometria e dei parametri d’interesse.

Il modello di partenza, selezionato dai template di riferimento della libreria di Revit, è stato scelto appositamente affinché avesse come oggetto “host” il tetto, vale a dire la geometria di ubicazione della finestra richiesta dalla categoria.

Al termine della fase di progettazione geometrica è possibile quindi ottenere il seguente modello:

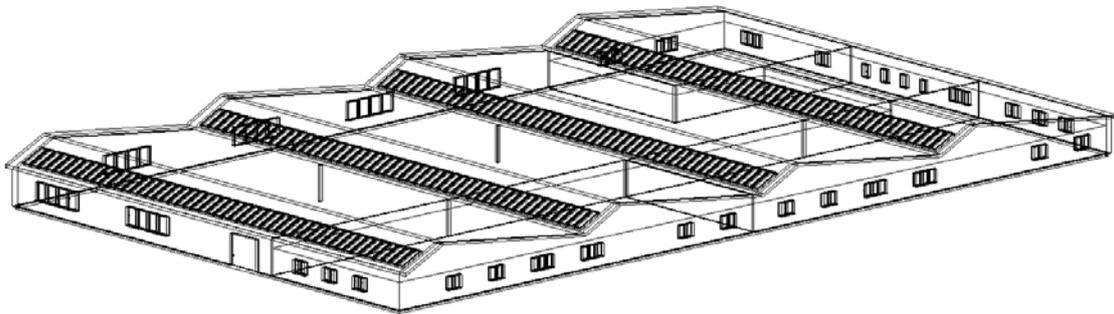


Figura 5 – Modello 3D visualizzazione wireframe

3.2.3 Materiali

Poiché ogni componente edilizio può essere rappresentato con diversi livelli di dettaglio, è possibile modificarne l'aspetto e le stratificazioni (stratigrafie) ed intervenire quindi su muri, pavimenti e tetti.

Grazie alla finestra "Proprietà", è possibile dunque modificare la struttura del componente desiderato, come mostrato in Figura 6:

Modifica assieme

Famiglia: Muro di base pannello prefabbricato
 Tipo: pannello prefabbricato
 Spessore totale: 0.4000
 Resistenza (R): 2.0109 (m²·K)/W
 Massa termica: 44.85 kJ/K
 Altezza esempio: 6.0000

LATO ESTERNO					
	Funzione	Materiale	Spessore	Ripiegature	Materiale strutturale
1	Struttura [1]	Calcestruzzo, Pannelli prefabbricati	0.1500	<input checked="" type="checkbox"/>	
2	Contorno del nucleo	Strati sopra ripiegatura	0.0000		
3	Struttura [1]	Riempimento intercapedine	0.1000	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	Contorno del nucleo	Strati sotto ripiegatura	0.0000		
5	Struttura [1]	Calcestruzzo, Pannelli prefabbricati	0.1500	<input checked="" type="checkbox"/>	

LATO INTERNO

Inserisci Elimina Su Giù

Ripiegatura di default
 Agli inserti: Non ripiegare Alle estremità: Nessuno

Modifica struttura verticale (strumenti attivi solo in anteprima sezione)
 Modifica Unisci regioni Estrusione
 Assegna strato Dividi regione Scanalature

Visualizza: Pianta del pavimento Antepima >> OK Annulla ?

Figura 6 – Stratigrafia componente (Revit)

Inoltre, accedendo all'interno di ogni singolo materiale scelto per comporre la stratigrafia, Revit permette all'utente di definirne la rappresentazione grafica, la resa grafica (rendering), le proprietà fisiche e, soprattutto, le proprietà termiche, fondamentali poiché forniscono un valore di resistenza termica (e quindi di trasmittanza), utile ai fini del progetto per l'analisi energetica.

La sopracitata metodologia può essere applicata indistintamente a qualsiasi componente opaco interessato da stratigrafia e permette quindi al progettista, da un lato, di ottenere una rappresentazione grafica ottimale e, dall'altro, di avere il completo controllo sul componente in termini non solo geometrici, ma anche fisici, grafici e termici.

La figura seguente (Figura 7) mostra il risultato ottenuto al termine della modellazione:

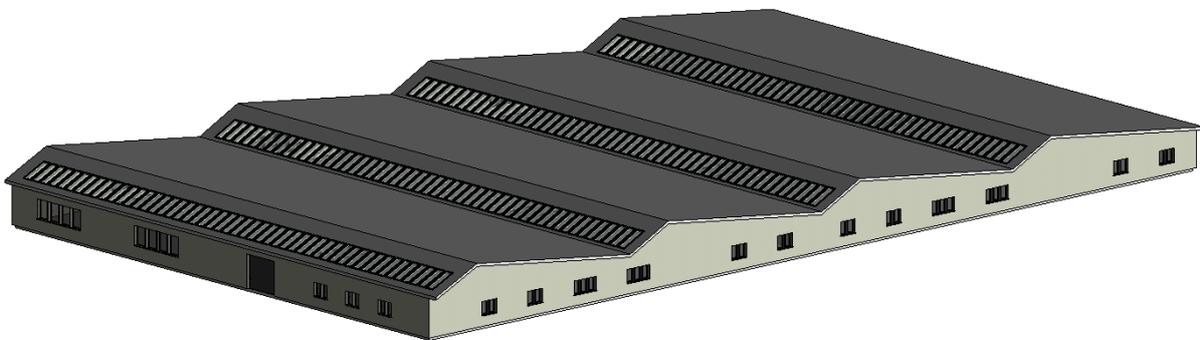


Figura 7 – Modello 3D visualizzazione realistica

3.2.4 Vani, Locali, Aree e Zone

Un'importante distinzione effettuata da Revit, utile per il flusso progettuale che dal modello BIM giunge a quello BEM, è quella tra le differenti metodologie di suddivisione interna degli edifici:

- *Vano* → suddivisione effettuata per la gestione delle informazioni relative ai carichi di riscaldamento/raffreddamento, partendo dal calcolo delle aree in cui vengono posizionati.
- *Locale* → suddivisione in base a elementi strutturali (delimitatori del locale).
- *Aree* → suddivisione su grande scala rispetto ai locali.
- *Zone* → insieme di uno o più vani.

Vani (1) Modifica	
Elettrico - Illuminazione	
Illuminazione media stimata	0.00 lx
Rapporto incassi locale	0.000000
Piano di lavoro calcolo illuminazione	0.7620
Calcolo illuminazione - Piano luminaria	Non calcolato
Riflettanza del controsoffitto	75.0000%
Riflettanza del muro	50.0000%
Riflettanza del pavimento	20.0000%
Elettrico - Carichi	
Carico HVAC di progetto per area	0.00 W/m ²
Carico alternativo di progetto per area	0.00 W/m ²
Dimensioni	
Area	284.839 m ²
Perimetro	69.7200
Altezza non delimitata	5.3000
Volume	1509.646 m ³
Altezza di calcolo	0.0000
Meccanico - Flusso	
Flusso d'aria di mandata specificato	0.00 L/s
Flusso d'aria di mandata calcolato	Non calcolato
Flusso d'aria di mandata reale	0.00 L/s
Flusso d'aria di ritorno	Specificato
Flusso d'aria di ritorno specificato	0.00 L/s
Flusso di ritorno effettivo	0.00 L/s
Flusso d'aria di scarico specificato	0.00 L/s
Flusso di scarico effettivo	0.00 L/s
Analisi energetica	
Zona	Default
Vano tecnico	<input type="checkbox"/>
Abitabile	<input checked="" type="checkbox"/>
Tipo di climatizzazione	Riscaldamento e raffreddamento
Tipo di vano	<Edificio>
Tipo di costruzione	<Edificio>
Persone	Modifica...
Carichi elettrici	Modifica...
Carico riscaldamento calcolato	Non calcolato
Carico riscaldamento di progetto	0.00 W
Carico raffreddamento calcolato	Non calcolato
Carico raffreddamento di progetto	0.00 W

Figura 8 – Sezione “Proprietà” di un vano (Revit)

Andando più nel dettaglio, con l’utilizzo dei vani è possibile definire, oltre alle dimensioni, le caratteristiche della porzione di spazio in termini di illuminazione, di carichi elettrici, di flussi meccanici e di analisi energetica (Figura 8).

Al contrario, inserendo un locale il software permettere l’accesso alle sole informazioni inerenti alla geometria.

Risulta molto importante capire bene la distinzione tra il concetto di vano e quello di locale, soprattutto per quanto riguarda la fase inerente all’esportazione verso un software di simulazione energetica e la conseguente interoperabilità con questo.

3.3 Modello EAM



La fase corrente rappresenta quella successiva alla metodologia di modellazione e si focalizza maggiormente sugli aspetti energetici e sull'esportazione di questi ultimi verso la creazione del modello energetico vero e proprio (BEM).

Il presente capitolo mette in evidenza come si evolve, nel caso di un modello semplificato, il flusso progettuale, dalla costruzione del modello energetico all'esportazione di quest'ultimo, passando dall'analisi dell'affidabilità dei dati coinvolti.

Con il termine EAM, Energy Analysis Model, si indica un'astrazione della forma e della struttura complessive di un edificio in una "rete computazionale" in grado di catturare efficacemente tutti i principali percorsi e processi di trasferimento del calore all'interno dell'edificio [15].

Sostanzialmente, è possibile descrivere l'EAM come il modello intermedio tra quello parametrico BIM realizzato in Revit e quello energetico (BEM) creato successivamente con DesignBuilder.

Per passare dalla modellazione parametrica alla simulazione energetica sono state individuate quattro strade principali, tenendo in considerazione le esigenze di importazione del software scelto:

- Esportazione del modello energetico
- Insight 360
- Esportazione vani
- Plug-in per DesignBuilder

3.3.1 Esportazione del modello energetico

La strategia illustrata nel presente capitolo prevede la creazione del modello energetico direttamente su Revit.

Accedendo alle impostazioni energetiche tramite il gruppo "Ottimizzazione energetica" della scheda "Analizza", è possibile specificare i parametri che agiranno da input per la creazione del modello, ad esempio le proprietà termiche dei materiali e i dati di costruzione dell'edificio (Figura 9-a).

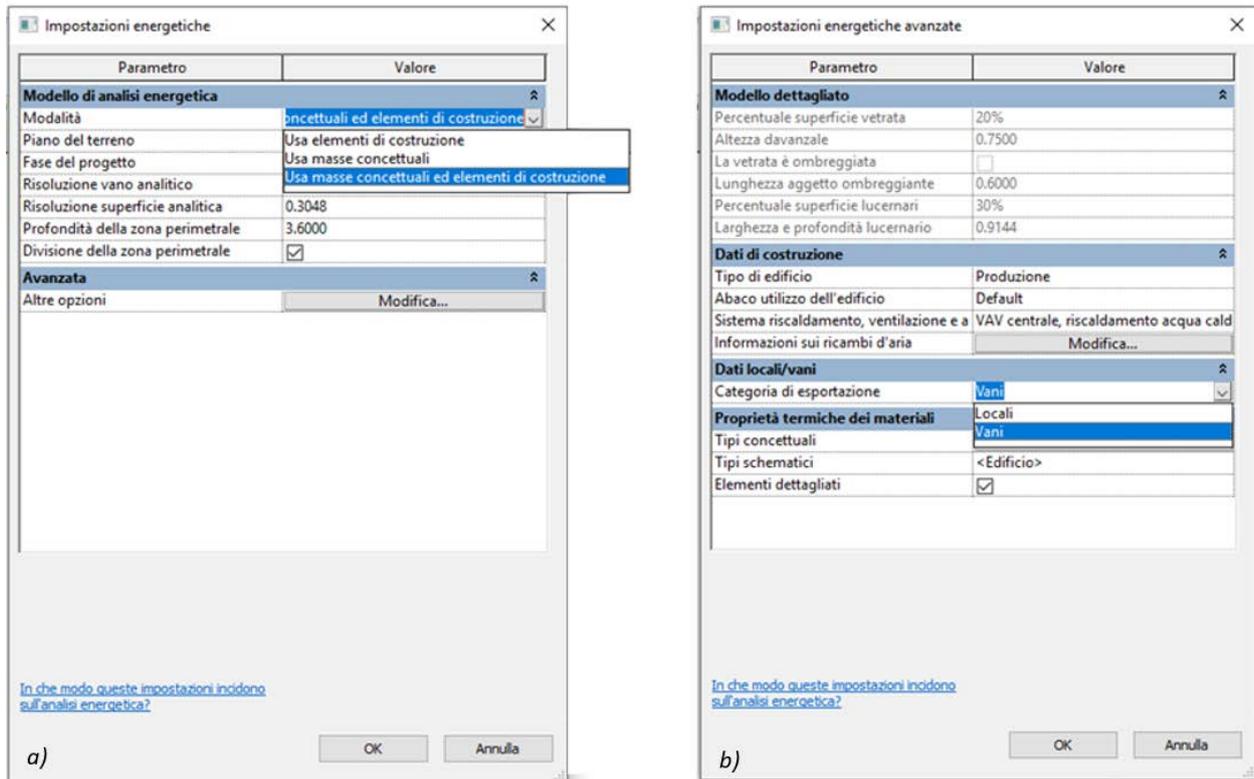


Figura 9 – Impostazioni energetiche preliminari (a) e avanzate (b) (Revit)

È possibile notare come la prima cosa che viene richiesta sia la scelta della modalità di creazione del modello, distinguendo fra tre opzioni: “Usa elementi di costruzione”, “Usa masse concettuali”, “Usa masse concettuali ed elementi di costruzione”.

La modalità più raccomandata è l’ultima e non c’è bisogno che il modello creato disponga per forza di masse concettuali ed elementi di costruzione contemporaneamente.

La Figura 9-b rappresenta la sezione inerente alle impostazioni energetiche avanzate ed è accessibile dal comando “Modifica” della finestra rappresentata dalla Figura 9-a.

È quindi possibile selezionare la modalità di creazione del modello energetico, scegliendo tra “Vani” o “Locali”; per via delle ragioni precedentemente elencate, se la categoria di esportazione viene impostata su “Vani”, Revit procederà con l’analisi portandosi dietro tutte le informazioni inerenti all’illuminazione, all’occupazione e ai carichi interni, oltre che il nome e il numero del vano in questione.

Infine, è possibile decidere la tipologia di edificio, il relativo impianto meccanico per climatizzazione e ventilazione, e il modo col quale specificare le proprietà termiche dei materiali, selezionando “Tipi concettuali” (nel caso in cui le proprietà non siano state specificate nel modello), “Tipi schematici” (in sostituzione all’opzione precedente), oppure “Elementi dettagliati” (se il modello in Revit risulta già comprensivo di tutte le stratigrafie di pavimenti, muri e tetti con le relative proprietà termiche).

Una volta definite tutte le impostazioni, sempre nella sezione “Ottimizzazione energetica”, si procede con la creazione del modello energetico, avente termine con la rappresentazione del modello da parte di Revit mediante appositi colori ad indicare le superfici energetiche analitiche (Figura 10).

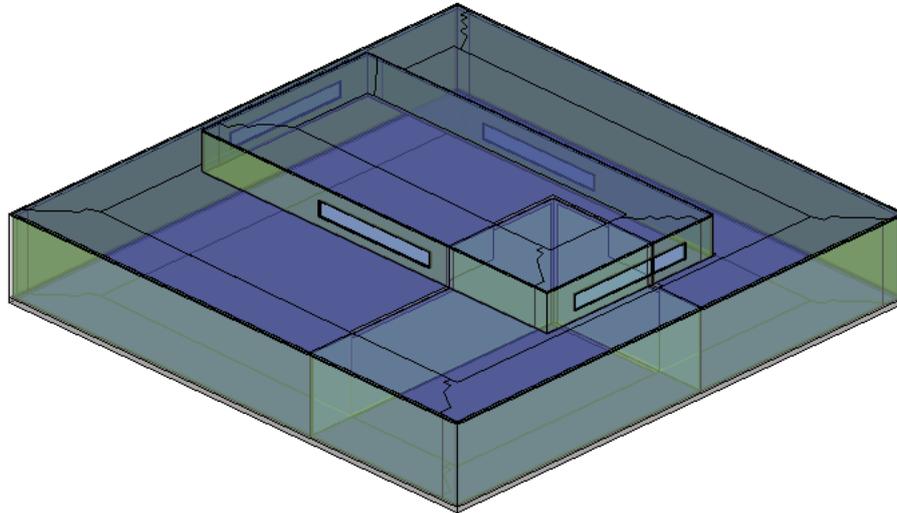


Figura 10 – Visualizzazione 3D modello energetico

Infine, l’ultimo step è rappresentato dall’esportazione del modello energetico creato tramite i formati gbXML o IFC (Figura 11); per l’intero progetto, come già anticipato, si è scelto di utilizzare il formato di scambio gbXML poiché supportato da DesignBuilder.



Figura 11 – Esportazione tramite file di scambio (Revit)

Dopo avere quindi selezionato il formato di esportazione, Revit propone la scelta tra le due modalità “Utilizza impostazioni energetiche” e “Utilizza volumi vani/locali”, e scegliendo la prima viene creato il file di scambio sulla base del modello energetico creato in precedenza.

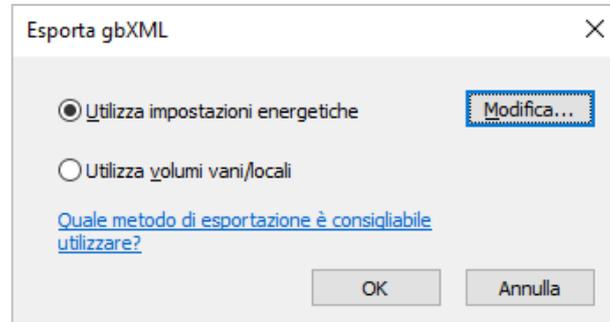


Figura 12 – Esportazione gbXML (Revit)

3.3.2 Insight 360

Dopo aver generato il modello energetico con la procedura precedentemente indicata, è possibile inviarlo al cloud di Autodesk per la simulazione energetica.

Dopo aver definito le coordinate geografiche di interesse, grazie al comando “Genera” presente nella suddetta scheda “Ottimizzazione energetica”, Revit mette quindi a disposizione la possibilità di effettuare un’analisi energetica automatica, a seguito della quale verrà recapitata all’utente un’e-mail contenente il link per il modello energetico in Autodesk Insight 360.

Insight 360 rappresenta una delle novità delle ultime versioni di Revit e permette facilmente ed intuitivamente di comprendere il reale comportamento energetico dell’edificio in esame.

Il cloud di Insight si presenta con un’interfaccia molto “user-friendly” e propone possibili interventi migliorativi in termini di performance energetica (orientamento, stratigrafie, illuminazione, serramenti, componenti vetrati, ecc...).

Come si può notare nella figura seguente (Figura 13), il primo parametro fornito da Insight 360 è il valore di energia primaria richiesta per il riscaldamento per unità di superficie (espresso in kWh/m²/anno), parametro internazionale di riferimento per la certificazione energetica degli edifici (ovviamente, trattandosi di un progetto fittizio, i risultati sono del tutto a titolo di esempio).

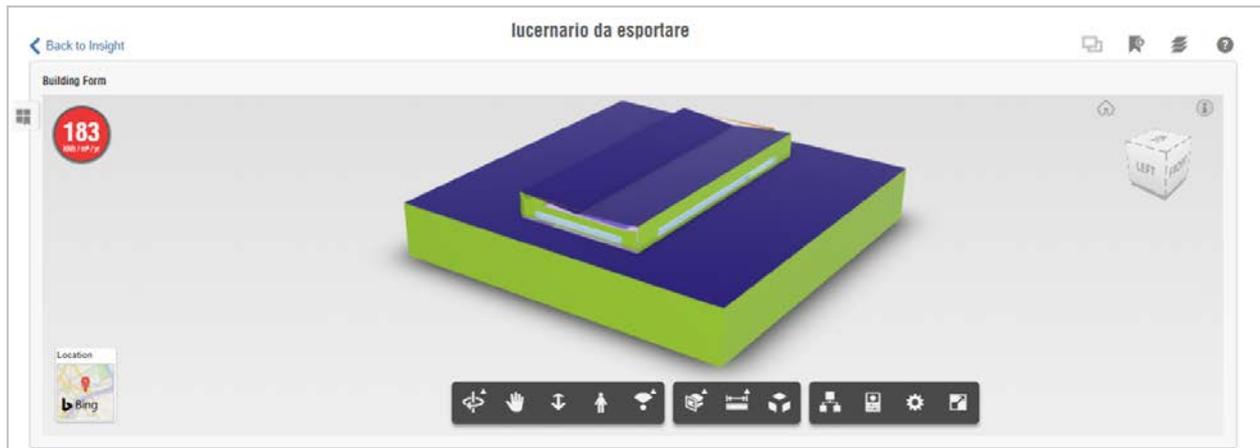


Figura 13 – Visualizzazione 3D su Insight 360

Inoltre, il cloud permette di effettuare un'analisi dei retrofit, vale a dire tutte quelle operazioni di intervento atte a migliorare l'efficienza energetica dell'edificio passando dall'uso razionale dei flussi energetici coinvolti.

Gli ambiti sui quali è possibile intervenire sono svariati e, più precisamente, Insight consente di modificare:

- Orientamento dell'edificio
- Rapporto superfici vetrate/superfici opache
- Sistemi di ombreggiamento
- Componenti vetrati
- Stratigrafie
- Infiltrazioni
- Illuminazione (sistemi di rilevamento/crepuscolari)
- Impianto HVAC
- Periodi di utilizzo
- Possibile impianto fotovoltaico

L'Figura 14 mostra a titolo di esempio l'editor inerente all'energia richiesta dovuta ai componenti opachi verticali, all'interno del quale è possibile individuare la configurazione BIM, ovvero quella attuale derivante dalla modellazione in Revit.

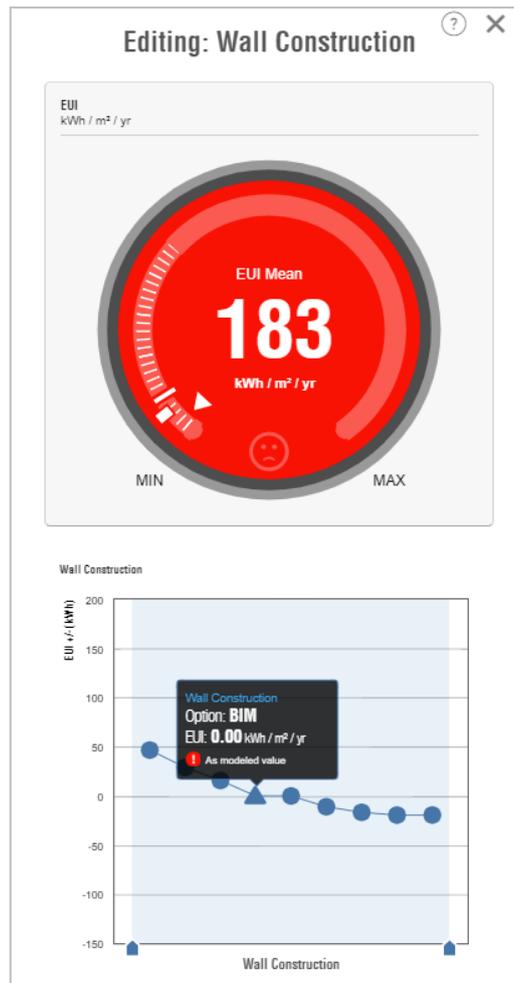


Figura 14 – Editor di Insight 360

Infine, sempre sul sito Autodesk, è possibile effettuare una comparazione tra due diversi possibili scenari, in maniera tale da confrontare il consumo di energia primaria o eventualmente il costo annuo ad essa associato.

3.3.3 Esportazione vani

Nella presente sezione viene descritta la metodologia che è stata poi adottata per il caso studio presentato in seguito.

Contrariamente a prima, non è stato creato il modello energetico, ma si è deciso di esportare direttamente il progetto col formato gbXML tramite la modalità “Utilizza volumi vani/locali” (preferendo, come concluso prima, i vani).

Questo metodo identifica i volumi definiti nel modello di edificio in base ai vani creati e genera un file di esportazione contenente tutte le informazioni energetiche del modello in base allo schema strutturale gbXML.

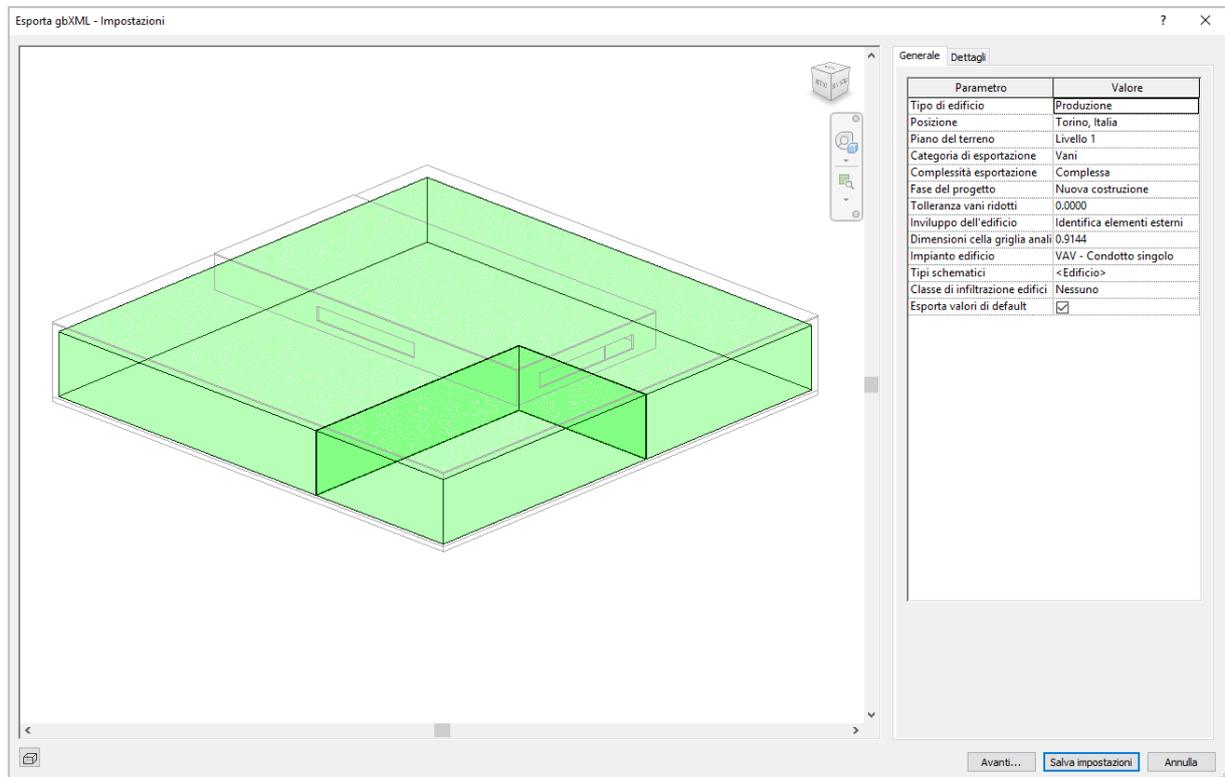


Figura 15 – Esportazione vani tramite gbXML (Revit)

Come si può evincere dalla Figura 15, le impostazioni sono molto affini a quelle energetiche trattate nella sezione inerente alla creazione del modello energetico.

Inoltre, tramite la scheda “dettagli” possono essere indagati la tipologia costruttiva di ogni vano, il numero di persone e i carichi elettrici ad esso associati, e il vano in esame viene evidenziato nella visualizzazione 3D per facilitarne l’individuazione.

La Figura 16 mostra più nel dettaglio quanto appena detto.

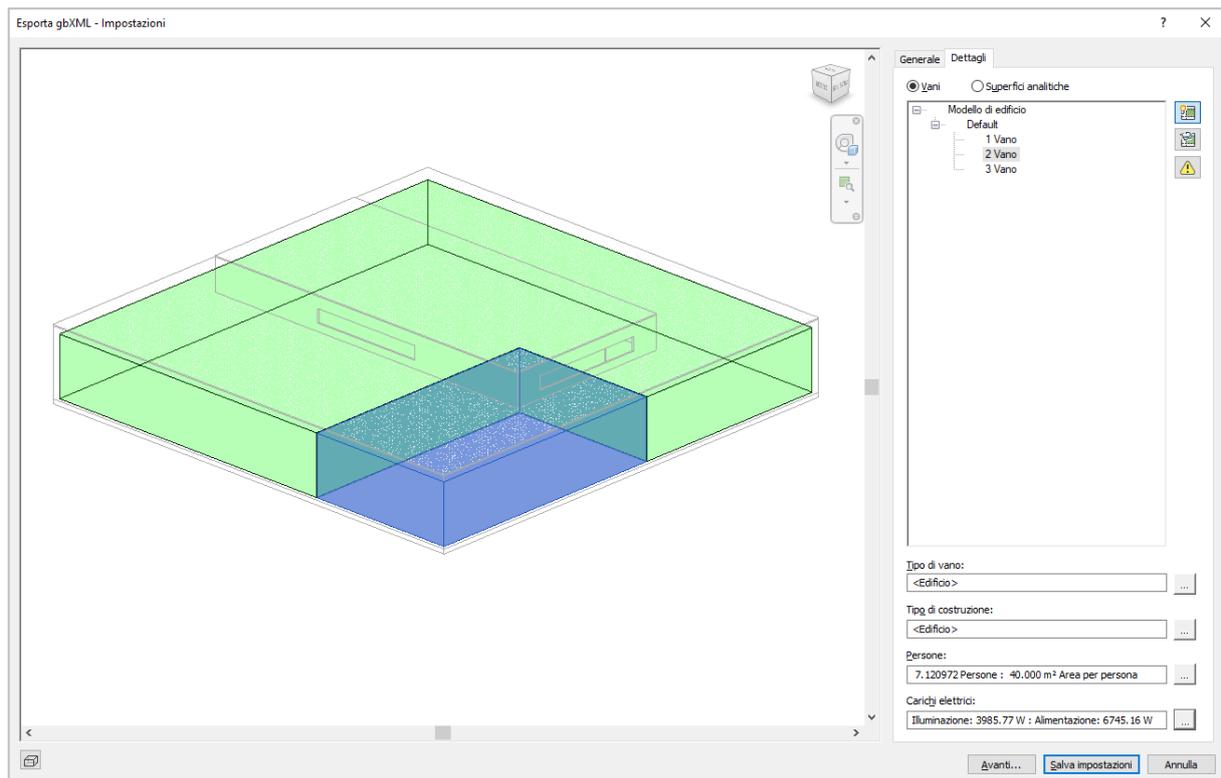


Figura 16 – Dettaglio vano in esportazione vani tramite gbXML (Revit)

Si è deciso di adottare questa strategia poiché è risultata la più efficiente dal punto di vista della conservazione delle informazioni e dell'interoperabilità tra i due software impiegati per l'analisi del progetto.

3.3.4 Plug-in per DesignBuilder

L'ultima alternativa proposta è rappresentata dalla possibilità messa a disposizione da Revit, esclusivamente dalla versione rilasciata nel 2017.

Più precisamente si tratta di un nuovo plug-in presente all'interno del software, che si installa automaticamente dopo aver installato DesignBuilder.

Questo capitolo dedica poco spazio al suddetto plug-in, poiché la procedura di esportazione in esame è risultata essere conflittuale e problematica, presentando criticità in contrasto con quanto esaminato con le precedenti modalità di esportazione.

L'utilizzo del plug-in ha condotto a errori relativi alla chiusura dell'involucro dell'edificio, alle finestre di lucernari posti sulla copertura e ha presentato una problematica per quanto riguarda i

materiali importati, poiché la denominazione adottata sul software di modellazione parametrica non viene sempre conservata, non facilitando quindi l'interoperabilità tra i due modelli.

Il presente metodo è stato quindi considerato alquanto inaffidabile, probabilmente per via del fatto che rappresenta una novità di Revit non ancora del tutto testata.

3.3.5 Data loss

Per validare la metodologia di esportazione è stata individuata la possibilità di effettuare un confronto tra le superfici analitiche calcolate da Revit nel modello EAM e quelle invece modellate geometricamente.

Per ogni componente è possibile quindi calcolare la differenza percentuale delle superfici come il rapporto tra la differenza dei due valori, riferiti rispettivamente all'EAM e al BIM, e il valore esatto derivante dalla modellazione parametrica (BIM).

Infine, è possibile effettuare una media per vedere quanto risulta essere la differenza percentuale media tra il modello EAM e quello BIM:

$$\text{differenza percentuale media} = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{S_{EAM,i} - S_{BIM,i}}{S_{BIM,i}} \right)}{N}$$

Dove:

- $S_{EAM,i}$ e $S_{BIM,i}$ sono le superfici i-esime dei modelli EAM e BIM rispettivamente;
- N è il numero totale delle superfici indagate dalla verifica.

Esaminando invece le criticità relative all'interoperabilità riscontrate nella fase di transizione dal modello BIM al modello BEM, è opportuno porre attenzione sul fatto che, se da un lato Revit consente di esportare i materiali dei componenti opachi, dall'altro non è stato possibile conservare le informazioni inerenti ai componenti finestrati.

Nonostante ciò, è comunque possibile selezionare tra i template di riferimento all'interno della libreria di DesignBuilder la composizione delle finestre che meglio approssima il componente reale, indagando quindi i valori di resistenza e trasmittanza termica.

3.4 Modello BEM



3.4.1 La simulazione energetica dinamica

Prima di mostrare la fase finale relativa all'analisi energetica col software di simulazione, è bene far chiarezza sul processo di calcolo alla base di una simulazione dinamica.

La simulazione energetica dinamica è un algoritmo di calcolo estremamente avanzato che permette all'utente di valutare in modo accurato le prestazioni e i consumi energetici di un edificio.

Nel corso dell'analisi viene posta l'attenzione sul reale comportamento dell'edificio in relazione alle componenti sia esterne che interne, tenendo quindi conto di un numero considerevole di variabili.

La simulazione dinamica rappresenta l'unico strumento capace di analizzare nel dettaglio le esigenze di comfort dei committenti, evitando quindi ogni tipo di criticità.

L'obiettivo principale è quindi quello di determinare il fabbisogno energetico di un edificio mediante l'utilizzo di step temporali riferiti all'ora piuttosto che al secondo, andando ad esaminare 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, con un'analisi stazionaria, non verrebbero considerate.

In questo modo risulta inoltre possibile prevedere l'andamento temporale dell'edificio in relazione all'impianto e comprendere al meglio come l'involucro reagisca alle sollecitazioni che subirebbe nella realtà dei fatti.

Dal 21 giugno 2017 è stata pubblicata la nuova norma UNI ISO 52016 (Energy performance of buildings -- Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads) che modifica il metodo di calcolo, contrapponendosi alla normativa UNI TS 11300 che adottava metodi di calcolo stagionali e, quindi, stazionari.

Il metodo di calcolo diviene dunque dinamico e orario, garantendo una maggior affidabilità dei risultati, in linea con le reali condizioni dell'edificio.

3.4.2 Analisi energetica

In seguito alla fase di modellazione su Autodesk Revit, l'analisi del progetto sposta la sua attenzione sull'ambito energetico, con l'utilizzo del software DesignBuilder (versione V5).

Come precedentemente fatto per la modellazione parametrica, viene ora presentata una breve descrizione del software.

DesignBuilder rappresenta forse la miglior interfaccia grafica del calcolatore EnergyPlus, impiegato per misurare, analizzare e implementare il comportamento energetico di un qualunque edificio.

Più precisamente, DesignBuilder mette a disposizione la possibilità di effettuare analisi energetiche in regime dinamico e analisi fluidodinamiche (CFD – Computational Fluid Dynamics), di ottimizzare i costi di un progetto e di fornire una vasta gamma di configurazioni impiantistiche per quanto riguarda la modellazione degli impianti.

Il principale vantaggio del software è quello di disporre di un'interfaccia grafica in grado di fornire un supporto considerevole all'utente per la progettazione iniziale degli edifici, con la possibilità di ottenere una rappresentazione grafica dei risultati di simulazione e di gestire nel dettaglio gli input e gli output direttamente passando all'utilizzo di EnergyPlus.

Per iniziare un nuovo progetto è possibile importare un file DWG o un file generato con un software BIM (creato ad esempio con Revit), oppure ancora c'è la possibilità di modellare la geometria dell'edificio direttamente con gli strumenti messi a disposizione da DesignBuilder stesso.

Il programma fornisce la possibilità di caricare una località, selezionandola dai template di riferimento già presenti nel database.

Il programma mette a disposizione molteplici schede, attraverso le quali è possibile intervenire sulla rappresentazione grafica (Layout), sulle caratteristiche occupazionali e inerenti alle condizioni di progetto di riscaldamento e raffrescamento dell'edificio (Activity), sulla composizione dei componenti opachi e le relative stratigrafie (Construction), sulle aperture finestrate (Openings), sull'illuminazione (Lighting), sull'impianto (HVAC) e su molte altre variabili, come ad esempio l'analisi fluidodinamica (CFD) piuttosto che il rendering grafico del modello.

Una volta generato il file di scambio, lo step successivo è rappresentato dal passaggio dal software di modellazione parametrica (Revit) a quello per l'analisi energetica (DesignBuilder).

Quando si decide di creare un nuovo progetto su DesignBuilder, le prime informazioni che vengono richieste sono quelle inerenti alla località di ubicazione dell'edificio, per poter selezionare il file climatico corretto, e alla tipologia di analisi, consentendo all'utente di scegliere tra tre tipologie: EnergyPlus, Klima Europa e DBSim.

Si è deciso di utilizzare il motore di calcolo EnergyPlus, poiché il più affidabile ed utilizzato a livello mondiale.

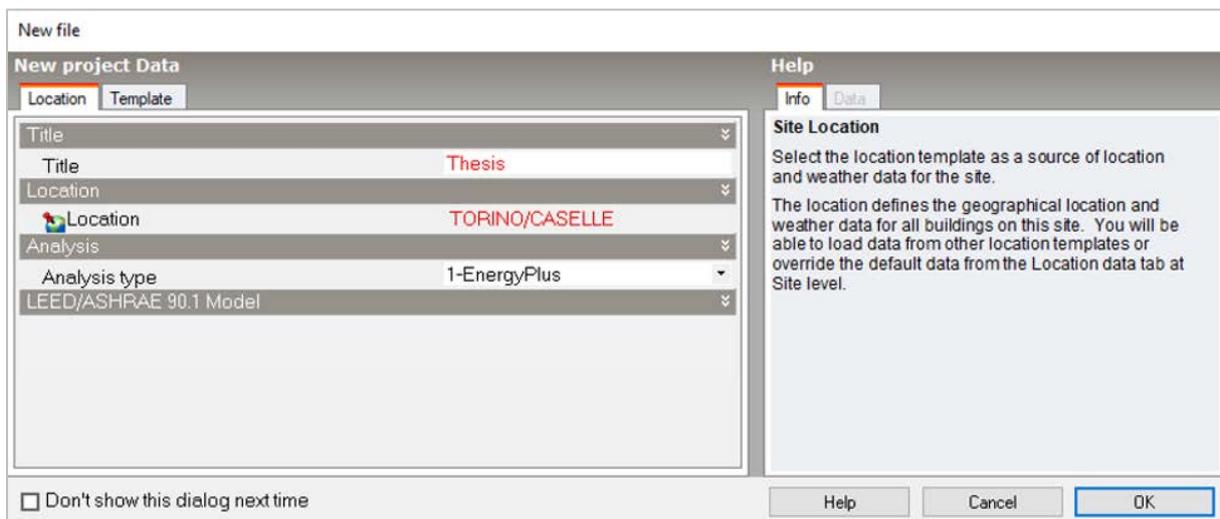


Figura 17 – Input località (DesignBuilder)

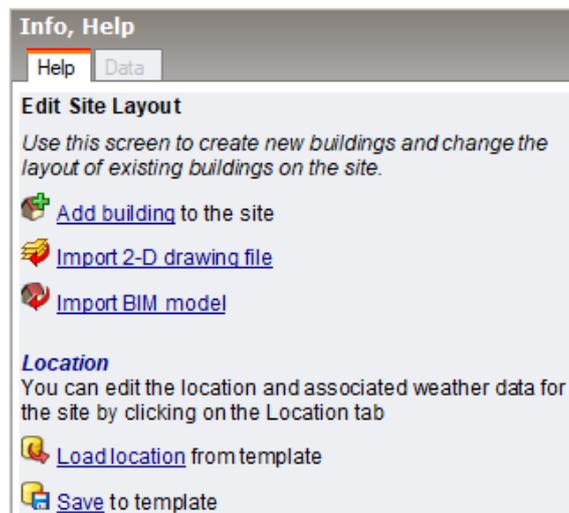


Figura 18 – Sezione "Info, Help" (DesignBuilder)

Successivamente, come suggerito dalla sezione “Info, Help” (Figura 18), si può procedere con l’importazione del file precedentemente creato con Revit tramite l’apposito comando “Import BIM model”.

In seguito, il programma reindirizza l’utente ad una finestra di dialogo inerente alla creazione di un nuovo edificio, all’interno del quale è possibile specificarne il tipo, in base al suo utilizzo, le informazioni relative all’indirizzo e al settore all’interno del quale si colloca (industriale, residenziale, ecc...). Inoltre, è possibile selezionare il template dell’attività, comprendente dei dati relativi ai livelli di occupazione, i turni di lavoro, i tassi metabolici, le temperature di set-point per riscaldamento e raffrescamento, i requisiti di illuminazione e quelli per la ventilazione interna.

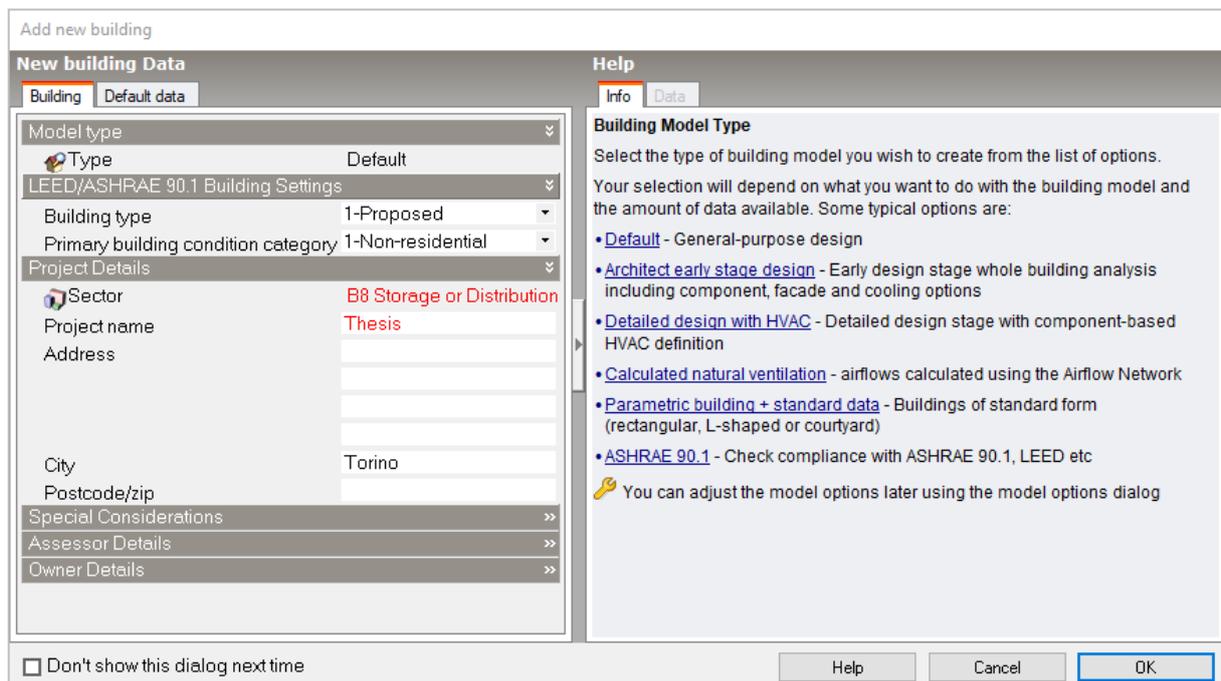


Figura 19 – Dettagli del progetto (DesignBuilder)

Successivamente, le ultime impostazioni da modificare sono quelle riguardanti le opzioni di importazione del modello BIM, prestando attenzione a selezionare l’importazione delle proprietà termiche e gli spazi (Spaces) nella modalità di importazione (opzione rivelatasi ottimale e senza perdita di dati a livello geometrico).

Le due figure seguenti mostrano i sopraccitati ultimi step prima della conclusione del processo di importazione.

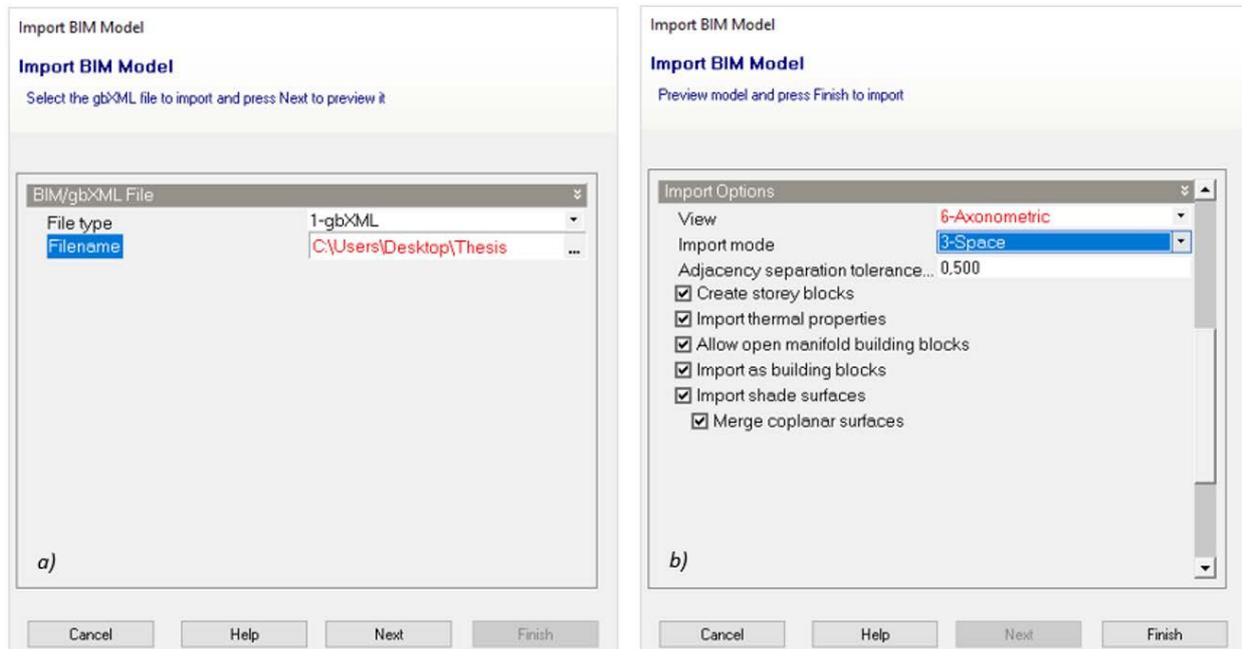


Figura 20 – Importazione file gbXML (DesignBuilder)

A titolo di esempio, con lo scopo di introdurre il capitolo successivo inerente agli output, viene riportato un tipo di impianto semplificato.

Lo schema dell'impianto è costituito da un circuito di acqua calda con a monte una caldaia e a valle un ventilconvettore, configurazione per il solo riscaldamento.

Viene quindi proposto lo schema dell'impianto adottato.

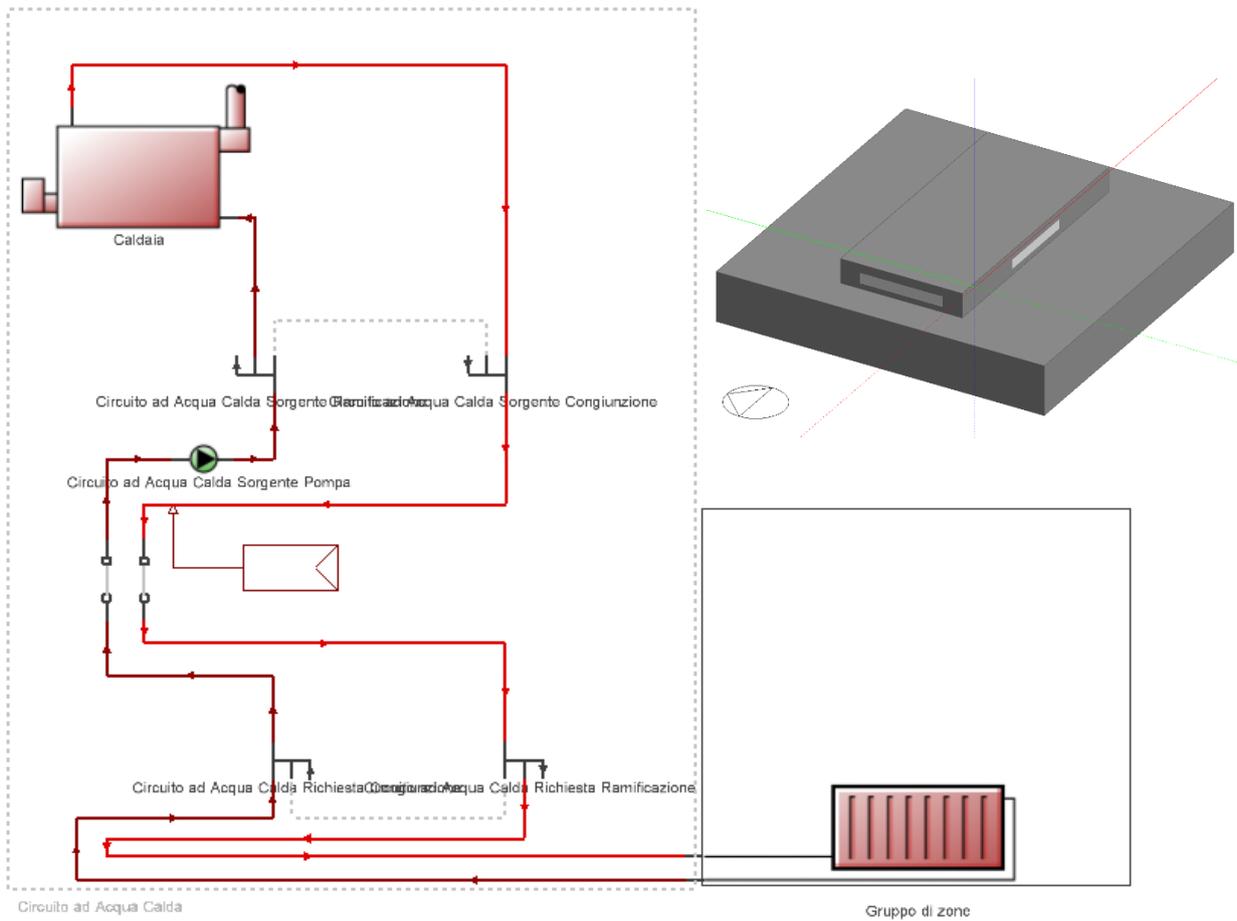


Figura 21 – Schema impianto HVAC e modello 3D

3.5 Output



Vengono ora riportati gli output a titolo di esempio relativi l'impianto creato nella sezione precedente.

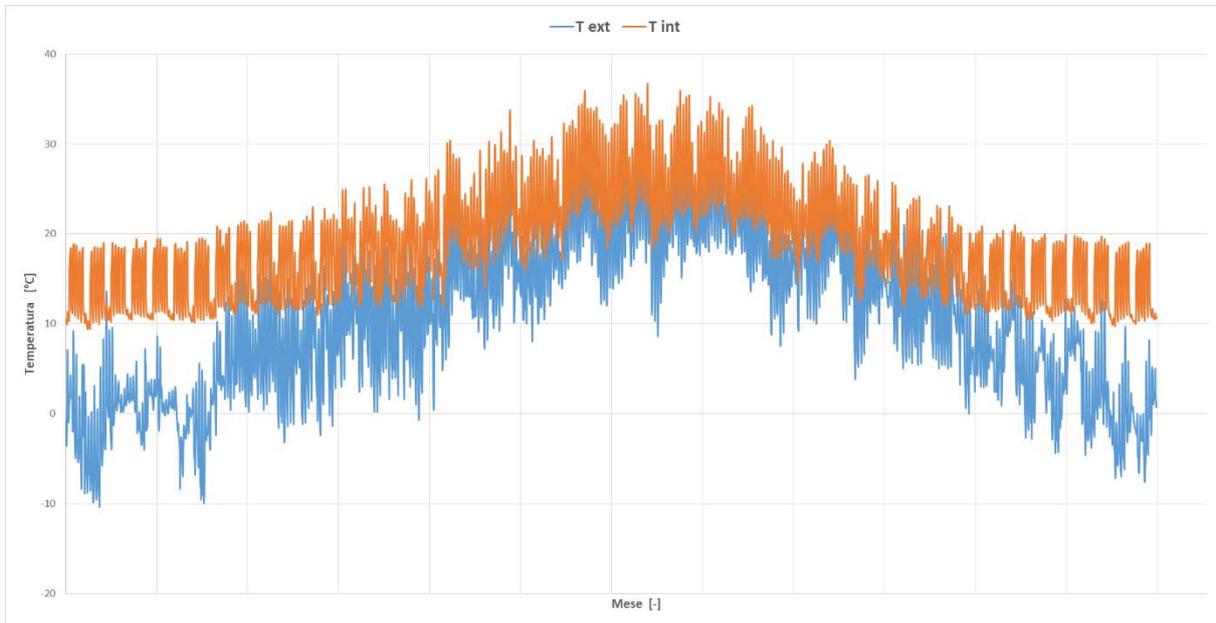


Figura 22 – Profili di temperatura senza impianto

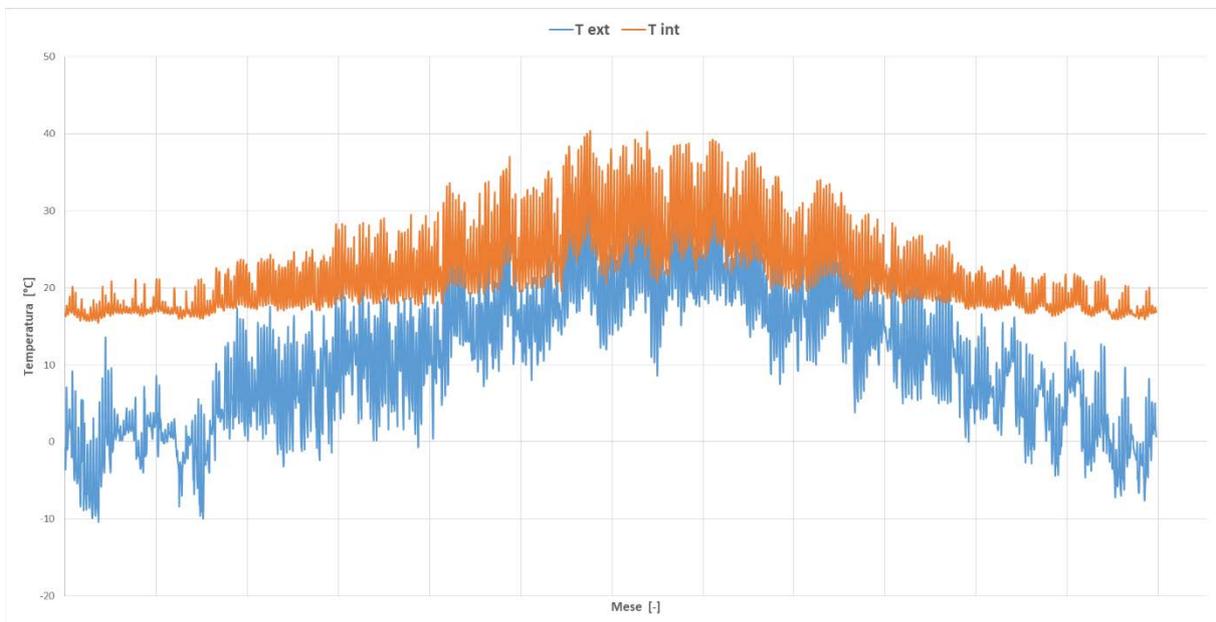


Figura 23 – Profili di temperatura con impianto

Nelle Figura 22Figura 23, sono riportati gli andamenti della temperatura esterna (di bulbo secco) e della temperatura operativa interna all'ambiente, ottenuti esportando il file (.csv), generato direttamente da EnergyPlus, in un foglio di calcolo Excel.

L'intervallo temporale utilizzato è di 10 minuti per l'arco di un intero anno.

Col termine "temperatura operativa" si indica la temperatura uniforme di una cavità fittizia in cui un soggetto scambierebbe per irraggiamento e convezione la stessa energia che scambia nell'ambiente reale, generalmente non uniforme [16]. La temperatura operativa (T_o) è data dalla combinazione tra la temperatura dell'aria (T_a) e la temperatura media radiante (T_{mr}):

$$T_o = \frac{h_c T_a + h_r T_{mr}}{h_r + h_c}$$

Dove:

h_c = coefficiente di scambio termico convettivo

h_r = coefficiente di scambio termico radiante

Come è possibile notare, nel caso senza impianto, la temperatura interna segue molto l'andamento di quella esterna e risulta quindi molto sensibile alle variazioni del profilo climatico.

Al contrario, l'edificio con l'impianto per il riscaldamento si comporta diversamente e la temperatura operativa cerca di adattarsi alle condizioni di set-point imposte in input, oscillando dunque intorno ai 20 °C.

Ovviamente, per quanto riguarda il periodo estivo, è possibile osservare come, non essendoci alcuno impianto di raffrescamento, la temperatura interna segue quella esterna discostandosi soltanto per via dei contributi derivanti dai carichi interni, imputabili prevalentemente al grado di occupazione dell'edificio e all'energia di processo per i macchinari presenti nell'edificio, e dagli apporti solari gratuiti.

Infine, vengono riportati gli output generati direttamente da DesignBuilder, inerenti al comfort (temperatura e umidità) e ai carichi interni rispettivamente, il tutto nella configurazione con l'impianto di riscaldamento.

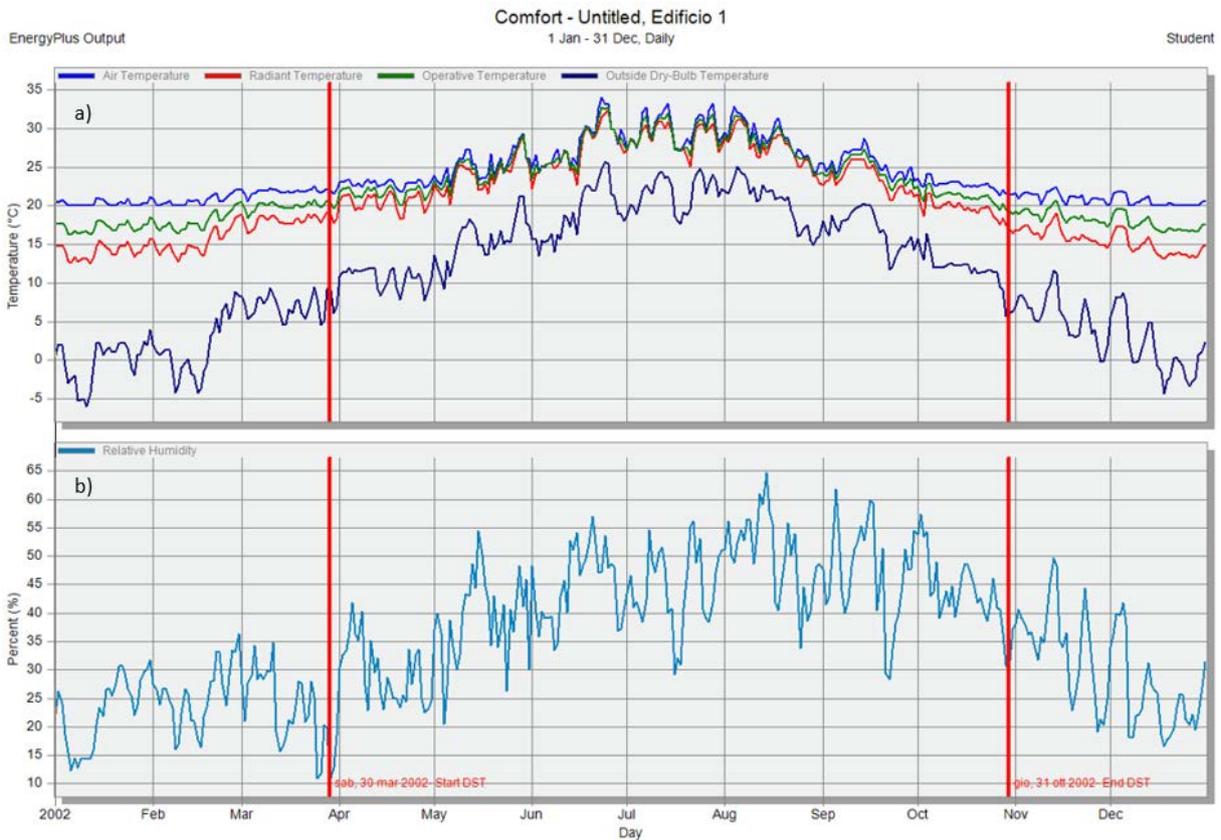


Figura 24 – Profili di temperatura e umidità relativa (con impianto)

Osservando la Figura 24-a, si può notare come la temperatura operativa risulti essere pressoché pari alla media aritmetica tra quella dell'aria interna e quella radiante; ciò è dovuto al fatto che il valore del coefficiente convettivo poco si discosta da quello radiativo. Il grafico in Figura 24-b, invece, rappresenta l'andamento annuale dell'umidità relativa interna, trend leggermente anomalo in quanto, di progetto, dovrebbe essere circa intorno al 40÷55% in inverno e 45÷60% in estate.

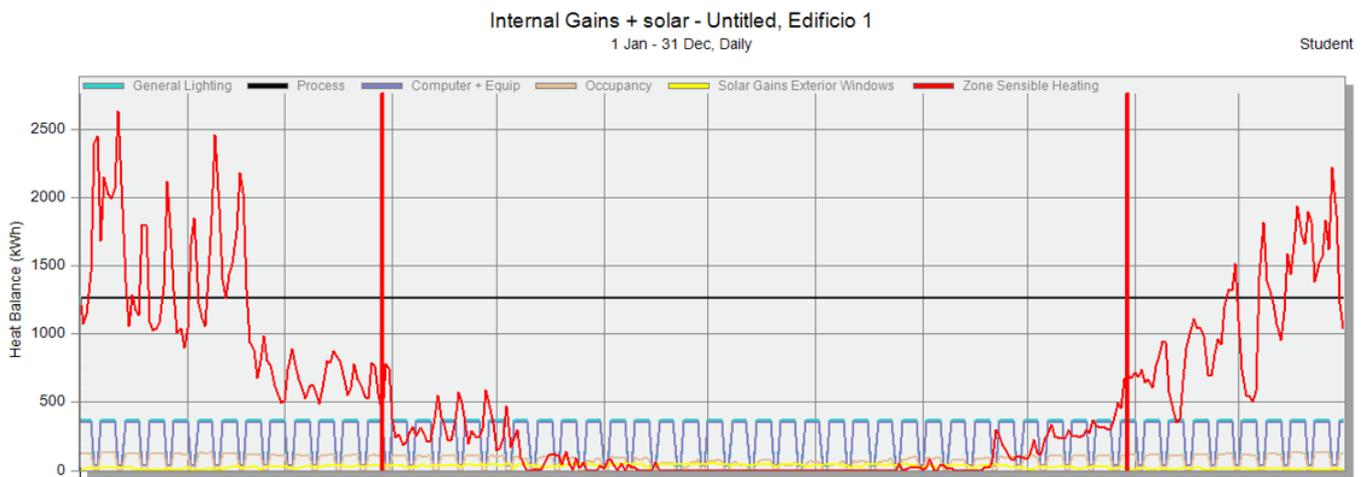


Figura 25 – Profilo dei carichi interni

Dalla Figura 25 è possibile notare come gli apporti interni dovuti alla presenza delle persone, ai computer e all'illuminazione rappresentino la quota minore assieme agli apporti solari gratuiti. Al contrario, l'energia di processo è stata appositamente mantenuta costante e pari a un valore piuttosto elevato, in maniera tale da simulare il comportamento di uno stabilimento industriale, come quello del caso studio d'interesse trattato nel seguito.

4. Caso studio

Il caso studio vero e proprio dell'elaborato riguarda lo stabilimento FCA di Mirafiori, comprensorio industriale sito nella zona sud di Torino.

L'obiettivo finale è rappresentato dall'analisi energetica del fabbricato, che si estende per circa 550.000 mq, andando ad analizzare tutti i parametri che caratterizzano il comportamento energetico dinamico dell'edificio.

Lo stabilimento si compone di differenti aree in base all'attività svolta al loro interno e, più precisamente, si suddivide in una zona principale dedicata alla verniciatura, un ex magazzino, le ex fucine, una zona di montaggio, una per la verniciatura paraurti e, infine, la lastratura.

La figura seguente (Figura 26) mostra l'immagine satellitare dell'intero complesso.

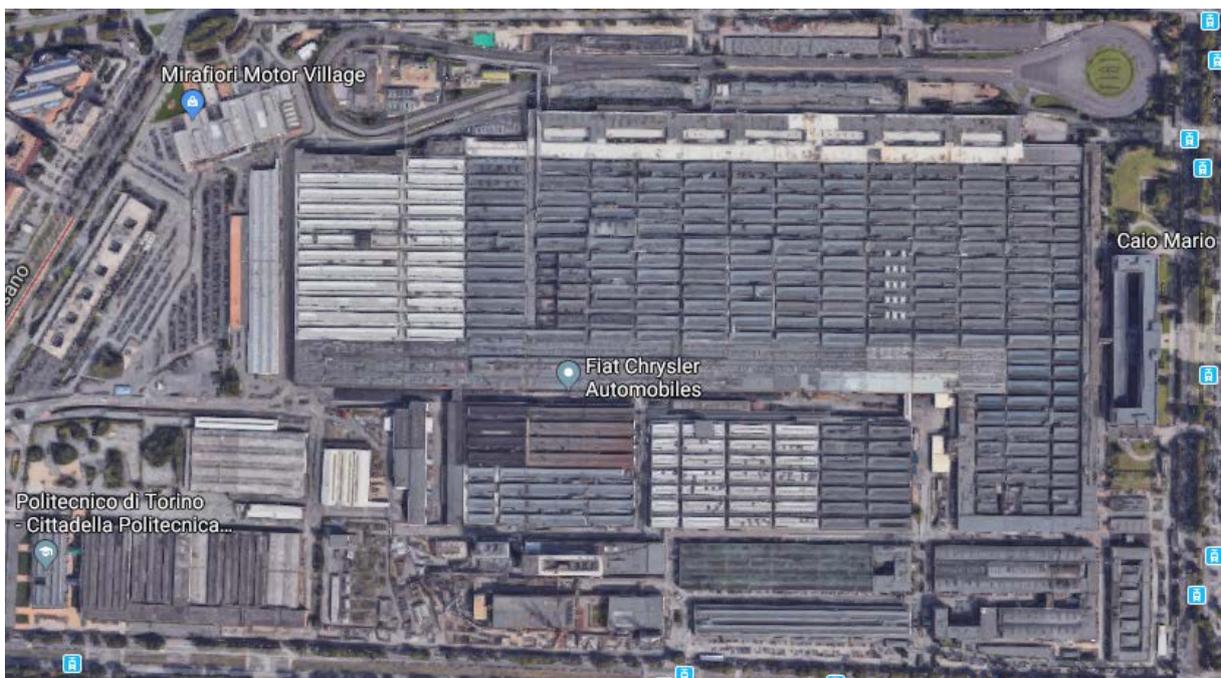


Figura 26 – Vista satellitare FCA Mirafiori (Google Maps)

Viene ora riportata la vista dal satellite più dettagliata (Figura 27) per quel che riguarda la copertura, oggetto di maggior interesse poiché caratterizzata da un numero considerevole di lucernari, maggiori componenti edilizi interessati da dispersione termica e, quindi, oggetto di un'analisi minuziosa durante la modellazione parametrica.



Figura 27 - Vista satellitare FCA Mirafiori (Google Maps)

Come testimoniano le figure precedenti, lo stabilimento è molto esteso e complesso da analizzare e, per questa ragione, si è deciso di effettuare un'analisi energetica ristretta alla sola zona corrispondente alla lastratura. Inoltre, i dati forniti da FCA non sono risultati del tutto esaustivi per motivi di privacy, ad eccezione della lastratura, della quale si è potuto reperire del materiale inerente a planimetrie e impianti per riscaldamento e raffrescamento.

Il flusso di lavoro adottato è quello descritto nel capitolo inerente alla metodologia e, perciò, verranno ripresi esattamente gli stessi step analizzati in precedenza in modo da rendere più lineare la trattazione.

4.1 Data collection



Per quanto riguarda la fase iniziale caratterizzata dalla raccolta dati, le informazioni di partenza avute direttamente da FCA consistevano in due file AutoCAD (.DWG), uno con la planimetria (Figura 28) e l'altro con la schematizzazione dell'impianto della sola zona lastratura (Figura 29). Inoltre, non è stato possibile effettuare alcun sopralluogo direttamente presso lo stabilimento.

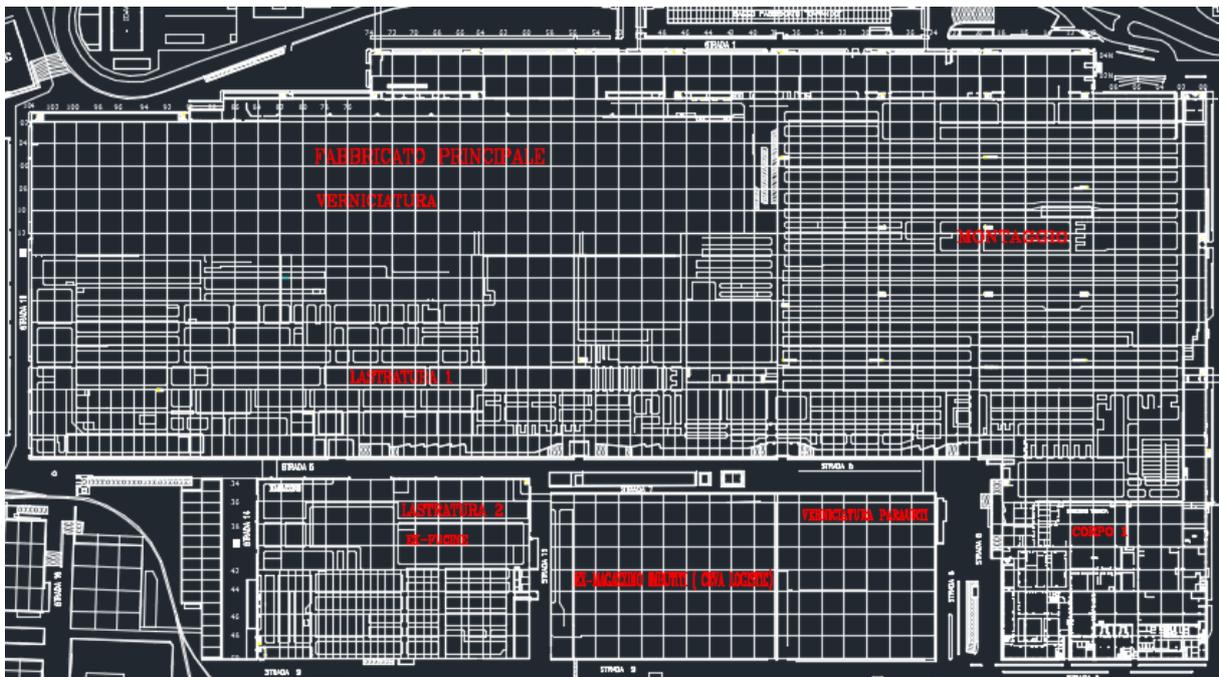


Figura 28 – Pianta AutoCAD di FCA Mirafiori (materiale di FCA)



Figura 29 – Schema impianto di FCA Mirafiori (materiale di FCA)

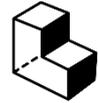
Come si può notare nella Figura 29, l'impianto è molto complesso ed è caratterizzato da Unità di Trattamento Aria (UTA), qualche impianto a tutt'aria e da un numero considerevole di aerotermi.

Per questo motivo, nella sezione inerente alla creazione del modello BEM, l'impianto verrà leggermente semplificato.

Il primo approccio alla modellazione è stato dapprima caratterizzato dalla decisione di creare un modello parametrico su Revit comprendente tutto il complesso Mirafiori, con l'intento di modellare l'edificio sulla base di tutte le sue proprietà geometriche, strutturali, fisiche e termiche.

Successivamente, per i motivi esposti sopra, l'analisi si è concentrata più nello specifico sulla lastratura ("Body Shop" in Inglese).

4.2 Modello BIM



Il modello è stato costruito sulla base della griglia schematica già presente nella planimetria e riprodotta in maniera accurata direttamente su Revit, in modo da rendere più fluida ed intuitiva la modalità di modellazione.

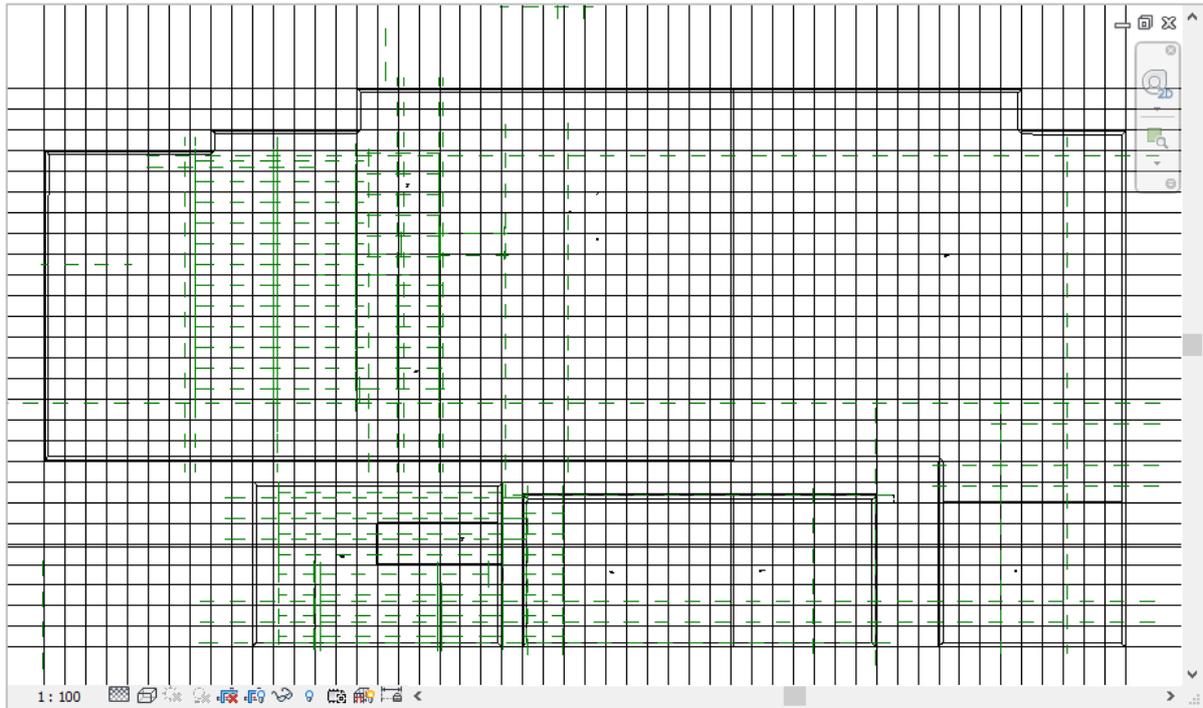


Figura 30 – Griglia schematica con planimetria di FCA Mirafiori (Revit)

Il passo successivo è stato quello di creare i muri perimetrali e, poiché il complesso è risalente agli anni '40, in assenza di ulteriori informazioni, le stratigrafie dei componenti edilizi sono state progettate coerentemente con i tipici stabilimenti industriali dell'epoca, ipotizzando sia stato soggetto a qualche eventuale intervento di riqualifica.

Prima di analizzare nello specifico le stratigrafie di tutti i componenti edilizi, è bene tener presente che Revit effettua il calcolo della trasmittanza senza tener conto delle resistenze superficiali interna ed esterna.

Col termine trasmittanza si indica la grandezza fisica che misura la quantità di potenza (calore) scambiata da un corpo per unità di superficie e di differenza di temperatura; l'unità di misura corrispondente è $W/m^2/K$ e si calcola come segue:

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_{i=1}^N \frac{S_i}{\lambda_i} + R_{se}} = \frac{1}{R_{TOT}}$$

Dove:

- R_{si} e R_{se} sono, rispettivamente, le resistenze superficiali interna ed esterna;
- N è il numero di strati componenti la stratigrafia;
- s_i è lo spessore dello strato i -esimo;
- λ_i è la conducibilità termica del materiale i -esimo;
- R_{TOT} è la somma delle resistenze termiche dei materiali della stratigrafia.

Per i muri esterni, dunque, è stata scelta una stratigrafia “a sandwich”, caratterizzata da un doppio strato esterno di calcestruzzo, con in mezzo una camera d’aria.

La Figura 31 mostra la struttura modellata su Revit.

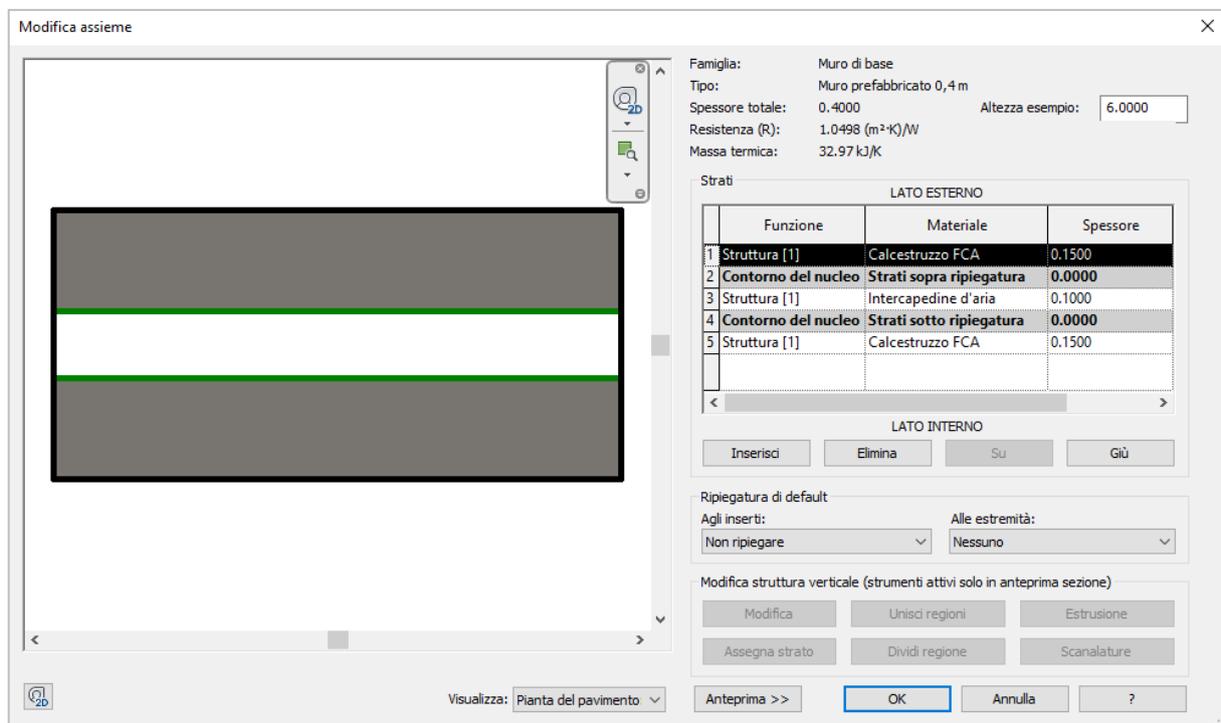


Figura 31 – Stratigrafia muri esterni (Revit)

La composizione dei componenti opachi verticali e il relativo valore di trasmittanza possono essere riassunti con la seguente tabella:

Parete esterna	s	λ	valore	R
(lato esterno)	[m]	[W/m ² /K]	[W/m ² /K]	[m ² K/W]
<i>strato liminare esterno</i>	-	-	23	0.043
calcestruzzo	0.15	1.65		0.091
camera d'aria	0.10	0.17		0.588
calcestruzzo	0.15	1.65		0.091
<i>strato liminare interno</i>	-	-	8	0.125
TOT	0.40			0.939
TRASMITTANZA analitica	1.065	[W/m ² /K]		
TRASMITTANZA Revit	0.953	[W/m ² /K]		

Tabella 2 – Calcolo trasmittanza muri esterni

Lo stesso procedimento è stato adottato per la caratterizzazione di pavimento e tetto.

Il tetto, dall'esterno verso l'interno, è stato pensato come uno strato di guaina, seguito da una copertura in calcestruzzo e, per finire, un'intonacatura, per uno spessore totale di 28 cm.

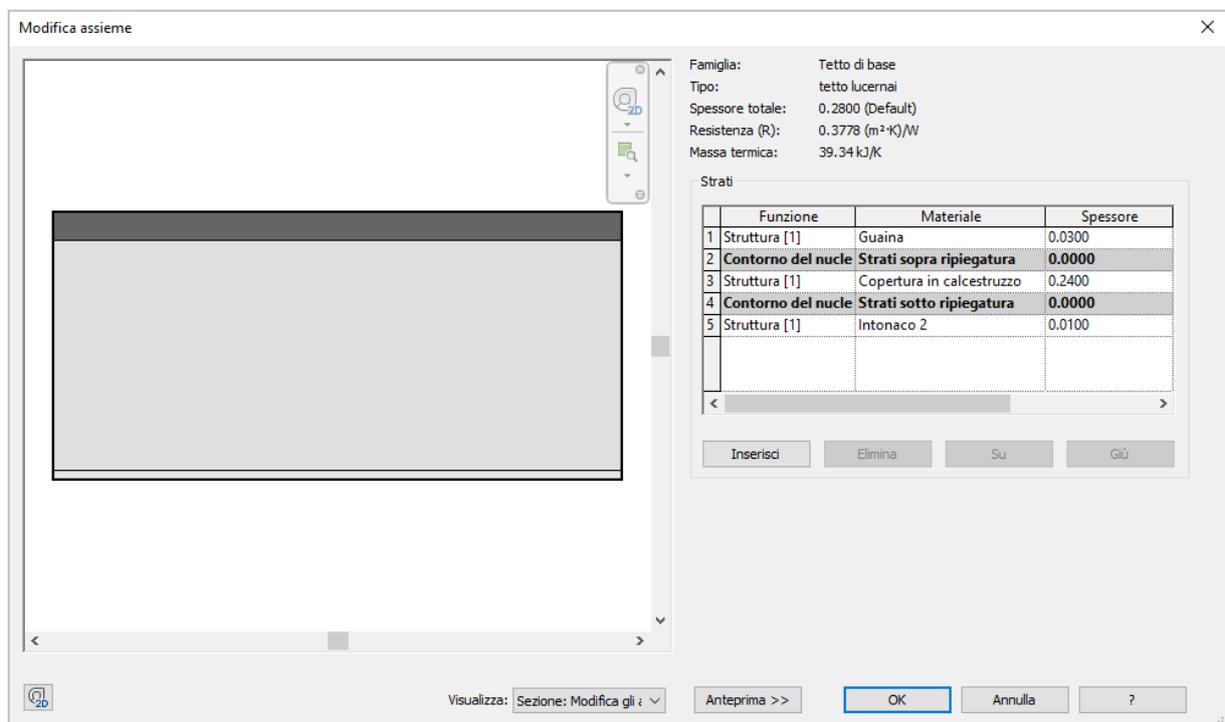


Figura 32 – Stratigrafia tetto (Revit)

Copertura	s	λ	valore	R
(lato esterno)	[m]	[W/m/K]	[W/m ² /K]	[m ² K/W]
<i>R th superficiale esterna</i>	-	-	-	0.040
guaina	0.03	0.3		0.100
copertura in calcestruzzo	0.24	0.90		0.267
intonaco	0.01	0.90		0.011
<i>R th superficiale interna</i>	-	-	-	0.100
<i>TOT</i>	<i>0.28</i>			<i>0.518</i>
TRASMITTANZA analitica	1.931	[W/m ² /K]		
TRASMITTANZA revit	2.647	[W/m ² /K]		

Tabella 3 – Calcolo trasmittanza tetto

Il pavimento rappresenta il componente più complesso, poiché formato da diversi strati, quali una gettata di sabbia e ghiaia, uno strato in calcestruzzo di perlite e vermiculite, un sottofondo di cemento e una resina per interni, tipica dei capannoni industriali.

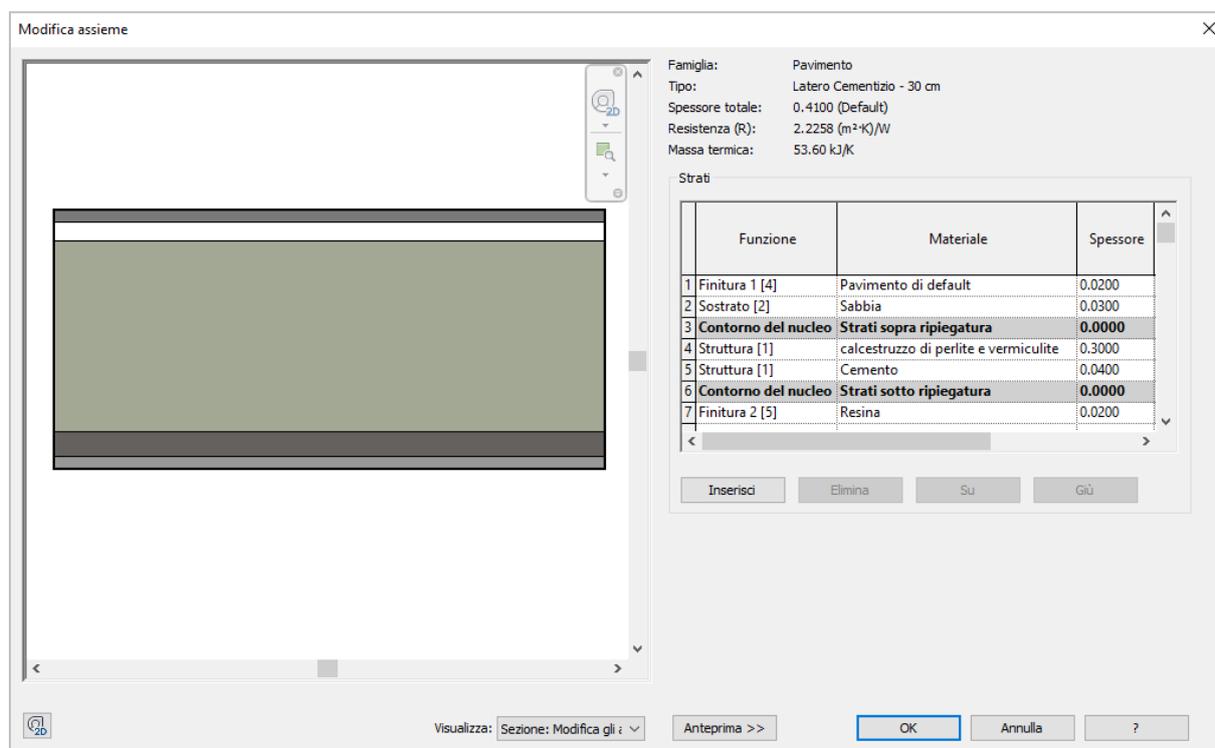


Figura 33 – Stratigrafia pavimento (Revit)

Pavimento	s	λ	valore	R
(lato esterno)	[m]	[W/m/K]	[W/m ² /K]	[m ² K/W]
gettata + sabbia	0.02	0.50		0.040
	0.03	0.33		0.091
cls di perlite e vermiculite	0.30	0.15		2.000
sottofondo cemento magro	0.04	0.65		0.062
resina	0.02	0.60		0.033
<i>R th superficiale interna</i>	-	-	-	0.170
<i>TOT</i>	<i>0.41</i>			<i>2.396</i>
TRASMITTANZA analitica	0.417	[W/m ² /K]		
TRASMITTANZA revit	0.449	[W/m ² /K]		

Tabella 4 – Calcolo trasmittanza pavimento

È possibile notare che, nonostante Revit non consideri le resistenze superficiali, i valori di trasmittanza termica si discostano poco da quelli calcolati analiticamente, ad eccezione solo della copertura.

Il tetto, infatti, non essendo molto performante, presenta materiali ad elevata conducibilità e, quindi, bassa resistenza termica; in questo modo, l'aggiunta delle resistenze termiche superficiali ha un peso elevato nel computo della resistenza totale.

Dopo aver così definito le proprietà termiche e geometriche di muri, pavimento e tetto, il passo successivo è stato quello di modellare accuratamente i lucernari.

Data la complessità della copertura, la creazione dei lucernari è risultata essere molto dispendiosa in termini di tempi, soprattutto per via del fatto che ne sono stati identificati di diverse tipologie, per forma, dimensioni e struttura.

La maggior parte dei lucernari creati è caratterizzata da pareti verticali, aventi altezza media di 2 metri e quasi totalmente finestrate, e un tetto costituito da uno strato di guaina, uno di calcestruzzo e uno di intonaco (Figura 34).

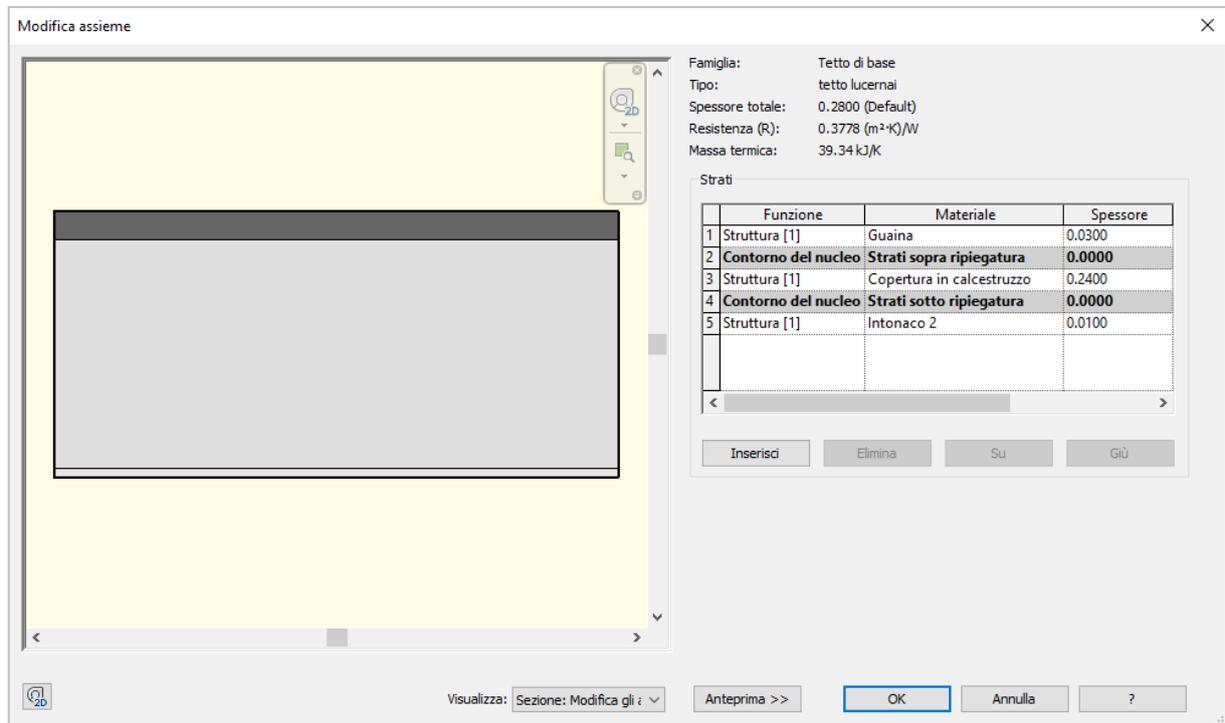


Figura 34 – Stratigrafia muri lucernari (Revit)

Ogni tipologia di lucernario è stata parametrizzata come una famiglia in maniera isolata rispetto al progetto intero e, per comodità, sono stati creati dei gruppi in modo tale da individuare più facilmente il tipo di lucernario e le relative caratteristiche geometriche e architettoniche.

Viene ora riportata l'immagine raffigurante una famiglia di lucernari, nella modalità "wireframe" (letteralmente "fil di ferro"), rappresentazione tridimensionale in computer grafica tramite spigoli (Figura 35-a), e nel caso di visualizzazione realistica (Figura 35-b).

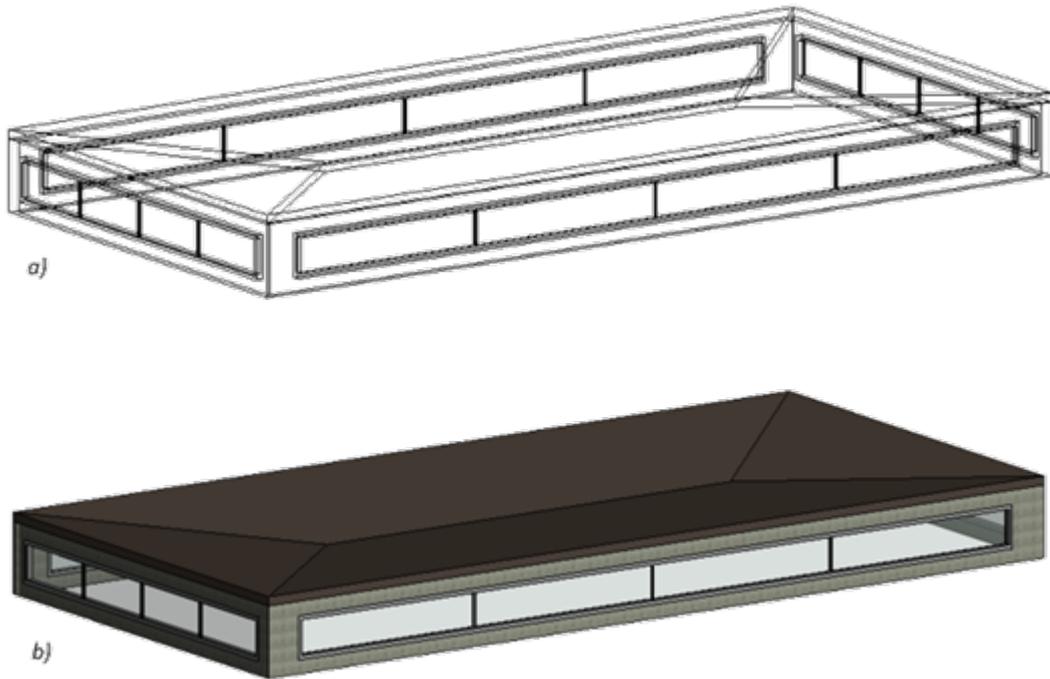


Figura 35 – Visualizzazione wireframe (a) e realistica (b) di un lucernario

Lucernario	Dimensioni
GRUPPO 1	130 x 12 m
GRUPPO 2	75 x 12 m
GRUPPO 3	35 x 12 m
GRUPPO 4	75,5 x 12 m
GRUPPO 5	75,5 x 12 m
GRUPPO 6	67 x 12 m
GRUPPO 7	56 x 12 m
GRUPPO 8	33 x 12 m
GRUPPO 9	25 x 12 m
GRUPPO 10	36 x 12 m
GRUPPO 11	215,5 x 12 m
GRUPPO 12	58 x 12 m
GRUPPO 13	113 x 12 m
GRUPPO 14	34 x 12 m
GRUPPO 15	162 x 12 m
GRUPPO 16	27,5 x 12 m
GRUPPO 17	39,4 x 12 m
GRUPPO 18	61,5 x 21,5 m

Tabella 5 – Riepilogo tipologie di lucernari

Come si può notare dalla Tabella 5, sono molteplici le tipologie di lucernari e presentano una stratigrafia dei componenti opachi verticali caratterizzata da un solo strato di calcestruzzo leggero con spessore di 20 cm.

Tutti i lucernari presentano caratteristiche edilizie (materiali) identiche ad eccezione di quelli realizzati in plexiglass, non presenti in tabella 5 (Figura 36).

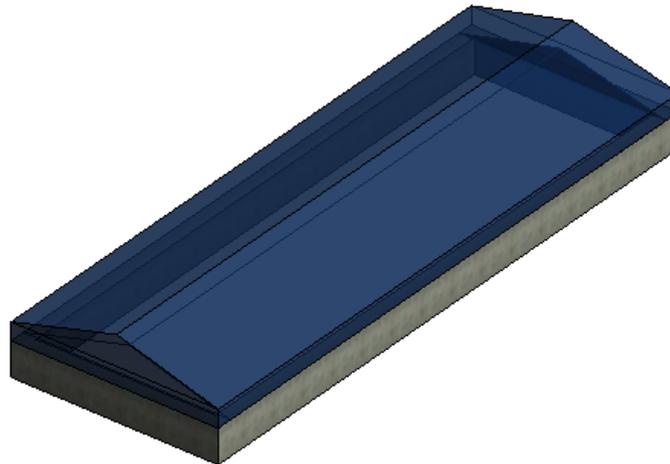


Figura 36 – Visualizzazione realistica di un lucernario in plexiglass

Vengono proposte ora porzioni delle facciate esposte rispettivamente a Nord-Ovest e a Sud-Ovest, comprendenti portelloni industriali in acciaio inossidabile e finestre.



a)



b)

Figura 37 – Vista frontale delle facciate a Nord-Ovest (a) e a Sud-Ovest (b)

Dopo aver ripartito internamente l'intero stabilimento ed aver realizzato tutti i lucernari, questi ultimi sono stati sistemati sulla copertura del fabbricato tenendo conto sia della pianta di AutoCAD (Figura 28), sia della mappa satellitare (Figura 26); le due viste sono state sovrapposte in maniera da ottenere una rappresentazione da un lato realistica, dall'altro precisa dal punto di vista geometrico (Figura 38).

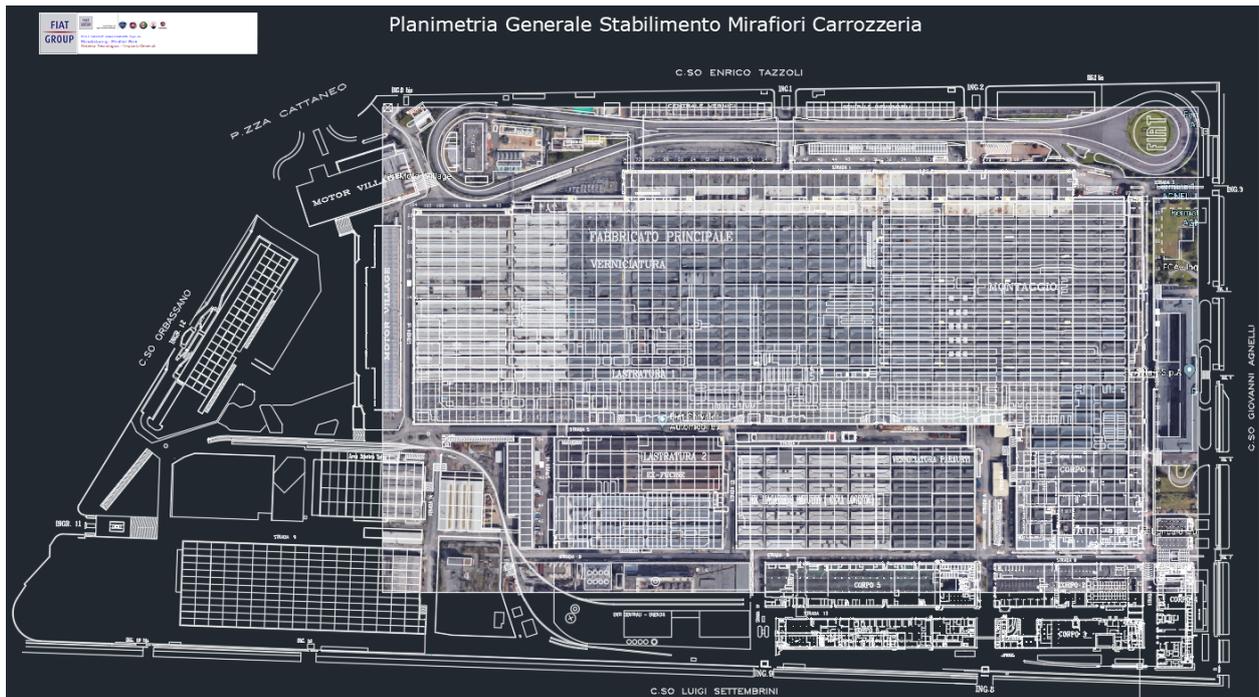


Figura 38 – Sovrapposizione pianta AutoCAD e vista satellitare

Infine, è stato così ottenuto il modello parametrico finale con Revit.

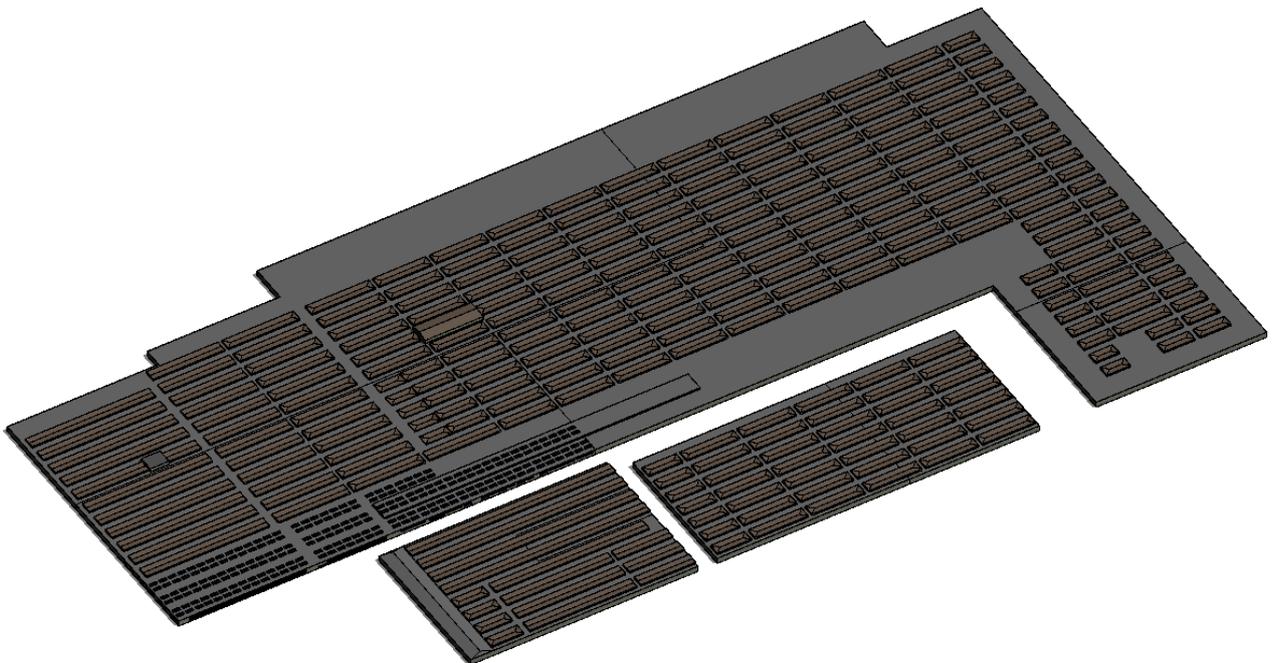


Figura 39 – Visualizzazione 3D del modello BIM di FCA Mirafiori (Revit)

Poiché il file generato è risultato essere di grande dimensioni e l'esportazione sarebbe diventata complicata e lunga in termini di tempo, si è pensato di semplificare il modello.

Ai fini dell'analisi energetica, la semplificazione del modello BIM è praticamente imprescindibile, dal momento che nasce la necessità di individuare metodologie di simulazione che portino ad una sostanziale riduzione dei tempi di progettazione e dei conseguenti costi.

La modifica principale ha riguardato i lucernari, che sono stati notevolmente semplificati senza andare a modificare i parametri di interesse della simulazione.

Il primo passo è stato quindi quello di semplificare i lucernari: è stata eliminata l'inclinazione dei tetti e, per quanto riguarda i lucernari in plexiglass, essi sono stati rimpiazzati da semplici finestre piane da copertura.

Infine, come accennato in precedenza, dal momento che i dati a disposizione coinvolgevano prevalentemente la zona relativa alla lastratura, si è deciso di spostare l'attenzione su quest'unica zona.

Il risultato finale della modellazione BIM è quello rappresentato nella figura seguente (Figura 40):

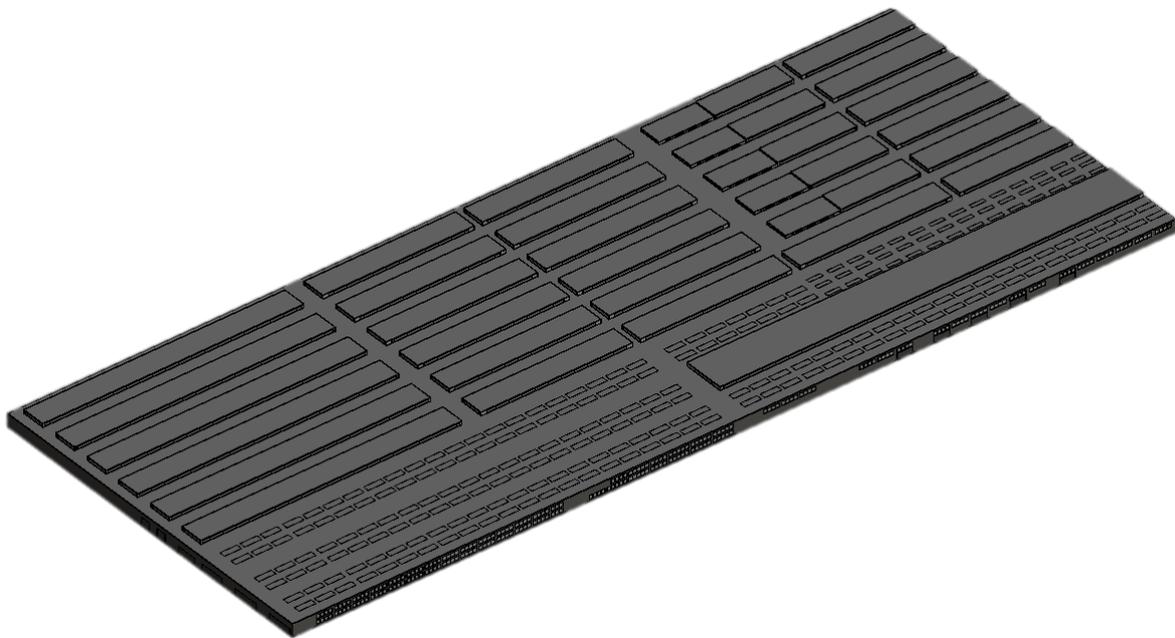


Figura 40 - Visualizzazione 3D del modello BIM della Lastratura (Revit)

4.3 Modello EAM



Una volta ottenuta la rappresentazione parametrica con Revit, prima della fase di esportazione, è stato inserito un unico vano comprendente tutta la lastratura, ponendo particolare attenzione ai livelli di inizio e fine del vano stesso, in modo da comprendere tutto il volume del fabbricato, dal pianterreno ai lucernari compresi.

È stato quindi creato il file gbXML da esportare per mezzo della suddetta procedura, tramite l'esportazione di vani.

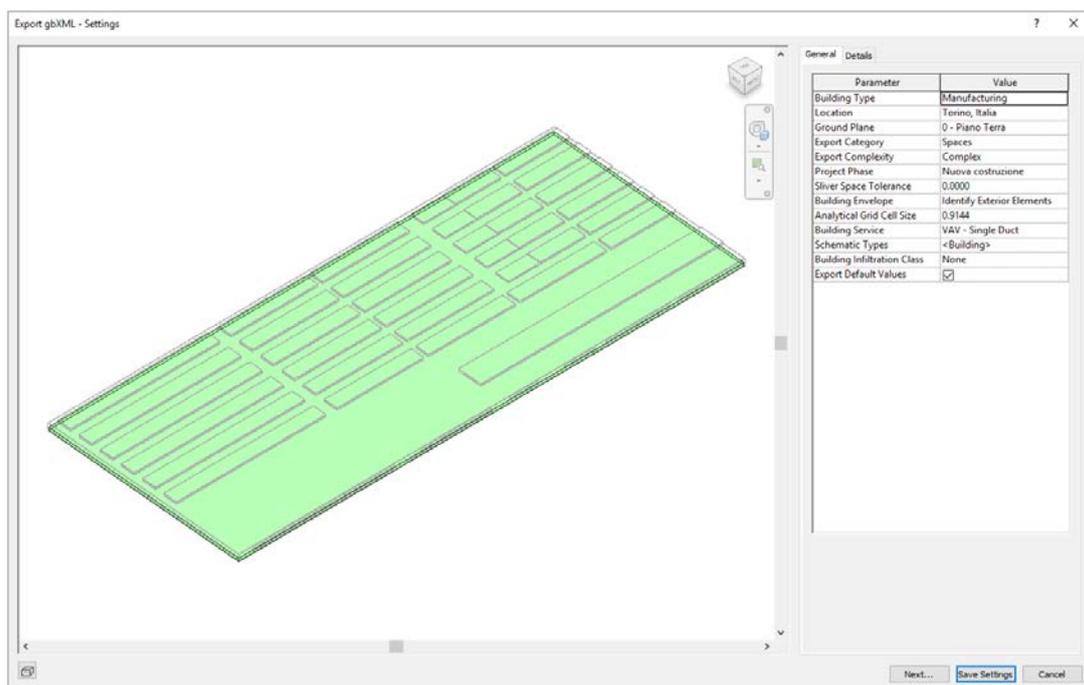


Figura 41 – Esportazione vani della Lastratura tramite gbXML (Revit)

La Figura 41 mostra il modello analitico generato da Revit.

Poiché quando si effettua l'analisi energetica le superfici analitiche generate differiscono da quelle degli elementi di costruzione, per validare questa fase di esportazione, sono state analizzate le differenze percentuali tra le superfici del modello EAM e quelle della modellazione BIM e, più precisamente, è stato effettuato un confronto tra i mq di finestre, porte (portelloni), muri, solaio e tetti.

Viene quindi riportata la tabella riguardante l'accuratezza e la precisione della presente fase inerente il modello EAM:

Accuratezza modello EAM			
Componenti	BIM	EAM	Differenza percentuale
finestre [m ²]	7652	7652	0,00%
porte [m ²]	305	305	0,00%
muri [m ²]	11562	11767	1,77%
solaio [m ²]	79173	79142	-0,04%
tetto [m ²]	79757	78626	-1,42%
Differenza percentuale media			0,06%

Tabella 6 – Analisi accuratezza del modello EAM

Come mostrato nella Tabella 6, le superfici generate dall'analisi energetica si discostano leggermente da quelle realmente modellate e, considerando che la differenza percentuale media solitamente va da -10% a +10%, il risultato ottenuto risulta essere del tutto soddisfacente (0,06%).

4.4 Modello BEM



Questa fase rappresenta il fulcro vero e proprio dell'analisi energetica.

La rappresentazione 3D della lastratura in DesignBuilder, ottenuta importando le proprietà termiche con modalità "spaces", è risultata essere la seguente:

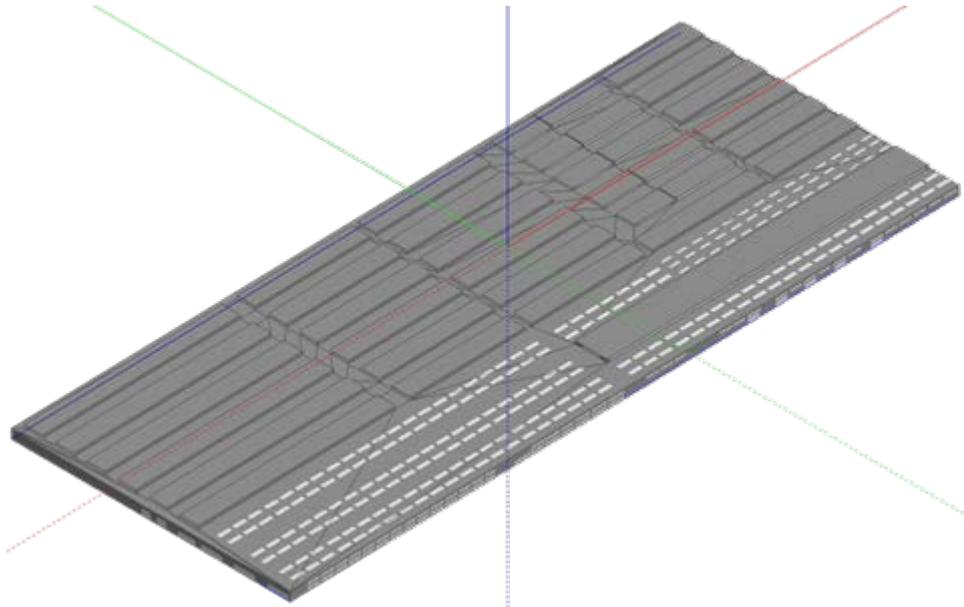


Figura 42 – Visualizzazione 3D del modello BEM della Lastratura (DesignBuilder)

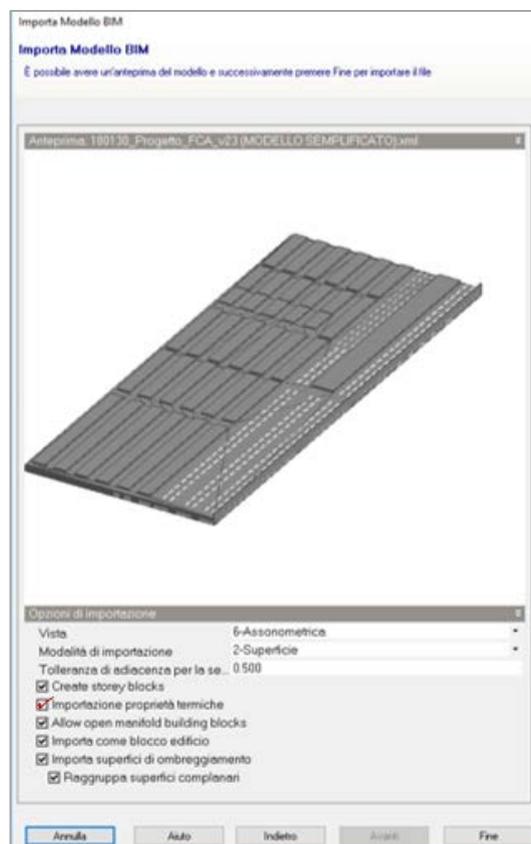


Figura 43 – Importazione modello BIM (DesignBuilder)

Una volta importato il file precedentemente generato in formato gbXML, il primo passo è stato quello di inserire i dati di input, per andare a caratterizzare l'edificio in tutto e per tutto.

Per prima cosa, all'edificio è stato associato un template iniziale di riferimento tipico delle aree industriali di processo. Successivamente è stata modificata la densità occupazionale e fissata ad un valore pari a 0,01 pers./m², ipotizzando la presenza di circa 800 dipendenti all'interno della lastratura (80.000 m²).

Dopodiché, sono stati inseriti i carichi interni attribuibili ad apparecchiature e macchinari presenti nell'edificio, ipotizzando un totale di poco più di 5 W/m².

Category	Property	Value
Template	Sector	B2 to B7 General Industrial and Special Industrial Grou
	Zone multiplier	1
	Include zone in thermal calculations	<input checked="" type="checkbox"/>
	Include zone in Radiance daylighting calculations	<input checked="" type="checkbox"/>
Occupancy	Density (people/m2)	0.0100
	Schedule	Indust_IndProcess_Occ
Office Equipment	On	<input checked="" type="checkbox"/>
	Gain (W/m2)	5.00
Miscellaneous	On	<input checked="" type="checkbox"/>
	Gain (W/m2)	0.05

Figura 44 – Dati di input relativi all'attività (DesignBuilder)

In seguito, sono stati selezionati i materiali esportati dal modello BIM per quanto riguarda muri, pavimento e tutti.

Inoltre, si è deciso di fissare una quota costante di ricambi orari involontari per via dell'ipotetica scarsa tenuta dell'involucro edilizio del capannone (0.7 ac/h).



Figura 45 – Dati di input relativi alla costruzione (DesignBuilder)

Per quanto riguarda i componenti finestrati, non è stato possibile importare i materiali creati in precedenza col modello parametrico e si è quindi deciso di selezionare un template di riferimento caratterizzato da un valore di trasmittanza molto vicino a quello ipotizzato inizialmente ($U_w=1.96$ W/m²/K).

Inoltre, si è deciso di simulare in qualche modo l'apertura dei portelloni nel corso dei turni lavorativi, tipico dei grandi stabilimenti industriali e fonte di grandi perdite termiche e discomfort localizzato.

È stata quindi ipotizzata un'apertura dei portelloni del 100%, in termini di superficie apribile, per una 20% della durata dei turni di lavoro.

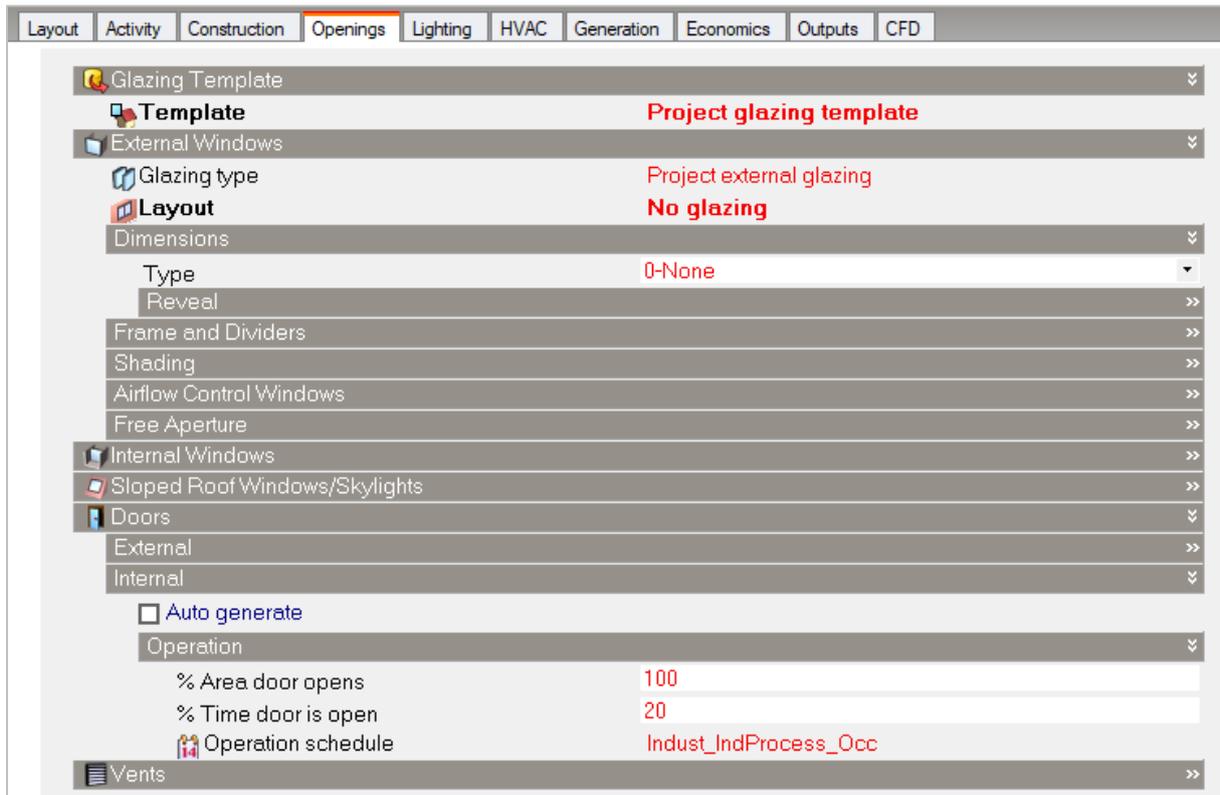


Figura 46 - Dati di input relativi alle aperture (DesignBuilder)

Infine, sono stati modificati gli input inerenti all'illuminazione esterna, ipotizzando una potenza al metro quadro pari a quella di un tipico impianto di illuminazione di uno stabilimento di processo.

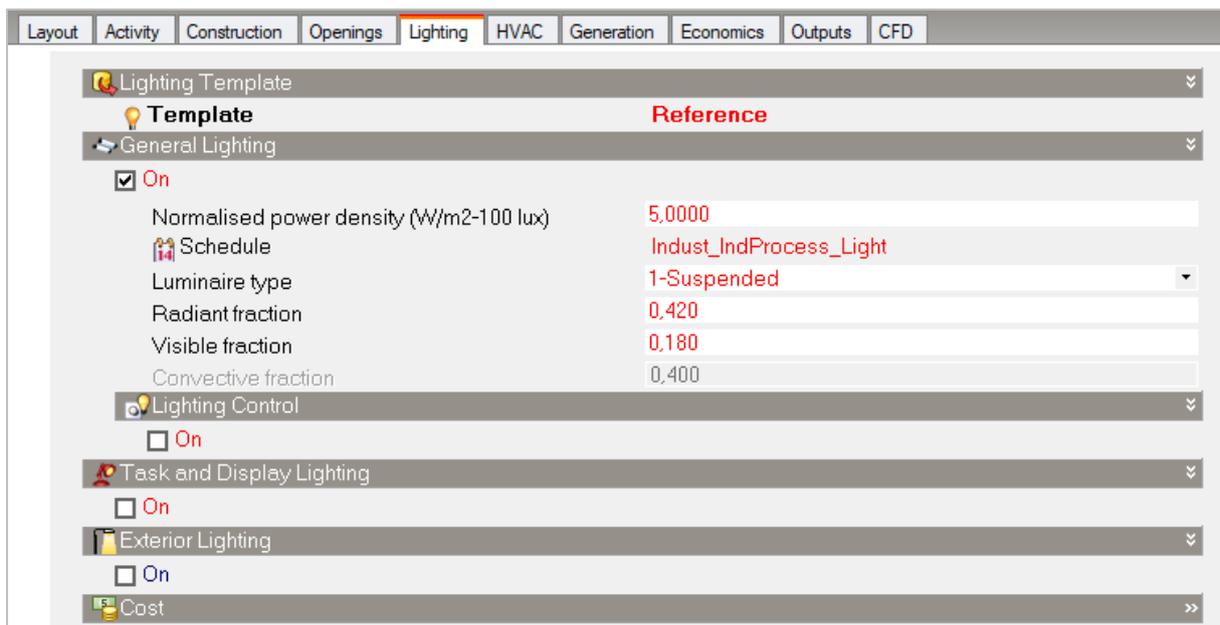


Figura 47 - Dati di input relativi all'illuminazione (DesignBuilder)

Siccome DesignBuilder effettua l'analisi energetica calcolando una singola temperatura media all'interno di ogni zona, ed essendo la lastratura un'unica zona, l'edificio è stato suddiviso in 13 zone virtuali.

Per effettuare questa suddivisione, sono state tracciate delle partizioni virtuali, in modo da rendere l'analisi più precisa e dettagliata e cercando, inoltre, di seguire lo schema dell'impianto HVAC (Figura 29).

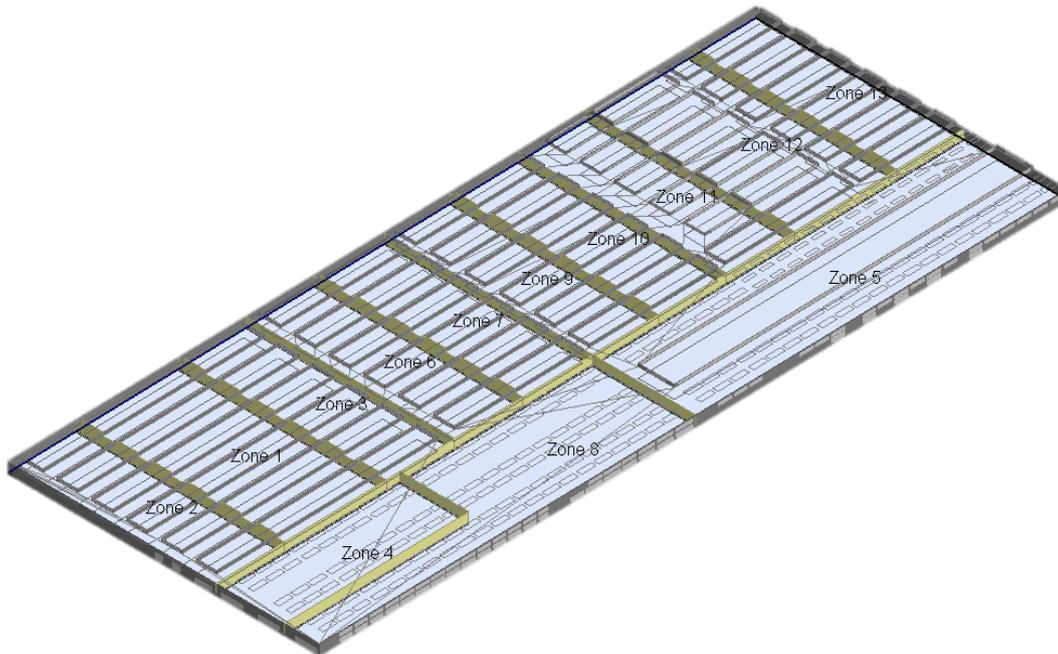


Figura 48 – Visualizzazione 3d delle zone virtuali della Lastratura (DesignBuilder)

Con riferimento alla figura soprastante (Figura 48), delle 13 zone virtuali create, le uniche due che si discostano dalle altre sono la 5 e la 8, poiché asservite da aerotermi e non da UTA (AHU – Air Handling Unit).

L'impianto realmente presente è stato semplificato facendo sì che le zone 5 e 8 fossero servite ciascuna da un unico aeroterme avente portata complessiva pari alla somma degli aerotermi presenti al loro interno, mentre le restanti zone presentano ciascuna un'unica UTA.

In conclusione, l'impianto modellato su DesignBuilder presenta un circuito d'acqua calda e uno di acqua fredda che alimentano le batterie delle 11 UTA e i 2 aerotermi delle zone 5 e 8.

Inoltre, poiché non è previsto il raffrescamento estivo, il circuito d'acqua fredda è stato disattivato, e l'intero impianto assume dunque l'unica funzione di riscaldamento per la stagione invernale.

Viene ora riportato lo schema funzionale dell'impianto:

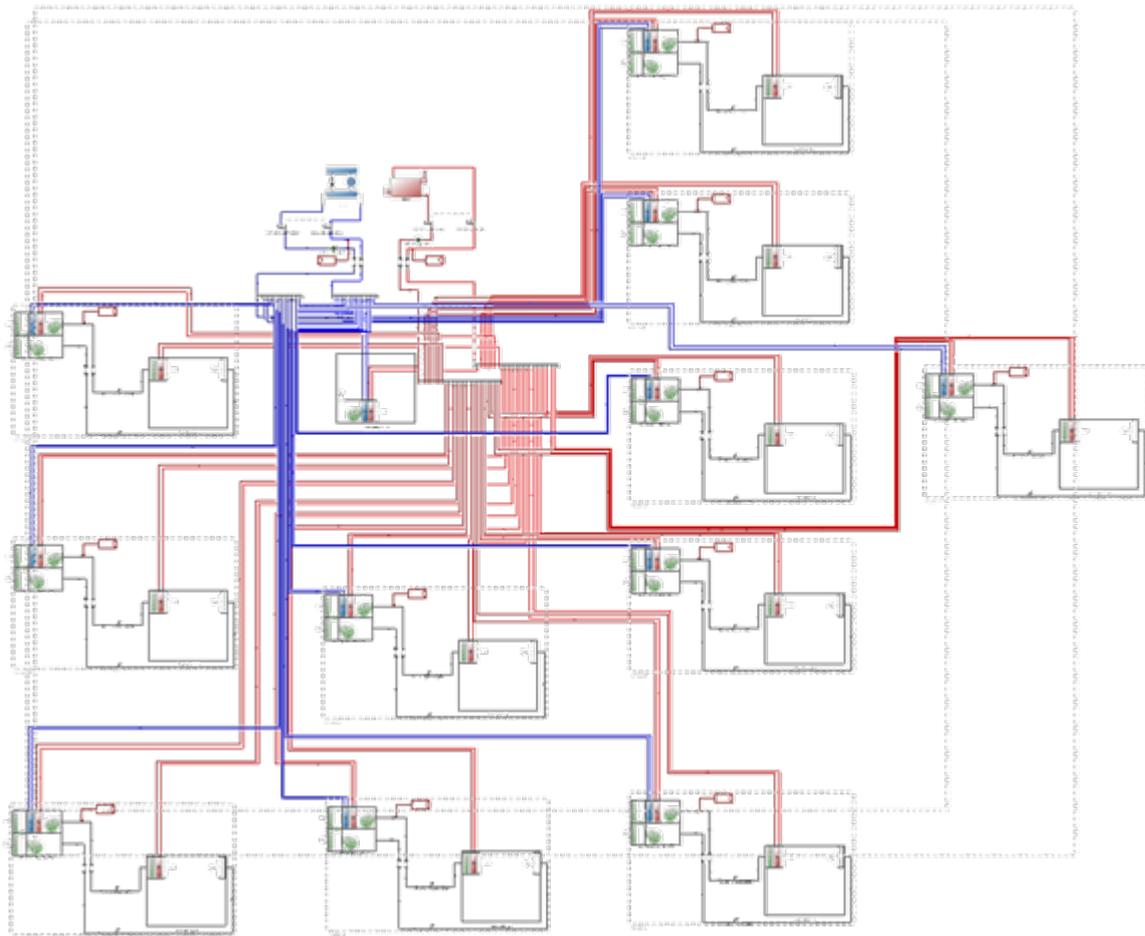


Figura 49 – Schema dell'impianto HVAC della Lastratura

Per quanto riguarda il dimensionamento dell'impianto, gli unici dati presenti nello schema dell'impianto, proposto nella sezione Data collection, erano quelli inerenti alle portate orarie degli aerotermi e di un impianto a tutt'aria:

- Tipologia di aerotermi aventi portata pari a 11.000 m³/h cad. (zona 5);
- Tipologia di aerotermi aventi portata pari a 5.800 m³/h cad. (zona 8);
- Impianto a tutt'aria con 24 diffusori con una portata totale di 150.000 m³/h (zona 4).

Di conseguenza, nell'editor di ogni singolo terminale di zona sono state imposte le portate, settando invece le potenze delle UTA e degli aerotermi in modalità "Autosize", cioè facendo sì che il software, in base alle portate e alle condizioni di set-point imposte, dimensionasse più nel dettaglio tutto l'impianto.

Le condizioni di set-point immesse prevedono una temperatura interna pari a 20°C.

Con l'ipotesi di avere un ricambio orario pari a 10 h⁻¹ (valore ragionevole per stabilimenti industriali), partendo dai dati a disposizione, sono state calcolate tutte le portate:

$$\dot{V} = \frac{n \cdot V_{zona}}{3600} \quad [m^3/s]$$

Dove:

- \dot{V} è la portata d'aria immessa;
- n è il ricambio orario;
- V_{zona} è il volume della zona.

La tabella seguente riassume tutti i dati in termini di portate e volumi delle zone:

ZONE	Volume [m ³]	Portata [m ³ /s]	Commenti
zona 1	17.490,70	48,59	
zona 2	11.548,50	32,08	
zona 3	11.650,70	32,36	
zona 4	10.478,40	41,67	noto
zona 5	31.040,50	86,22	6 aerotermini noti e 46 incogniti
zona 6	11.650,70	32,36	
zona 7	11.650,70	32,36	
zona 8	22.395,10	62,21	13 aerotermini noti e 42 incogniti
zona 9	33.744,50	93,73	
zona 10	11.650,70	32,36	
zona 11	11.650,70	32,36	
zona 12	17.490,70	48,59	
zona 13	11.606,90	32,24	
TOT	214.048.80		

Tabella 7 – Portate di UTA e aerotermini

Come si può notare dalla Tabella 7, le portate degli aerotermini delle zone 5 e 8 non erano tutte note, così si è deciso di ipotizzare le portate volumetriche di quelli incogniti in maniera tale da garantire il ricambio orario ipotizzato inizialmente.

Per quanto riguarda il funzionamento, l'accensione dell'impianto è stata ipotizzata essere alle 7:00 del mattino e lo spegnimento alle 19:00, supponendo dunque che lo stabilimento abbia dei turni di lavoro di 12 ore, mentre è stato considerato inattivo nei weekend.

Come è possibile osservare nelle figure seguenti (Figura 50 e Figura 51), nell'impianto modellato l'UTA e l'impianto a portata variabile (VAV, Variable Air Volume) lavorano in contemporanea: l'apertura delle serrande del VAV varia in base alle impostazioni di set-point scelte all'interno del locale e, di conseguenza, la pressione dei condotti varia, grazie al segnale derivante dai sensori (di pressione e temperatura) che controlla il ventilatore di mandata dell'UTA, mantenendo quindi la portata d'aria richiesta.

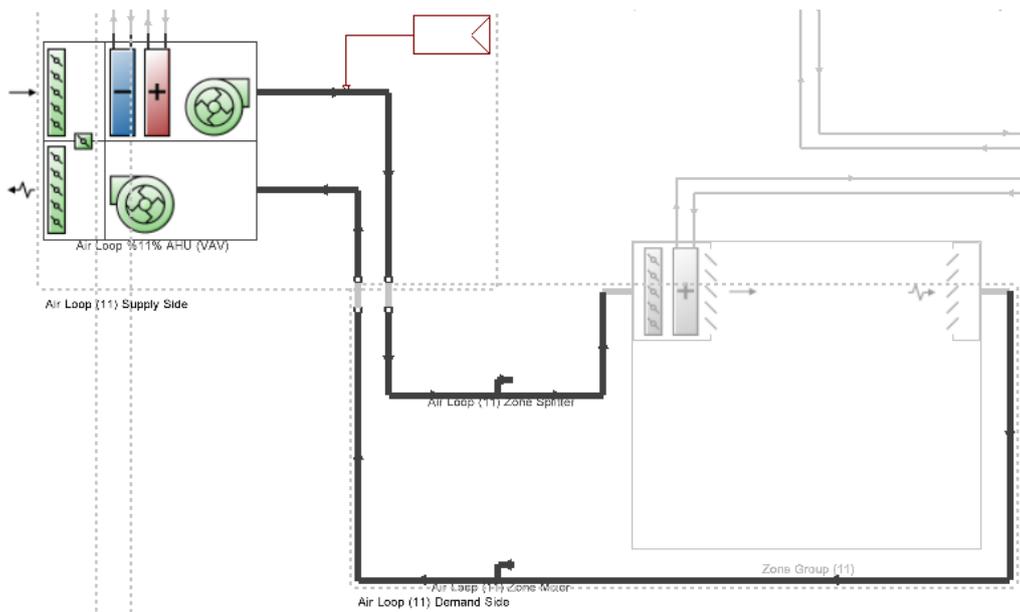


Figura 50 – Schema impiantistico UTA

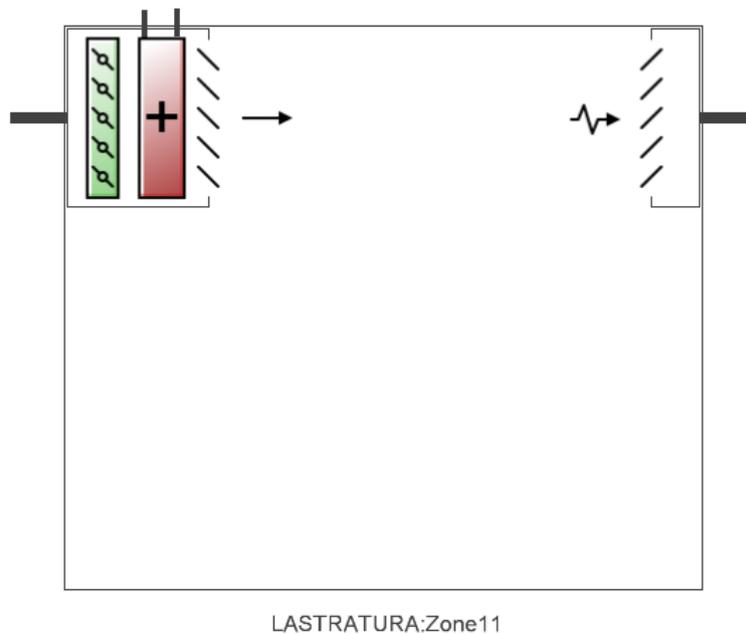


Figura 51 – Schema impiantistico terminale di riscaldamento

Infine, dal momento che nello stabilimento non è previsto alcun tipo di raffrescamento, si è deciso di ipotizzare un funzionamento in condizioni di free cooling per il periodo estivo, metodo che sfrutta il gradiente di temperatura tra ambiente esterno e ambiente interno.

Più nello specifico, la batteria calda delle UTA viene bypassata e il locale viene raffrescato in modo naturale sfruttando la temperatura esterna qualora essa risulti inferiore a quella interna.

Questa tecnologia punta a migliorare il comfort del locale e il risparmio energetico, poiché non sfrutta l'energia elettrica, bensì esclusivamente una fonte energetica rinnovabile quale l'aria.

Prima di presentare i risultati della simulazione del modello BEM appena descritto (capitolo successivo), viene proposta una breve sezione inerente ai problemi di interoperabilità riscontrati nel corso del progetto.

4.5 Problemi di interoperabilità

Nel corso dell'elaborazione dell'analisi energetica e, più precisamente, nel momento in cui il file generato da Revit è stato importato in DesignBuilder, sono stati riscontrati diversi problemi di interoperabilità.

La criticità principale è rappresentata dall'esportazione dei materiali delle stratigrafie impiegati durante la modellazione in Revit: nella sezione "Construction" di DesignBuilder non comparivano, infatti, i materiali del progetto, nonostante fosse stata selezionata l'opzione inerente all'importazione delle proprietà termiche. Si è scoperto che i due software utilizzati vanno leggermente in conflitto se all'interno di quello per l'analisi energetica non è impostata la lingua Inglese.

Un altro ostacolo è rappresentato dal fatto che DesignBuilder tende a riconoscere molti edifici come aperti, "not fully enclosed" come indicato dal software. È stato possibile arginare il problema individuando una soluzione di carattere generale: affinché l'involucro risulti chiuso è necessario modellare i pavimenti e i tetti su Revit tracciando i loro perimetri in concomitanza con l'asse centrale dei muri, facendo quindi coincidere il filo esterno del componente opaco orizzontale con la mezzera dei componenti verticali.

Inoltre, un'ultima problematica è stata rilevata nell'esportazione di un locale avente un lucernario sulla copertura. In Revit è possibile modellare un lucernario collegandolo all'ambiente sottostante tramite due metodi: o modificando il perimetro del tetto sul quale è presente il lucernario, o creando un'apertura che percorra verticalmente la copertura, tramite il comando "Cavedio" nella scheda "Architettura". La soluzione migliore è stata identificata nella scelta riguardante la modifica perimetrale, in quanto DesignBuilder non riconosce il taglio del cavedio utilizzato in Revit.

Infine, un ulteriore limite riconosciuto nell'interoperabilità tra Revit e DesignBuilder è stato individuato nell'impossibilità di conservare un impianto HVAC modellato sul software parametrico; infatti, una volta conclusa l'esportazione, tutti i dati relativi allo schema impiantistico vanno persi.

5. Risultati



In questo capitolo verranno presentati i risultati più significativi della simulazione energetica dinamica effettuata da DesignBuilder (EnergyPlus).

Viene dapprima proposto l'andamento annuale delle temperature dell'aria interna, radiante, operativa e dell'ambiente esterno dell'intera zona della lastratura.

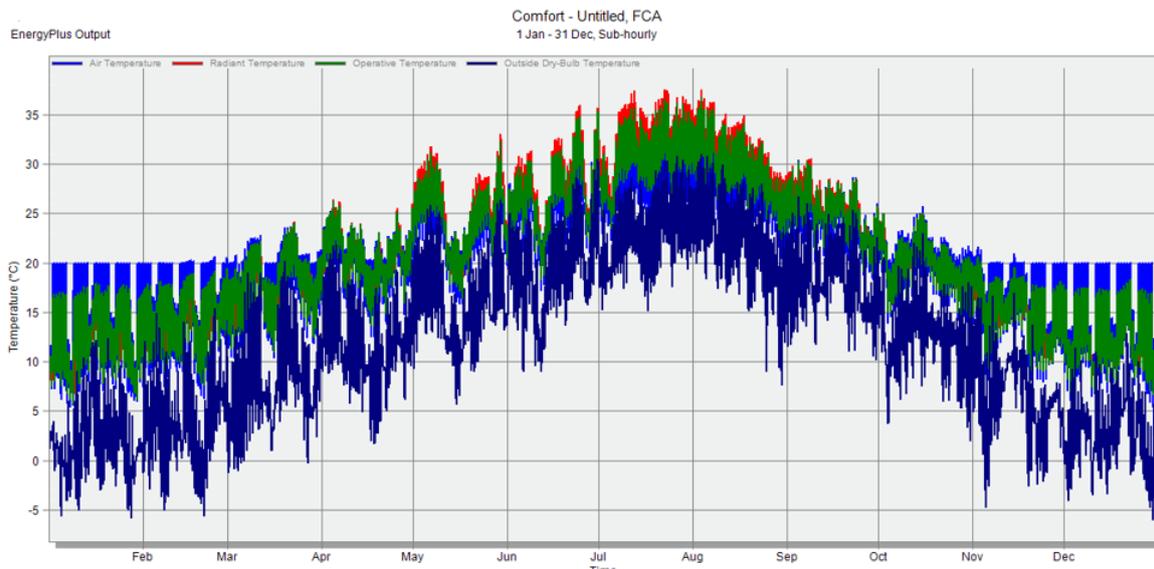


Figura 52 – Profili di temperatura annuali

Per maggior chiarezza si è deciso di riportare anche gli stessi andamenti per il mese più gravoso per il periodo invernale (gennaio) e per quello estivo (luglio), in modo da osservare più nel dettaglio il comportamento dell'edificio.

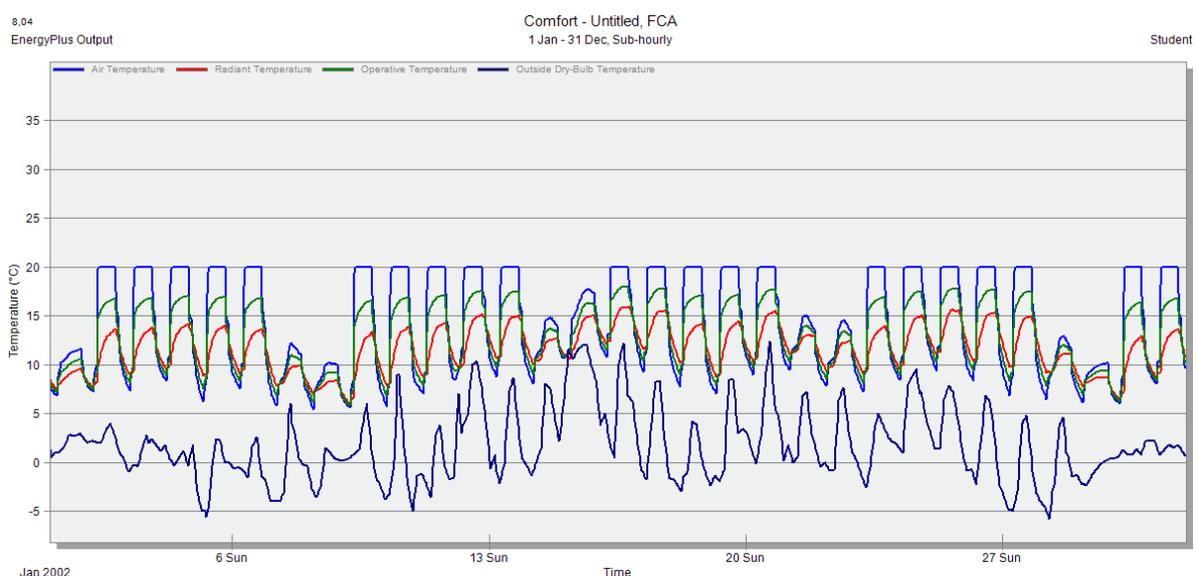


Figura 53 – Profili di temperatura mese di Gennaio

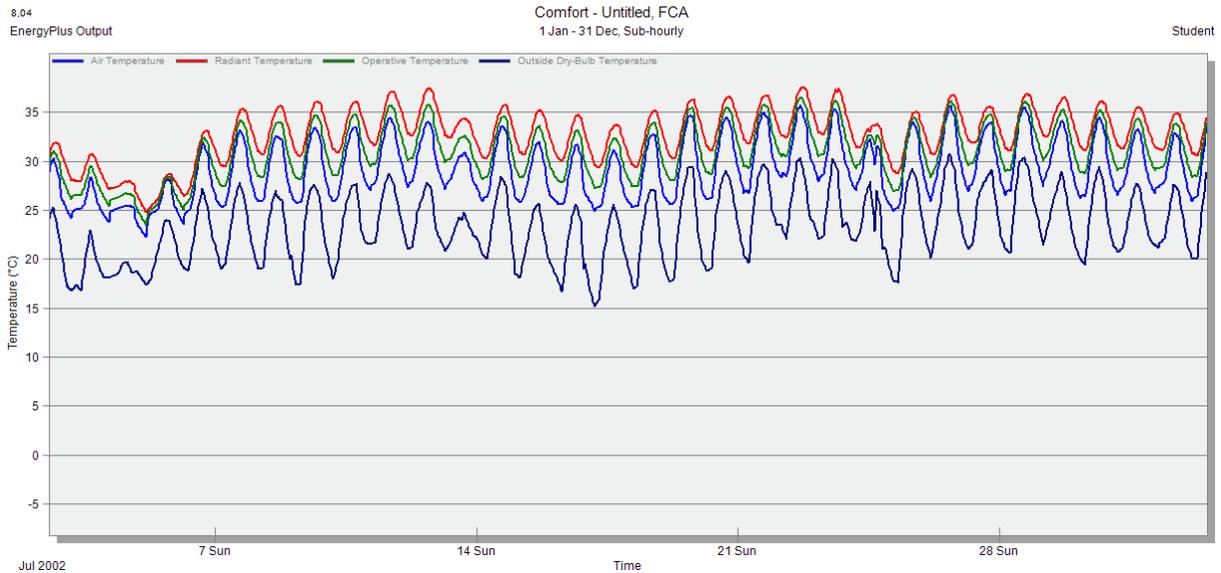


Figura 54 – Profili di temperatura mese di Luglio

Come si può notare dalla Figura 53, l'aria interna raggiunge la temperatura di set-point (20°C) durante tutto il turno di lavoro giornaliero (7:00-19:00). La temperatura percepita, ovvero la temperatura operativa, invece, si aggira attorno ai 18°C creando un leggero discomfort, in quanto dalle indicazioni della normativa UNI EN ISO 7730 (relativa ai metodi per la previsione della sensazione termica percepita), durante il periodo invernale dovrebbe variare tra i 20 e i 24°C. Inoltre, è possibile osservare come la temperatura operativa sia rappresentata dalla media tra quella dell'aria interna e quella derivante dalla radiazione solare.

Nel periodo estivo,

Figura 54, si può apprezzare il fatto che con la temperatura interna sia inferiore a quella operativa e quella radiante e segua l'andamento della temperatura esterna, discostandosi di massimo 5°C circa.

Il grafico seguente mette invece in risalto la percentuale di umidità nel corso di un intero anno.

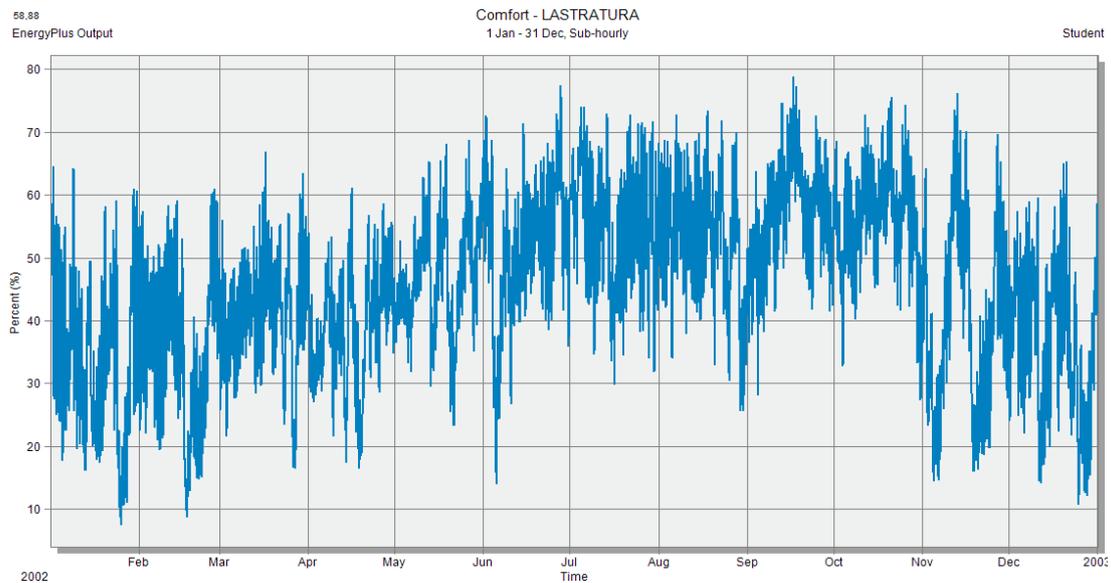


Figura 55 – Profilo annuale dell'umidità relativa

Anche in questo caso, in riferimento alla normativa UNI EN ISO 7730, il benessere stagionale non è sempre garantito, in quanto le condizioni nei periodi invernale ed estivo dovrebbero essere caratterizzate da un'umidità relativa pari a 30-70% e l'impianto realizzato non prevede un controllo dell'umidità.

Spostando l'attenzione su quelle che sono le potenze caratterizzanti l'edificio, è possibile notare nel grafico seguente (Figura 56) gli andamenti dei carichi per il riscaldamento, quelli imputabili all'illuminazione, ai macchinari di processo, all'occupazione e agli apporti solari gratuiti.

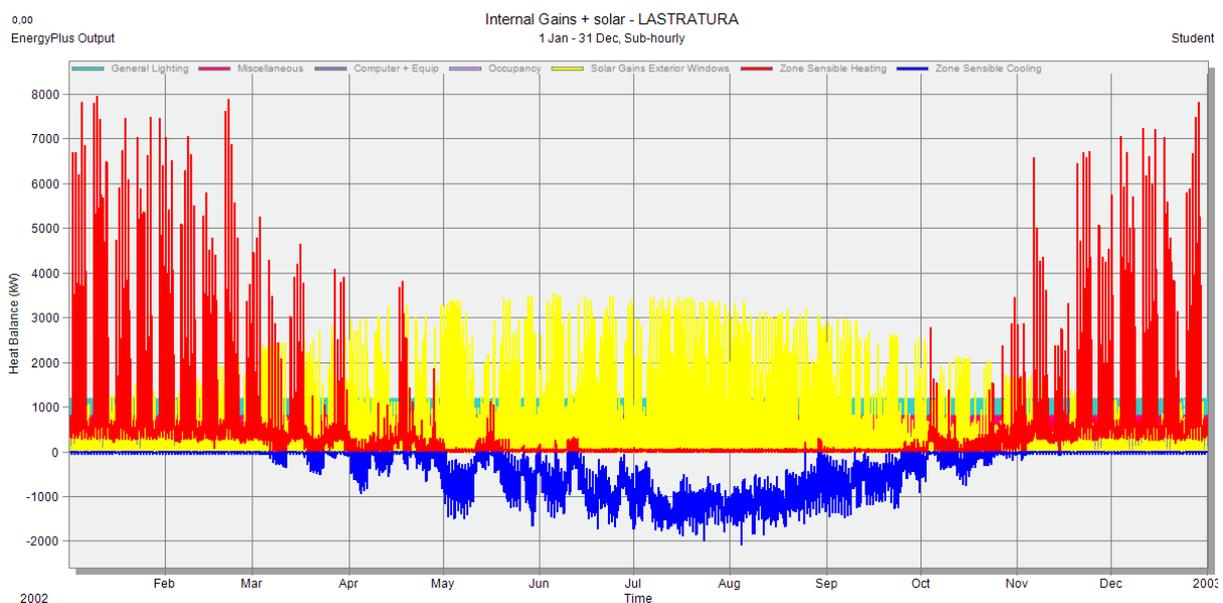


Figura 56 – Profilo annuale dei carichi interni

Si può facilmente notare l'andamento caratteristico del carico per il riscaldamento per la stagione invernale in contrapposizione con il profilo degli apporti solari gratuiti.

Il profilo indicato con la linea blu è riferito al free cooling e non al classico raffrescamento estivo e, a conferma di ciò, è possibile osservare nella figura seguente (Figura 57) come il consumo di gas sia imputabile esclusivamente al riscaldamento.

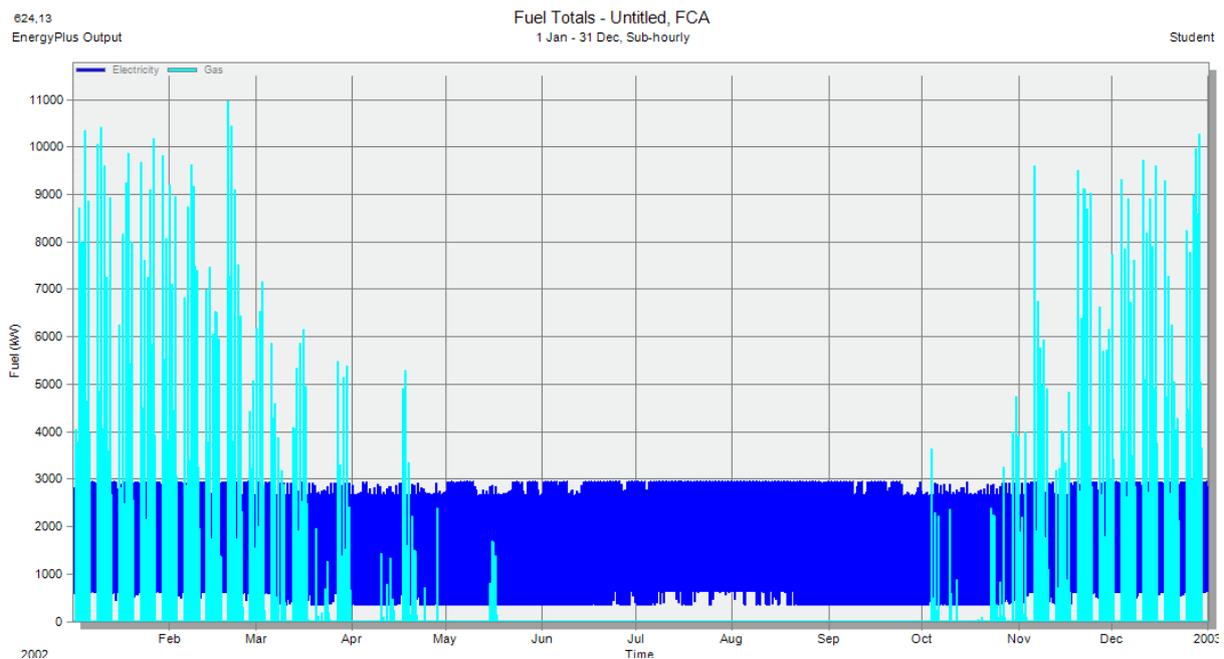


Figura 57 – Profilo annuale del consumo di combustibile

Inoltre, nelle simulazioni precedentemente analizzate non era stato previsto un sistema di free cooling e, infatti, durante il periodo estivo si poteva apprezzare un andamento della temperatura interna attorno ai 40°C, problema arginato con questo tipo di soluzione.

Nella tabella sottostante sono stati raccolti i principali dati riguardanti gli usi finali di energia primaria:

USI FINALI	Elettricità [kWh_e]	Gas naturale [kWh_{th}]	
<i>Riscaldamento</i>	6,2	3.189.182,1	
<i>Raffrescamento</i>	0,0	0,0	
<i>Illuminazione</i>	6.911.139,7	0,0	
<i>Macchinari</i>	7.068.921,0	0,0	
<i>Ventilatori</i>	3.582.443,3	0,0	
<i>Pompe</i>	1.064,2	0,0	
TOT (en. elettrica e termica)			
	17.563.574,3	3.189.182,1	<i>kWh</i>
TOT (en. primaria)			
	38112956,3	3.348.641,2	<i>kWh</i>
TOT (en. primaria)			
	41,5		<i>GWh</i>

Tabella 8 – Usi finali di energia

L'energia elettrica e quella termica sono state convertite in energia prima mediante i seguenti fattori di conversione (utilizzati direttamente da DesignBuilder):

Fattori di conversione	
elettricità	2,17
gas naturale	1,05

Tabella 9 – Fattori di conversione

Infine, tramite le tabelle riassuntive fornite da DesignBuilder (le stesse messe a disposizione da EnergyPlus), è stato possibile dimensionare la caldaia e le pompe:

	Potenza nominale [MW]	Efficienza nominale [-]
<i>Boiler</i>	12,34	0,89

Tabella 10 – Dati di targa del boiler

	Portata [m³/s]	Potenza elettrica [kW]	Efficienza [-]
<i>Pompe</i>	0,293	8,34	0,9

Tabella 11 – Dati di targa delle pompe

Ottenuti tutti i risultati dalle simulazioni, non potendo validare il modello, si è deciso di analizzare più nel dettaglio il comfort di una singola zona e ipotizzare un ipotetico intervento per migliorarne il benessere interno, andando a diminuire il consumo di energia.

La zona virtuale oggetto di analisi è la zona 8 ed è stata scelta per via del fatto che possiede due pareti confinanti con l'ambiente esterno ed ha superficie ridotta rispetto ad esempio alla zona 5, riducendo quindi i tempi richiesti dalle simulazioni.

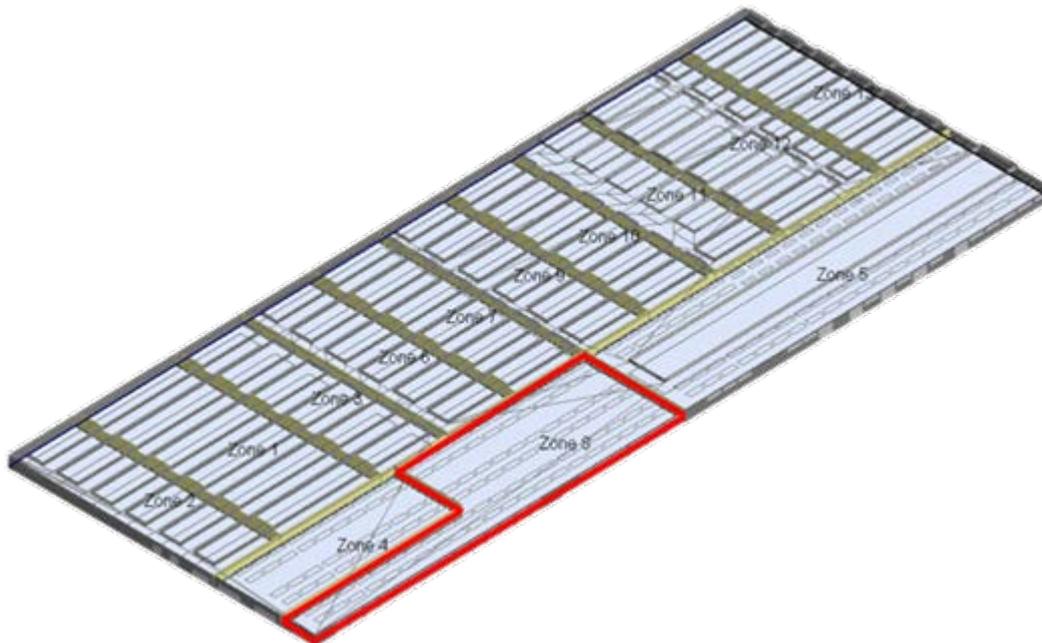


Figura 58 – Dettaglio della zona 8 della Lastratura

Prima di entrare nel dettaglio dell'analisi effettuata, viene proposto un breve excursus inerente al comfort termoigrometrico [17].

Le normative di riferimento riguardanti il comfort sono le seguenti:

- EN 15251 – Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica (2008);
- UNI EN ISO 7730 - Ergonomia degli ambienti termici. Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale (2006);
- ASHRAE Std 55 – ANSI/ASHRAE 55-2010 – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.

Grazie a Fanger, professore alla Danish Technical University (DTU) che per primo analizzò il concetto di comfort, è possibile definire la condizione cosiddetta “termicamente neutra” come la condizione alla quale un soggetto non percepisce alcuna differenza termica tra l’ambiente circostante e sé stesso.

Lo stesso Fanger sviluppò due indici, il Predicted Mean Vote (PMV) e il Predictive Percentage Dissatisfied (PPD).

Il PMV esprime il valor medio della sensazione termica di un gruppo di soggetti in una scala di 7 valori che va da -3 (sensazione di freddo) a +3 (sensazione di caldo).

Il PPD, invece, è la percentuale di soggetti che votano -3, -2, +2, +3 nella scala del PMV.

Bisogna sottolineare il fatto che un valore di PMV pari a zero non implica che il numero di insoddisfatti sia zero, bensì il PPD non è mai inferiore al 5%.

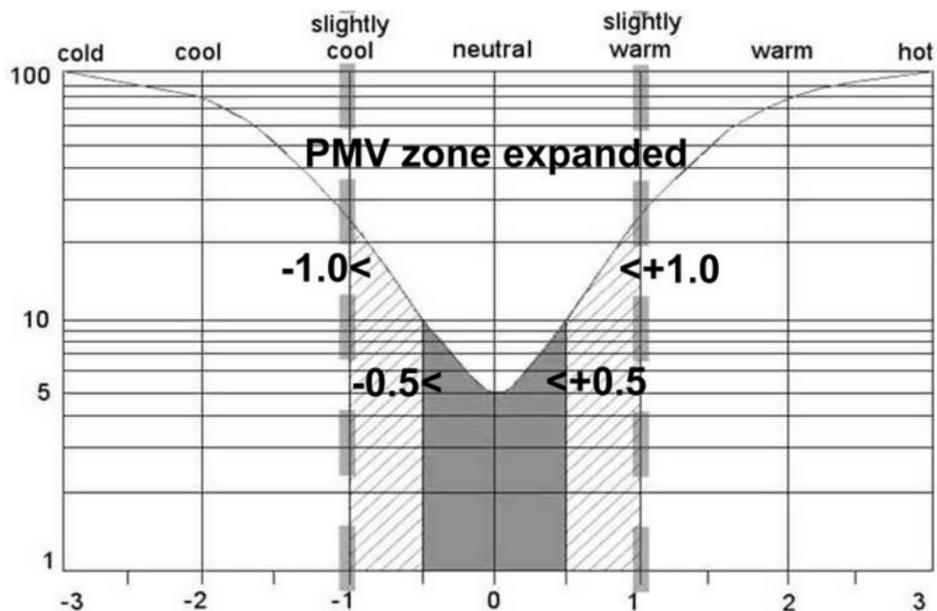


Figura 59 – Predicted Mean Vote e Predictive Percentage Dissatisfied

Dalla simulazione precedentemente effettuata è stato ricavato il consumo annuo della sola zona 8, così come tutti i carichi interni ad essa annessi, come mostrato nella tabella seguente:

Lastratura - ZONA 8	
<i>Carichi interni</i>	
HVAC sensible air heating [kW]	1.372,32
people sensible heat addition [kW]	13,10
lights sensible heat addition [kW]	133,40
equipment sensible heat addition [kW]	133,40
calculated design load [kW]	848,98
infiltration heat removal [kW]	-130,02
opaque surface cond heat removal [kW]	-1.409,54
window heat removal [kW]	-112,65
<i>Consumo energetico</i>	
annual HVAC zone sensible air heating [MWh]	438,26

Tabella 12 – Dati sulle potenze della zona 8 della Lastratura

Viene inoltre riportato l'andamento del PMV in relazione ai profili di temperatura.

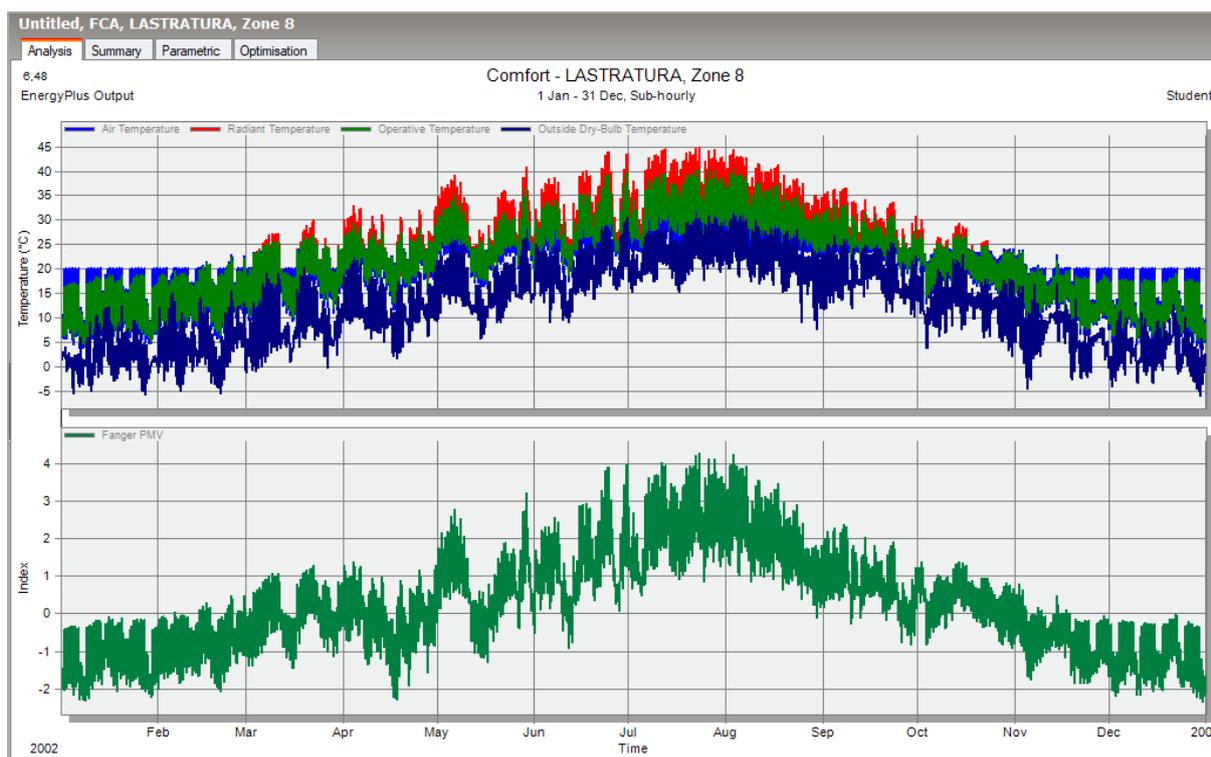


Figura 60 – Profili di temperatura e andamento del PMV della zona 8 (con aerotermi)

Come si può facilmente intuire dal grafico, nel periodo invernale prevale la sensazione di fresco, con valori di PMV che variano da -2,5 a +1, mentre nella stagione estiva si supera addirittura il valore di +4, a verifica del fatto che il comfort interno non è rispettato.

Per provare a migliorare il comfort termoigrometrico interno alla zona 8 si è pensato di sostituire gli aerotermini con dei pannelli radianti a soffitto.

I pannelli radianti come terminali di riscaldamento hanno il vantaggio di distribuire bene il calore e il loro funzionamento si basa sulla circolazione di acqua calda a circa 80°C in un circuito all'interno di una superficie radiante [18].

Inoltre, gli impianti radianti, lavorando a basse temperature, riescono ad andare a regime in poco tempo, garantendo quindi un notevole risparmio energetico [19].

Per poter dimensionare i pannelli radianti su DesignBuilder è necessario conoscere la temperatura dell'acqua (80°C), la frazione radiativa del flusso di calore emesso e la frazione radiativa che raggiunge le persone.

Lo scambio di calore tra i pannelli e l'ambiente interno avviene attraverso due flussi, uno radiativo e uno convettivo:

$$\dot{Q} = h_c(T_{panel} - T_{amb}) + \sigma F_\epsilon F_{12} S_1 (T_{panel}^4 - T_{amb}^4) \quad [W/m^2]$$

Dove:

- h_c è il coefficiente di scambio termico convettivo;
- T_{panel} è la temperatura del pannello radiante;
- T_{amb} è la temperatura dell'ambiente;
- σ è la costante di Stefan Boltzmann;
- F_ϵ è il fattore di emissività;
- F_{12} è il fattore di vista (o di forma);
- S_1 è la superficie emettente.

La seconda differenza di temperatura può essere semplificato nel modo seguente:

$$\begin{aligned} (T_{panel}^4 - T_{amb}^4) &= (T_{panel}^2 + T_{amb}^2)(T_{panel}^2 - T_{amb}^2) \\ &= (T_{panel} + T_{amb})(T_{panel}^2 + T_{amb}^2)(T_{panel} - T_{amb}) \end{aligned}$$

Introducendo una temperatura media:

$$T_m = \frac{T_{panel} + T_{amb}}{2}$$

Si ottiene:

$$\dot{Q} = h_c(T_{panel} - T_{amb}) + h_r(T_{panel} - T_{amb}) = h_c(T_{panel} - T_{amb}) + 4T_m^3 \sigma F_\epsilon F_{12} (T_{panel} - T_{amb})$$

Dove h_r è il coefficiente termico per irraggiamento ed è pari a:

$$h_c = 4T_m^3 \sigma F_\epsilon F_{12} \quad [W/m^2K]$$

Per il dimensionamento del pannello F_{ε} e F_{12} sono stati posti rispettivamente pari a 0,8 e 1.

La temperatura media tra quella del pannello (80°C) e quella dell'ambiente interno (20°C) è risultata essere di 50°C (323 K).

Infine, ipotizzando una lunghezza del pannello radiativo (L) pari a circa 6 m, tramite la seguente formula empirica per il calcolo del coefficiente di scambio termico convettivo:

$$h_c = 0,61 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{1/5}$$

(ΔT è la differenza di temperatura tra quella dell'acqua e quella dell'aria ed è espressa in °C).

Sono stati così ottenuti:

$$h_c = 0,676 \quad [W/m^2K]$$

$$h_r = 6,110 \quad [W/m^2K]$$

Dunque, la frazione radiante rappresenta circa il 90% del totale.

Per quanto riguarda invece la frazione di flusso radiativo diretto verso le persone, si è ipotizzato di porla con buona approssimazione pari al 50%.

Per procedere in tale direzione, si è deciso di isolare su Revit la singola zona 8, creando una partizione orizzontale per ogni metro di altezza (altezza totale pari a 6 metri), in modo da creare più zone virtuali a diverse altezze per apprezzare meglio la distribuzione di temperatura in ottica di un miglioramento del comfort.

Le partizioni orizzontali sono state pensate come un sottile strato di aria, in modo da rappresentare esclusivamente delle partizioni virtuali e non intaccare i risultati delle simulazioni.

Inoltre, dopo aver importato il nuovo modello in DesignBuilder, il locale è stato ulteriormente ripartito tracciando partizioni verticali e creando, così, zone virtuali aventi ognuna una superficie del pavimento pari a 400 mq (20x20 m).

Infine, su DesignBuilder è stato precisato che, ad esclusione dell'ambiente al piano inferiore, tutti gli altri blocchi non concorrono al computo della superficie totale calpestabile.

In Figura 61 è riportato il modello 3D di DesignBuilder.

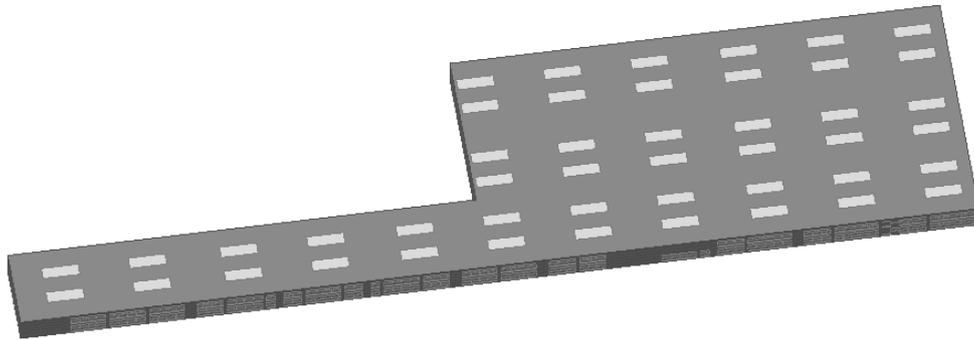


Figura 61 – Visualizzazione 3D del modello BEM della zona 8

Una volta suddiviso complessivamente l'intero locale in 138 zone virtuali (23 per ogni piano) è stato modellato l'impianto (Figura 63) con un circuito d'acqua calda alimentato da una caldaia e 14 pannelli radianti posizionati nelle zone virtuali evidenziate in Figura 62, ad un'altezza di 4 metri.

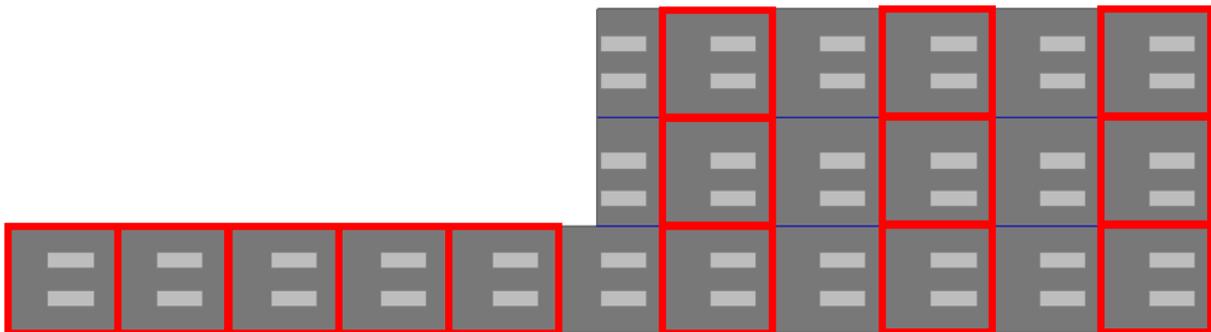


Figura 62 – Zone virtuali con pannelli radianti

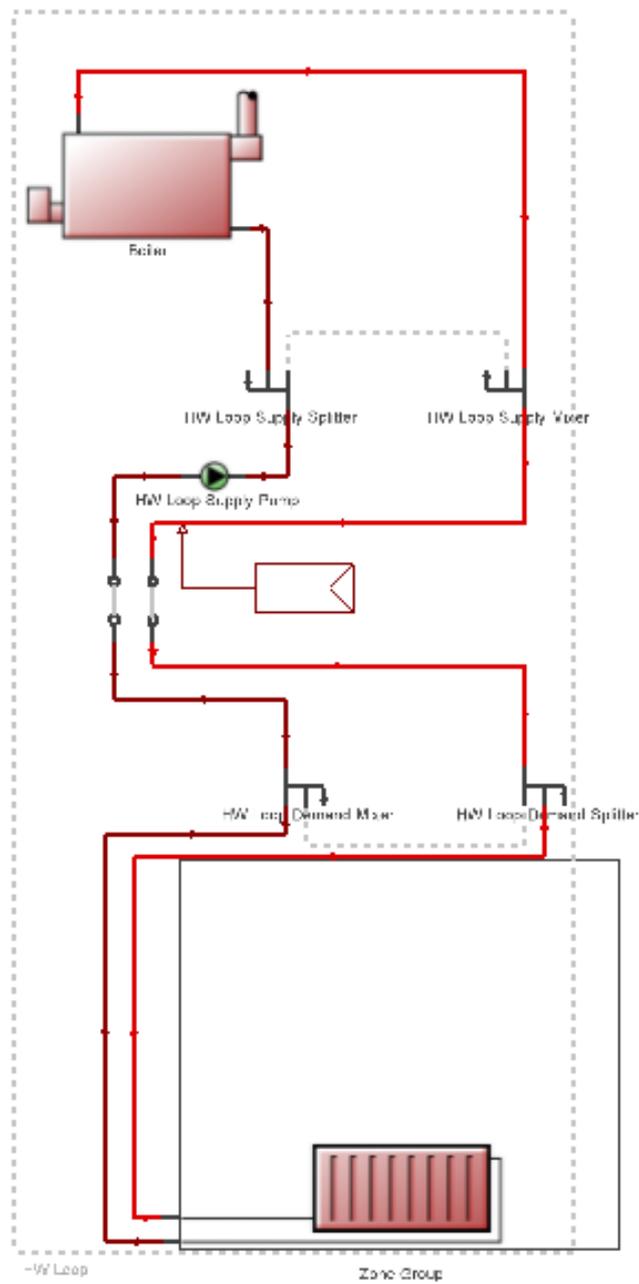


Figura 63 – Schema impianto HVAC con pannelli radianti

È stata così effettuata una prima simulazione, impostando una temperatura di set-point dell'aria interna del quarto piano, dove sono presenti i pannelli radianti, pari a 40°C, in modo tale da avere una condizione di comfort a pianterreno.

La simulazione è stata condotta per la seconda settimana di gennaio, poiché generalmente la più fredda e, dunque, di maggior interesse.

Vengono quindi riportati gli andamenti di temperatura e del PMV del piano al livello più inferiore, ovvero quello interessato dall'occupazione.

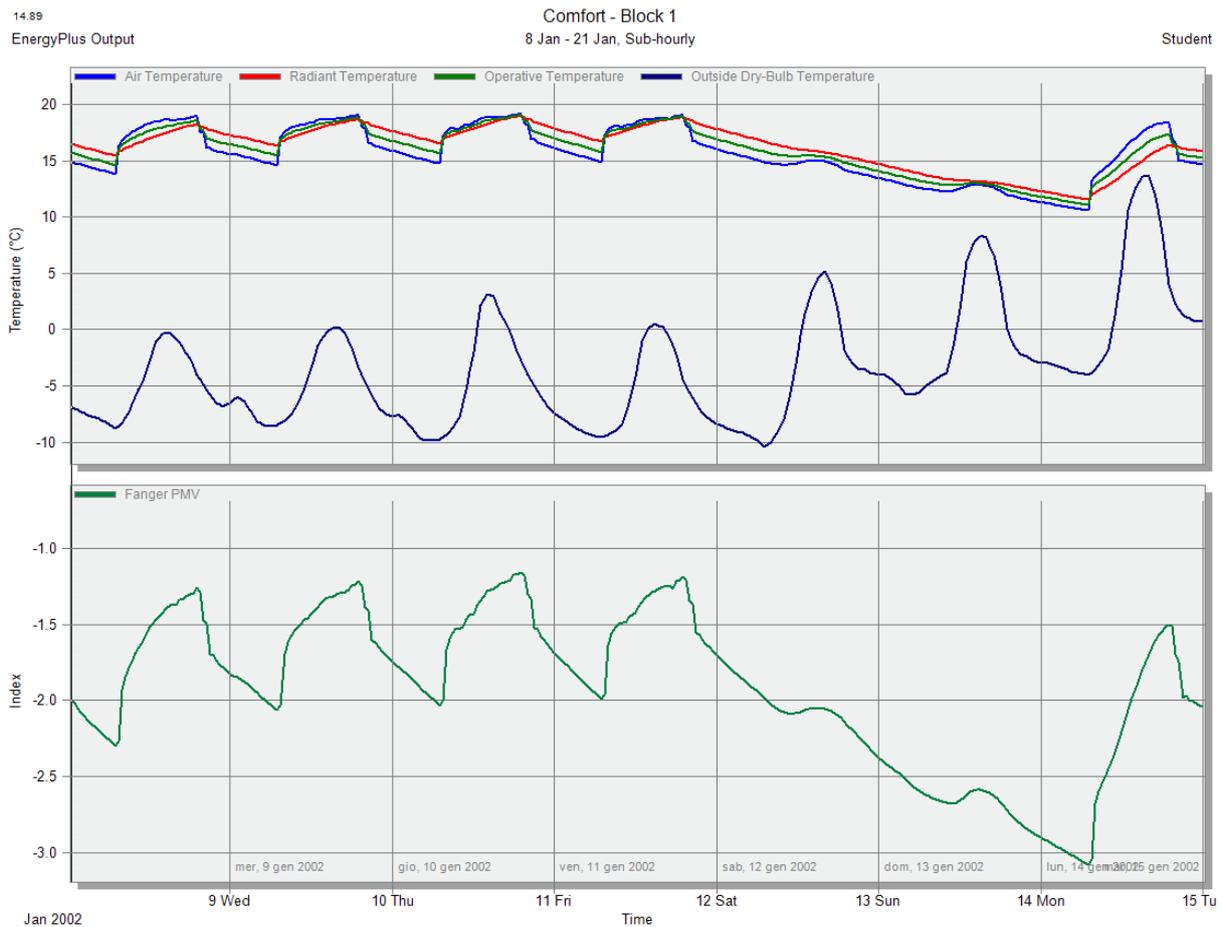


Figura 64 – Profili di temperatura e andamento del PMV del piano più inferiore

L'analisi, come si evince dalla Figura 64, ha riscontrato valori di PMV oscillanti tra circa -2,3 e -1,5. Ciò è sicuramente dovuto al fatto che i pannelli radianti sovrastano solo 14 zone delle 33 totali che formano la superficie calpestabile del locale.

Dunque, si è deciso di riportare gli andamenti del PMV di una zona tipo a pianterreno interessata dal riscaldamento di un pannello radiante sovrastante, ad un'altezza di 4 metri.

Successivamente, invece, vengono proposti i soli andamenti delle temperature della stessa zona virtuale al variare dell'altezza.



Figura 65 - Profili del PMV di una zona con pannello radiante sovrastante (piano terra)

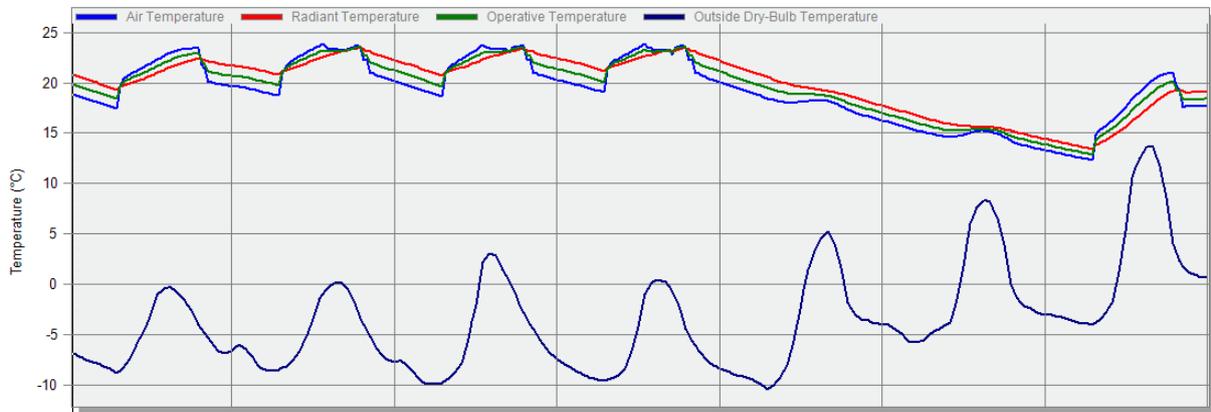


Figura 66 - Profili del PMV di una zona con pannello radiante sovrastante (piano terra)

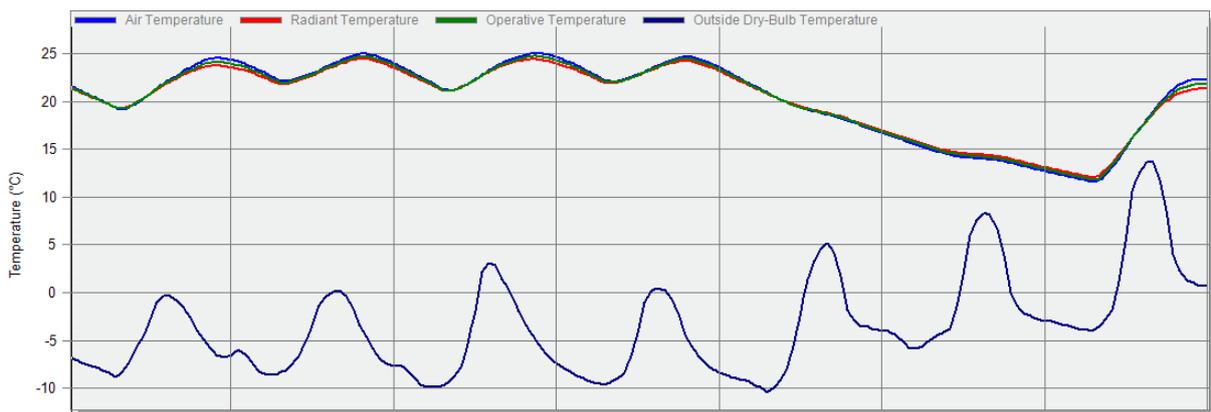


Figura 67 - Profili del PMV di una zona con pannello radiante sovrastante (piano 2)

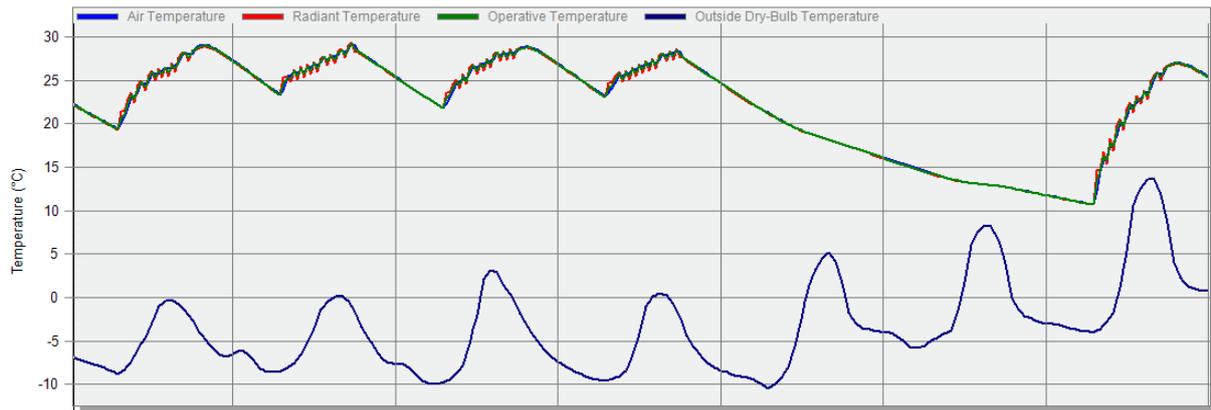


Figura 68 - Profili del PMV di una zona con pannello radiante sovrastante (piano 3)

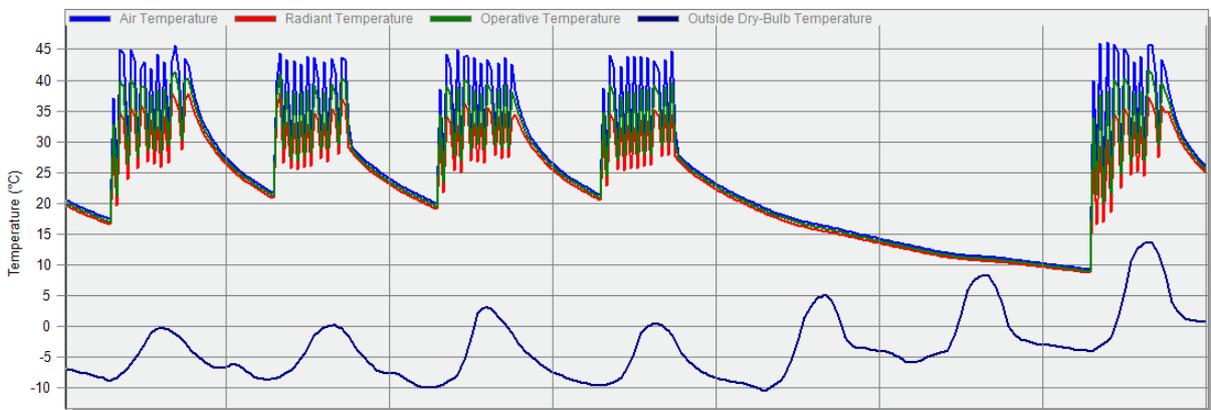


Figura 69 - Profili del PMV di una zona con pannello radiante sovrastante (piano 4 – con pannelli)

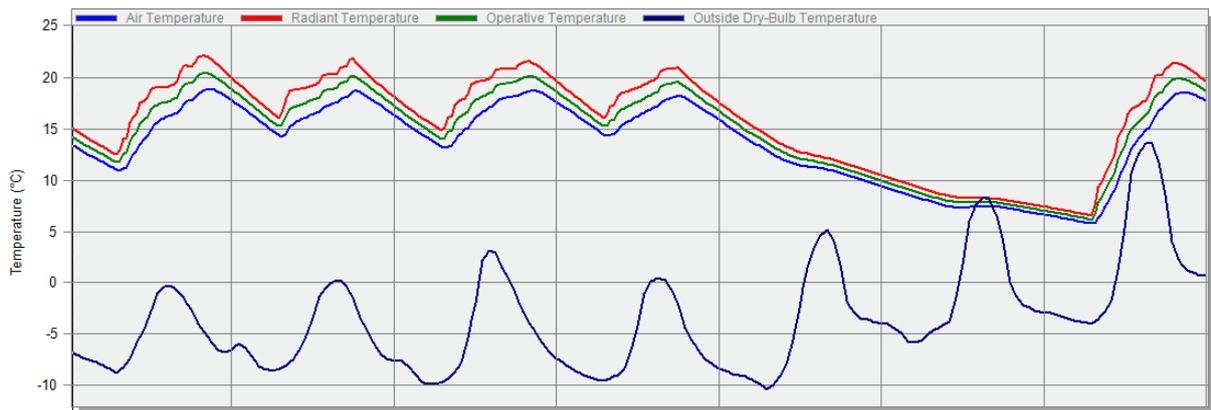


Figura 70 - Profili del PMV di una zona con pannello radiante sovrastante (piano 5)

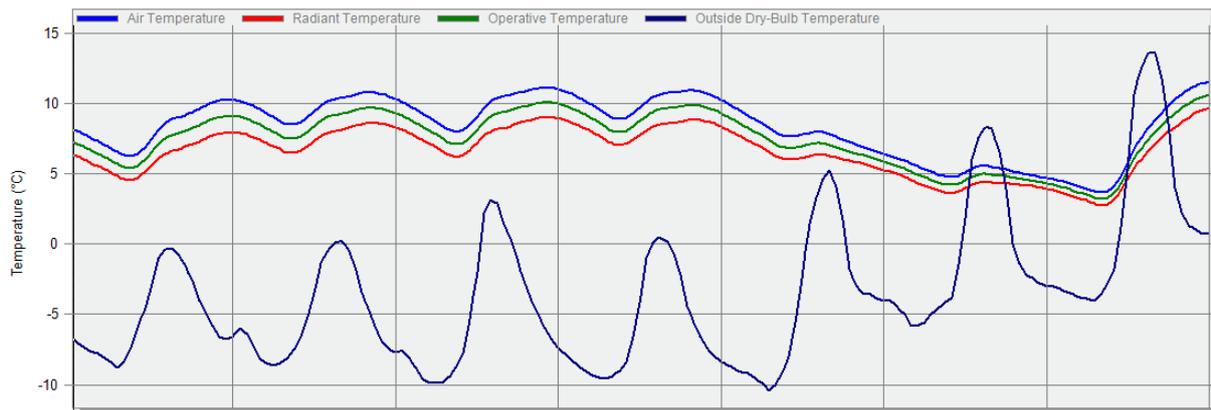


Figura 71 - Profili del PMV di una zona con pannello radiante sovrastante (piano 6)

È possibile notare come le temperature dell'aria, quella radiante e quella operativa aumentino salendo verso l'alto, fino ad incontrare il livello al quale sono presenti i pannelli radianti, determinando dunque un gradiente termico verticale in linea coi risultati attesi.

Da un'altezza di 4 metri in su, invece, si nota come la temperatura radiante superi quella dell'aria, dovuto al fatto che, salendo verso l'alto, la temperatura dell'aria tende a diminuire per via della vicinanza con la superficie del tetto che disperde, mentre la temperatura radiante, derivante dai pannelli, continua ad incidere.

Infine, in riferimento alla Figura 71, i valori delle temperature sono diminuiti fortemente, registrando una temperatura operativa e, quindi, percepita pari a circa 9 °C.

Inoltre, dalla Figura 66, è possibile osservare come la temperatura scenda raggiungendo i 10°C durante il weekend, poiché l'impianto è spento.

In conclusione, si possono dunque constatare i benefici ottenuti con un sistema di pannelli radianti, posizionati ad un'altezza di circa 4 metri e in corrispondenza soltanto di alcune zone, poiché quelle sprovviste sono destinate ad accogliere i macchinari di processo presenti nella lastratura. Il comfort è quindi garantito.

6. Conclusioni

Lo scopo della tesi era quello di delineare in maniera dettagliata il processo di progettazione alla base della metodologia BIM, dalla modellazione parametrica all'analisi energetica.

L'analisi del caso studio ha evidenziato quelli che sono i principali punti di forza e le criticità del flusso di lavoro identificato nel presente elaborato.

La metodologia BIM si è rivelata un ottimo strumento per la creazione di un modello di partenza utile come base per un'analisi del comportamento energetico dell'edificio in esame, sebbene le informazioni iniziali non fossero particolarmente esaustive.

È, infatti, proprio quest'ultima considerazione a generare incertezze nel percorso di progettazione adottato, dal momento che la raccolta dati rappresenta a tutti gli effetti il cuore dell'intero processo.

Il modello realizzato del capannone industriale di FCA Mirafiori è caratterizzato da incertezze legate ad una raccolta dati limitata, ma il vantaggio della modellazione parametrica è stato quello di poter creare un modello perfettamente adattabile a qualunque modifica geometrica, piuttosto che strutturale o termica.

Risulta comunque fondamentale disporre di un numero sufficiente di dati iniziali, in termini di piante, sezioni, rilievi, schemi di impianti, eventuali nuvole di punti, informazioni legate all'attività occupazionale e ai consumi energetici dell'edificio in esame, e in generale tutte quelle caratteristiche che permettono al modello di discostarsi il meno possibile dalla realtà.

Inoltre, una corretta modellazione sulla base di sufficienti informazioni porta inevitabilmente ad una validazione dei risultati efficiente e imprescindibile per la veridicità del modello generato.

Infatti, al momento, i risultati ottenuti per lo stabilimento non hanno la possibilità di essere validati, nell'attesa di una più consistente fornitura di dati di input da parte di FCA, in modo da poter adattare il modello e poter così confrontarne il comportamento con quello reale.

Una volta ottenuta la documentazione necessaria per impostare correttamente il percorso di lavoro, il passo successivo è stato quello di creare il modello parametrico col software BIM Autodesk Revit.

Il modello tridimensionale subisce differenti trasformazioni nel corso della progettazione, aumentando considerevolmente il proprio livello di sviluppo, passando da una semplice rappresentazione geometrica ad una più complessa, contenente informazioni termiche, strutturali e meccaniche.

La successiva fase di esportazione rappresentata dall'EAM rappresenta un passaggio importante, poiché permette di verificare preliminarmente l'attendibilità del modello energetico che si intende importare e analizzare successivamente con un software BEM (DesignBuilder).

I dati in esportazione sono risultati essere caratterizzati da grande accuratezza e precisione.

Durante il passaggio dal software di modellazione parametrica a quello energetico sono state riscontrate alcune criticità in termini di operabilità, vale a dire la difficoltà di importazione e riconoscimento di un edificio con grande metratura e strutturalmente complesso come il capannone di FCA, con un ingente numero di lucernari e finestre da tetto.

La modellazione del BEM ha avuto inizio con la progettazione dello schema impiantistico del sistema di riscaldamento e ventilazione, dal momento che l'interoperabilità tra Revit e DesignBuilder non permette la conservazione delle informazioni inerenti agli impianti.

Infine, sono state condotte diverse simulazioni in DesignBuilder, passando talvolta ad analizzare nel dettaglio direttamente gli input in EnergyPlus, poiché permette una gestione degli output finali più ampia rispetto alla sua interfaccia grafica rappresentata da DesignBuilder.

Gli output di maggior importanza sono stati identificati negli andamenti delle temperature interne, in relazione a quella esterna derivante dal file climatico, dal profilo dei carichi interni, dai dati relativi alle potenze e ai consumi annuali dell'impianto, e dall'analisi del comfort termoigrometrico.

Infine, l'analisi dettagliata riguardante il comfort ha evidenziato l'importanza e l'efficienza dell'impiego di pannelli radianti per il riscaldamento invernale, sia in termini di comfort che di risparmio energetico.

Ai fini del progetto condotto con FCA Mirafiori, per quanto riguarda gli sviluppi futuri, si potrebbe pensare di andare ad agire, oltre che sul comfort interno degli ambienti, sulla stratigrafia dei componenti edilizi, sulla tenuta dell'involucro per la minimizzazione delle perdite per ventilazione (che in edifici con volumi elevati rappresentano la quota maggiore nel calcolo del fabbisogno), oppure si potrebbe ipotizzare una soluzione impiantistica del sistema HVAC più efficiente.

Il progetto, di fatto, proseguirà oltre al periodo dedicato alla stesura della tesi, con lo scopo di giungere alla creazione di un modello ad un più alto livello di dettaglio e affidabilità, e si porrà come obiettivo finale la validazione dei risultati e la conseguente analisi dei possibili interventi di retrofit energetico.

Concludendo, al fine di indagare ulteriormente gli aspetti legati all'interoperabilità, si potrebbe replicare la creazione del modello BEM con l'utilizzo di un software energetico diverso, in modo da creare un ulteriore mezzo di validazione dei risultati.

Bibliografia

- [1] M. Binotto, "Software di simulazione energetica degli edifici e loro validazione," *Tesi.Cab.Unipd.It*, 2009.
- [2] A. Osello, "The future of drawing whit BIM for Engineers and Architects," *Dario Flaccovio Ed.*, 2008.
- [3] K. L. C. EASTMAN, P. TEICHOLZ, R. SACKS, *BIM Handbook: A guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors*, 2nd Editio. 2011.
- [4] BIPS National Agency for Enterprise and Construction, *3D Working Method 2006*, no. April. 2007.
- [5] National Institute of Building Sciences, "National Building Information Modeling Standard," *Nist*, 2007.
- [6] Stefano Brusaporci, *Handbook of Research on Emerging Digital Tools for Architectural Surveying, Modeling, and Representation*. 2015.
- [7] D. K. Smith, "Getting Started and Working with Building Information Modeling," *Facilities*.
- [8] J. Underwood, *Handbook of Research on Building Information Modeling and Construction Informatics: Concepts and Technologies: Concepts and Technologies*. 2009.
- [9] F. Jernigan, *BIG BIM little Bim: The Practical Approach to Building Information Modeling Integrated Practice done the right Way!* 4Site Press, 2007.
- [10] D. B. Crawley *et al.*, "EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program," *Energy Build.*, vol. 33, no. 4, pp. 319–331, Apr. 2001.
- [11] A. V. Prada-Hernández, J. S. Rojas-Quintero, J. A. Vallejo-Borda, and J. L. Ponz-Tienda, "Interoperability of Building Energy Modeling (BEM) with Building Information Modeling (BIM)," *Proc. SIBRAGEC ELAGEC 2015, Sao Carlos, Bras.*, pp. 519–526, 2015.
- [12] B. Lab, "DOE-2." [Online]. Available: <http://simulationresearch.lbl.gov/projects/doe2>.

- [13] Autodesk, "Lo standard IFC : quando e come utilizzarlo."
- [14] K. L. Chuck Eastman, Paul Teicholz, Rafael Sacks, *Il BIM: Guida completa al Building Information Modeling per committenti, architetti, ingegneri, gestori immobiliari e imprese*. 2011.
- [15] "From BIM to BPA: What is an 'Energy Analysis Model' (EAM)?," 2013. .
- [16] D. Lanzoni, *Diagnosi e certificazione energetica: prove strumentali sugli edifici*. 2012.
- [17] J. F. Hall, "Thermal comfort thermal environments," 1969, vol. 27, no. 5.
- [18] A. U. Casalena and M. Enei, "Pannelli Radianti a Soffitto: Raffrescamento e Riscaldamento dall'Alto." [Online]. Available: <http://www.mygreenbuildings.org/2013/01/31/pannelli-radianti-a-soffitto-raffrescamento-e-riscaldamento.html>.
- [19] R. G. S.r.l., "Pannelli radianti." [Online]. Available: <http://www.rossatogroup.com/prodotti/pannelli-radianti.html>.

