

1222•2022  
**800**  
ANNI



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA  
**Dipartimento di Ingegneria Industriale DII**  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

**Modellizzazione energetica in ambito urbano:  
il caso di studio del distretto universitario di Padova**

*Relatore:* Prof. Angelo Zarrella

*Correlatore:* Ing. Enrico Prativiera

*Laureando:* Pierdonato Romano  
matricola n°1179055

Anno Accademico 2019/2020



# SOMMARIO

<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>5</b>
<b>CAPITOLO 1.....</b>	<b>11</b>
1.1 Il caso studio: distretto universitario di Padova.....	11
1.1.1 Area Nord-Piovego .....	12
1.1.2 Area Sud-Piovego .....	24
<b>CAPITOLO 2.....</b>	<b>33</b>
2.1 Il software di simulazione energetica: EnergyPlus.....	33
2.1.1 Bilancio termico dell'ambiente climatizzato.....	34
2.1.2 Bilancio di massa dell'ambiente climatizzato.....	35
2.1.3 Bilancio termico su una superficie generica .....	36
2.2 Le fasi della modellizzazione di un edificio in ambiente EnergyPlus.....	37
2.2.1 Geometria dell'edificio .....	38
2.2.2 Input climatico.....	40
2.2.3 Involucro edilizio .....	41
2.2.4 Carichi interni, schedules e parametri di funzionamento dell'impianto .....	42
2.2.5 Measures.....	45
2.2.6 Simulazione e risultati.....	46
<b>CAPITOLO 3.....</b>	<b>53</b>
3.1 Il linguaggio di programmazione: l'ambiente MATLAB.....	53
3.2 Il modello RC: cenni storici e normative di riferimento.....	53
3.3 Il codice di calcolo sviluppato in ambiente MATLAB.....	55
3.3.1 Equazioni del bilancio termico e di vapore.....	57
3.3.2 Definizione dei dati di input e fase di pre-processing.....	60

3.3.3 Simulazione energetica .....	68
3.3.4 Fase di post-processing .....	76
<b>CAPITOLO 4 .....</b>	<b>83</b>
4.1 Analisi dei risultati .....	83
4.1.1 Confronto per gli edifici non residenziali .....	83
4.1.2 Confronto per gli edifici residenziali .....	87
4.2 Analisi comparativa dei modelli energetici proposti.....	89
<b>CAPITOLO 5 .....</b>	<b>93</b>
5.1 Premessa.....	93
5.2 Riqualificazione energetica della copertura .....	93
5.3 Sostituzione dei serramenti .....	96
5.4 Ristrutturazione delle pareti verticali esterne .....	99
5.5 Retrofit della copertura, dei serramenti e delle pareti verticali esterne.....	101
5.6 Introduzione di un recuperatore di calore nell'impianto di ventilazione .....	104
5.7 Installazione di un impianto fotovoltaico sulla copertura degli edifici .....	106
5.8 Considerazioni finali .....	108
<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>113</b>
<b>APPENDICE .....</b>	<b>115</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>129</b>
<b>RINGRAZIAMENTI.....</b>	<b>133</b>

## INTRODUZIONE

Le Nazioni Unite stimano che il numero di abitanti sulla Terra aumenterà entro il 2030 con un tasso netto di crescita di circa due milioni a settimana [1]. Questo può avere conseguenze importanti sull'economia, sull'ambiente e sulla qualità della vita di miliardi di persone. Sempre più spesso si sente parlare di misure politiche a livello nazionale e internazionale, i governi di molte città nel mondo hanno sviluppato e proposto ambiziosi obiettivi di riduzione delle emissioni di gas serra, ne sono un esempio San Francisco e Londra (rispettivamente 40% e 60% entro il 2025) o New York e Boston (80% entro il 2050) [2,3]. È interessante notare come tali obiettivi richiedano sempre più una forte volontà politica, specialmente nelle regioni che hanno pagato a caro prezzo gli effetti dei cambiamenti climatici degli ultimi anni.

In un periodo storico in cui la società sembra muoversi abbastanza uniformemente verso una transizione accelerata volta ad arginare, nonché ridurre, le emissioni di anidride carbonica, i dati energetici per il 2018 dipingono un quadro preoccupante, come riportato dal report BP del 2019 [4] da cui si evince che il consumo energetico e le emissioni di anidride carbonica sono aumentati con un tasso di crescita più rapido che negli ultimi anni. Il consumo di energia primaria è aumentato del 2,9% rispetto all'anno precedente (valore più alto dal 2010 e circa doppio rispetto al valore medio di 1,5%) mentre l'emissione di anidride carbonica è aumentata del 2% (valore più alto negli ultimi 7 anni). È possibile spiegare questa forte crescita come una combinazione di effetti legati soprattutto alle condizioni meteorologiche e alla grande espansione economica della Cina.

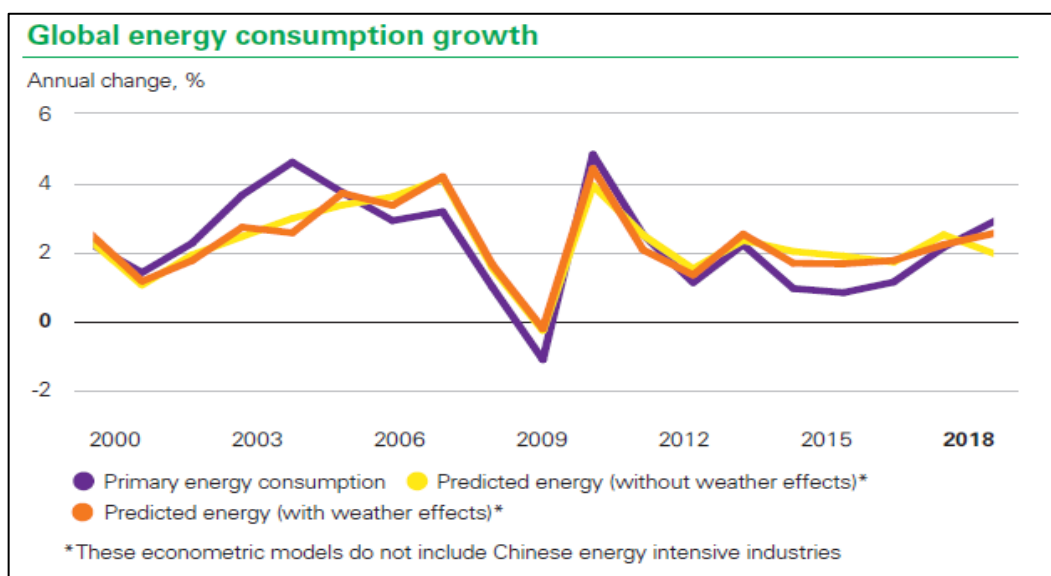


Figura 1: Andamento del consumo energetico mondiale e dipendenza dai fattori climatici-Fonte Report BP 2019

Nel grafico alla pagina precedente è ben distinguibile la forte riduzione del consumo energetico mondiale tra il 2007 e il 2009 a causa della crisi economica. Nell'ultimo anno, invece, si può notare che, considerando gli effetti climatici, la previsione sul consumo energetico sia più vicina alla realtà di quella che li trascura. Anche accettando questa spiegazione, è abbastanza chiaro che le misure adottate finora abbiano prodotto dei risultati al di sotto delle aspettative previste dall'accordo di Parigi del 2015, il cui obiettivo è il contenimento dell'innalzamento della temperatura del pianeta al di sotto dei 2°C rispetto ai livelli preindustriali. Questi dati, di conseguenza, suonano come l'ennesimo campanello d'allarme per la sostenibilità mondiale.

Nel grafico seguente si può notare come Cina, Stati Uniti e India insieme rappresentino più dei due terzi della crescita del consumo di energia primaria, in particolare la Cina risulta la responsabile principale ma, al tempo stesso, è anche la nazione con il più alto tasso di crescita delle fonti rinnovabili (45%).

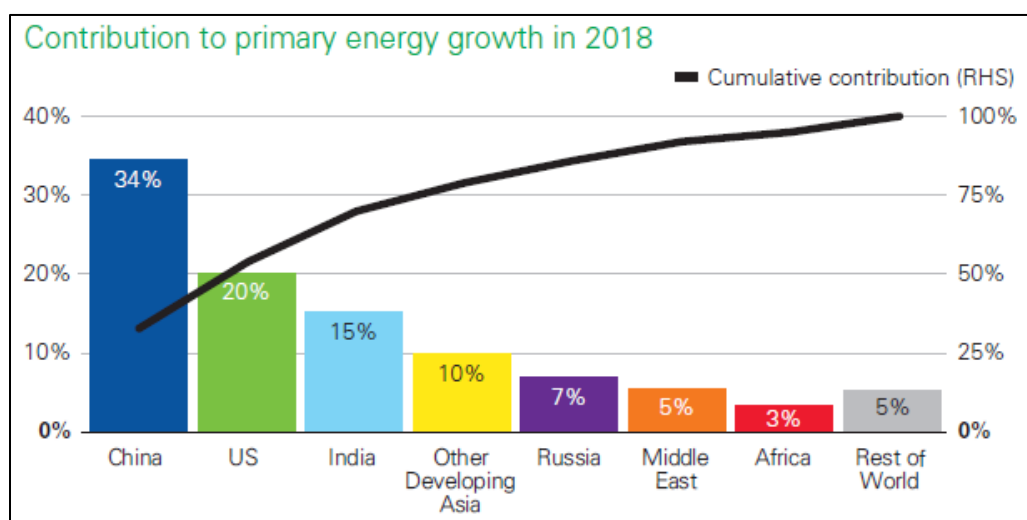


Figura 2: Responsabili principali della crescita del consumo di energia primaria nel 2018 - Fonte BP 2019

Le emissioni inquinanti derivano principalmente da tre settori: l'industria, i trasporti e gli edifici. Mentre la quota di emissioni legata ai trasporti e alle attività industriali varia da città a città, quella legata agli edifici rappresenta un fattore chiave. Al fine di gestire e, in particolare, ridurre tali emissioni sia per i quartieri nuovi che per quelli esistenti, è necessario comprendere meglio non solo quali settori e edifici causino attualmente tali emissioni, ma anche quali effetti futuri potrebbero avere sia programmi globali di retrofit energetico che cambiamenti delle infrastrutture di approvvigionamento energetico [5].

La Raccomandazione Europea 2016/1318 [6], a tal proposito, individua negli edifici di nuova costruzione un modo per contenere la domanda di energia; tali edifici devono essere

caratterizzati da consumi energetici molto ridotti e, quando possibile, devono generare energia localmente attraverso l'impiego di fonti rinnovabili. La Raccomandazione chiarisce l'importanza che gli Stati membri si assicurino, entro il 31 dicembre 2020, che tutti gli edifici di nuova costruzione siano ad energia quasi zero e ribadisce: “gli edifici sono elementi fondamentali per le politiche di efficienza energetica dell'Unione, in quanto rappresentano circa il 40% del consumo di energia finale”.

È altresì importante individuare delle soluzioni tecniche ed economicamente valide rivolte alla riqualificazione del parco edilizio europeo esistente in quanto, molti degli edifici presenti nelle città europee, necessitano di una profonda ristrutturazione. D'altronde, circa il 55% della popolazione mondiale vive attualmente in aree urbane e si prevede che questa percentuale aumenterà ulteriormente, anche a causa della continua migrazione dalle aree rurali.

Ottenere dei risultati concreti nel breve termine e garantire un futuro sostenibile per la popolazione mondiale è sicuramente una sfida a cui l'umanità intera è chiamata a partecipare.

Per intervenire nel settore edilizio, al fine di ridurre i consumi energetici, è necessario sicuramente essere in grado di modellizzare adeguatamente il comportamento termico di un edificio. Negli ultimi decenni sono stati sviluppati numerosi strumenti per la modellizzazione energetica degli edifici in contesto urbano. In generale, la dinamica termica di un edificio può essere modellizzata seguendo due approcci diversi. Il primo consiste nel modellare esplicitamente i fenomeni fisici che si verificano all'interno/esterno dell'edificio, ovvero tutti i processi fisici che influenzano in modo significativo il bilancio energetico delle zone termiche considerate. I modelli che seguono questa logica sono definiti *white box models*. Il secondo approccio si basa su metodi statistici applicati ai dati disponibili (consumi energetici, valori di temperatura e umidità relativa registrati negli ambienti) senza alcun riferimento esplicito alle equazioni che governano il loro bilancio energetico e sono quindi chiamati *black box models* [7]. Nella maggior parte dei casi i dati non sono disponibili, ad esempio durante la fase di progettazione, o non sono esaurienti. In questi casi si è obbligati ad utilizzare la prima tipologia di modello.

Gli edifici sono sistemi energetici molto complessi (sistemi dinamici) perché interessati da diversi processi fisici sovrapposti quali, ad esempio, lo scambio termico per convezione e radiazione tra le superfici interne dei muri, la generazione interna di calore e vapore, l'assorbimento della radiazione solare e tanti altri. Inoltre, sono costituiti da strutture complesse (tridimensionalità, involucro multistrato costituito da componenti opachi e vetrati, molteplicità

delle zone termiche). Il fabbisogno energetico per il riscaldamento o per il raffrescamento, pertanto, può essere calcolato in diversi modi più o meno dettagliati a seconda dell'obiettivo dell'analisi. A questo scopo possono essere usati metodi stazionari, quasi stazionari o dinamici. La figura seguente schematizza questi modelli energetici.

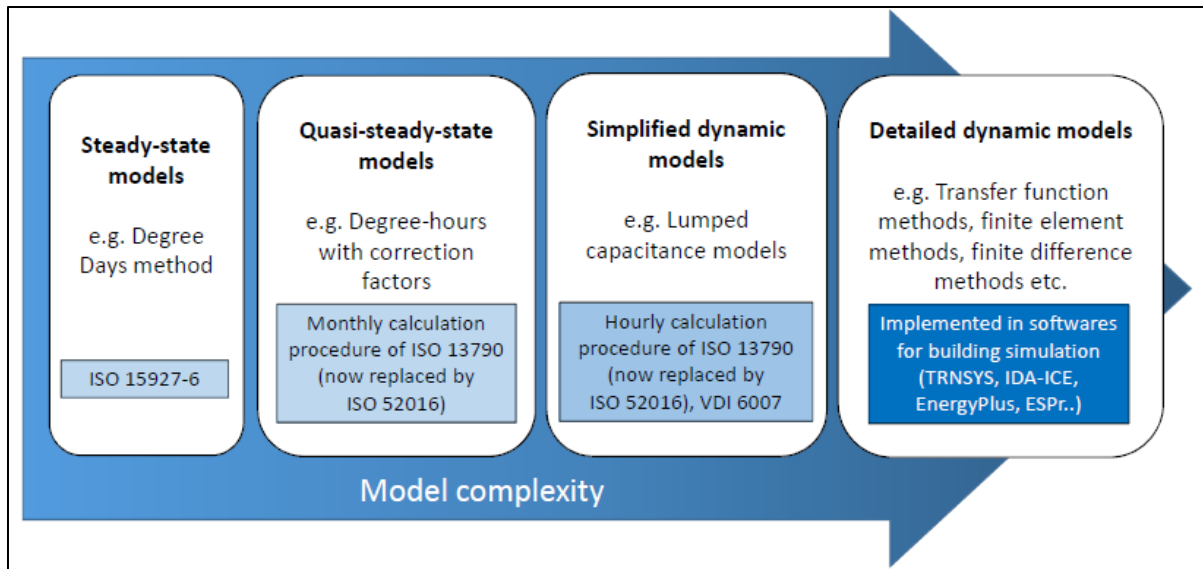


Figura 3: Principali tipologie di modelli energetici – Fonte Corso di Energy and Buildings

Dalla figura si può notare come muovendosi da sinistra verso destra aumenti la complessità del modello e, al tempo stesso, l'accuratezza. È chiaro che i modelli dinamici dettagliati risultano i più accurati ma richiedono anche uno sforzo di calcolo maggiore. I metodi quasi stazionari calcolano il bilancio termico delle zone dell'edificio per periodi abbastanza lunghi (un mese o un'intera stagione) in modo stazionario ma tengono conto degli effetti dinamici utilizzando dei fattori di utilizzo determinati empiricamente. Al contrario, i metodi dinamici calcolano il bilancio termico in un breve intervallo di tempo (in genere un'ora ma anche meno se necessario) prendendo in considerazione la trasmissione termica, il flusso di calore per ventilazione, la capacità termica e i carichi di calore interni e solari [8].

Nella pratica, i software più utilizzati per la simulazione energetica degli edifici (TRNSYS e EnergyPlus tra gli altri) si basano su modelli dinamici dettagliati che richiedono una grande quantità di dati, sia di tipo geometrico che legati alle proprietà fisiche delle strutture. Poiché questi modelli richiedono un elevato sforzo computazionale non sono adatti per applicazioni del controllo predittivo [9] o per simulazioni di interi quartieri o distretti dove il numero di edifici è considerevole. A tal fine, recentemente, la ricerca si è focalizzata su modelli dinamici semplificati, in grado di gestire un numero elevato di simulazioni in tempi brevi, mantenendo tuttavia un certo grado di dettaglio nei risultati. Ne sono un esempio i modelli a Resistenza-



Capacità (RC), nei quali l'edificio viene rappresentato come un insieme di nodi collegati con resistenze termiche e capacità (parametri del modello). Il principale vantaggio è che, una volta identificati questi parametri, il sistema ridotto di equazioni può essere risolto analiticamente evitando problemi di convergenza e stabilità che si possono presentare con modelli dinamici dettagliati. Un altro vantaggio è la possibilità di utilizzo anche per utenti meno esperti grazie alla maggiore semplicità dei dati di input.

Il lavoro di tesi descritto in questo elaborato ha l'obiettivo di sviluppare un modello per la valutazione delle azioni di efficientamento energetico su scala urbana. Il primo passo per raggiungere questo obiettivo è sicuramente approfondire le problematiche, le differenze e i vantaggi di un modello RC ad una capacità rispetto ad una simulazione dettagliata dei singoli edifici. Per tale scopo è stato considerato il distretto universitario di Padova, che comprende sia edifici ad uso uffici che residenziali, in modo da poter valutare anche l'effetto del comportamento dell'utente. Nei capitoli seguenti vengono messe in luce le caratteristiche e le differenze principali tra le due metodologie di modellizzazione dinamica. Infine, verrà mostrato anche l'utilizzo del modello RC per la valutazione delle azioni volte al risparmio energetico sul caso studio considerato.



# CAPITOLO 1

## DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO

### 1.1 Il caso studio: distretto universitario di Padova

L'Università degli Studi di Padova è stata fondata nel 1222 quando un gruppo di studenti e docenti dell'Università di Bologna si recarono nella città alla ricerca di una maggiore libertà accademica. L'Università è una delle più antiche del mondo ed ospita circa 60.000 studenti. È composta da 32 dipartimenti a cui sono associate un gran numero di sedi e strutture [10].

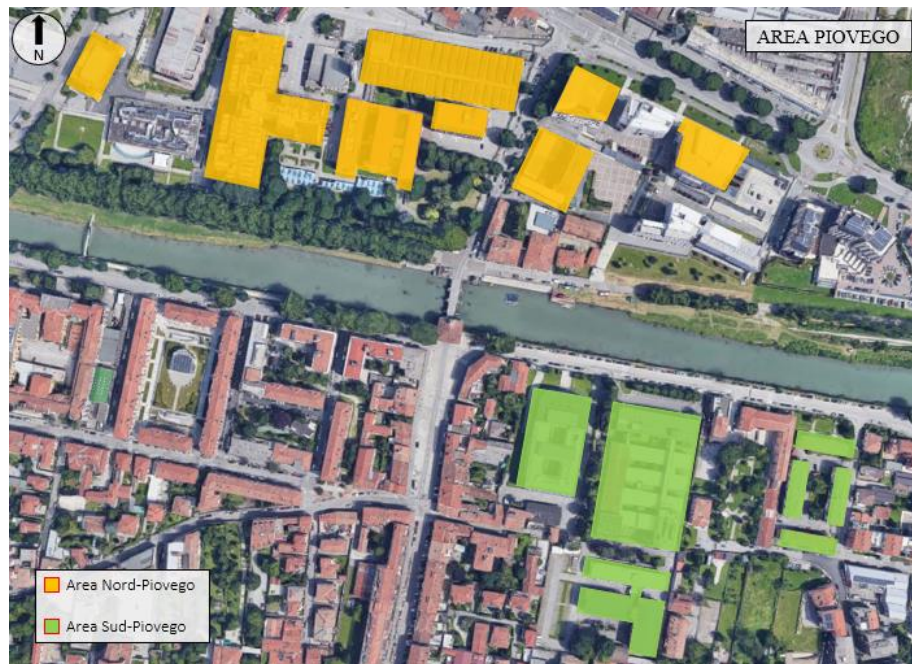


Figura 4: Immagine satellitare degli edifici oggetto di studio - Fonte Google Maps

Il tema centrale di questo elaborato è la modellizzazione energetica in ambito urbano con l'utilizzo di due differenti modelli dinamici: uno dettagliato e l'altro semplificato. È chiaro che le strutture universitarie risultano un buon punto di partenza per uno studio di questo tipo perché si ha disposizione una vasta gamma di edifici dei quali, nella maggior parte dei casi, si è a conoscenza delle principali caratteristiche tecniche e dei dati di occupazione e funzionamento degli impianti. Molti degli edifici dell'ateneo sono abbastanza datati e costituiti da un basso isolamento termico, motivo per cui risulta interessante stabilire di quali interventi di riqualificazione energetica necessitano. Sono presenti anche edifici più moderni o adibiti a scopi

diversi dalla didattica. La varietà degli edifici dell'ateneo è un punto chiave per lo studio e l'ottimizzazione di modelli energetici semplificati e adatti al trattamento di un numero elevato di edifici. In questo elaborato sono stati presi in considerazione tredici edifici nell'area circostante il canale Piovego che coprono una superficie in pianta totale di circa 23.000 m<sup>2</sup> e un volume lordo totale di circa 346.000 m<sup>3</sup>. Nei seguenti paragrafi vengono elencati con le rispettive caratteristiche. Si consideri che la trasmittanza termica totale indicata nelle tabelle si calcola con l'espressione  $U = 1/R_{tot}$ , dove  $R_{tot}$  è la resistenza termica totale comprensiva delle resistenze superficiali esterna ed interna come definite da normativa ISO 6946 [11].

### 1.1.1 Area Nord-Piovego

Nell'area a Nord del canale Piovego sono stati scelti quattro complessi di edifici:

1. Complesso didattico Piovego (riconosciuto anche come “aule Ugo Bassi”);
2. Complesso pluridipartimentale di Biologia “A. Vallisneri”;
3. Ex Complesso Dipartimentale di Ingegneria Meccanica;
4. Cittadella dello Studente.



Figura 5: Immagine satellitare degli edifici oggetto di studio nell'area Nord-Piovego - Fonte Google Maps

#### 1.1.1.1 Complesso didattico Piovego

Il Complesso didattico Piovego è un edificio sviluppato su quattro piani di forma rettangolare costruito a metà degli anni Novanta e composto da un insieme di moduli prefabbricati in calcestruzzo. Il piano terra, dopo aver ospitato un parcheggio, ha subito una riqualificazione nel

2006 ed oggi ospita delle aule didattiche così come gli altri piani. L'edificio conta una superficie netta per piano di circa 550 m<sup>2</sup> e un volume lordo totale di circa 7800 m<sup>3</sup>.



Figura 6: Complesso Didattico Piovego

Di seguito vengono elencate le proprietà termofisiche degli elementi strutturali principali dell'edificio:

- Parete esterna:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
CLS	0.050	1.67	880	2400	0.03
Polistirene alleggerito	0.100	0.14	1470	25	0.71
CLS	0.050	1.67	880	2400	0.03
Polistirene	0.030	0.06	1470	25	0.50
Cartongesso	0.010	0.60	840	900	0.02
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.69</b>

- Parete interna:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Intonaco interno	0.015	0.70	1010	1400	0.02
Cartongesso	0.015	0.60	840	900	0.03
Lana di vetro	0.040	0.04	800	16	1.00
Cartongesso	0.015	0.60	840	900	0.03
Intonaco interno	0.015	0.70	1010	1400	0.02
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.75</b>

- Solaio interpiano:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Linoleum	0.002	0.23	1250	1800	0.01
CLS	0.080	1.67	880	2400	0.05
Polistirene	0.200	0.04	1470	25	5.00
CLS	0.070	1.67	880	2400	0.04
Poliuretano	0.040	0.04	1453	40	1.00
Massetto	0.040	1.67	1000	1700	0.02
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.16</b>

- Pavimento contro terra:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Massetto	0.040	1.67	1000	1700	0.02
Poliuretano	0.040	0.04	1453	40	1.00
CLS	0.070	1.67	880	2400	0.04
Polistirene	0.200	0.04	1470	25	5.00
CLS	0.080	1.67	880	2400	0.05
Linoleum	0.002	0.23	1250	1800	0.01
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.16</b>

- Copertura:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Guaina bituminosa	0.004	0.23	3500	1200	0.02
Poliuretano	0.040	0.04	1453	40	1.00
CLS alleggerito	0.180	0.19	880	2400	0.95
CLS	0.070	1.67	880	2400	0.04
Polistirene	0.200	0.04	1470	25	5.00
CLS	0.080	1.67	880	2400	0.05
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.14</b>

- Superfici vetrate: l'edificio presenta due tipologie di finestre costruttivamente molto simili ma con un diverso valore della trasmittanza termica globale. Entrambe sono di tipo a vetrocamera con telaio a taglio termico e infissi metallici, la prima garantisce una trasmittanza termica di 1.92 W/(m<sup>2</sup> K) e la seconda di 2.50 W/(m<sup>2</sup> K).

### 1.1.1.2 *Complesso pluridipartimentale di Biologia “A. Vallisneri”*

Il Complesso pluridipartimentale “A. Vallisneri” è un edificio costruito nei primi anni '80 sviluppato su nove piani di cui 8 fuori terra. La struttura portante è costituita da un telaio in travi d'acciaio sul quale trovano spazio moduli prefabbricati in calcestruzzo. L'edificio può essere scomposto in tre parti: la zona Nord e la zona Sud, simmetriche e facenti parte del cosiddetto “corpo scientifico” e infine la zona Est o “corpo didattico”. L'edificio conta una superficie netta totale di circa 29.000 m<sup>2</sup> e un volume lordo totale di circa 91.000 m<sup>3</sup>.



Figura 7: *Complesso pluridipartimentale A. Vallisneri*

Di seguito, sono riportate le proprietà termofisiche degli elementi strutturali principali dell'edificio:

- Parete esterna:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
CLS	0.210	1.67	880	2400	0.13
Cartongesso	0.014	0.60	840	900	0.02
Lana di vetro	0.072	0.05	800	11	1.37
Cartongesso	0.014	0.60	840	900	0.02
Intonaco interno	0.020	0.70	1010	1400	0.02
Trasmittanza termica totale [W/(m <sup>2</sup> K)]					0.58

- Parete interna:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Intonaco interno	0.010	0.70	1010	1400	0.01
Cartongesso	0.010	0.60	840	900	0.02
Lana di vetro	0.070	0.05	800	11	1.37
Cartongesso	0.010	0.60	840	900	0.02
Intonaco interno	0.010	0.70	1010	1400	0.01
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.61</b>

- Solaio interpiano:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Linoleum	0.002	0.23	1250	1800	0.01
Massetto in CLS	0.040	1.67	880	2400	0.02
Argilla espansa	0.120	0.12	920	450	1.00
CLS armato	0.140	1.67	880	2400	0.08
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.73</b>

- Pavimento contro terra:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Lana di roccia	0.120	0.05	670	30	2.67
CLS armato	0.140	1.67	880	2400	0.08
Argilla espansa	0.120	0.12	920	450	1.00
Massetto in CLS	0.040	1.67	880	2400	0.02
Linoleum	0.002	0.23	1250	1800	0.01
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.26</b>

- Copertura:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Guaina bituminosa	0.016	0.23	3500	1200	0.07
Polistirene espanso	0.100	0.06	1470	10	1.67
Massetto in CLS	0.040	1.67	880	2400	0.02
Argilla espansa	0.120	0.12	920	450	1.00
CLS armato	0.140	1.67	880	2400	0.08
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.33</b>



- Superfici vetrate: l'edificio presenta un'ampia superficie finestrata, soprattutto dal primo al sesto piano. Le finestre impiegate sono di tipo a vetrocamera con una trasmittanza termica globale di circa  $3.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ .

### 1.1.1.3 Ex Complesso Dipartimentale di Ingegneria Meccanica

L'ex Complesso Dipartimentale di Ingegneria Meccanica è costituito da quattro corpi distinti, collegati tramite corridoi di passaggio: il corpo A adibito a uffici, il corpo B impiegato come officina, il corpo C-D utilizzato a scopo didattico e il corpo E, ex Dipartimento di Fisica Tecnica, contenente uffici e laboratori. I fabbricati appartengono a periodi di costruzione differenti: i primi sono stati costruiti negli anni '70 mentre il corpo E risale al 1982. Visti il differente periodo di costruzione e la diversa destinazione d'uso, le stratigrafie delle strutture edilizie si differenziano tra i vari corpi. Il complesso si estende per circa  $15.500 \text{ m}^2$  e presenta un volume lordo di circa  $69.800 \text{ m}^3$ .

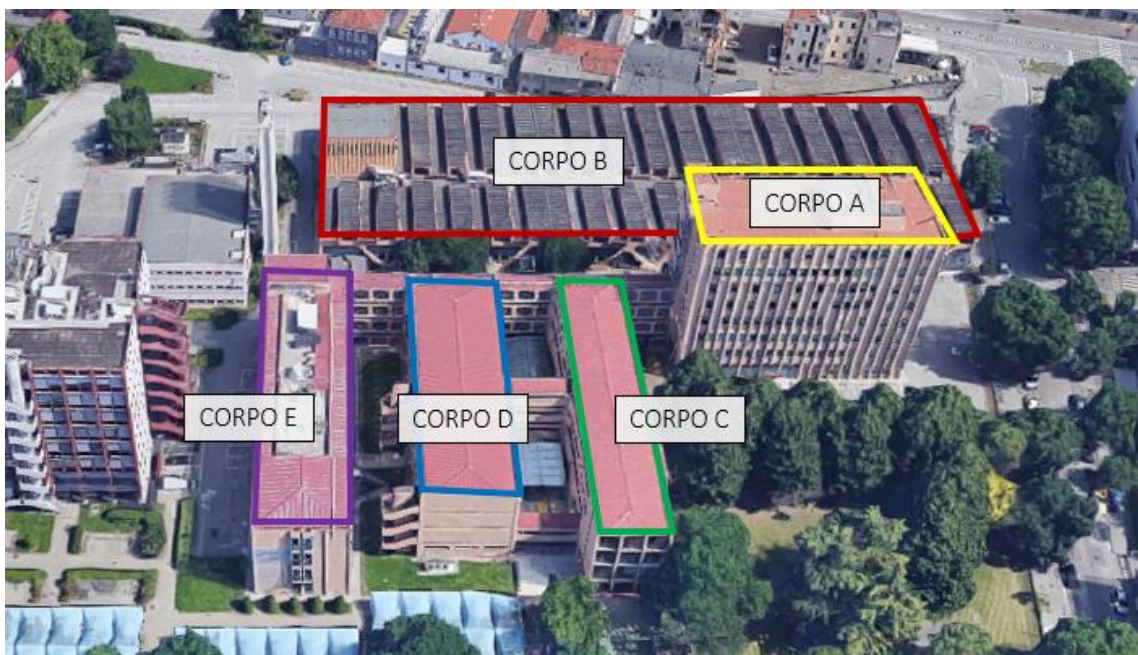


Figura 8: Ex Complesso Dipartimentale di Ingegneria Meccanica

Di seguito, sono schematizzate le proprietà termofisiche delle strutture principali dell'involucro del solo corpo A:

- Parete esterna:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
CLS armato	0.200	2.00	880	2400	0.10
Pannello isolante	0.020	0.07	1810	450	0.29
Mattone forato	0.100	0.36	840	1000	0.28
Intonaco interno	0.015	0.70	1010	1400	0.02
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>1.18</b>

- Parete interna:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Intonaco interno	0.015	0.70	1010	1400	0.02
Mattone forato	0.100	0.36	840	1000	0.28
Intonaco interno	0.015	0.70	1010	1400	0.02
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>1.75</b>

- Solaio interpiano:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Linoleum	0.003	0.18	1700	1150	0.17
Massetto	0.050	1.06	1000	1700	0.05
CLS armato	0.050	2.00	880	2400	0.02
Latero cemento	0.240	0.57	840	900	0.42
Intonaco interno	0.015	0.70	1010	1400	0.02
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>1.07</b>

- Pavimento contro terra:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
CLS armato	0.300	2.00	880	2400	0.15
Massetto	0.050	1.06	1000	1700	0.05
Piastrelle	0.020	1.47	1000	1700	0.01
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>2.98</b>

- Copertura:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Guaina bituminosa	0.005	0.17	1470	1200	0.03
Massetto	0.050	1.06	1000	1700	0.05
Latero-cemento	0.200	0.60	840	900	0.33
Intonaco interno	0.015	0.70	1010	1400	0.02
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>1.68</b>

- Superfici vetrate: finestre di tipo a vetrocamera con telaio in alluminio senza taglio termico con trasmittanza termica globale di 3 W/(m<sup>2</sup> K).

#### 1.1.1.4 Cittadella dello Studente

La Cittadella dello Studente è un complesso di edifici adibiti principalmente alla didattica. Il complesso è costituito da cinque edifici: Psicologia 1, Psicologia 2, il Centro Linguistico di Ateneo, il Centro Congressi e la residenza ESU. A causa della mancanza di materiale per alcune di queste strutture, è stato possibile modellizzare soltanto i primi tre sopraccitati.

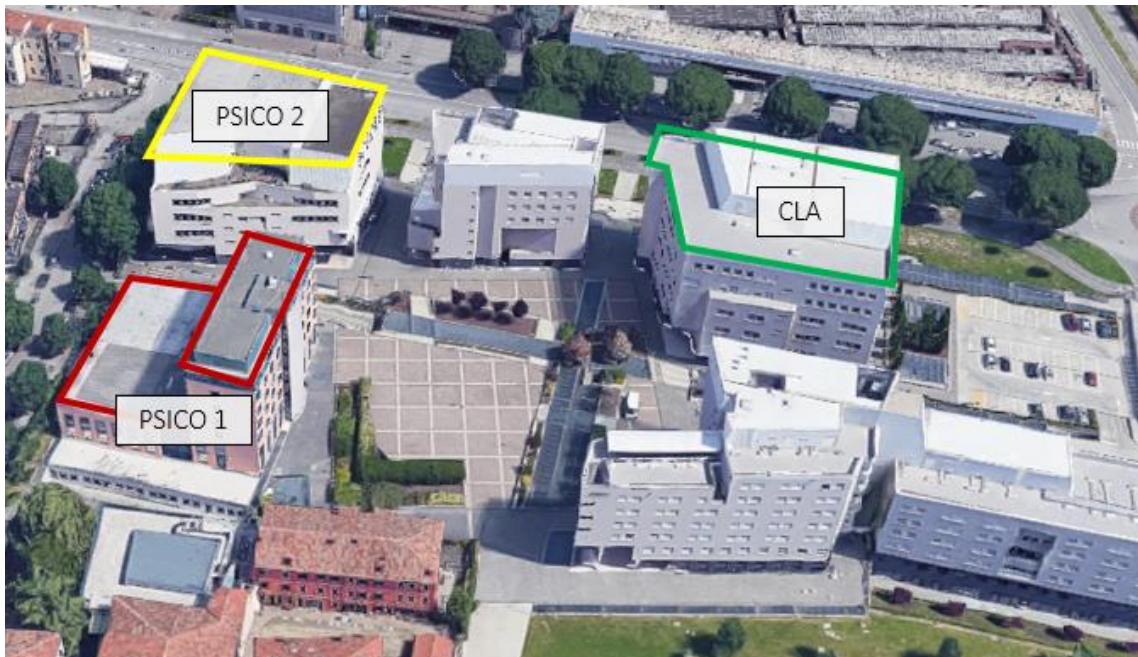


Figura 9: Cittadella dello Studente

Psicologia 1 è situato in Viale Venezia ed è stato acquistato dall'Università degli Studi di Padova nel 1992. Lo stabile è costituito da un piano seminterrato con locali destinati a laboratori e vani tecnici e altri sette piani fuori terra destinati ad aule ed uffici. L'edificio ha una forma

particolare, occupa un'area in pianta di circa 1.180 m<sup>2</sup> e un volume di circa 21.000 m<sup>3</sup>. Di seguito sono riportate le caratteristiche termofisiche delle strutture principali dell'edificio.

- Parete esterna:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Intonaco esterno	0.015	0.90	900	1800	0.02
CLS armato	0.270	2.00	880	2400	0.13
Lana di vetro	0.060	0.04	970	30	1.50
Cartongesso	0.012	0.21	840	900	0.06
Intonaco interno	0.003	0.70	1010	1400	0.01
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.53</b>

- Parete interna:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Intonaco interno	0.005	0.70	1010	1400	0.01
Cartongesso	0.012	0.21	840	900	0.06
Polistirene	0.066	0.04	1470	25	1.65
Cartongesso	0.012	0.21	840	900	0.06
Intonaco interno	0.005	0.70	1010	1400	0.01
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.50</b>

- Solaio interpiano:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
PVC	0.020	0.04	1170	30	0.51
Massetto alleggerito	0.100	0.18	880	700	0.56
Solaio Predalles	0.400	0.95	880	1800	0.42
Intonaco interno	0.015	0.70	1010	1400	0.02
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.57</b>

- Pavimento contro terra:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
CLS armato	0.300	2.00	880	2400	0.15
Ghiaia	0.050	1.20	840	1700	0.04
CLS armato	0.200	2.00	880	2400	0.10
Guaina bituminosa	0.050	0.17	1470	1200	0.29
Poliuretano espanso	0.030	0.03	1600	25	0.88
Massetto	0.050	1.06	1000	1700	0.04
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.61</b>

- Copertura:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Lamiera d'acciaio	0.001	17.00	1990	8000	0.00
CLS armato	0.200	2.00	880	2400	0.10
Polietilene	0.005	0.06	1200	50	0.08
Poliuretano	0.050	0.03	1600	25	1.47
Polietilene	0.005	0.06	1200	50	0.08
Massetto alleggerito	0.100	0.18	880	700	0.56
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.41</b>

- Superfici vetrate: l'edificio presenta dei serramenti a vetrocamera con trasmittanza pari a 2.83 W/(m<sup>2</sup> K).

Psicologia 2 è collocato all'angolo tra Via Venezia e Via Tommaseo ed è stato acquistato dall'Università degli Studi di Padova nel 1995. Lo stabile è caratterizzato da un piano interrato e sette piani fuori terra ed ospita la Biblioteca della Facoltà di Psicologia. Le tabelle seguenti indicano le proprietà termofisiche delle strutture principali dell'edificio.

- Parete esterna:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Intonaco esterno	0.015	0.90	900	1800	0.02
CLS armato	0.320	2.00	880	2400	0.16
Lana di vetro	0.060	0.04	970	30	1.50
Cartongesso	0.012	0.21	840	900	0.06
Intonaco interno	0.003	0.70	1010	1400	0.01
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.52</b>

- Parete interna:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Intonaco interno	0.015	0.70	1010	1400	0.02
Mattone forato	0.120	0.36	840	1000	0.33
Intonaco interno	0.015	0.70	1010	1400	0.02
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>1.60</b>

- Solaio interpiano:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Linoleum	0.002	0.18	1700	1150	0.01
Massetto alleggerito	0.100	0.18	880	700	0.56
Solaio Predalles	0.400	0.95	880	1800	0.42
Intonaco interno	0.015	0.70	1010	1400	0.02
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.79</b>

- Pavimento contro terra:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
CLS armato	0.300	2.00	880	2400	0.15
Mattone forato	0.060	0.36	840	1000	0.17
CLS armato	0.200	2.00	880	2400	0.10
Poliuretano	0.030	0.03	1600	25	0.88
Massetto ordinario	0.050	1.06	1000	1700	0.05
Piastrelle	0.020	1.47	1000	1700	0.01
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.67</b>

- Copertura:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Lamiera d'acciaio	0.001	17.00	1990	8000	0.00
CLS armato	0.300	2.00	880	2400	0.15
Polietilene	0.005	0.06	1200	50	0.08
Poliuretano	0.050	0.03	1600	25	1.47
Polietilene	0.005	0.06	1200	50	0.08
Massetto alleggerito	0.100	0.18	880	700	0.56
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.40</b>

- Superfici vetrate: l'edificio presenta dei serramenti a vetrocamera con trasmittanza pari a 2.17 W/(m<sup>2</sup> K).

Il Centro Linguistico di Ateneo si trova lungo Via Venezia all'interno dell'area denominata *Cittadella dello Studente*. Lo stabile è stato costruito di recente, nel 2012 ed è costituito da un piano interrato e da sette piani fuori terra. L'edificio comprende per lo più aule didattiche, aule studio ed uffici. Le tabelle seguenti si riferiscono alle caratteristiche termofisiche delle strutture principali dell'edificio.

- Parete esterna:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Intonaco esterno	0.020	0.90	900	1800	0.02
Polistirene espanso	0.040	0.04	1470	25	1.00
CLS armato	0.270	2.00	880	2400	0.13
Lana di vetro	0.050	0.04	970	30	1.25
Cartongesso	0.012	0.21	840	900	0.06
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.38</b>

- Parete interna:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Cartongesso	0.025	0.21	840	900	0.12
Lana di vetro	0.060	0.04	970	30	1.50
Cartongesso	0.025	0.21	840	900	0.12
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.50</b>

- Solaio interpiano:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Linoleum	0.010	0.18	1700	1150	0.06
Massetto ordinario	0.070	1.06	1000	1700	0.07
Massetto alleggerito	0.110	0.18	880	700	0.61
Solaio Predalles	0.600	0.89	880	1800	0.68
Intercapedine d'aria	0.030	-	-	-	0.16
Controsoffitto	0.030	0.05	670	100	0.56
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.42</b>

- Pavimento contro terra:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Solaio Predalles	0.500	0.89	880	1800	0.56
Massetto ordinario	0.040	1.06	1000	1700	0.04
Polietilene	0.010	0.06	1200	50	0.17
Massetto alleggerito	0.200	0.18	880	700	1.11
CLS armato	0.700	2.00	880	2400	0.35
LInoleum	0.010	0.18	1700	1150	0.06
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.41</b>

- Copertura:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Polistirene espanso	0.090	0.04	1470	25	2.25
Polietilene	0.020	0.06	1200	50	0.33
Massetto ordinario	0.170	1.06	1000	1700	0.16
Polietilene	0.010	0.06	1200	50	0.17
Solaio predalles	0.400	0.89	880	1800	0.45
Controsoffitto	0.030	0.05	670	100	0.60
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.24</b>

- Superfici vetrate: l'edificio presenta dei serramenti di recente generazione con trasmittanza pari a 1.10 W/(m<sup>2</sup> K).

### 1.1.2 Area Sud-Piovego

Nell'area a Sud del canale Piovego sono stati scelti tre complessi universitari e un complesso residenziale formato da quattro edifici:

1. Dipartimento di Geoscienze;
2. Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII);
3. Dipartimento di Ingegneria Informatica (DEI);
4. Complesso residenziale "social housing".





Figura 10: Immagine satellitare degli edifici oggetto di studio dell'area Sud-Piovego – Fonte Google Maps

### 1.1.2.1 Dipartimento di Geoscienze

Il Dipartimento di Geoscienze è una struttura abbastanza recente, costruita nel 2008 al posto della vecchia sede della Facoltà di Agraria. L'edificio si sviluppa per cinque piani di cui quattro fuori terra e può essere scomposto in due parti: il blocco didattico rivolto a Nord e il blocco uffici e laboratori rivolto a Sud. La struttura si estende per 11.500 m<sup>2</sup> e presenta un volume lordo di circa 34.000 m<sup>3</sup>.



Figura 11: Dipartimento di Geoscienze

Di seguito vengono riportate le proprietà termofisiche degli elementi strutturali dell'edificio:

- Parete esterna:

Materiale	Spessore	Conduttività	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Lamiera metallica	0.002	17.00	1000	8000	0.00
Intercapedine d'aria	0.030	-	-	-	0.16
Isolante polimerico	0.050	0.03	1600	35	1.43
CLS	0.250	0.57	880	1500	0.44
Cartongesso	0.010	0.21	1090	900	0.05
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.45</b>

- Parete interna:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Cartongesso	0.020	0.21	1090	900	0.10
Lana di roccia	0.060	0.04	670	80	1.54
Cartongesso	0.020	0.21	1090	900	0.10
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.50</b>

- Solaio interpiano:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Piastrelle	0.015	1.00	800	2300	0.01
Massetto	0.050	1.06	1000	1700	0.05
Solaio Predalles	0.250	0.86	840	1480	0.29
CLS armato	0.050	2.00	880	2400	0.02
Intonaco interno	0.010	0.70	1010	1400	0.01
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>1.55</b>

- Pavimento contro terra:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Ciottoli	0.250	0.70	1000	1500	0.05
Sabbia e ghiaia	0.300	1.20	880	1700	0.12
CLS armato	0.250	2.00	840	2400	0.25
Massetto	0.050	1.06	840	1700	0.36
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>1.11</b>

- Copertura:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Guaina bituminosa	0.030	0.26	1100	1700	0.11
Lana di roccia	0.060	0.04	670	80	1.54
Massetto	0.050	1.06	1000	1700	0.05
Solaio Predalles	0.250	0.86	840	1480	0.29
CLS armato	0.050	2.00	880	2400	0.02
Intonaco interno	0.010	0.70	1010	1400	0.01
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.45</b>

- Superfici vetrate: finestre di tipo a vetrocamera con trasmittanza termica globale di 1.27 W/(m<sup>2</sup> K).

### 1.1.2.2 Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII)

Il Dipartimento di Ingegneria Industriale, detto anche DEI-G, è un complesso costituito da più edifici connessi tra loro e costruiti in epoche diverse a partire dal 1960 fino al 1999 quando venne costruito l'ultimo blocco.



Figura 12: Dipartimento di Ingegneria Industriale

Alla pagina seguente, sono riportate le principali proprietà termofisiche delle strutture:

- Parete esterna:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Mattone forato	0.140	0.58	840	1800	0.24
Intercapedine d'aria	0.020	-	-	-	0.16
Mattone forato	0.140	0.58	840	1800	0.24
Intonaco interno	0.010	0.70	1010	1400	0.01
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>1.22</b>

- Parete interna:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Intonaco interno	0.010	0.70	1010	1400	0.01
Mattone forato	0.080	0.69	840	1400	0.11
Intonaco interno	0.010	0.70	1010	1400	0.01
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>2.54</b>

- Solaio interpiano:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Piastrelle	0.015	1.00	800	2300	0.01
Massetto	0.050	1.06	1000	1700	0.05
CLS armato	0.050	2.00	880	2400	0.02
Latero-cemento	0.250	0.57	840	900	0.44
Intonaco interno	0.015	0.70	1010	1400	0.02
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>1.25</b>

- Pavimento contro terra:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Ciottoli	0.250	0.70	1010	1500	0.36
Sabbia e ghiaia	0.300	1.20	840	1700	0.25
CLS armato	0.250	2.00	880	2400	0.12
Massetto	0.050	1.06	1000	1700	0.05
Piastrelle	0.015	1.00	800	2300	0.01
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>1.09</b>

- Copertura:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Guaina bituminosa	0.030	0.26	800	1700	0.12
Lana di roccia	0.060	0.04	670	80	1.53
Massetto	0.050	1.06	1000	1700	0.05
CLS armato	0.050	2.00	880	2400	0.02
Latero-cemento	0.250	0.57	840	900	0.44
Intonaco interno	0.010	0.70	1010	1400	0.01
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.43</b>

- Superfici vetrate: le finestre sono di due tipologie, a singolo vetro con trasmittanza termica globale di 5.68 W/(m<sup>2</sup> K) e a vetrocamera con trasmittanza termica globale di 1.4 W/(m<sup>2</sup> K).

### 1.1.2.3 Dipartimento di Ingegneria Informatica (DEI)

Il Dipartimento di Ingegneria Informatica è un complesso costruito nel 1970, contemporaneamente ai primi ampliamenti del DEI-G, costituito da due edifici (il DEI-D e il DEI-A) collegati al piano terra da un corridoio. Il DEI-D presenta solo due piani fuori terra; il DEI-A è composto, invece, da quattro piani fuori terra. Entrambi ospitano uffici e laboratori di ricerca dipartimentali. L'unico locale adibito ad aula didattica è l'Aula Magna al primo piano del DEI-D. Il complesso conta una superficie calpestabile totale di circa 5.300 m<sup>2</sup> e un volume lordo totale di circa 18.000 m<sup>3</sup>.



Figura 13: Dipartimento di Ingegneria Informatica

Per questi due edifici non è stato possibile risalire alle informazioni costruttive, pertanto le stratigrafie degli elementi strutturali sono state ipotizzate basandosi sullo spessore effettivo dei muri e sulla conoscenza dei metodi costruttivi degli anni '70.

- Parete esterna:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Intonaco esterno	0.020	0.70	1010	1400	0.03
Mattone forato	0.250	0.70	840	1400	0.39
Intercapedine d'aria	0.050	-	-	-	0.16
Mattone forato	0.080	0.69	840	1800	0.12
Intonaco interno	0.020	0.70	1010	1400	0.03
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>1.15</b>

Per le pareti interne, il solaio interpiano, il pavimento contro terra e la copertura si può far riferimento alle stratigrafie del Dipartimento di Ingegneria Industriale (DEI-G).

- Superfici vetrate: le finestre dei due edifici sono di tipo a vetrocamera con trasmittanza termica globale pari a 1.4 W/(m<sup>2</sup> K).

#### 1.1.2.4 Complesso residenziale "social housing"

Il distretto "social housing" comprende quattro edifici residenziali disposti come i lati di un rettangolo; i due edifici orientati a Nord e a Sud sono più piccoli degli altri due ma, dal punto di vista strutturale, sono tutti uguali, fatta eccezione per l'edificio orientato a Nord, l'unico ad aver subito un intervento di efficientamento energetico.



Figura 14: Complesso residenziale "social housing"

Di seguito, vengono elencate le proprietà termofisiche dell'edificio esposto a Nord.

- Parete esterna:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
<i>Pannello isolante</i>	0.030	0.09	1500	250	0.33
Mattoni forati	0.250	0.72	840	1800	0.35
Intonaco interno	0.015	0.80	1000	1600	0.02
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>1.16</b>

- Parete interna:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Intonaco interno	0.015	0.80	1000	1600	0.02
Mattoni forati	0.250	0.59	840	1600	0.42
Intonaco interno	0.015	0.80	1000	1600	0.02
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>1.41</b>

- Solaio interpiano:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
<i>Cemento magro</i>	0.050	0.70	880	1600	0.07
CLS	0.040	1.91	920	2400	0.02
Mattoni forati	0.120	0.46	880	1280	0.26
Intonaco interno	0.015	0.80	1000	1600	0.02
<i>Intercapedine d'aria</i>	0.030	-	-	-	0.16
<i>Cartongesso in lastre</i>	0.015	0.21	1000	700	0.07
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>1.17</b>

- Pavimento contro terra:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Ghiaione	0.500	1.20	840	1700	0.42
Massetto	0.100	1.49	880	2200	0.07
Massetto alleggerito	0.080	0.15	1200	600	0.53
Cemento magro	0.040	1.00	880	1600	0.04
Piastrelle	0.010	1.00	800	2300	0.01
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>0.84</b>

- Copertura:

Materiale	Spessore	Conduttività termica	Calore specifico	Densità	Resistenza termica
[dall'esterno]	[m]	[W/(m K)]	[J/(kg K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[(m <sup>2</sup> K)/W]
Tegole	0.015	0.59	840	1600	0.02
Pannello di legno	0.040	0.15	1660	550	0.27
Travi	0.057	0.12	1380	450	0.47
<b>Trasmittanza termica totale [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>					<b>1.07</b>

- Superfici vetrate: le finestre presenti nell'edificio sono in legno di tipo a vetrocamera con una trasmittanza termica globale di 2.56 W/(m<sup>2</sup> K).

I materiali indicati in corsivo si riferiscono agli elementi che sono stati aggiunti su questo edificio per aumentarne l'isolamento termico e migliorarne le prestazioni energetiche. Le stesse stratigrafie, al netto di questi materiali, costituiscono i restanti tre edifici facenti parte del distretto.



## CAPITOLO 2

# MODELLIZZAZIONE DINAMICA DETTAGLIATA IN AMBIENTE ENERGY PLUS

### 2.1 Il software di simulazione energetica: EnergyPlus

EnergyPlus è un software open source per la simulazione energetica degli edifici in regime dinamico, creato nel 2001 dal Department of Energy (DOE) negli Stati Uniti, dopo lo sviluppo dei programmi BLAST e DOE-2, rispettivamente alla fine degli anni '70 e all'inizio degli anni '80. Questi due software nacquero a seguito della crescente preoccupazione per la crisi energetica dei primi anni '70 e del riconoscimento del consumo energetico legato agli edifici come componente principale dei consumi energetici statunitensi [12].

EnergyPlus si basa su una simulazione integrata. Ciò significa che il software esegue delle simulazioni integrate tra ambiente, sistema di distribuzione e impianto di generazione. Nei programmi a simulazione sequenziale (i due software precedenti) questi tre blocchi sono simulati sequenzialmente. La soluzione sequenziale comincia con un bilancio termico della zona che permette di aggiornare le condizioni della zona stessa e di determinare i carichi di riscaldamento/raffrescamento. Queste informazioni vengono inviate dal blocco ambiente al blocco sistema di distribuzione per determinarne la risposta, ma tale risposta non influisce sulle condizioni della zona termica. Allo stesso modo, le informazioni vengono inviate dal blocco sistema di distribuzione al blocco impianto di generazione, anche in questo caso, senza nessun'influenza sulle condizioni della zona termica. Questa tecnica di simulazione funziona bene fintanto che la risposta del sistema sia una funzione ben definita della temperatura dell'aria nell'ambiente climatizzato, ma può portare a risultati non fisicamente giustificabili. Per ottenere una simulazione fisicamente realistica, i blocchi devono essere collegati in uno schema di simulazione simultanea che operi con processi iterativi, tenendo conto della risposta dell'ambiente dovuta a sollecitazioni di origine esterna o interna all'ambiente stesso [13].

Questi tre blocchi fanno parte dell' *Integrated Solution Manager* e sono i seguenti:

- *Air Heat Balance Manager*, risolve il bilancio termico dell'ambiente simulando gli scambi termici radiativi e convettivi;
- *Surface Heat Balance Manager*, risolve il bilancio termico in corrispondenza delle superfici;
- *Building System Simulation Manager*, si occupa della simulazione dei componenti impiantistici.

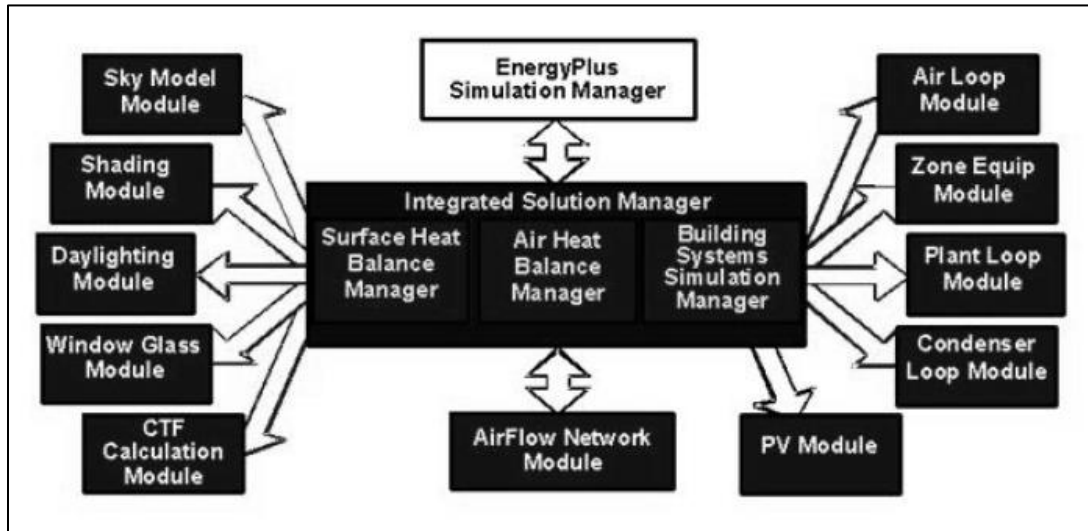


Figura 15: Schema di funzionamento di Energy Plus [12]

### 2.1.1 Bilancio termico dell'ambiente climatizzato

L'equazione di bilancio termico, implementata dal software EnergyPlus per il calcolo dei carichi di riscaldamento e raffrescamento, considera tutti i flussi termici che intervengono in un ambiente climatizzato:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{si}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i c_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} c_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (2.1)$$

Questa equazione viene risolta per ogni zona termica e ad ogni istante temporale. In particolare, si possono distinguere nell'equazione i seguenti parametri:

- $C_z = \rho_{air} c_p C_T$  rappresenta la capacità termica totale della zona considerata, con  $C_p$  capacità termica della zona e  $C_T$  moltiplicatore della capacità (di default pari a 1);
- $T_z$  rappresenta la temperatura della zona;
- $C_z \frac{dT_z}{dt}$  è l'energia accumulata nella zona termica;

- $\sum_{i=1}^{N_{si}} \dot{Q}_i$  è la somma dei carichi interni convettivi;
- $\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$  è il flusso termico convettivo dalle superfici della zona termica;
- $\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i c_p (T_{zi} - T_z)$  è lo scambio termico dovuto al miscelamento dell'aria tra le zone;
- $\dot{m}_{inf} c_p (T_{\infty} - T_z)$  rappresenta il flusso termico dovuto alle infiltrazioni dall'esterno;
- $\dot{Q}_{sys} = \dot{m}_{sys} c_p (T_{sup} - T_z)$  è il flusso termico dal sistema di riscaldamento/raffrescamento.

EnergyPlus offre tre diversi algoritmi di soluzione per risolvere le equazioni di bilancio: *EulerMethod*, *3rdOrderBackwardDifference*, e *AnalyticalSolution*. I primi due utilizzano l'approssimazione delle differenze finite mentre l'ultimo utilizza una soluzione analitica. L'algoritmo utilizzato di default è il *3rdOrderBackwardDifference*, il quale richiede le temperature della zona in tre istanti temporali precedenti e utilizza coefficienti di temperatura costanti. Questo algoritmo permette di sostituire il termine differenziale con la seguente equazione:

$$\left. \frac{dT_z}{dt} \right| \approx (\delta t)^{-1} \left( \frac{11}{6} T_z^t - 3T_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2} T_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3} T_z^{t-3\delta t} \right) + O(\delta t^3) \quad (2.2)$$

A differenza dell'*EulerMethod*, di primo ordine, questo algoritmo permette di ridurre l'instabilità. Sono state sperimentate approssimazioni dal secondo al quinto ordine ma, l'approssimazione della differenza finita del terzo ordine è risultata essere la migliore.

### 2.1.2 Bilancio di massa dell'ambiente climatizzato

L'equazione seguente, implementata in EnergyPlus, si riferisce al bilancio di massa che considera la variazione nel tempo dell'umidità specifica della zona climatizzata:

$$\begin{aligned} \rho_{air} V_z C_w \frac{dW_z}{dt} = & \sum_{i=1}^{N_{sl}} k g_{mass,load} + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{air,z} (W_{surfs,i} - W_z^t) \\ & + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i (W_{zi} - W_z^t) + \dot{m}_{inf} (W_{\infty} - W_z^t) + \dot{m}_{sys} (W_{sup} - W_z^t) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Questa equazione, come la (2.1), viene risolta per ogni zona termica e ad ogni timestep. Di seguito, sono riportati singolarmente i termini che ne fanno parte:

- $\rho_{air} V_z C_W \frac{dW_z}{dt}$  rappresenta la variazione di umidità specifica nell'aria;
- $\sum_{i=1}^{Nsl} k g_{mass,load}$  è la quantità di vapore prodotta dai carichi interni;
- $\sum_{i=1}^{Nsurfaces} A_i h_{mi} \rho_{air,z} (W_{surfs,i} - W_z^t)$  rappresenta la quantità di vapore scambiati con le superfici della zona termica;
- $\sum_{i=1}^{Nzones} \dot{m}_i (W_{zi} - W_z^t)$  è la portata di vapore scambiata con le zone adiacenti, se presenti;
- $\dot{m}_{inf} (W_\infty - W_z^t)$  è la portata di vapore causata dalle infiltrazione con l'esterno;
- $\dot{m}_{sys} (W_{sup} - W_z^t)$  è la portata di vapore immessa dai terminali di impianto.

I tre algoritmi di soluzione, precedentemente elencati, sono validi anche per il bilancio di massa. Anche in questo caso, l'algoritmo di default è il *3rdOrderBackwardDifference*, che permette di preservare la stabilità del calcolo con l'approssimazione differenziale del terzo ordine. Il termine differenziale può essere sostituito con il seguente:

$$\left. \frac{dW_z}{dt} \right| \approx (\delta t)^{-1} \left( \frac{11}{6} W_z^t - 3W_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2} W_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3} W_z^{t-3\delta t} \right) + O(\delta t^3) \quad (2.4)$$

### 2.1.3 Bilancio termico su una superficie generica

Il bilancio termico che coinvolge le facce interne delle superfici della zona è generalmente modellato con quattro componenti di scambio termico accoppiate: la conduzione attraverso le strutture edilizie, il flusso convettivo lato aria, l'assorbimento e la riflessione della radiazione a bassa lunghezza d'onda e lo scambio radiante ad alta lunghezza d'onda. In particolare, la radiazione incidente a bassa lunghezza d'onda proviene dalla radiazione solare che entra nella zona attraverso le finestre e dall'emissione delle fonti interne (l'illuminazione artificiale). Lo scambio radiante infrarosso, invece, comprende l'assorbimento e l'emissione di sorgenti di radiazioni a bassa temperatura (le altre superfici, le persone, gli oggetti) [13]. Il bilancio può essere scritto come segue:

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (2.5)$$

dove:

- $q''_{LWX}$  è il flusso radiante ad alta lunghezza d'onda scambiato tra le superfici della zona;
- $q''_{SW}$  è il flusso radiante a bassa lunghezza d'onda proveniente dall'illuminazione artificiale;

- $q''_{LWS}$  è il flusso radiante ad alta lunghezza d'onda proveniente dagli impianti presenti nella zona;
- $q''_{ki}$  è il flusso termico conduttivo attraverso l'involucro edilizio;
- $q''_{sol}$  è il flusso radiante solare assorbito dalle superfici;
- $q''_{conv}$  è il flusso termico convettivo di zona.

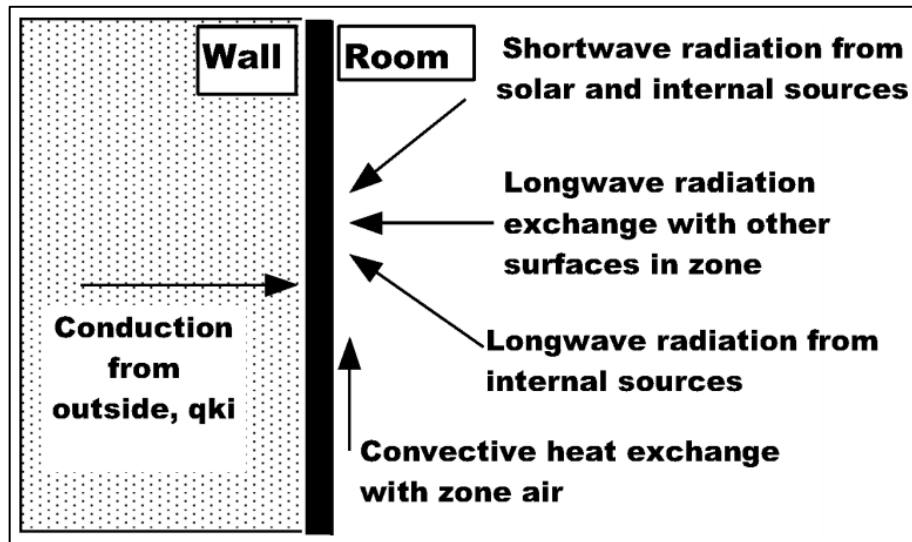


Figura 16: Flussi termici rappresentati nel bilancio [13]

## 2.2 Le fasi della modellizzazione di un edificio in ambiente EnergyPlus

La normale procedura per i programmi non interattivi, tra cui EnergyPlus, prevede tre fasi principali precedute soltanto dalla lettura del dizionario dei dati (Energy+.idd) e del file di input (in.idf). Queste fasi sono: l'elaborazione di tutti gli input necessari, l'esecuzione delle azioni richieste dall'input e la produzione di report relativi alle azioni precedentemente eseguite. Nel caso in cui vengano inseriti input errati o vengano rilevate condizioni errate durante l'elaborazione, si generano messaggi di errore, visualizzati per lo più nel file di errore eplusout.err.

La differenza principale tra EnergyPlus e un software più tradizionale è che nel primo caso il riempimento effettivo dei dati è di tipo modulare. A causa della struttura modulare, ogni modulo è responsabile di ottenere il proprio input; questo implica che non è necessario alcun ordine nel file dei dati di input. Inoltre, i dati non necessari ad una particolare simulazione non vengono elaborati. Il dizionario dei dati ha la capacità di eseguire, durante la lettura dei dati, il controllo automatico dei campi numerici e di inserire valori predefiniti dove necessario [14].

Il file dei dati di input (in.idf) è il file principale utilizzato dal software per effettuare la simulazione dell'edificio e contiene diverse informazioni: la geometria dell'edificio, la posizione geografica, la stratigrafia dell'involucro edilizio e dei muri interni, le schedules dei carichi e degli impianti, le condizioni al contorno per ogni superficie e le caratteristiche dell'impianto di condizionamento. L'interfaccia di EnergyPlus risulta poco intuitiva e, per questo motivo, la descrizione dell'edificio può essere effettuata da un software terzo in modo da ridurre lo sforzo richiesto per la modellizzazione. Il software *OpenStudio* è una raccolta di strumenti per lo sviluppo della modellazione energetica di un intero edificio. Inoltre, include l'applicazione grafica *SketchUp* che consente di creare rapidamente la geometria dell'edificio. Oltre al vantaggio di un'interfaccia più semplice e intuitiva, OpenStudio consente a ricercatori e sviluppatori di software di creare specifici script che possono modificare il modello in funzione di particolari esigenze, le *Measures*, che possono essere facilmente condivise e applicate ai modelli OpenStudio.

Nei seguenti paragrafi vengono descritte le principali fasi della modellizzazione di un edificio con l'utilizzo del software OpenStudio e del relativo plug-in, SketchUp.

### **2.2.1 Geometria dell'edificio**

La geometria dell'edificio è un input fondamentale per un software di simulazione energetica di tipo geometrico come EnergyPlus, in quanto rappresenta la differenza principale rispetto ad altri modelli come TRNSYS. Nel primo caso la geometria viene implementata in modo tridimensionale, nel secondo caso vengono definite soltanto le superfici con le proprie orientazioni ma non è chiaro quali di queste siano in grado di interferire con le altre. Il software SketchUp consente di estrarre geometrie semplici in blocchi solidi che rappresentano le zone in cui è suddiviso l'edificio.

Data la complessità delle piante originali degli edifici considerati, prima di procedere con la modellizzazione è stata fatta una semplificazione eliminando alcune superfici irregolari e i muri interni alle zone termiche. L'immagine alla pagina seguente si riferisce al piano terra di uno degli edifici, il Dipartimento di Geoscienze; si può notare come l'intero piano sia stato suddiviso in sole cinque zone termiche, all'interno delle quali si trovano stanze con simile destinazione d'uso o condizione al contorno. La stessa procedura è stata adottata per i restanti dodici edifici.

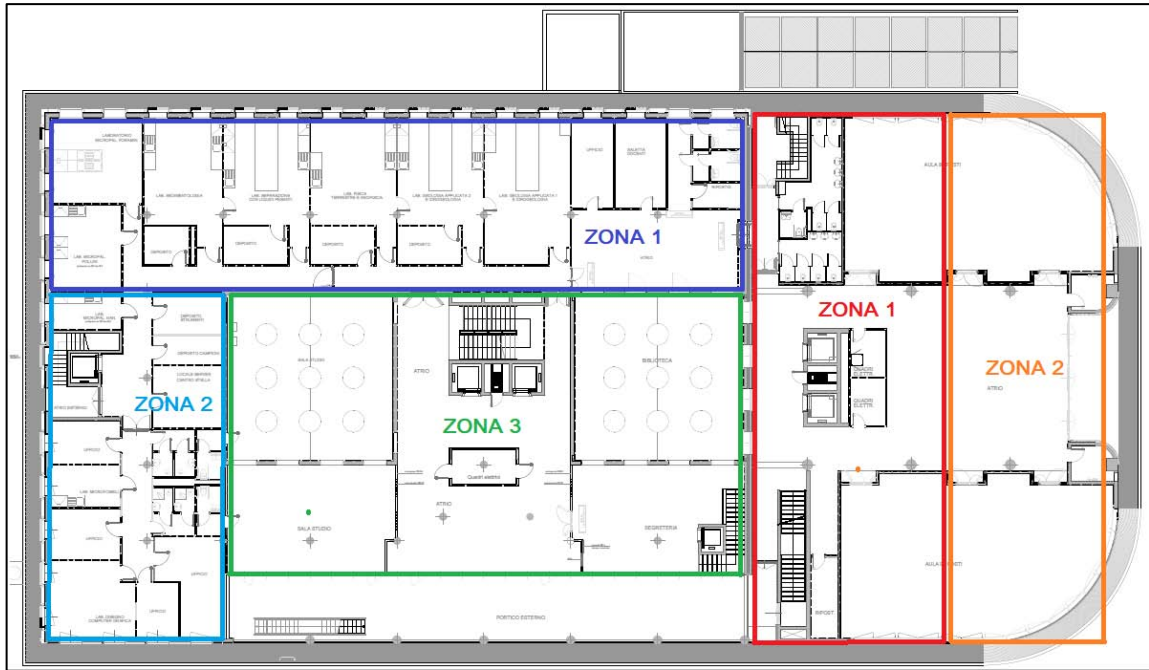


Figura 17: Pianta del piano terra del Dipartimento di Geoscienze con relativa suddivisione in zone termiche

Dopo aver definito la geometria semplificata degli edifici e suddiviso ciascun piano in più zone termiche si può procedere al disegno delle piante così semplificate e, successivamente, all'estrusione delle stesse. È importante, inoltre, collocare le aperture (finestre) nella giusta posizione in modo che l'effetto della radiazione solare e delle infiltrazioni sia il più possibile realistico. Ciascuna zona termica è costituita dalle superfici di confine con le relative stratigrafie, dalle aperture e dalle condizioni al contorno. In particolare, è necessario stabilire se una specifica superficie sia a contatto con l'esterno, adiabatica, adiacente ad altre superfici o a contatto con il terreno. Queste informazioni possono essere fornite contemporaneamente alla creazione del modello geometrico.

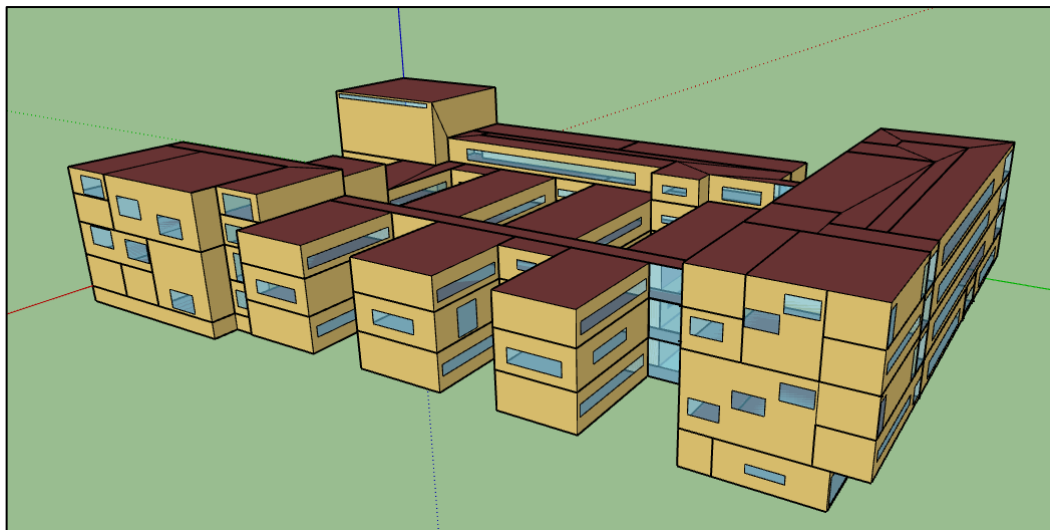


Figura 18: Modello del Dipartimento di Ingegneria Industriale con il tool SketchUp

La Figura 18 rappresenta il modello del Dipartimento di Ingegneria Industriale disegnato con il tool SketchUp. Dopo aver completato la geometria dell'edificio si può considerare terminato il lavoro su questo software. Le fasi successive sono state sviluppate, infatti, con il software OpenStudio. La tabella seguente presenta le principali informazioni degli edifici.

Tabella 1: Informazioni geometriche degli edifici

Edificio	Area in pianta	Area totale	Volume lordo
-	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]
Complesso didattico Piovego	554	2657	7806
Complesso A. Vallisneri	3707	28743	90862
Ex Complesso Dipartimentale di Ingegneria Meccanica	6439	15473	69790
Psicologia 1	1182	6114	21169
Psicologia 2	707	5421	18028
Centro Linguistico di Ateneo	1149	7766	23098
Dipartimento di Geoscienze	2592	11456	33850
Dipartimento di Ingegneria Industriale	3734	11321	49609
Dipartimento di Ingegneria Informatica	1626	5308	17795
Edificio residenziale Nord	285	1143	3085
Edificio residenziale Est	369	1853	5230
Edificio residenziale Sud	285	1143	3086
Edificio residenziale Ovest	369	1853	5230

### 2.2.2 Input climatico

EnergyPlus richiede in input un file climatico, reperibile dal sito ufficiale del software, contenente le informazioni climatiche principali del sito nel quale si trova l'edificio oggetto di studio. A testimonianza dell'importanza di questo file, va ricordato che nella pagina principale di OpenStudio, la prima voce del menu è *Site* e si riferisce proprio alla posizione geografica del sito e alle relative condizioni climatiche.

Per questo lavoro di Tesi Magistrale il file disponibile più prossimo alla zona in esame è quello di Venezia-Tessera del tipo IGDG (Italian Climatic data collection "Gianni de Giorgio"). Sviluppato principalmente per la progettazione dei sistemi di conversione e utilizzazione dell'energia solare, questo set di 66 file meteorologici si basa sulla costruzione di un anno tipo, utilizzando delle serie statistiche di dati climatici, sulla base di un periodo storico compreso tra il 1951 e il 1970. In questo modo, si genera un anno tipo costituito da una sequenza di mesi reali provenienti da anni diversi.



Uno degli enti coinvolti nella definizione degli anni tipo è stato il Centro di Ricerca Termica e Nucleare dell'ENEL. Nel 1984, il CRTN ha rielaborato tali dati climatici aggiungendo i valori di irradiazione solare totale giornaliera nelle stazioni nelle quali mancavano e, utilizzando un proprio metodo basato sul numero di ore di sole giornaliere, ha scomposto la radiazione solare totale nelle componenti diretta e diffusa. Un confronto tra tali valori e quelli ottenibili a partire dallo stesso dato di irradiazione totale giornaliera ma utilizzando le più note e affidabili correlazioni reperibili in letteratura, ha evidenziato come il metodo proposto dal CRTN comporta una sovrastima sistematica della radiazione diretta. Si è quindi deciso di sostituire i valori di irradiazione oraria diretta e diffusa calcolati dal CRTN con i nuovi valori ricalcolati utilizzando le seguenti correlazioni [15]:

- Erbs [16] per la stima del rapporto tra irradiazione diffusa e totale giornaliera,  $K_T$ ;
- Liu-Jordan [17] modificata per la stima del fattore di ripartizione dell'irradiazione diffusa giornaliera in irradiazione diffusa oraria,  $r_d$ ;
- Collares-Pereira e Rabl [18] modificata per la stima del fattore di ripartizione dell'irradiazione totale giornaliera in irradiazione totale oraria,  $r_t$ .

Il file contiene le informazioni riguardanti la radiazione solare diretta e diffusa sul piano orizzontale, la temperatura e la velocità dell'aria e l'umidità relativa esterna. Il formato meteorologico utilizzato da EnergyPlus per questo tipo di file è quello .epw, un formato ASCII semplice molto comune tra gli input di EnergyPlus.

### 2.2.3 Involucro edilizio

La geometria degli edifici disegnata su SketchUp consente di individuare tutte le superfici (esterne ed interne) e le aperture (porte e finestre) e di associare alle stesse una condizione al contorno e una tipologia. Questo vuol dire che, in questa fase, le strutture (opache e vetrate) necessitano soltanto di essere definite dal punto di vista della stratigrafia. La voce *Constructions* del menu in OpenStudio permette di creare i materiali facenti parte dell'involucro edilizio e, accorpandoli, i pacchetti costruttivi associati a ciascuna superficie.

Il software permette di creare diverse tipologie di materiali. In particolare, per i materiali massivi, i più presenti per ovvie ragioni, è necessario definire la rugosità, lo spessore, la conduttività termica, la densità, il calore specifico e i coefficienti di assorbimento termico, solare e visibile.

È possibile definire anche un '*Air gap Material*' per i casi in cui sia presente uno strato isolante di aria tra due elementi costruttivi. In questo caso è sufficiente definire la resistenza termica dello strato isolante d'aria.

Per quanto riguarda gli elementi vetrati, il software permette di scegliere se definire il vetro in modo dettagliato o l'intera finestra in modo semplificato. In questo elaborato, per facilitare il confronto tra EnergyPlus e il modello a Resistenza-Capacità sviluppato in MATLAB e a causa delle informazioni disponibili, non sempre esaurienti, si è scelto di definire i serramenti in modo semplificato. È sufficiente, pertanto, definire la trasmittanza termica dell'intero serramento, il solar heat gain e il coefficiente di trasmissione nel visibile.

Dopo aver definito tutti i materiali presenti nell'involucro edilizio, è necessario creare le stratigrafie delle strutture opache e vetrate, facendo attenzione ad inserire i materiali in modo corretto, dal più esterno al più interno. Le stratigrafie inserite nel software sono le stesse definite nel primo capitolo di questo elaborato.

Il software, inoltre, permette di definire i *Construction Sets*, ovvero dei set costruttivi che possono essere facilmente associati alle zone termiche dell'edificio. Questa scelta permette di rendere istantanea, alla voce *Spaces*, l'associazione dei pacchetti costruttivi a ciascuna superficie facente parte della zona termica in questione.

#### **2.2.4 Carichi interni, schedules e parametri di funzionamento dell'impianto**

I carichi interni si riferiscono, in genere, agli apporti di calore dovuti alla presenza di persone, illuminazione artificiale e altri apparecchi all'interno delle zone termiche. Questi, possono avere un'importante influenza sul fabbisogno energetico e sul comfort termico e necessitano, quindi, di essere definiti in modo appropriato attraverso l'uso di schedules giornaliere.

I carichi interni possono essere definiti alla voce *Loads* del menu di OpenStudio, il quale ne distingue diverse tipologie. Per questo caso di studio si è deciso di far riferimento alla normativa ISO 18523 che definisce tutti i parametri legati ai carichi interni per ogni categoria di zona termica e distinguendo gli edifici non residenziali [19] da quelli residenziali [20]. Trattandosi di un distretto universitario, costituito per lo più da sedi universitarie ma anche da alcuni edifici residenziali, tra le varie possibilità, si è stabilito di considerare soltanto tre categorie di zone termiche: gli *office buildings*, gli *educational buildings* e i *residential buildings*. Ciascuna categoria contiene al suo interno diverse tipologie di stanze. In particolare, della prima categoria sono state scelte due tipologie: l'*office room* e il *corridor* per distinguere rispettivamente le

zone di lavoro dalle zone di passaggio. Per la seconda categoria è stata presa in considerazione la tipologia *Lecture room of university* in modo da valutare correttamente i carichi interni nelle aule didattiche. Infine, per l'ultima categoria, è stata fatta una distinzione tra *night zone* e *day zone*.

Alla voce *Loads* sono stati creati, quindi, degli oggetti in grado di descrivere l'apporto gratuito fornito alla zona termica, in termini di occupazione, illuminazione artificiale ed equipaggiamento elettrico. Nelle tabelle seguenti sono stati inseriti dei valori di riferimento utilizzati per caratterizzare i carichi interni negli edifici. I dati indicati nella prima tabella sono riportati nella normativa ISO 18523 [19], i dati della seconda tabella si riferiscono alla normativa UNI EN ISO 7730:2006 [21]. In particolare, per gli edifici residenziali si è ipotizzata l'occupazione di una famiglia di tre persone costituita da due adulti e un bambino.

- Edifici non residenziali – carico termico totale (sensibile e latente):

Zona termica	Unità di misura	Office room	Corridor	Lecture room
Occupazione	[W/m <sup>2</sup> ]	11.9	3.6	59.5
Densità di occupazione	[pers./m <sup>2</sup> ]	0.1	0	0.5
Illuminazione artificiale	[W/m <sup>2</sup> ]	12	15	20
Equipaggiamento elettrico	[W/m <sup>2</sup> ]	12	0	2
Ventilazione a persona	[m <sup>3</sup> /(h pers.)]	50	0	20

- Edifici residenziali – carico termico di occupazione totale (sensibile e latente):

Componente dell'abitazione	Unità di misura	Night zone	Day zone
Adulto	[W/pers.]	115	180
Bambino	[W/pers.]	80.5	126

Questi dati, con le relative schedules, permettono di definire i carichi interni annuali. È importante, inoltre, distinguere la quota sensibile dalla latente. Si è stabilito, pertanto, che la quota sensibile del carico legato alla presenza delle persone sia pari al 54.62% del totale, in modo che il carico termico sensibile, negli edifici non residenziali, sia pari a 65 W a persona. Per gli altri carichi la quota sensibile è pari al 100%. Infine, si è deciso che la frazione radiante di tutti i carichi sensibili, rispetto alla convettiva, sia pari al 50%.

Queste informazioni sono molto importanti soprattutto per il comfort termico. Il fatto che i carichi interni siano al 50% radianti, permette alle pareti interne di mantenere una temperatura leggermente più alta durante la stagione invernale, il che migliora la sensazione di comfort nella stanza. Inoltre, allo spegnimento dell'impianto di riscaldamento, una più alta temperatura superficiale permette di contenere l'abbassamento di temperatura dell'ambiente.

La voce *Schedules* nel menu di OpenStudio permette di creare diverse tipologie di profili annuali da associare agli oggetti creati in fase di modellizzazione dell'edificio. Come già detto, per quanto riguarda le schedules associate ai carichi interni, si è fatto riferimento alla normativa ISO 18523, la quale, oltre a definire i valori nominali dei carichi, fornisce anche dei profili giornalieri per varie tipologie di giorni. In particolare, la normativa distingue: giorni feriali, giorno prefestivo (sabato) e giorni festivi (domenica e festività). Nella tabella seguente vengono presentati i profili dei carichi interni per un giorno feriale in una zona termica appartenente alla tipologia *Office room*.

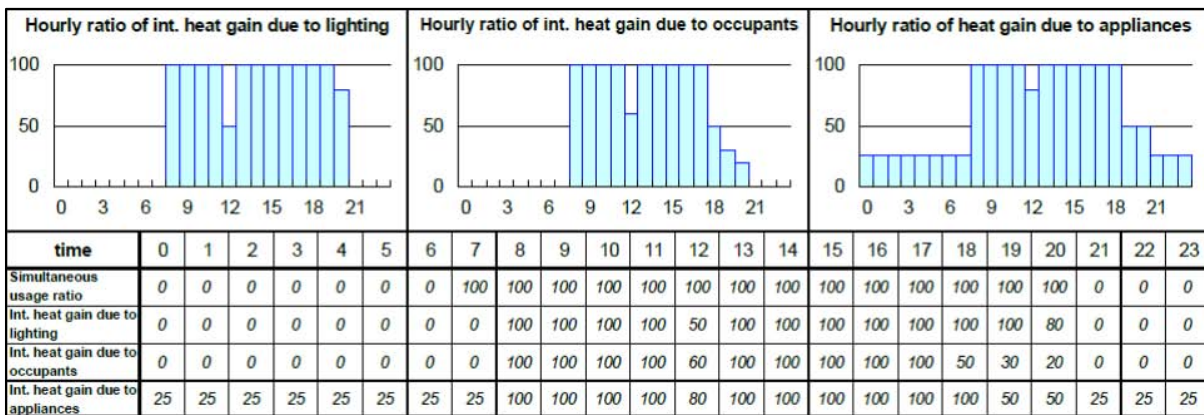


Figura 19: esempio di schedules giornaliera per una Office room [19]

Oltre ai profili dei carichi interni, alla voce *Schedules* possono essere definiti: il funzionamento degli impianti di riscaldamento e raffrescamento, le temperature di setpoint, le infiltrazioni e la ventilazione naturale, dove presente. Per quanto riguarda il funzionamento dell'impianto di climatizzazione, il grafico seguente ne descrive il profilo di accensione, valido sia per la stagione estiva che per quella invernale.

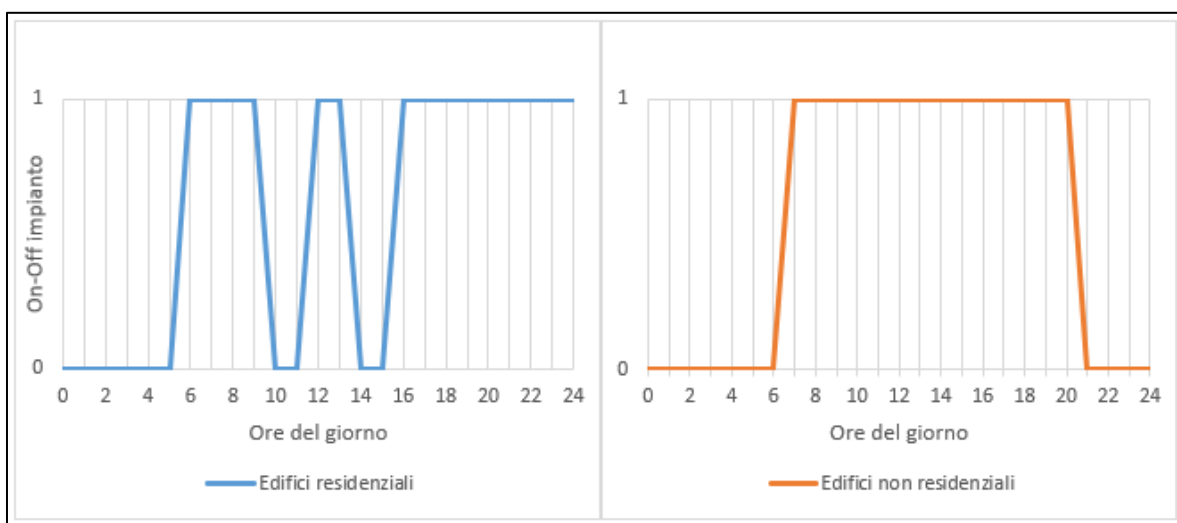


Figura 20: Schedule di funzionamento dell'impianto di climatizzazione

Gli altri parametri fissati in questa fase sono i seguenti:

- Temperatura di setpoint invernale al nodo aria per gli edifici non residenziali, 22°C;
- Temperatura di setpoint estiva al nodo aria per gli edifici residenziali e non, 26°C;
- Temperatura di setpoint invernale al nodo aria per gli edifici residenziali, 20°C;
- Infiltrazioni per gli edifici non residenziali, 0.1 h<sup>-1</sup>;
- Valore nominale di infiltrazione per gli edifici residenziali, 0.2 h<sup>-1</sup>;
- Ventilazione naturale nominale (h<sup>-1</sup>) in funzione del parametro definito da normativa (m<sup>3</sup>/(h pers.)), del numero di occupanti (pers.) e del volume totale riscaldato (m<sup>3</sup>).

Le temperature di setpoint sono richiamate successivamente alla voce *Thermal Zones* dove sono associate alle zone termiche. Qui è necessario spuntare la casella ‘*Turn On Ideal Air Loads*’ se, come in questo caso studio, si vuole calcolare il fabbisogno energetico ideale, trascurando la tipologia effettiva di impianto di condizionamento ambientale. Questa scelta permette di ignorare la voce *HVAC Systems*. È importante ricordare che EnergyPlus con il termine impianto ideale considera un impianto convettivo a tutta aria. Altri software, TRNSYS ad esempio, risolvono il bilancio termico trascurando la presenza di un qualsiasi impianto.

La ventilazione naturale per gli edifici residenziali è stata considerata nulla o trascurabile in quanto l’apertura manuale delle finestre viene considerata nella schedule delle infiltrazioni, definita nella normativa ISO 18523. La schedule associata alla ventilazione naturale negli edifici non residenziali è la stessa che definisce il funzionamento dell’impianto di climatizzazione. Come per la voce *Constructions*, anche in questo caso si possono creare degli *Schedule Sets* da associare facilmente alle zone termiche alla voce *Spaces*.

### 2.2.5 Measures

Uno dei vantaggi nell’utilizzo di OpenStudio è rappresentato dalla possibilità di usufruire delle Measures, ovvero oggetti creati appositamente per sopperire ad una mancanza del software o per facilitare lo sviluppo del modello energetico. Le Measures sono messe a disposizione dal Building Component Library (BCL), una libreria online del Dipartimento di Energia degli Stati Uniti (DOE) consultabile per la costruzione di modelli energetici sia da utenti inesperti che da professionisti del settore. Le Measures sono state utilizzate per settare:

- la temperatura media mensile del terreno;
- i coefficienti convettivi per le superfici interne (3 W/(m<sup>2</sup> K)) ed esterne (20 W/(m<sup>2</sup> K));

- le caratteristiche dell'impianto ideale ovvero: le schedules di funzionamento dell'impianto, il setpoint di umidità relativa per la deumidificazione estiva (50%), la temperatura minima di immissione dell'aria durante il raffrescamento (25°C per evitare che, con temperature più basse, l'aria immessa nella zona raggiunga un'umidità relativa del 100% e avvenga, quindi, un processo di deumidificazione sulla batteria di raffreddamento dell'impianto ideale), l'eventuale presenza di recupero termico e altro.

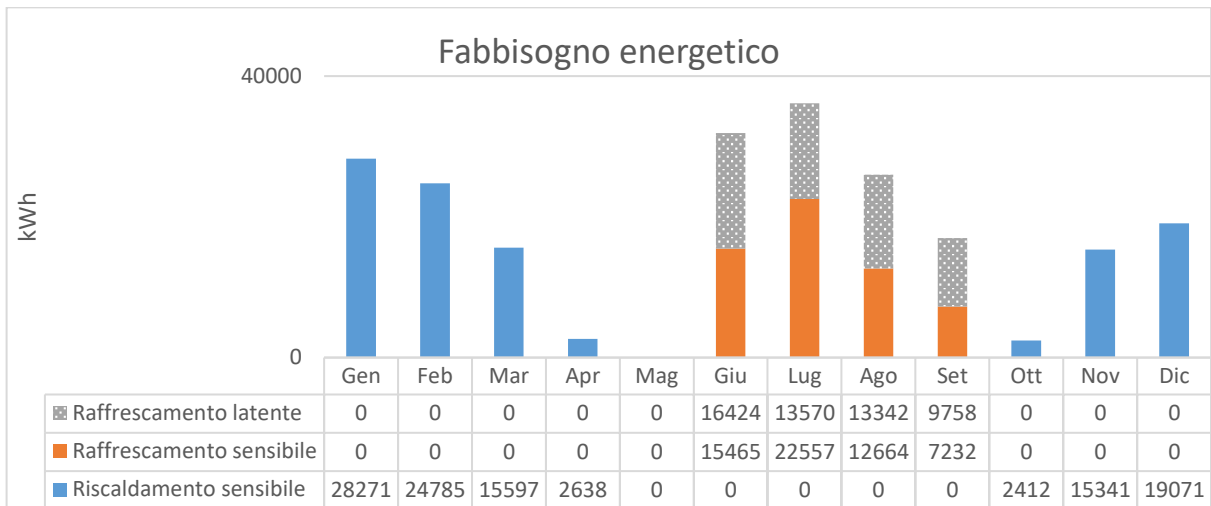
Questi parametri possono essere definiti direttamente dall'editor di EnergyPlus ma non sono disponibili su OpenStudio. Inoltre, le Measures possono essere utilizzate per la visualizzazione di alcuni risultati non rintracciabili alla voce *Output Variables*. In questo modo è stato possibile completare il modello degli edifici senza utilizzare l'editor di EnergyPlus.

### 2.2.6 Simulazione e risultati

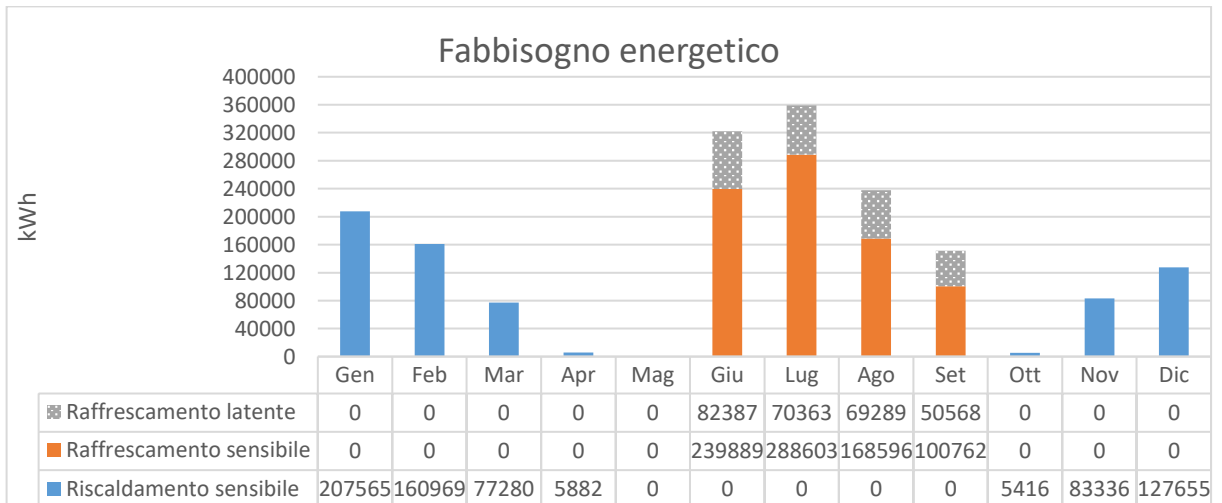
Prima di eseguire la simulazione energetica, è possibile regolare le impostazioni di simulazione alla voce *Simulation Settings*, dove si può definire il periodo di simulazione, il numero degli istanti temporali di calcolo, i parametri di convergenza, gli algoritmi di risoluzione e tanto altro. Inoltre, come già accennato nel paragrafo precedente, alla voce *Output Variables* e con l'aiuto delle Measures, è possibile stabilire quali output debbano essere visualizzati al termine della simulazione. Visto l'obiettivo principale di questo elaborato, ovvero il confronto tra un modello dinamico dettagliato (EnergyPlus) e un modello dinamico semplificato (il modello RC), in questa fase risulta sufficiente visualizzare i risultati in termini di fabbisogno energetico invernale ed estivo, distinguendo la quota sensibile dalla latente. Risultati più approfonditi verranno esposti nei capitoli a seguire in sede di confronto con il modello semplificato.

Si ricorda che il periodo di riscaldamento è definito dal DPR 412 del 26 agosto 1993 [22], il quale suddivide il territorio nazionale in sei zone climatiche (dalla A alla F) sulla base del calcolo dei gradi giorno. Padova appartiene alla zona climatica E, conta 2383 gradi giorno e presenta una stagione di riscaldamento compresa tra il 15 ottobre ed il 15 aprile. Per la stagione di raffrescamento la legge non stabilisce alcuna regola; tuttavia si è deciso di considerare un periodo di raffrescamento compreso tra il 1° giugno ed il 15 settembre. Alla pagina seguente si possono osservare i grafici relativi al fabbisogno energetico degli edifici oggetto di studio. Si noti che, non essendo stata impostata alcuna umidificazione invernale, il fabbisogno invernale è solo di tipo sensibile.

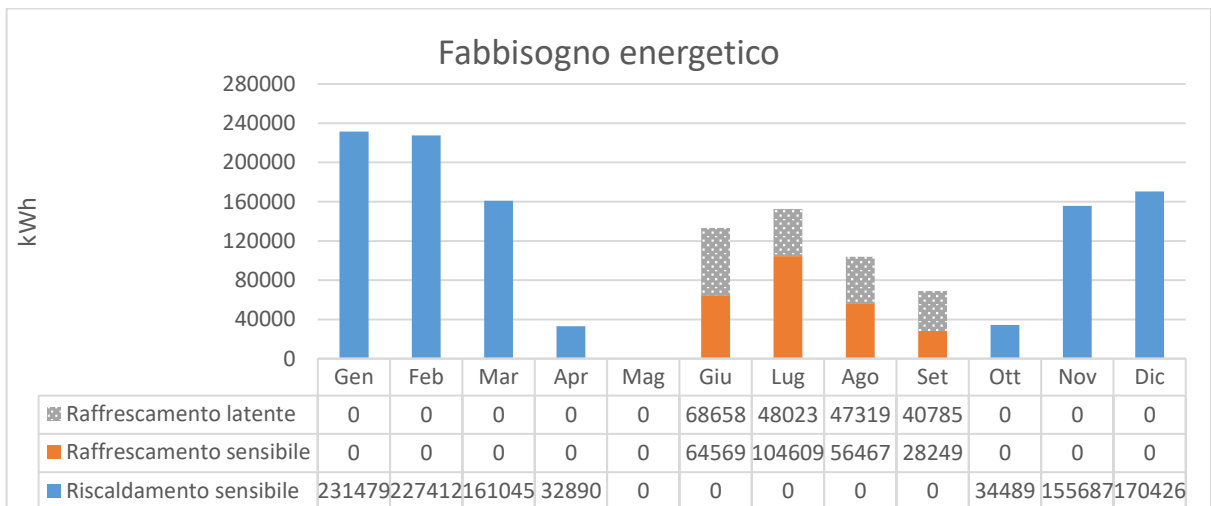
- Complesso Didattico Piovego:



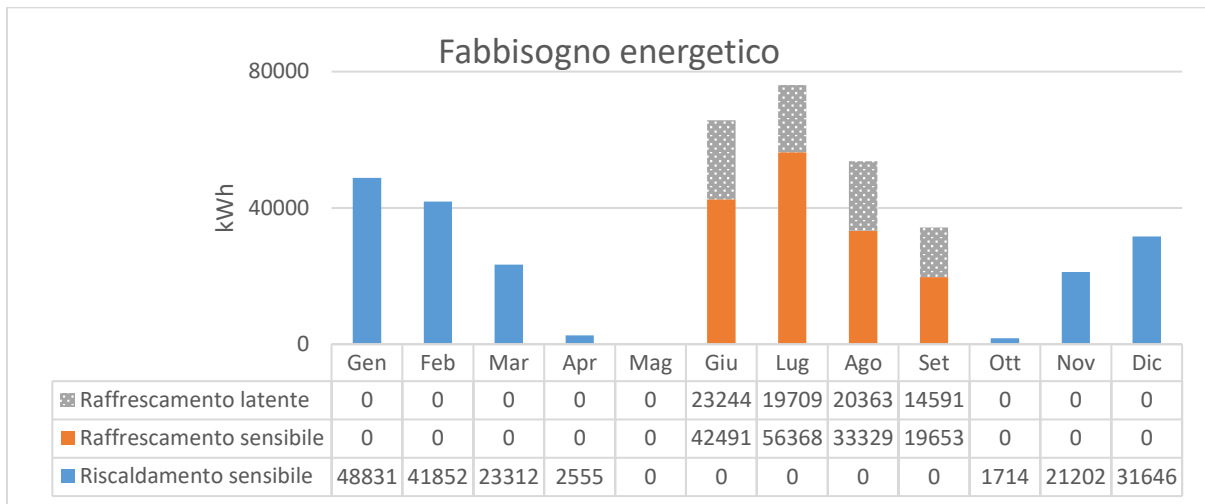
- Complesso pluridipartimentale di Biologia "A. Vallisneri":



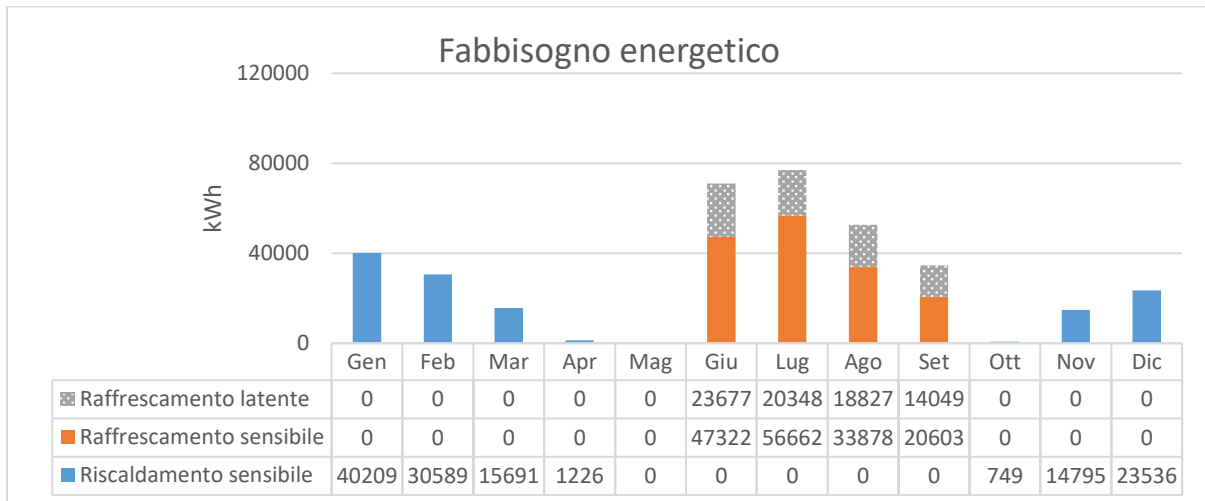
- Ex Complesso Dipartimentale di Ingegneria Meccanica:



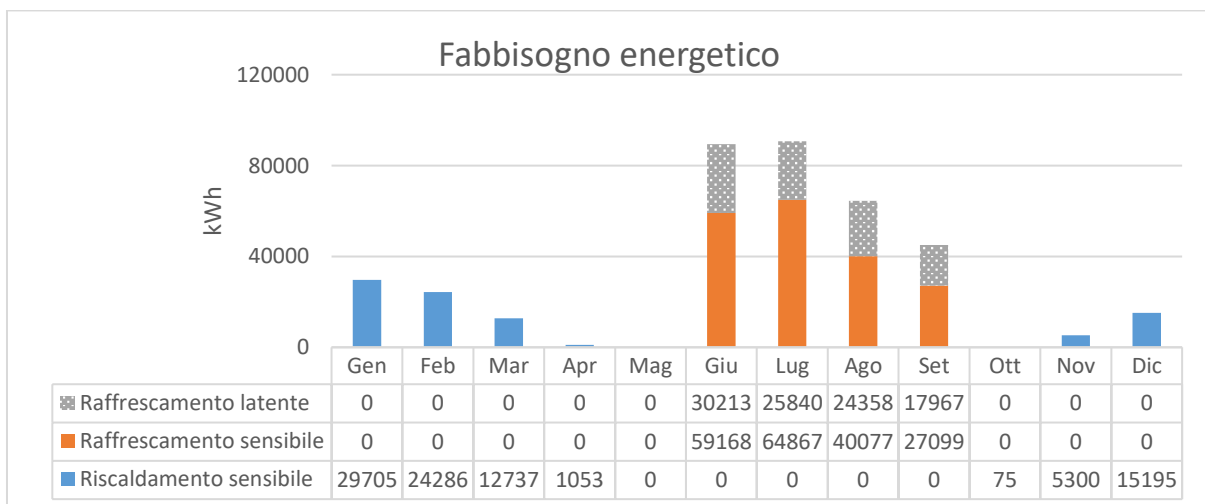
- Psicologia 1:



- Psicologia 2:

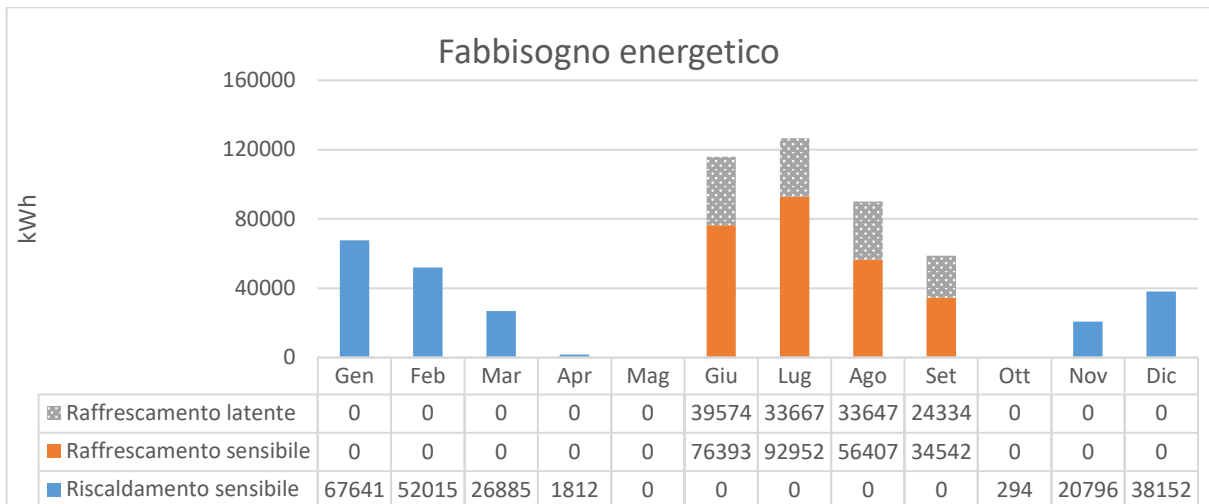


- Centro Linguistico di Ateneo:

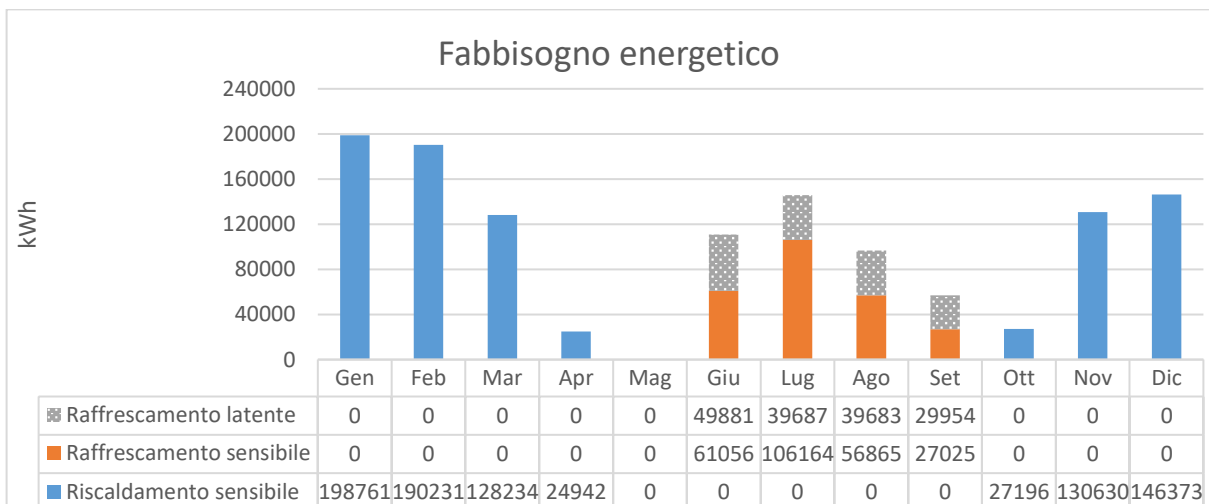




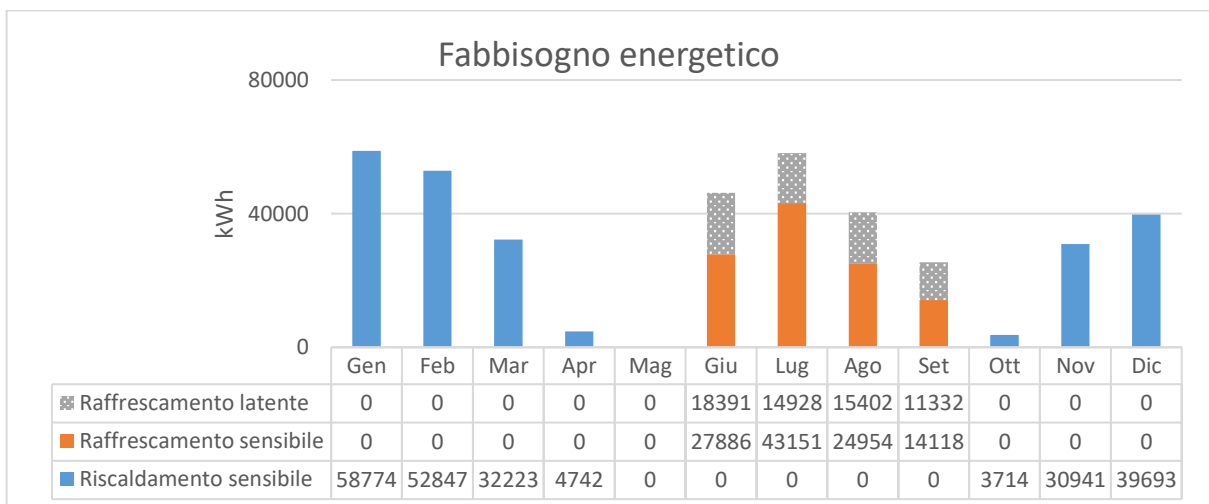
- Dipartimento di Geoscienze:



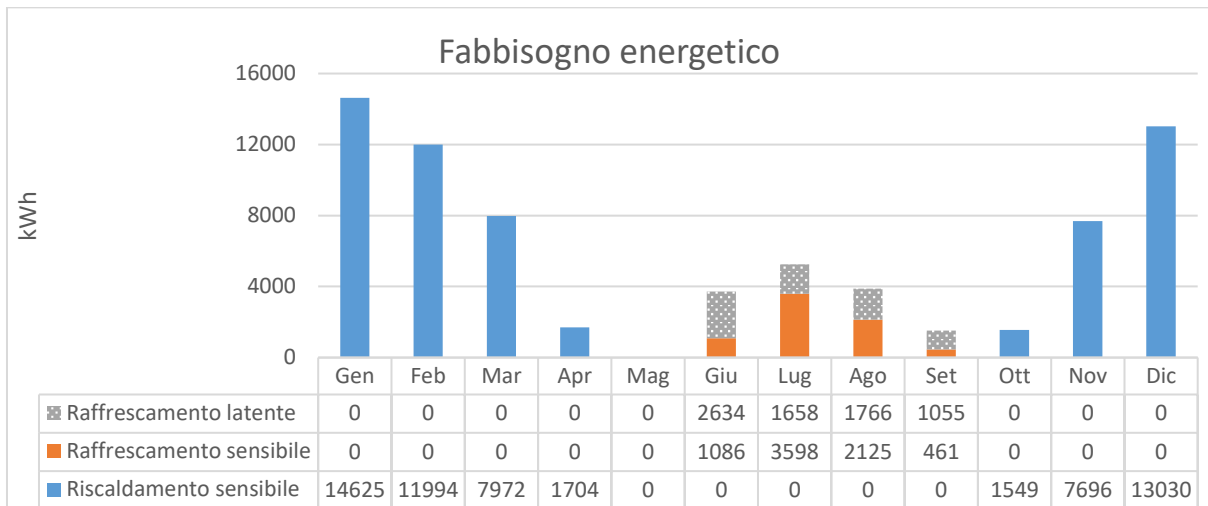
- Dipartimento di Ingegneria Industriale:



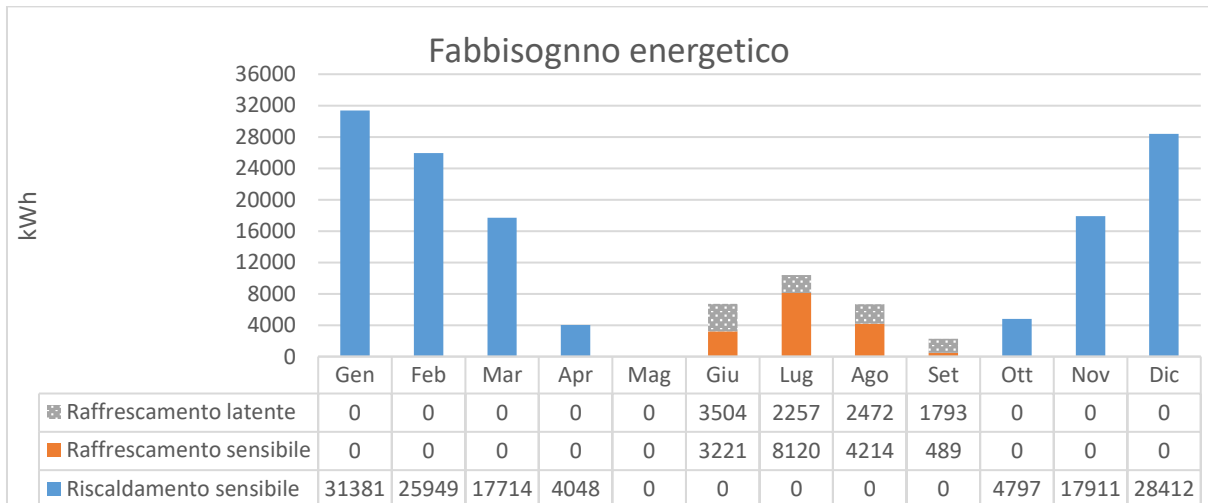
- Dipartimento di Ingegneria Informatica:



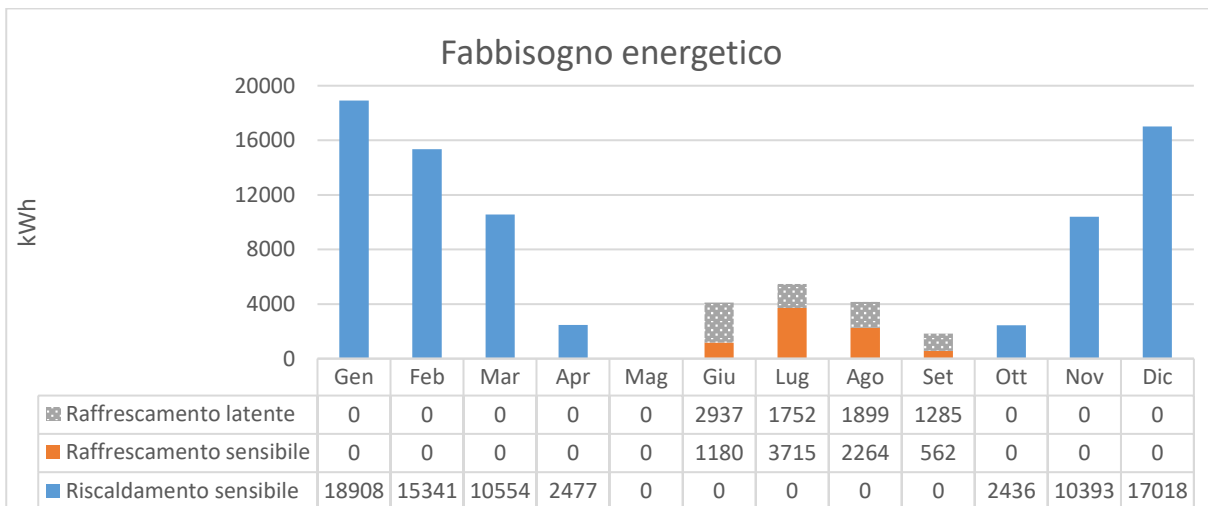
- Edificio residenziale Nord:



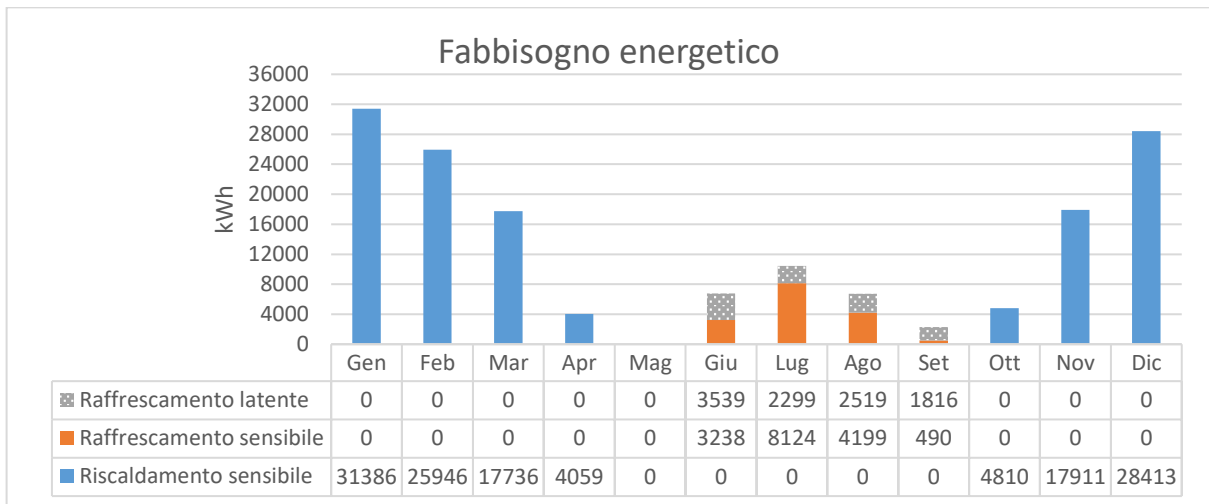
- Edificio residenziale Est:



- Edificio residenziale Sud:



- Edificio residenziale Ovest:



Quanto riportato nei grafici può essere sintetizzato in un'unica tabella che riporti il fabbisogno energetico invernale ed estivo totale per ciascun edificio. Nella tabella seguente, inoltre, è indicato il fabbisogno invernale specifico per unità di superficie e di volume. Questi dati possono essere utili per un confronto più immediato tra i risultati ottenuti e per un dimensionamento di massima di un eventuale impianto.

*Tabella 2: Risultati conseguiti con il modello dinamico dettagliato in ambiente EnergyPlus*

Edificio	Fabbisogno termico invernale	Fabbisogno termico estivo	Fabbisogno invernale specifico	Fabbisogno invernale specifico
-	[kWh/anno]	[kWh/anno]	[kWh/(m <sup>2</sup> anno)]	[kWh/(m <sup>3</sup> anno)]
Complesso didattico Piovego	108115	111011	40.7	13.9
Complesso A. Vallisneri	668105	1070457	23.2	7.4
Ex Complesso Dipartimentale di Ingegneria Meccanica	1013427	458679	65.5	14.5
Psicologia 1	171111	229748	28.0	8.1
Psicologia 2	126794	235365	23.4	7.0
Centro Linguistico di Ateneo	88351	289588	11.4	3.8
Dipartimento di Geoscienze	207595	391516	18.1	6.1
Dipartimento di Ingegneria Industriale	846367	410317	74.8	17.1
Dipartimento di Ingegneria Informatica	222934	170161	42.0	12.5
Edificio residenziale Nord	58570	14382	51.2	19.0
Edificio residenziale Est	130212	26069	70.3	24.9
Edificio residenziale Sud	77127	15594	67.5	25.0
Edificio residenziale Ovest	130261	26224	70.3	24.9
<b>TOTALE</b>	<b>3848969</b>	<b>3449111</b>	<b>38.4</b>	<b>11.0</b>



## CAPITOLO 3

# MODELLIZZAZIONE DINAMICA SEMPLIFICATA CON IL MODELLO A RESISTENZA-CAPACITA'

### 3.1 Il linguaggio di programmazione: l'ambiente MATLAB

Il modello dinamico semplificato proposto in questo elaborato è un modello a resistenza-capacità ed è stato sviluppato in ambiente MATLAB, un linguaggio di programmazione molto comune nel settore della ricerca scientifica. Il linguaggio MATLAB, basato sull'utilizzo delle matrici, rappresenta uno dei modi più semplici per esprimere la matematica computazionale ed è ottimizzato per la risoluzione di problemi tecnici e scientifici. L'interfaccia grafica semplifica la visualizzazione e l'acquisizione di informazioni dai dati e la vasta libreria di strumenti predefiniti consente di sostenere un'ampia gamma di applicazioni ingegneristiche e scientifiche. Questi strumenti sono tutti rigorosamente testati e progettati per lavorare congiuntamente. Il codice MATLAB, inoltre, può essere integrato con altri linguaggi di programmazione.

### 3.2 Il modello RC: cenni storici e normative di riferimento

Il primo tentativo di descrivere il comportamento dinamico degli elementi caratteristici di un edificio con l'analogia elettrica risale al 1936 quando *Beuken* [23] descrisse le equazioni per una rete con  $n$  capacità termiche. Questo studio fu la base per il modello proposto da *Rouvel* [24], il quale descrisse ogni elemento di costruzione usando un modello di primo o secondo ordine, ottenendo così un modello con almeno  $n$  capacità termiche, dove  $n$  è il numero di elementi costruttivi della stanza.

*Laret* [25], pochi anni dopo, propose un metodo analitico semplice che rappresentasse ciascun elemento di costruzione con un modello ad un nodo costituito da due resistenze e una capacità. *Lorenz e Masy* [26], sulla base di questo approccio, raggrupparono tutti gli elementi

costruttivi della zona termica considerati in un modello semplice con due costanti temporali: una per il volume d'aria e una per la struttura dell'edificio. Successivamente *Crabb* [27] e altri utilizzarono un modello di primo e secondo ordine basato su quanto studiato precedentemente da *Lorenz* e *Masy* per calcolare la temperatura dell'aria interna in una scuola, ottenendo dei buoni risultati.

*Tindale* [28], più tardi, sostenne che un modello di secondo ordine fosse troppo reattivo se utilizzato per edifici di medie/grandi dimensioni con cicli di riscaldamento giornalieri ad alto tasso di apporti gratuiti o, equivalentemente, con ampi sbalzi di temperatura diurni. Propose, quindi, un modello del terzo ordine con l'aggiunta di una capacità collegata al nodo sole-aria. Questo metodo migliorò i risultati.

*Antonopoulos* e *Koronaki* [29] considerarono l'effettiva, e quindi dinamica, capacità termica di un modello del primo ordine adattandolo ad una soluzione numerica ottenuta da un modello dettagliato risolto con il metodo delle differenze finite.

*Fraisse* [30] et. al., a partire da un modello del secondo ordine, proposero di aggiungere altre due capacità corrispondenti al 5% delle capacità interne della struttura dell'edificio per considerare la risposta della superficie della parete a rapidi cambiamenti di temperatura interna. La risposta a sollecitazioni ad alta frequenza diventa importante quando il timestep è minore di un'ora.

*Nielsen* [31] sviluppò un semplice modello a due nodi da usare nelle prime fasi di progettazione di un edificio. Il modello semplificato trovò un buon riscontro con il software di simulazione BSim. Più tardi, *Kampf* e *Robinson* [32] modificarono leggermente la struttura del modello di Nielsen e, applicato ad un caso di studio, trovarono che il modello di secondo ordine fosse accurato sia per il calcolo del fabbisogno energetico che per la valutazione del comportamento transitorio e che l'accuratezza dipendesse dal tipo di struttura considerata.

*Gouda* [33] et. al. usarono un modello di ordine minore e stabilirono che il modello 3R2C fosse la soluzione migliore per descrivere il comportamento dinamico degli elementi di una singola costruzione.

*Rouvel* e *Zimmermann* [34] separarono gli elementi dell'edificio in funzione del carico, se simmetrico (partizioni interne) o asimmetrico (muri esterni). Il risultato di questa procedura fu un modello a resistenza-capacità con due costanti di tempo simili: una per le pareti adiabatiche e l'altra per quelle non adiabatiche.

La normativa internazionale ISO 13790 [8] descrive un metodo di calcolo quasi stazionario e un metodo dinamico semplificato basato su un modello RC del primo ordine con cinque resistenze termiche ed una capacità termica. Il metodo è stato validato soltanto in termini di fabbisogno energetico mensile, nonostante sia in grado di produrre risultati orari. Questa normativa è stata sostituita nel 2018 dalla ISO 52016, adatta per il calcolo del carico orario di riscaldamento e raffrescamento, inclusa la deumidificazione. Il modello con due capacità di Rouvel e Zimmermann, invece, è stato implementato nella Direttiva tedesca VDI 6007-1 [35].

Nonostante diversi studi abbiano analizzato questi modelli, non è ancora chiaro quanto siano accurati in diverse condizioni climatiche e per diversi tipi di strutture edilizie.

Il codice di calcolo scritto in MATLAB per questo lavoro di tesi magistrale si basa sul modello RC con cinque resistenze ed una capacità (definito anche come modello 5R1C) e fa riferimento alla normativa ISO 13790 [8]. Il codice fu creato ad hoc per un caso di studio dai ricercatori dell'Università di Padova; in questi elaborato è stato modificato profondamente e ottimizzato per poter simulare più edifici in ambito urbano. I dettagli del codice saranno spiegati approfonditamente nei seguenti paragrafi.

### **3.3 Il codice di calcolo sviluppato in ambiente MATLAB**

I modelli a parametri concentrati presuppongono che i parametri distribuiti dell'edificio siano raggruppati in un numero discreto di resistenze e capacità termiche. Questi modelli vengono spesso definiti xRyC, dove con x si intende il numero di resistenze termiche e con y il numero di capacità termiche del circuito equivalente. Le basi di questo tipo di modelli sono le seguenti:

- linearità del meccanismo di scambio termico;
- rappresentazione delle caratteristiche dei componenti opachi multistrato mediante parametri concentrati;
- approssimazione delle zone termiche costituenti l'edificio in un'unica zona termica.

Il modello RC viene risolto con un sistema lineare composto da  $n$  equazioni di bilancio termico, dove con  $n$  si intende il numero dei nodi della rete. Solitamente, il sistema si presenta con un grado di libertà a meno che una variabile non sia fissata dall'utente. Questo genera due possibilità:

- *Calcolo del carico termico*: la temperatura interna viene fissata dall'utente e si calcola il carico termico, ovvero l'energia necessaria all'edificio per mantenere il setpoint di temperatura specificato;
- *Calcolo della temperatura interna*: il carico termico è fissato dall'utente e si calcola la temperatura dell'aria interna.

Il modello sviluppato in ambiente MATLAB contiene anche il bilancio di vapore nell'ambiente interno, non previsto dalla normativa ISO 13790. Questo significa che il calcolo del carico latente (da estrarre dall'ambiente in fase di deumidificazione) viene eseguito ad ogni intervallo temporale conseguentemente al bilancio termico.

Il modello 5R1C si basa sul circuito equivalente mostrato nella figura seguente.

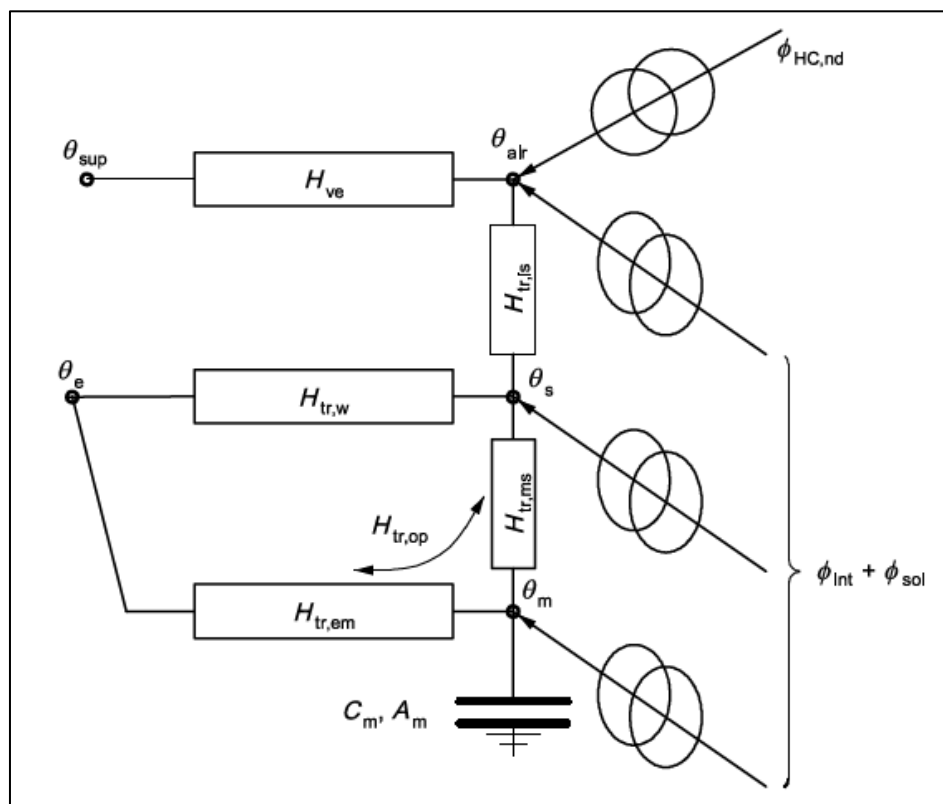


Figura 21: Schema del modello 5R1C [8]

I parametri del modello sono: i coefficienti di trasmissione termica dei componenti opachi e vetrati dell'edificio (rispettivamente  $H_{tr,op}$  e  $H_{tr,w}$ ); la capacità termica concentrata  $C_m$ ; il coefficiente di ventilazione  $H_{ve}$  e la conduttanza di accoppiamento  $H_{tr,is}$ . In particolare, il coefficiente di trasmissione dei componenti opachi  $H_{tr,op}$  è suddiviso in  $H_{tr,em}$  e  $H_{tr,ms}$ .

I nodi rappresentano la temperatura dell'aria esterna  $\theta_e$ , la temperatura d'immissione dell'aria  $\theta_{sup}$ , la temperatura dell'aria interna  $\theta_{air}$ , la temperatura superficiale delle pareti  $\theta_s$  e la massa termica  $\theta_m$ . I carichi termici interni e solari ( $\phi_{int}$  e  $\phi_{sol}$ ) sono distribuiti ai nodi  $\theta_{air}$ ,  $\theta_s$  e  $\theta_m$



come stabilito da tre correlazioni semi-analitiche che dipendono dal rapporto tra il coefficiente  $A_m$ , il quale rappresenta la capacità termica dell'edificio in termini di area superficiale, e l'area dei componenti interni dell'edificio e dalla trasmittanza termica dei componenti vetrati  $H_{tr,w}$ . Il termine  $\phi_{HC,nd}$  indica il carico termico dell'edificio, il quale, come si nota dallo schema, è collegato direttamente al nodo aria. Questo lascia presupporre che sul modello RC il sistema di climatizzazione sia ideale e puramente convettivo.

Di seguito sono indicate le formule utilizzate nello script *parameterize\_v1* per il calcolo dei parametri concentrati del modello in W/K:

- $H_{tr,w} = U_{ww}A_{ww,tot}$ , dove  $U_{ww}$  è la trasmittanza termica degli elementi vetrati e  $A_{ww,tot}$  è l'area totale delle finestre dell'edificio;
- $H_{tr,is} = h_{is}A_{tot}$ , dove  $h_{is}$  è il coefficiente di scambio termico tra il nodo aria interna e il nodo superficiale con un valore di riferimento di  $3.45 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  e  $A_{tot}$  è l'area totale comprensiva di tutte le superfici dell'edificio;
- $H_{tr,ms} = h_{tr,ms}A_m$ , dove  $h_{tr,ms}$  è il coefficiente di scambio termico tra i nodi m e s con un valore di riferimento di  $9.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ;
- $H_{tr,em} = 1/(1/H_{tr,op} - 1/H_{tr,ms})$ ;
- $H_{ve} = c_{p,air}G_{da}$ , dove  $c_{p,air}$  è il calore specifico dell'aria e  $G_{da}$  è la portata di aria di ventilazione espressa in  $\text{kg}_{as}/\text{s}$ ;
- $C_m = \sum_j k_j A_j$ , dove  $k_j$  è la capacità termica interna per unità di superficie e  $A_j$  è l'area dell'elemento j.

Per completezza sono riportate anche le equazioni riferite alla distribuzione dei carichi termici sui tre nodi  $\theta_{air}$ ,  $\theta_m$  e  $\theta_s$  così come si presentano nel main script *districtHeatDemand\_v1*:

$$- \phi_{ia} = 0.5\phi_{int} \quad (3.1)$$

$$- \phi_{st} = (1 - A_m/A_{tot} - H_{tr,w}/(9.1 \cdot A_{tot})) \cdot (0.5\phi_{int} + \phi_{sol}) \quad (3.2)$$

$$- \phi_m = A_m/A_{tot} \cdot (0.5\phi_{int} + \phi_{sol}) \quad (3.3)$$

### 3.3.1 Equazioni del bilancio termico e di vapore

Le equazioni di bilancio termico per il modello 5R1C devono essere pari al numero dei nodi della rete. Come si può osservare dallo schema di Figura 21, i nodi in questione sono tre: il nodo aria, il nodo superfici e la massa termica. Di seguito sono riportate tali equazioni di

bilancio in questo ordine, si ricordi che il sistema può essere risolto se si fissa la temperatura di setpoint e si calcola il fabbisogno energetico sensibile o viceversa:

$$\phi_{HC,nd} + H_{tr,is}(\theta_s - \theta_{air}) + H_{ve}(\theta_{sup} - \theta_{air}) + \phi_{ia} = 0 \quad (3.4)$$

$$H_{tr,is}(\theta_{air} - \theta_s) + H_{tr,w}(\theta_e - \theta_s) + H_{tr,ms}(\theta_m - \theta_s) + \phi_{st} = 0 \quad (3.5)$$

$$H_{tr,ms}(\theta_s - \theta_m) + H_{tr,em}(\theta_e - \theta_m) + \phi_m = \frac{C_m}{\tau}(\theta_m - \theta_{m0}) \quad (3.6)$$

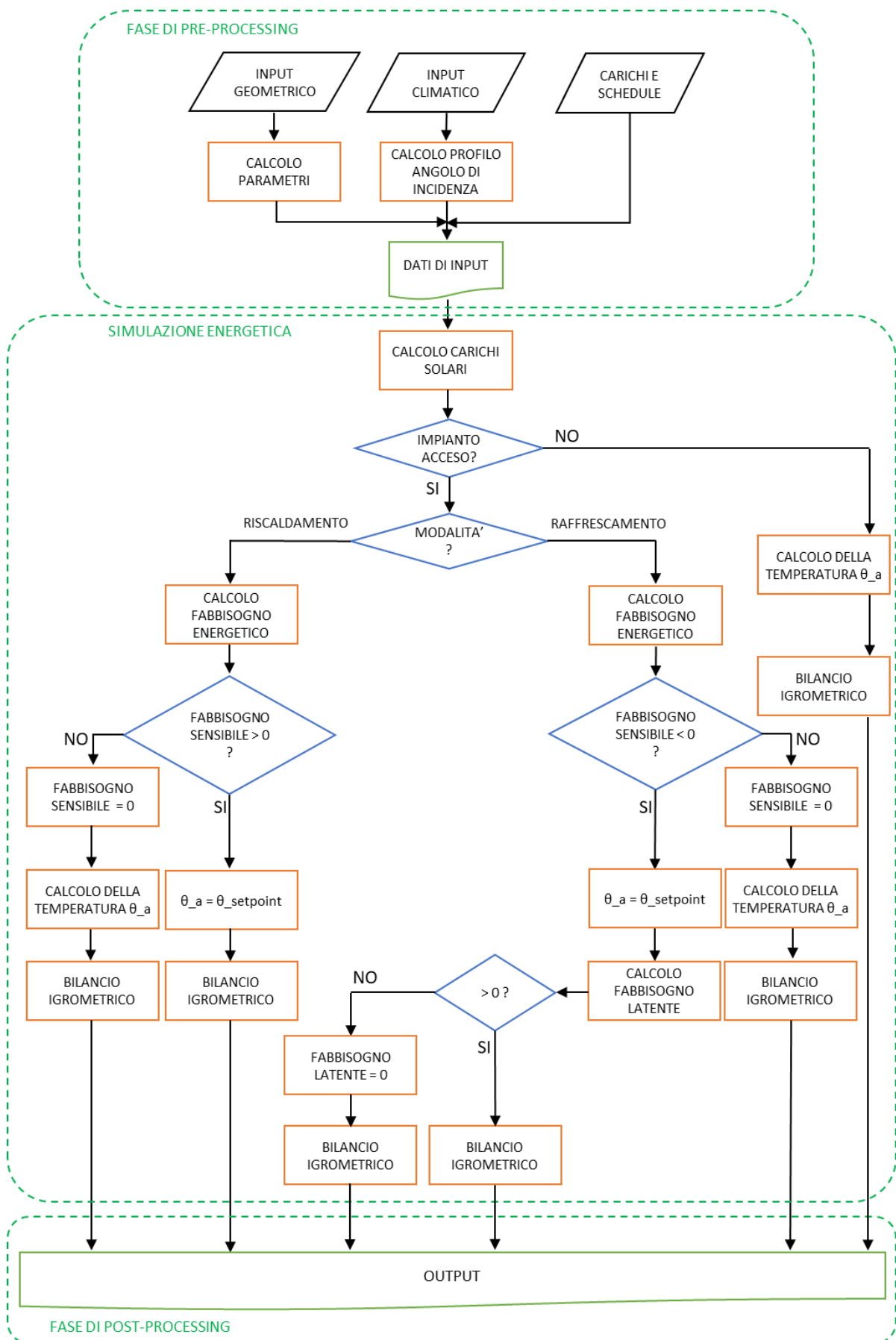
Con il termine  $\theta_{m0}$  si intende la temperatura associata al nodo massivo al timestep precedente. Al primo istante temporale di calcolo si è imposto che tale valore sia pari a 15 °C.

Il sistema di equazioni viene risolto ad ogni istante temporale all'interno di un ciclo in funzione della schedule di accensione dell'impianto di climatizzazione. In particolare, quando l'impianto è acceso il sistema viene risolto impostando la temperatura di setpoint al nodo aria e calcolando la potenza necessaria per mantenere tale temperatura. Viceversa, nel caso in cui l'impianto sia spento, o nei casi di raffrescamento invernale e riscaldamento estivo, viene impostata la potenza nulla e dal sistema si calcola la temperatura al nodo aria

L'equazione del bilancio di vapore viene risolta soltanto al nodo aria e permette di effettuare la deumidificazione, ovvero il controllo dell'umidità relativa interna durante la stagione di raffrescamento in base al setpoint scelto dall'utente. L'equazione è stata scritta nel main script all'interno del ciclo contenente il bilancio termico, in cascata a quest'ultimo. Si ricordi che i due bilanci sono indipendenti l'uno dall'altro. Di seguito viene riportata l'equazione di bilancio di vapore così come definita nel codice:

$$\phi_{lat} = G_{da}(x_{ext} - x_{int\_set}) \cdot (r_0 + c_{pv}\theta_{air}) + G_v(r_0 + c_{pv}\theta_{air}) \quad (3.7)$$

dove  $x_{ext}$  è l'umidità specifica esterna,  $x_{int\_set}$  è l'umidità specifica interna di setpoint,  $r_0$  è il calore latente di vaporizzazione dell'acqua a 0°C pari a 2501 kJ/kg,  $c_{pv}$  è il calore specifico del vapore pari a 1875 J/(kg K) e  $G_v$  è la generazione interna di vapore espressa in kg<sub>v</sub>/s. Alla pagina seguente è raffigurato il diagramma di flusso del modello energetico sviluppato.



### 3.3.2 Definizione dei dati di input e fase di pre-processing

Il codice di calcolo scritto in ambiente MATLAB per la modellizzazione energetica degli edifici si articola in diverse fasi successive. Queste fasi non sono molto diverse da quelle definite nel capitolo precedente, valide per il software di simulazione EnergyPlus. La definizione e l'elaborazione dei dati di input è una fase necessaria per la successiva esecuzione della simulazione dinamica. In questa fase, definita come fase di pre-processing, vengono richiamati nel codice tutti i file esterni di input che definiscono gli edifici in termini di: dati geometrici, caratteristiche termofisiche dell'involucro edilizio, posizione geografica, carichi termici, schedules di funzionamento dell'impianto e condizioni al contorno.



Figura 22: Struttura ad albero della cartella di lavoro

Nella figura in alto si può osservare la struttura ad albero della cartella di lavoro *5R1C\_v1* contenente tutti i file necessari per la simulazione energetica. In particolare, i file esterni richiamati nel codice per la compilazione dei dati di input si trovano nella cartella *Input\_5R1C* e sono raffigurati all'interno della parentesi graffa. Nella cartella *Output\_5R1C*, invece, vengono caricate le variabili principali di output al termine di ogni simulazione. Infine, nella cartella denominata *Altro* sono stati creati alcuni file utilizzati per il confronto e la visualizzazione dei risultati del modello RC con il modello dettagliato in ambiente EnergyPlus.

### 3.3.2.1 Dati geometrici

I primi dati di input che vengono richiamati nel codice sono i dati geometrici principali degli edifici. Questi dati si trovano all'interno del file Excel *buildings\_final*, nella cartella *Input\_5RIC*. Il file si articola in due fogli di calcolo; nel primo sono indicate le informazioni generali osservabili nella figura in basso. I coefficienti  $r_{h\_gross}$  e  $r_{h\_net}$  rappresentano il rapporto tra il reale valore dell'altezza per piano e il valore semplificato e sono stati utilizzati per rendere il più possibile confrontabili i due modelli oggetto di studio. È chiaro che, nel caso in cui siano coinvolti migliaia di edifici, è difficile che si abbiano a disposizione dei modelli dettagliati per ognuno di essi. Tuttavia, per lo scopo di questa Tesi Magistrale, l'utilizzo di questi due coefficienti permette di capire quanto il modello semplificato si discosti, in termini di risultati, da quello dettagliato a parità di dati di input.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Codice edificio	Perimetro [m]	Area netta in pianta [mq]	Archetipo	Altezza [m]	Numero di piani riscaldati	Area netta totale [mq]	Volume riscaldato [mc]	Volume lordo [mc]			Altezza lorda piano	Altezza netta piano	$r_{h\_gross}$	$r_{h\_net}$
2	1	107.40	701.12	1	14	4	2804	8133	8413			3.6	3	0.83	0.97
3	2	353.16	3647.28	2	25	7	25531	89358	117442			3.6	3	1.28	1.17
4	3	703.00	5387.00	3	11	3	16161	64644	88886			3.6	3	1.53	1.33
5	4	140.90	1186.93	4	18	5	5935	21365	27774			3.6	3	1.3	1.2
6	5	132.08	712.91	5	25	7	4990	17965	17965			3.6	3	1	1.2
7	6	160.82	1146.03	7	25	7	8022	22863	23104			3.6	3	0.8	0.95
8	7	225.50	2420	9	14	4	9680	32912	38720			3.6	3	1.11	1.13
9	8	589.00	3747.35	10	11	3	11242	48341	51713			3.6	3	1.28	1.43
10	9	334.20	1555.7	11	11	3	4667	17268	17735			3.6	3	1.06	1.23
11	10	83.00	285.4	14	10	3	856	2825	2996			3.2	2.7	1.09	1.22
12	11	102.68	371.0	15	10	3	1113	3784	3895			3.2	2.7	1.09	1.26
13	12	83.00	285.4	16	10	3	856	2825	2997			3.2	2.7	1.09	1.22
14	13	102.68	371.0	17	10	3	1113	3784	3895			3.2	2.7	1.09	1.26
15															
16															
17															
18															

Figura 23: File *buildings\_final* contenente le informazioni geometriche degli edifici

Nel secondo foglio di calcolo sono indicati i seguenti dati: la lunghezza di ciascuna parete in pianta dell'edificio e l'orientazione delle pareti stesse. L'orientazione è indicata con un numero associato a ciascuna delle quattro principali direzioni cardinali (Nord, Est, Sud, Ovest).

Questi dati vengono catalogati ed elaborati nello script *tableRead\_v1* dove si calcola, per ogni edificio, la lunghezza dei muri esterni per ciascuna orientazione, l'area effettiva delle superfici finestrate, l'area laterale totale e il volume riscaldato. Per il calcolo dell'area effettiva delle finestre si distinguono due casi in funzione della mole di informazioni a disposizione dell'utente.

1. Nel caso in cui gli edifici siano stati precedentemente modellizzati in ambiente EnergyPlus (come in questo caso) è possibile reperire tra gli output di simulazione il *window wall ratio*, ovvero il rapporto tra la superficie finestrata e la superficie laterale

totale per ciascuna orientazione. Questi dati devono essere inseriti in un apposito foglio di calcolo del file Excel *archetypes\_final*. In questo modo, con l'utilizzo della function *ew2ww\_wwr\_ext*, si è sicuri di ottenere un valore coerente con il metodo utilizzato in precedenza.

2. Nel caso in cui non si abbiano sufficienti informazioni, l'area effettiva delle finestre viene calcolata con l'utilizzo della function *ew2ww\_wwr\_int*, nella quale è indicato un valore di riferimento del rapporto tra la superficie finestrata e la superficie laterale totale per ciascuna orientazione. Questi valori di riferimento possono essere modificati agendo sulla function in funzione della località e/o dei riferimenti forniti da eventuali normative.

### **3.3.2.2 Stratigrafie e calcolo dei parametri**

I dati di input relativi alle stratigrafie dei componenti opachi e vetrati degli edifici si trovano all'interno del file Excel *archetypes\_final*, vengono richiamate nel codice all'interno dello script *parameterize\_v1* e sono fondamentali per il calcolo dei parametri del modello. Il file si compone di tanti fogli di calcolo quanti sono gli edifici e in ognuno di essi sono elencate le proprietà termofisiche principali delle seguenti categorie di componenti opachi:

- parete esterna,
- parete interna,
- solaio interpiano,
- pavimento contro terra,
- copertura.

Il file contiene anche le informazioni principali riguardanti gli elementi vetrati, ovvero:

- la trasmittanza termica totale,
- la frazione di telaio,
- il solar heat gain nominale,
- il fattore di ombreggiamento per oggetti movibili esterni,
- il fattore di correzione,
- il fattore di ombreggiamento per elementi esterni.

In aggiunta, si è deciso di permettere all'utente di fornire, per ciascuna categoria di componente opaco, la resistenza superficiale esterna ed interna espressa in  $(m^2 K)/W$ . Questa scelta è stata presa dopo aver notato che, nel modello dettagliato in ambiente EnergyPlus, un diverso valore delle resistenze superficiali, soprattutto per le pareti esterne, comportava una variazione significativa dei risultati in termini di fabbisogno energetico sensibile.

Infine, è necessario indicare un valore del coefficiente di assorbimento delle pareti esterne e della copertura. Nella figura seguente si può osservare il layout del file Excel appena descritto.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1														
2														
3														
4	External walls (P2+)											Surface resistance		
5	NUM_STR	NOME_STR	CODE	t [m]	lambda	dens [l cp [J/kg/K]	R [m2 K/W]	U [W/m²]	Mf [kg/m²]				R_si_ew	[m2 K/W]
6	1	Cis_50_mm		0.05	1.67	2400	880	0.030					R_se_ew	0.125
7	2	Polistirene_alleggerim		0.1	0.14	25	1470	0.714						0.04
8	3	Cis_50_mm		0.05	1.67	2400	880	0.030						
9	4	Polistirene_30_mm		0.03	0.06	25	1470	0.500						
10	5	Cartongesso_10_mm		0.01	0.6	900	840	0.017						
11	6													
12								1.291	0.775					
13														
14	Internal walls											Surface resistance		
15	NUM_STR	NOME_STR	CODE	t [m]	lambda	dens [l cp [J/kg/K]	R [m2 K / W U [W/m²]	Mf [kg/m²]					R_si_iw	[m2 K/W]
16	1	Intonaco_int_15_mm		0.015	0.7	1400	1010	0.021					R_se_iw	0.125
17	2	Cartongesso_15_mm		0.015	0.6	900	840	0.025						0.125
18	3	Lana_di_vetro_40_mm		0.04	0.04	16	800	1.000						
19	4	Cartongesso_15_mm		0.015	0.6	900	840	0.025						
20	5	Intonaco_int_15_mm		0.015	0.7	1400	1010	0.021						
21	6													
22								1.093	0.915					
23														
24	Ceiling (S2) - interpiano											Surface resistance		
25	NUM_STR	NOME_STR	CODE	t [m]	lambda	dens [l cp [J/kg/K]	R [m2 K / W U [W/m²]	Mf [kg/m²]					R_si_ce	[m2 K/W]
26	1	Linoleum_2_mm		0.002	0.23	1800	1250	0.009					R_se_ce	0.125
27	2	Cis_80_mm		0.08	1.67	2400	880	0.048						0.125
28	3	Polistirene_solai_200_mm		0.2	0.04	25	1470	5.000						
29	4	Cis_70_mm		0.07	1.67	2400	880	0.042						
30	5	Poliuretano_solai_40_mm		0.04	0.04	40	1453	1.000						
31	6	Massetto_40_mm		0.04	1.67	1700	1000	0.024						
32								6.122	0.163					
33														
34	Floor (PV2)											Surface resistance		

Figura 24: Layout del file Archetypes\_final contenente le proprietà termofisiche delle strutture degli edifici

Il fatto che ciascun foglio di calcolo si riferisca ad un edificio è una scelta pensata per questo caso di studio. Come già detto in precedenza per i coefficienti  $r_{h\_gross}$  e  $r_{h\_net}$ , questa scelta permette di capire quanto il modello semplificato si discosti, in termini di risultati, da quello dettagliato a parità di dati di input. Nel caso in cui siano coinvolti centinaia o migliaia di edifici, ciascun foglio di calcolo si riferirà ad una certa tipologia edilizia. In quel caso, le caratteristiche termofisiche indicate, potrebbero essere diverse da quelle effettive dell'edificio. Certamente, avere un ampio ventaglio di tipologie edilizie permette una migliore associazione di uno specifico edificio ad esse.

All'interno dello script *parameterize\_v1*, dopo aver richiamato tutti questi dati, si procede al calcolo dei parametri del modello con le formule già viste nei paragrafi precedenti. In particolare, la function *intArCap\_v1* consente di calcolare le capacità termiche interne per unità di superficie  $k_j$  seguendo il metodo dettagliato indicato nella normativa ISO 13786:2007. Le superfici considerate sono le pareti esterne, le pareti interne e i solai interpiano. La function necessita in input delle caratteristiche termofisiche principali degli elementi strutturali, del periodo di riferimento e della resistenza superficiale esterna ed interna.

### 3.3.2.3 Dati climatici

La fase di pre-processing continua con l'introduzione dei dati climatici riferiti al sito geografico nel quale si trovano gli edifici. Il sito è indicato nel primo foglio di calcolo del file Excel *buildings\_final* e viene descritto con le seguenti informazioni: latitudine, longitudine e longitudine di riferimento. Questi dati sono stati utilizzati per il calcolo della posizione oraria del Sole, la quale permette di ricavare il profilo del fattore solare dei vetri degli elementi finestrati per diversi valori dell'angolo di incidenza.

I profili orari di temperatura esterna, radiazione solare e umidità specifica esterna sono stati estrapolati dallo stesso file climatico utilizzato in ambiente EnergyPlus, ovvero il file di Venezia-Tessera del tipo IGDG. In questo caso, però, è stato necessario utilizzare il tool di TRNSYS, Simulation Studio, per acquisire i dati contenuti nel file .epw tramite l'apposita Type 15-3.

Questa porzione del main script relativa ai dati climatici si conclude con il calcolo della posizione del Sole e dell'angolo di incidenza rispetto ad una generica superficie verticale orientata verso i quattro punti cardinali. Il calcolo viene eseguito nella function *sun\_position* e rappresenta una delle ottimizzazioni apportate al codice di calcolo. I dati di input di cui necessita la function sono: la latitudine ( $\phi$ ), la longitudine ( $\phi$ ), la longitudine di riferimento ( $\phi_{st}$ ), il timestep, il tilt ( $\beta$ ) e l'azimuth ( $\gamma$ ). Questi ultimi due dati rappresentano rispettivamente l'inclinazione della superficie rispetto al piano orizzontale e l'orientamento della superficie rispetto alla direzione Sud.

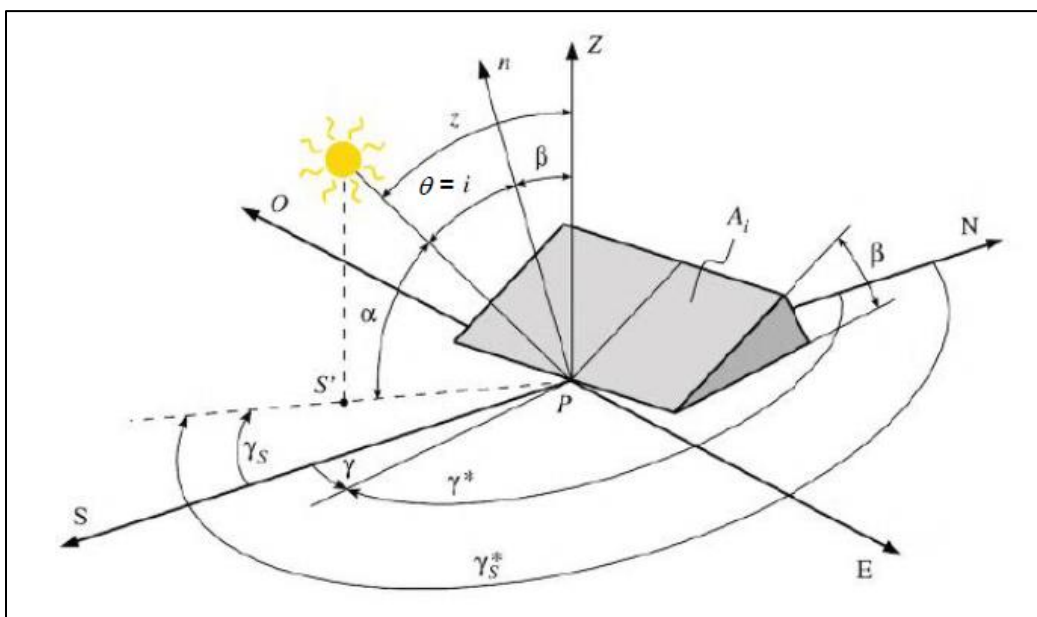


Figura 25: la posizione del Sole [36]



Gli output della function sono: l'altezza solare ( $\alpha$ ), l'azimuth solare ( $\gamma_s$ ) e l'angolo di incidenza ( $\theta$ ). I primi due descrivono la posizione del Sole e sono indipendenti dalla superficie. Di seguito sono riportate le equazioni principali utilizzate per il calcolo della posizione del Sole.

$$\sin \alpha = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \omega \cos \varphi \quad (3.8)$$

$$\sin \gamma_s = \left( \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha} \right) \quad (3.9)$$

Per prima cosa si definisce la declinazione solare nel tempo ( $\delta$ ), omologa della latitudine, e calcolata come segue, secondo quanto riportato nell'Appendice A della normativa UNI 10349:2013:

$$\delta = \frac{360^\circ}{2\pi} [a_0 + a_1 \cos \Omega + a_2 \sin \Omega + a_3 \cos 2\Omega + a_4 \sin 2\Omega + a_5 \cos 3\Omega + a_6 \sin 3\Omega] \quad (3.10)$$

dove i coefficienti  $a_x$  sono costanti e definiti da normativa e  $\Omega$  è l'angolo orbitale della Terra espresso in radianti e calcolato come segue:  $\Omega = 2\pi \cdot (n - 1)/365$ , con  $n$  numero del giorno dell'anno. La declinazione solare, a causa dell'inclinazione dell'asse terrestre, potrà assumere un valore compreso tra  $\pm 23.45^\circ$ .

Il parametro  $\omega$  rappresenta l'angolo orario, omologo della longitudine, definito dalla seguente espressione:  $\omega = 15(\tau_{sol} - 12)$  [°]. Il tempo solare vero  $\tau_{sol}$  si differenzia dal tempo legale a causa dell'effetto congiunto della rotazione terrestre e della rivoluzione attorno al Sole e può essere calcolato come segue:  $\tau_{sol} = \tau_{leg} + 1/15 \cdot (\phi - \phi_{st}) + E$ , dove  $E$  rappresenta l'equazione del tempo, la quale considera che l'intervallo tra due culminazioni successive non sia costante ma vari a causa dell'orbita ellittica della Terra.

La relazione generale valida per il calcolo dell'angolo di incidenza è la seguente:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (3.11)$$

Come già accennato in precedenza, avere a disposizione un vettore che descriva la variazione oraria dell'angolo d'incidenza per tutte le orientazioni considerate consente di calcolare un profilo orario del fattore solare dei vetri delle finestre, parametro fondamentale per il calcolo

del carico solare. Nei paragrafi seguenti verrà descritta la function utilizzata per la generazione del profilo del shg e saranno illustrati i vantaggi da essa derivati.

#### 3.3.2.4 Carichi interni e schedules d'impianto

I carichi interni si riferiscono all'apporto termico gratuito fornito dalla presenza di persone, dall'illuminazione artificiale e dall'equipaggiamento elettrico. Il codice di calcolo è stato impostato in modo da poter scegliere tra due metodi di generazione dei carichi. In un primo caso si ipotizza di richiamare da un file esterno due vettori di 8760 valori contenenti rispettivamente la somma di tutti i carichi interni sensibili (in W) e la generazione di vapore totale (in kg/s). In un secondo caso si ipotizza di non avere a disposizione questi dati e si procede alla generazione "manuale" dei vettori considerando un profilo orario giornaliero di riferimento appositamente scelto.

Nel primo caso i vettori esterni richiamati nel codice si trovano all'interno del file Excel *ScheduleIHG* nella cartella *Input\_5RIC* e, come per EnergyPlus, fanno riferimento alla normativa ISO 18523. Per rendere il più possibile confrontabili i due modelli a parità di dati di input, si è deciso di sommare i carichi interni sensibili definiti su EnergyPlus per ciascuna zona termica al fine di ottenere un profilo orario in [W], valido per tutto l'edificio. Considerando una quota sensibile del 54.62% dei carichi interni associati alla presenza di persone (come stabilito anche in ambiente EnergyPlus), si è calcolato il carico latente in [W] e, con l'espressione seguente, la generazione interna di vapore:

$$G_v = \frac{\phi_{lat}}{r_0 + c_{pv} \cdot \theta_{air}} \quad (3.12)$$

dove  $\theta_{air}$  è stato assunto pari a 26°C in quanto il calcolo del carico latente viene eseguito soltanto durante la stagione di raffrescamento che prevede un setpoint estivo di 26°C per tutti gli edifici.

Nel secondo caso, i carichi interni sensibili e la generazione interna di vapore ( $G_v$ ) sono generati a partire dai profili orari giornalieri di riferimento proposti nel file Excel *archetypes\_final* in corrispondenza dei fogli di calcolo *IHG\_sensible* e *IHG\_latent*. Questi profili sono stati creati a partire dai valori indicati dalla normativa ISO 18523. In particolare, i carichi sensibili notturni si riferiscono soltanto alla presenza di persone e il valore indicato è una media tra il carico sensibile generato da un adulto e quello generato da un bambino in stato

di riposo; il carico sensibile nel corso della giornata comprende anche l'utilizzo di apparecchiature elettroniche e dell'illuminazione artificiale; la generazione interna di vapore, indicata in  $\text{kg}_v/\text{s}$ , dipende soltanto dalla presenza di persone e il valore indicato è stato calcolato come definito per il primo caso. Nel grafici seguenti sono indicati il profilo dei carichi interni sensibili e il profilo della generazione interna di vapore, distinguendo tra giorni feriali e giorni festivi.

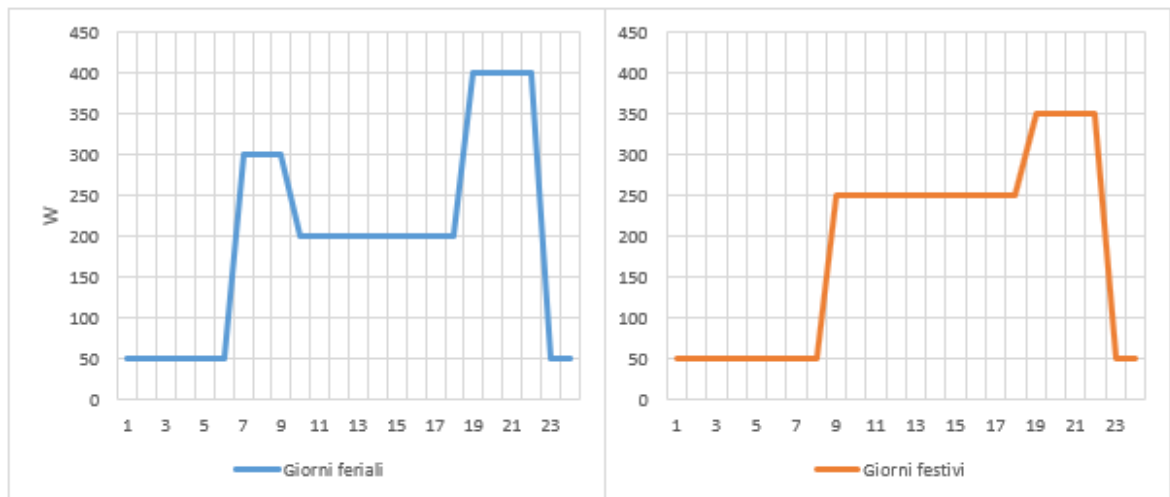


Figura 26: Profilo dei carichi interni sensibili nei giorni feriali e festivi

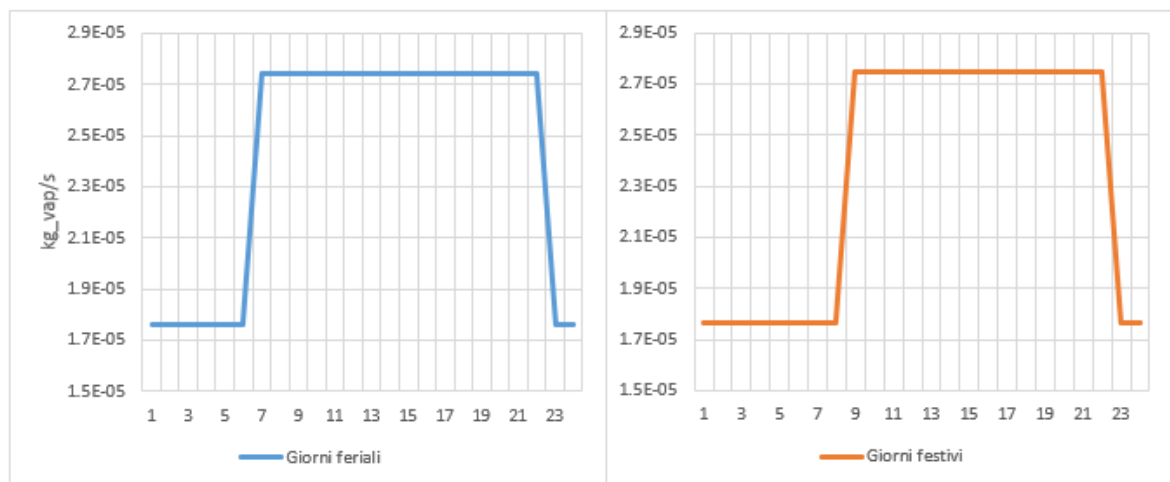


Figura 27: Profilo di generazione interna di vapore nei giorni feriali e festivi

I profili dei carichi interni, così definiti, sono stati utilizzati per generare una schedule annuale dei carichi interni sensibili espressa in W e una schedule annuale dei carichi latenti espressa in  $\text{kg}_v/\text{s}$ . In questo modo l'input generato da questa sezione del codice è equivalente in entrambi i casi.

Le impostazioni di sistema sono fissate nella sezione successiva, seguita soltanto dalla simulazione e dal post-processing. Anche in questo caso il codice è stato scritto in modo da consentire la scelta tra due metodi di immissione dei dati.

Nel primo caso è necessario caricare il file Excel *schedule\_system* contenuto nella cartella *Input\_5RIC*. All'interno del file sono presenti molteplici fogli di calcolo contenenti le seguenti informazioni di sistema:

- accensione dell'impianto nelle modalità di riscaldamento sensibile (indicata con 1) e raffrescamento sensibile (indicata con -1);
- temperature di setpoint invernali ed estive;
- umidità relativa di setpoint per la deumidificazione estiva;
- attivazione della deumidificazione estiva;
- infiltrazioni;
- ventilazione meccanica.

In questo modo, tutte le informazioni di sistema possono essere gestite dall'esterno e poi caricate nel codice sottoforma di schedule annuali. Il funzionamento dell'impianto, i valori di setpoint e gli indici di ricambio orario della ventilazione e delle infiltrazioni ( $h^{-1}$ ) sono stati definiti come per il modello dettagliato descritto al capitolo precedente.

Nel secondo caso le schedule di sistema possono essere generate all'interno dello script utilizzando le funzioni messe a disposizione dal linguaggio di programmazione purché le variabili in uscita da questa sezione abbiano lo stesso nome in entrambi i casi.

### **3.3.3 Simulazione energetica**

Il cuore del codice di calcolo è sicuramente la simulazione perché consente di calcolare il fabbisogno energetico sensibile e latente per ciascun edificio oggetto di studio, tuttavia si ricordi che la definizione e il caricamento dei dati di input è una fase necessaria e fondamentale per la corretta esecuzione della simulazione energetica. L'analisi degli output dipende molto dalla qualità dei dati di input. Per questo motivo si consiglia di prestare particolare attenzione alla compilazione dei dati nella fase di pre-processing.

La simulazione prevede diversi step che vengono elencati nei paragrafi seguenti.

### 3.3.3.1 Calcolo dei carichi solari

La simulazione dinamica comincia con il calcolo del carico termico solare secondo quanto riportato nella normativa EN ISO 13790. Il flusso termico generato dal carico solare attraverso un generico elemento può essere espresso dalla seguente equazione:

$$\phi_{sol,k} = F_{sh,ob,k} A_{sol,k} I_{sol,k} - F_{r,k} \phi_{r,k} \quad (3.13)$$

dove  $F_{sh,ob,k}$  è il fattore di ombreggiamento dovuto alla presenza di ostacoli esterni;  $A_{sol,k}$  è l'area effettiva esposta alla radiazione solare dotata di una precisa orientazione e inclinazione;  $I_{sol,k}$  è la radiazione solare incidente sulla superficie;  $F_{r,k}$  è il fattore di forma tra il componente dell'edificio e il cielo (0.5 per le superfici verticali e 1 per le superfici orizzontali) e  $\phi_{r,k}$  è il flusso termico causato dallo scambio termico radiante tra il componente e il cielo.

La relazione valida per il calcolo dell'area effettiva esposta alla radiazione solare dipende dal tipo di componente dell'edificio, se vetrato o opaco. Di seguito è indicata l'equazione valida nel primo caso:

$$A_{sol,gl} = F_{sh,gl} g_{gl} (1 - F_F) A_{w,p} \quad (3.14)$$

dove  $F_{sh,gl}$  è il fattore di ombreggiamento dovuto alla presenza di dispositivi mobili;  $g_{gl}$  è il fattore solare del vetro della finestra;  $F_F$  è la frazione di telaio della finestra e  $A_{w,p}$  è l'area dell'elemento vetrato.

Il carico solare attraverso le superfici opache, durante la stagione di riscaldamento, è una piccola parte del carico solare totale ed è parzialmente compensato dalle dispersioni radiative verso il cielo; nonostante questo, per superfici scure, scarsamente isolate o rivolte verso il cielo, il suo contributo può diventare rilevante. Nel caso in cui il componente dell'edificio sia una superficie opaca è valida la seguente equazione:

$$A_{sol,op} = \alpha_{s,c} R_{se} U_c A_c \quad (3.15)$$

dove  $\alpha_{s,c}$  è il coefficiente di assorbimento della radiazione solare del componente;  $R_{se}$  è la resistenza superficiale esterna;  $U_c$  è la trasmittanza termica dell'elemento opaco e  $A_c$  è l'area totale del componente.

Il flusso termico verso il cielo  $\phi_{r,k}$  si riferisce soltanto ai componenti opachi e può essere calcolato con l'espressione seguente:

$$\phi_r = R_{se} U_c A_c h_r \Delta\theta_{er} \quad (3.16)$$

dove  $h_r$  è il coefficiente di scambio termico radiativo e  $\Delta\theta_{er}$  è la differenza media tra la temperatura dell'aria esterna e la temperatura apparente del cielo.

Nel codice di calcolo queste equazioni sono state riportate così come definite da normativa, fatta eccezione per il fattore solare del vetro  $g_{gl}$ . A tal proposito è stata implementata una *function* per il calcolo del profilo di  $g_{gl}$  in funzione dell'angolo di incidenza. La normativa definisce il fattore solare del vetro come il rapporto mediato nel tempo tra l'energia entrante attraverso l'elemento vetrato e l'energia incidente su di esso. Il valore nominale, indicato nelle schede tecniche delle finestre e disponibile per questo caso studio, si riferisce al caso in cui la radiazione solare sia perpendicolare al vetro. Poiché questa condizione non è valida in un'intera giornata, la normativa suggerisce di applicare un fattore di correzione ( $F_w$ ) unico.

Applicando il fattore di correzione è stata riscontrata una discordanza tra il carico solare attraverso le finestre  $\phi_{sol,gl}$  calcolato con il modello RC e quello calcolato con il metodo dettagliato in ambiente EnergyPlus, in un generico giorno dell'anno. D'altronde, la normativa stessa spiega che il fattore solare, nel caso in cui si lavori con un metodo dettagliato, debba essere determinata di ora in ora in funzione della posizione del Sole e del contributo della radiazione diffusa e riflessa dal terreno. Per ottimizzare il codice di calcolo, viste queste premesse, si è stabilito di implementare la *function* per un calcolo più preciso e dettagliato del fattore solare.

La *function* in questione, denominata *SimpleGlazingModel*, implementa il metodo semplificato utilizzato da EnergyPlus in grado di convertire l'intera finestra in una finestra equivalente costituita da un unico strato. Le proprietà dello strato equivalente sono determinate con il metodo delineato da *Arasteh, Kohler e Griffith* [37]. La *function* necessita dei seguenti dati di input:

- la trasmittanza termica totale dell'elemento vetrato U,
- il fattore solare nominale del vetro SHGN;
- il coefficiente di trasmissione nel visibile dell'elemento vetrato.

Il modello si articola nei seguenti step:

1. determinazione della resistenza termica totale della finestra comprensiva delle resistenze superficiali esterna ed interna, calcolate con le correlazioni fornite dal metodo in funzione della trasmittanza termica totale dell'elemento vetrato;
2. determinazione dello spessore dello strato equivalente in funzione della resistenza termica del solo strato;
3. determinazione della conduttività termica dello strato equivalente;
4. determinazione del coefficiente di trasmissione dello strato equivalente per un angolo di incidenza nullo in funzione del fattore solare nominale e della trasmittanza termica totale della finestra definite in input;
5. determinazione del coefficiente di riflessione dello strato equivalente preceduta dal calcolo della resistenza termica superficiale esterna ed interna in condizioni estive;
6. determinazione delle proprietà dello strato nello spettro del visibile;
7. determinazione delle curve della fattore solare per diversi valori dell'angolo di incidenza attraverso l'uso di una serie di correlazioni messe a disposizione dal metodo in funzione di U e del SHGN. Esistono dieci differenti correlazioni per il calcolo dei coefficienti di trasmissione e di riflessione. L'interpolazione delle correlazioni permette di identificare 28 differenti casi, schematizzati nella figura seguente.

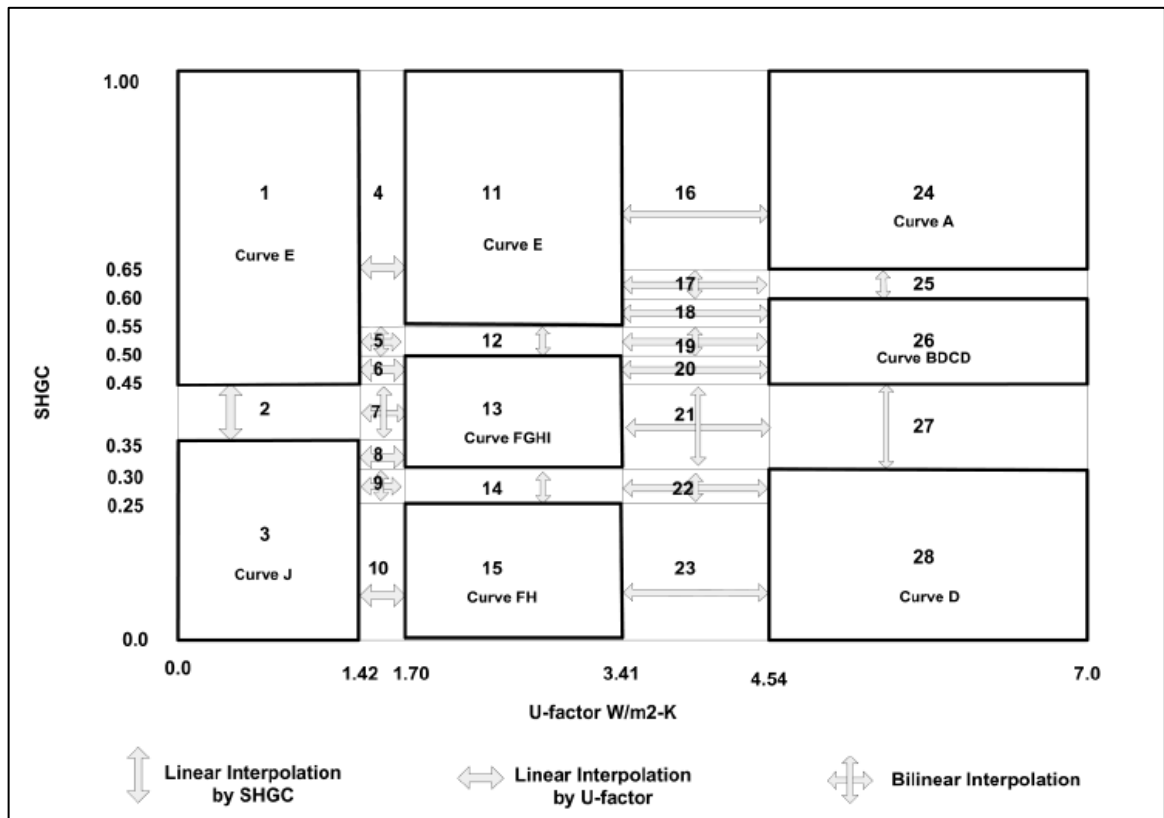


Figura 28: diagramma per il calcolo delle correlazioni di T ed R in funzione di U e SHGN - EngineeringReference

L'output principale della *function* è il profilo del fattore solare del vetro che viene utilizzato per generare un vettore annuale di  $g_{gl}$  in funzione del reale valore dell'angolo di incidenza. Questo permette di calcolare di ora in ora il valore dell'area effettiva esposta alla radiazione solare  $A_{sol,gl}$ . Inoltre, non potendo definire un angolo di incidenza orario per la radiazione diffusa, il metodo appena descritto è stato applicato alla sola radiazione diretta. Tuttavia, si è stabilito di indicare un angolo di incidenza equivalente per la radiazione diffusa pari a  $70^\circ$ . Di conseguenza, il calcolo del carico solare è stato effettuato separatamente per la radiazione diretta e diffusa.

### 3.3.3.2 *Calcolo del fabbisogno energetico sensibile*

Il calcolo del fabbisogno energetico sensibile degli edifici è preceduto soltanto dal calcolo del carico solare, come spiegato nel precedente paragrafo, dal caricamento dei carichi interni sensibili e dal calcolo dei carichi distribuiti sui tre nodi,  $\phi_{ia}$ ,  $\phi_{st}$  e  $\phi_m$  con le equazioni descritte al paragrafo 3.3

Successivamente, un ciclo distingue tre possibili casi in funzione della schedule di funzionamento dell'impianto:

1. funzionamento dell'impianto di riscaldamento (indicato con 1);
2. funzionamento dell'impianto di raffrescamento (indicato con -1);
3. impianto spento (indicato con 0).

Nei primi due casi viene utilizzata la function *buildingLS\_IC\_Tset* che permette di calcolare di ora in ora il fabbisogno energetico sensibile, la temperatura al nodo superfici e la massa termica fissando la temperatura di setpoint al nodo aria. La function necessita dei seguenti input:

- parametri del modello, ovvero i coefficienti di dispersione termica;
- carichi termici interni e solari distribuiti;
- temperatura esterna e temperatura di immissione dell'aria per ventilazione ed infiltrazione;
- massa termica all'istante temporale precedente;
- temperatura di setpoint del nodo aria;
- periodo di simulazione.

Al termine del calcolo è stato inserito un controllo che permette di evitare situazioni di raffrescamento invernale o riscaldamento estivo. Il fabbisogno energetico appena calcolato dovrebbe essere positivo in inverno (calore da immettere al nodo aria) e negativo in estate (calore da estrarre dal nodo aria). Qualora il calcolo restituisca un valore di segno opposto,



viene azzerato il fabbisogno energetico sensibile per quell'ora e si procede al calcolo della temperatura effettiva al nodo aria con la function *buildingLS\_IC\_phiset* che permette di calcolare la temperatura al nodo aria fissando il carico termico sensibile (in questo caso nullo). Entrambe le function si basano sulle equazioni di bilancio termico definite al paragrafo 3.3.1

Nel terzo caso viene utilizzato soltanto la function *buildingLS\_IC\_phiset* per il calcolo della temperatura al nodo aria durante lo spegnimento dell'impianto.

### 3.3.3.3 *Calcolo del fabbisogno energetico latente*

La determinazione del fabbisogno energetico latente rappresenta una delle componenti aggiuntive nel codice di calcolo. La normativa di riferimento ISO 13790 non prevede il calcolo del carico latente, nonostante questo possa essere molto rilevante soprattutto in edifici non residenziali destinati ad uffici o ad aule didattiche. Il calcolo viene eseguito in cascata al calcolo del carico sensibile e permette di effettuare la deumidificazione, ovvero il controllo dell'umidità relativa interna durante la stagione di raffrescamento. Il calcolo viene eseguito tutto l'anno nonostante l'umidificazione invernale non sia prevista.

Un ciclo distingue due possibili casi in funzione della schedule della deumidificazione:

1. deumidificazione spenta (indicata con 0);
2. deumidificazione attiva (indicata con 1).

Il primo caso si riferisce alla stagione invernale, alle stagioni intermedie e alle ore di spegnimento della deumidificazione estiva. Il carico latente viene fissato pari a zero e si procede al calcolo dell'umidità relativa interna  $RH_{int}$  con le seguenti espressioni:

$$x_{int} = x_{ext} + G_v/G_{da} \quad (3.17)$$

$$p_{int} = p_{atm} \cdot x_{int}/(0.622 + x_{int}) \quad (3.18)$$

$$RH_{int} = p_{int}/p_{int,sat}(\theta_{int}) \quad (3.19)$$

dove  $x_{int}$  è l'umidità specifica interna espressa in  $kg_v/kg_{as}$ ,  $x_{ext}$  è l'umidità specifica esterna espressa in  $kg_v/kg_{as}$ ,  $G_v$  è la generazione interna di vapore espressa in  $kg_v/s$ ,  $G_{da}$  è la portata di aria di ventilazione espressa in  $kg_{as}/s$ ,  $p_{atm}$  è la pressione atmosferica espressa in Pa,  $p_{int}$  è la pressione interna di vapore espressa in Pa e  $p_{int,sat}$  è la pressione interna di saturazione calcolata come suggerito dalla normativa ISO 13788:2012 [38] in funzione della temperatura al nodo aria calcolata allo stesso intervallo temporale ( $\theta_{int}$ ).

Nel secondo caso viene fissato un valore orario di setpoint dell'umidità relativa interna con il quale si calcola l'umidità specifica interna di setpoint con le espressioni appena descritte, seguita dal bilancio di vapore descritto al paragrafo 3.3.1 .

Al termine del calcolo è stato inserito un controllo che permette di evitare l'umidificazione estiva qualora l'umidità relativa interna calcolata sia minore del valore di setpoint. In questa evenienza, il carico latente viene annullato e l'umidità relativa interna viene calcolata come nel precedente caso.

#### **3.3.3.4 Calcolo del fabbisogno energetico dell'Unità di Trattamento Aria**

Una delle ipotesi di efficientamento energetico trattate nel Capitolo 5 riguarda l'introduzione di un recuperatore di calore nell'impianto di Unità di Trattamento Aria (UTA). In questo caso il codice di calcolo è stato modificato in modo da inglobare anche il calcolo del fabbisogno delle batterie della UTA al termine del calcolo del fabbisogno energetico latente per valutare il risparmio energetico conseguito rispetto allo stato di partenza. A tal proposito è stata creata la function *AHU\_Dem\_V2* che necessita in input dei seguenti dati:

- portata di ventilazione;
- temperatura e umidità specifica dell'ambiente esterno, della zona e di immissione;
- schedule di funzionamento della UTA;
- quota di ricircolo;
- efficienza sensibile e latente del recuperatore.

La function fornisce in output la temperatura, l'umidità specifica e l'entalpia all'uscita di ogni batteria della UTA e il fabbisogno di ciascuna di esse. Di seguito sono descritte le fasi principali della function:

1. verifica delle condizioni di saturazione per l'esterno, per la zona termica e per l'immissione con l'utilizzo della function *CheckSatCond*;
2. verifica della corretta funzionalità del recuperatore, attivazione di un by-pass in caso di *free-heating* e *free-cooling*;
3. calcolo della temperatura, dell'umidità specifica e dell'entalpia al termine del ricircolo;
4. definizione della modalità di trattamento dell'aria in funzione del controllo dell'umidità dell'aria;
5. calcolo del fabbisogno energetico delle batterie nel caso in cui il controllo dell'umidità sia attivo (caso 1) o spento (caso 2) durante il funzionamento dell'impianto di riscaldamento (indicato con 1), di raffrescamento (indicato con -1) o durante lo

spegnimento dell'impianto (indicato con 0). Possono verificarsi, quindi, sei casi distinti, ognuno dei quali può implicare l'attivazione o meno di una determinata batteria. In questa fase sono stati inseriti diversi controlli che permettono di evitare la deumidificazione invernale e l'umidificazione estiva.

A titolo d'esempio, nelle figure seguenti è riportato il diagramma psicrometrico Carrier con le trasformazioni tipiche dell'aria umida in condizioni invernali ed estive.

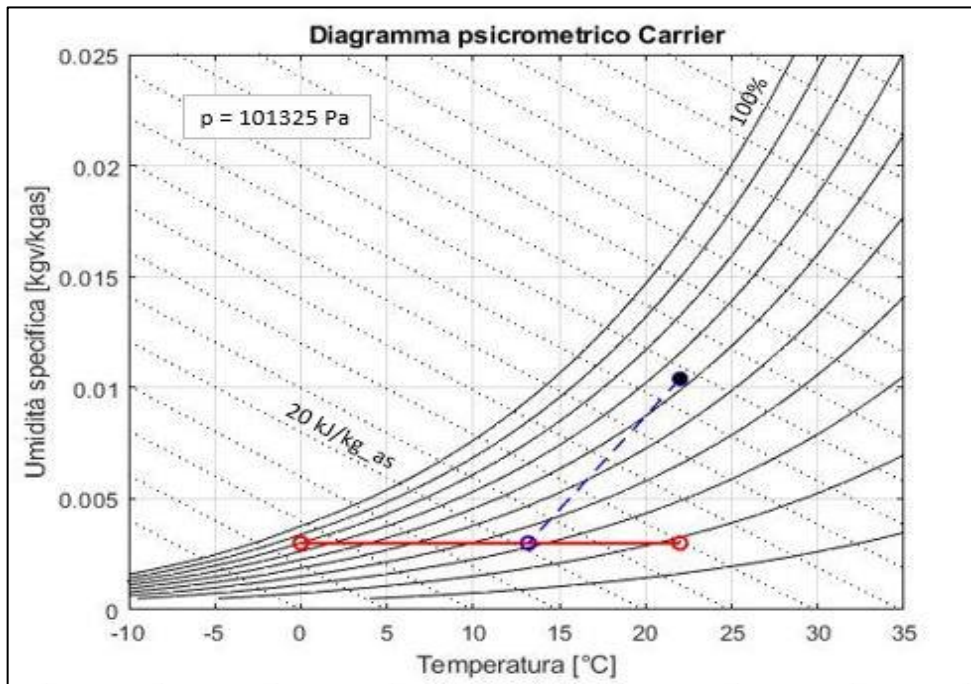


Figura 29: Funzionamento della UTA in condizioni tipiche invernali

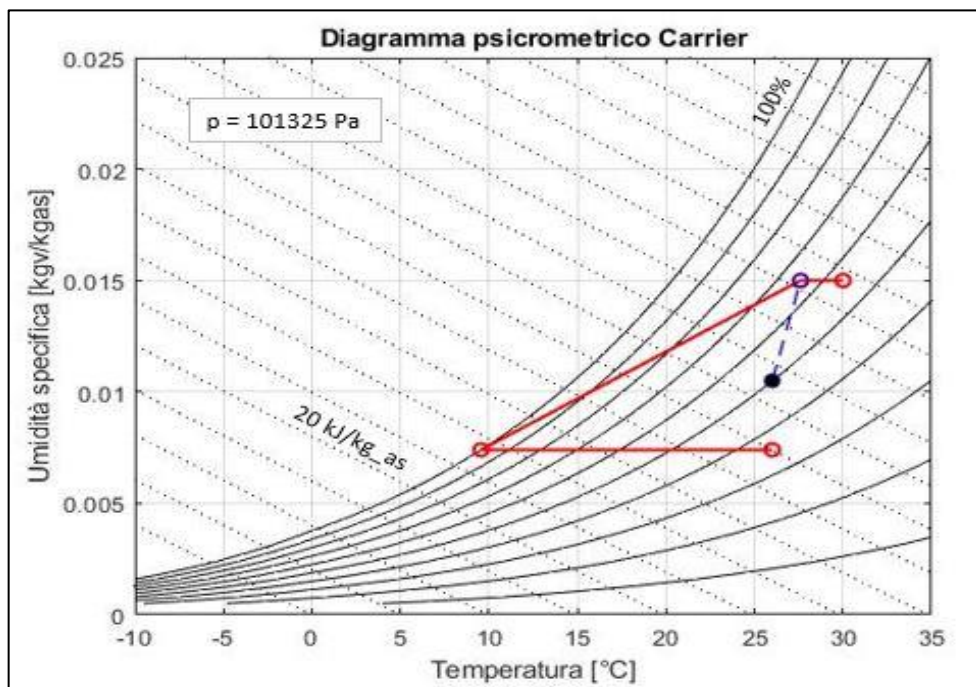


Figura 30: Funzionamento della UTA in condizioni tipiche estive

Il retrofit comprende l'installazione di un recuperatore a flussi incrociati in grado di recuperare solo il calore sensibile con un'efficienza pari al 60% e l'assenza del ricircolo. Inoltre, come si può osservare dai grafici, il controllo dell'umidità viene effettuato soltanto in modalità estiva. Durante l'inverno la batteria di preriscaldamento e il saturatore adiabatico sono disattivati, l'unica batteria in funzione è quella di post riscaldamento che fornisce il calore necessario all'aria per raggiungere la temperatura di immissione desiderata nella zona termica.

Il fabbisogno energetico della UTA corrisponde alla somma del fabbisogno di ciascuna batteria che può essere calcolato con le espressioni seguenti:

$$\phi_{bat\_sens} \cong G_{da} c_{p,air} (T_2 - T_1) \quad (3.20)$$

$$\phi_{bat\_lat} = G_{da} r_0 (x_2 - x_1) \quad (3.21)$$

$$\phi_{bat} = G_{da} (h_2 - h_1) \quad (3.22)$$

Le equazioni che regolano il funzionamento del recupero termico e del ricircolo sono le seguenti:

$$\varepsilon_{sens} = \frac{(T_{hr} - T_{ext})}{(T_{air} - T_{ext})} \quad \varepsilon_{lat} = \frac{(x_{hr} - x_{ext})}{(x_{air} - x_{ext})} \quad (3.23)$$

$$r_{mix,h} = \frac{(h_{mix} - h_{air})}{(h_{hr} - h_{air})} \quad r_{mix,x} = \frac{(x_{mix} - x_{air})}{(x_{hr} - x_{air})} \quad (3.24)$$

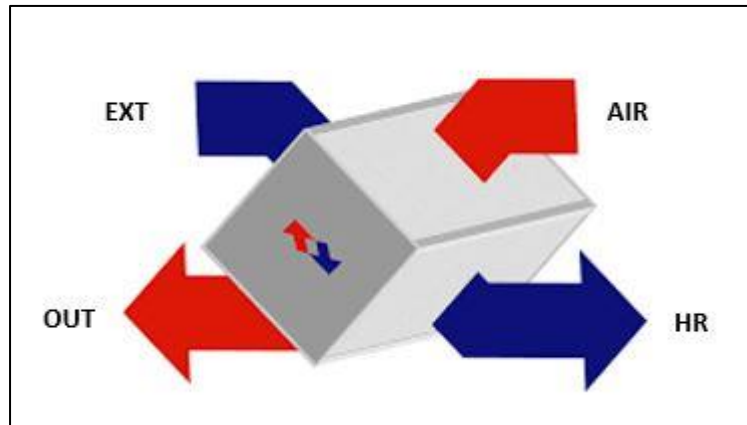


Figura 31: Recuperatore a flussi incrociati

### 3.3.4 Fase di post-processing

La realizzazione di un buon modello energetico è un ottimo punto di partenza ma non è sufficiente per cogliere i vantaggi conseguiti dall'utilizzo del modello stesso. A tale scopo è

necessario un lavoro di post-processing e di analisi dei risultati. Anche questo aspetto è stato trattato nel processo di miglioramento del codice di calcolo.

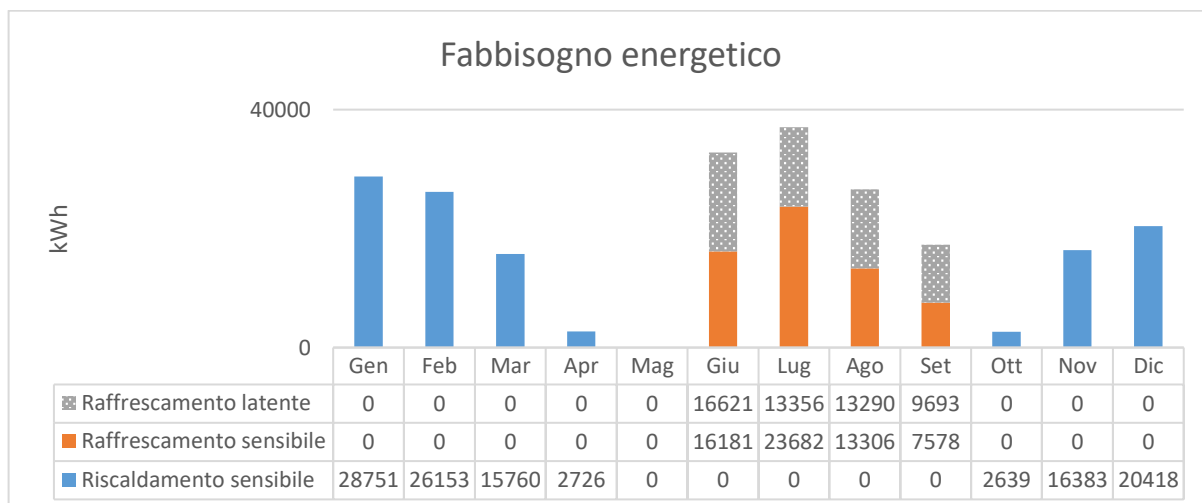
Al termine della simulazione energetica le variabili di output principali vengono salvate all'interno di un file di testo denominato con il nome della variabile, preceduto dalla data di avvenuta simulazione. Le variabili in questione sono le seguenti:

- fabbisogno energetico sensibile in Wh;
- temperatura al nodo aria in °C;
- fabbisogno energetico latente in Wh;
- umidità relativa interna in %;

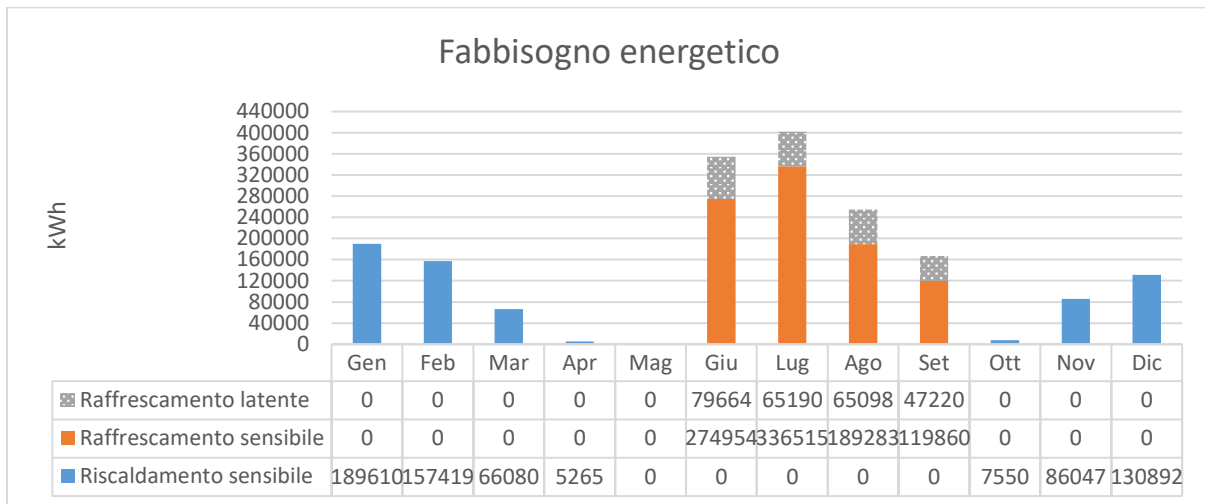
In questo modo si può tener traccia delle simulazioni effettuate anche a distanza di tempo. Inoltre, è stata aggiunta la possibilità di visualizzare dei grafici riguardanti le variabili di output. In particolare, vengono generati due grafici per ogni edificio contenenti rispettivamente le prime due e le ultime due variabili sopracitate. I grafici possono essere generati inserendo il numero associato agli edifici nel vettore *plottedBuildings* nella sezione dedicata. In questo modo, al termine della simulazione, si generano soltanto i grafici richiesti dall'utente.

Nelle tabelle seguenti sono riportati il fabbisogno energetico sensibile invernale ed estivo e il fabbisogno energetico latente per ognuno degli edifici considerati calcolati dal modello RC. Per quanto riguarda il periodo di riscaldamento e di raffrescamento, valgono le stesse ipotesi fatte al paragrafo 2.2.6

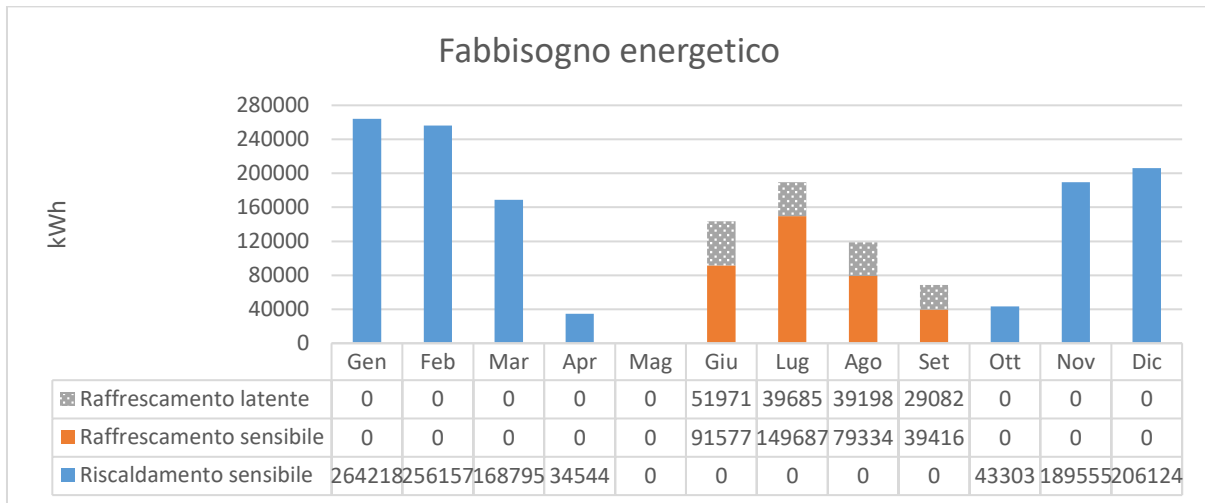
- Complesso Didattico Piovego:



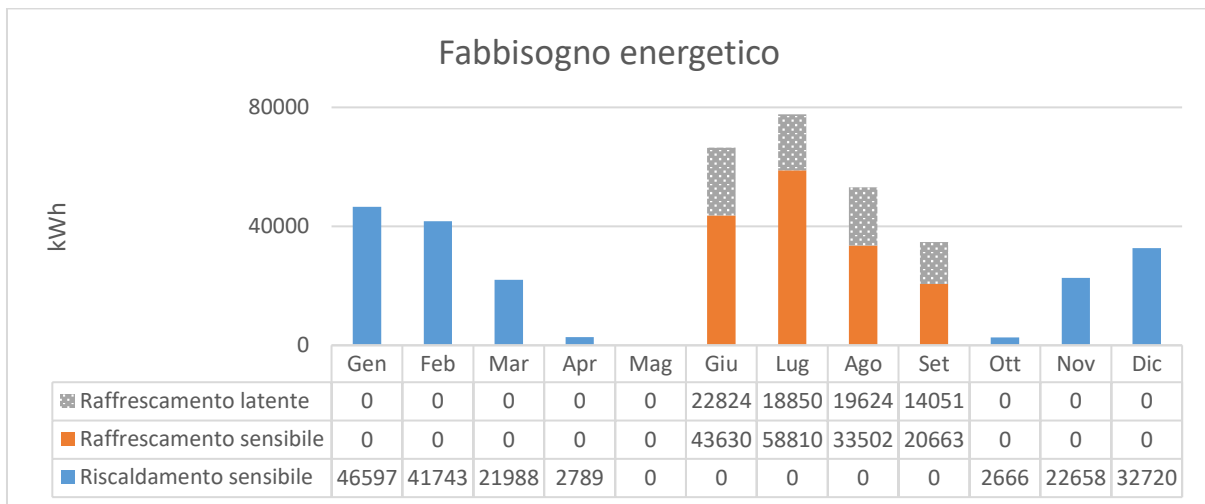
- Complesso pluridipartimentale di Biologia "A. Vallisneri":



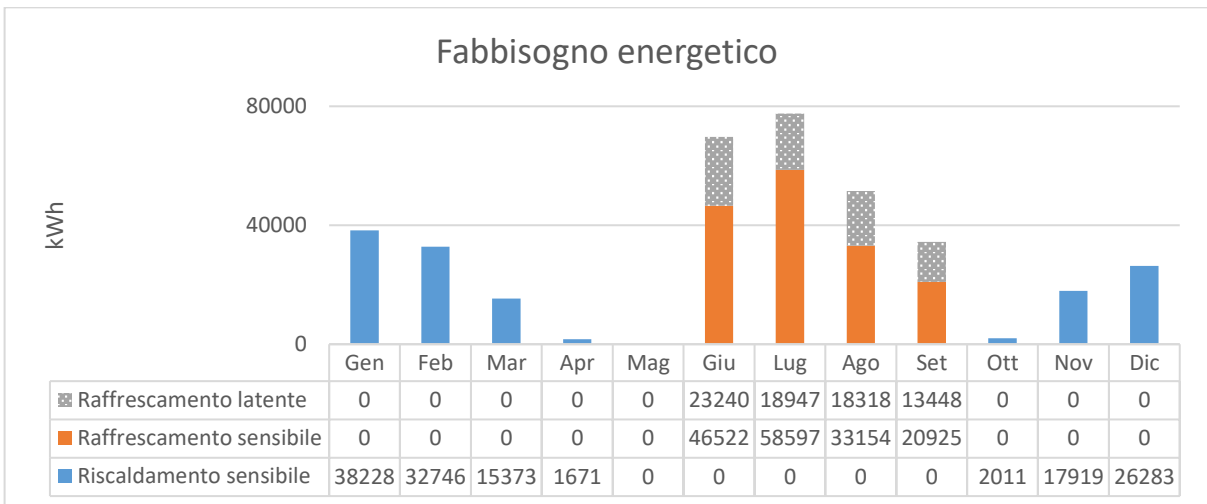
- Ex Complesso Dipartimentale di Ingegneria Meccanica:



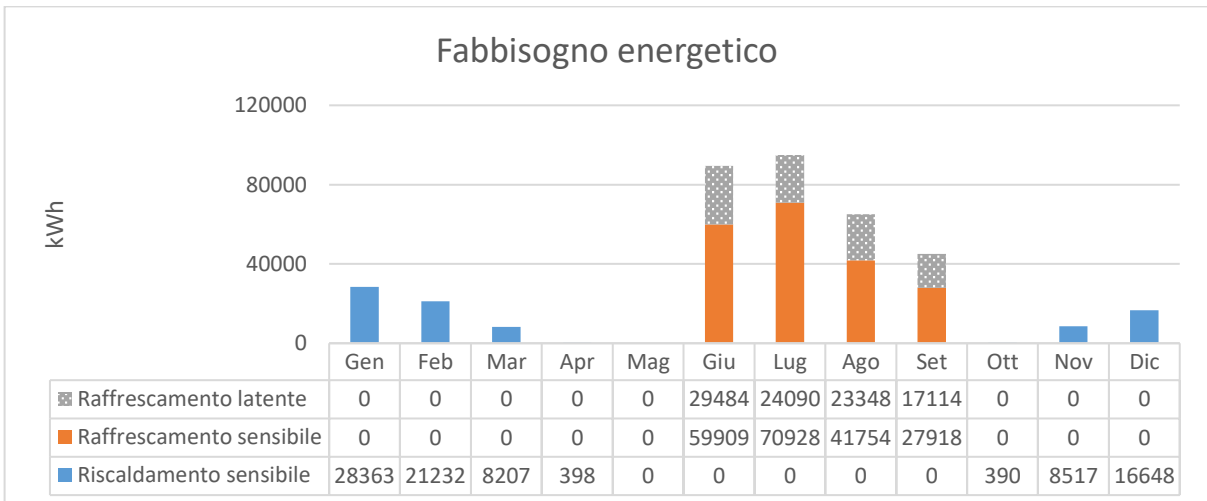
- Psicologia 1:



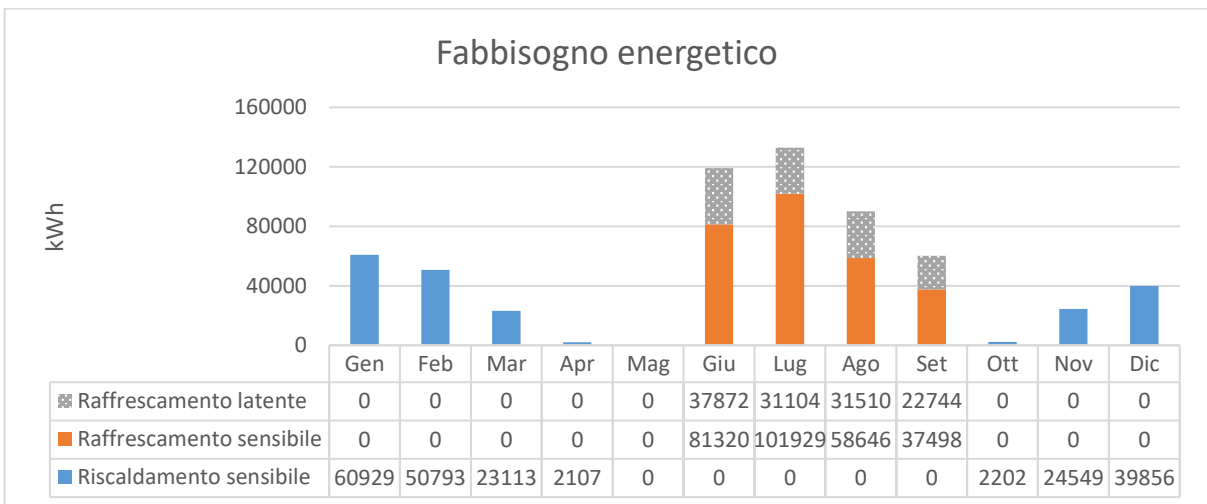
- Psicologia 2:



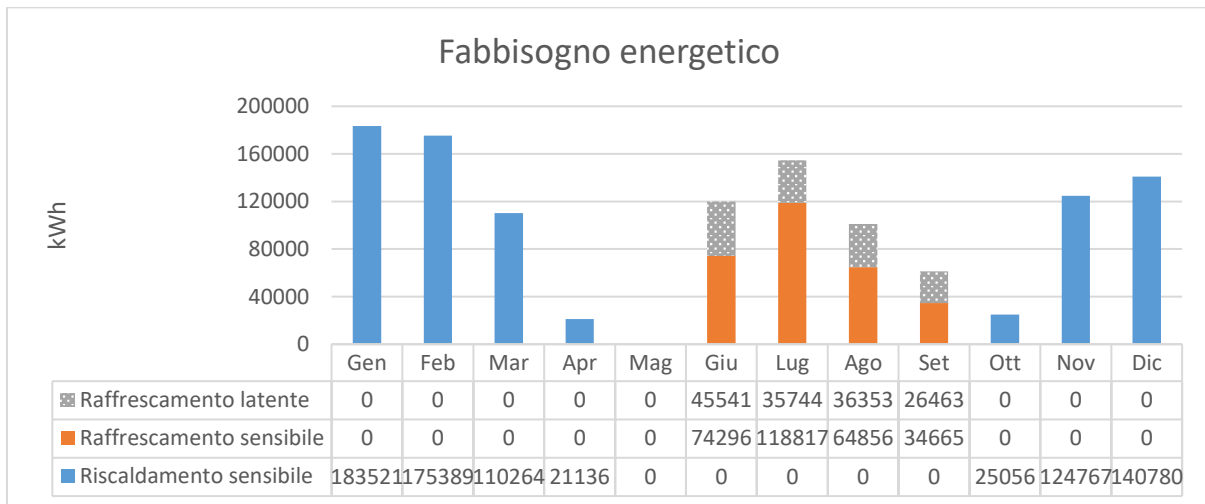
- Centro Linguistico di Ateneo:



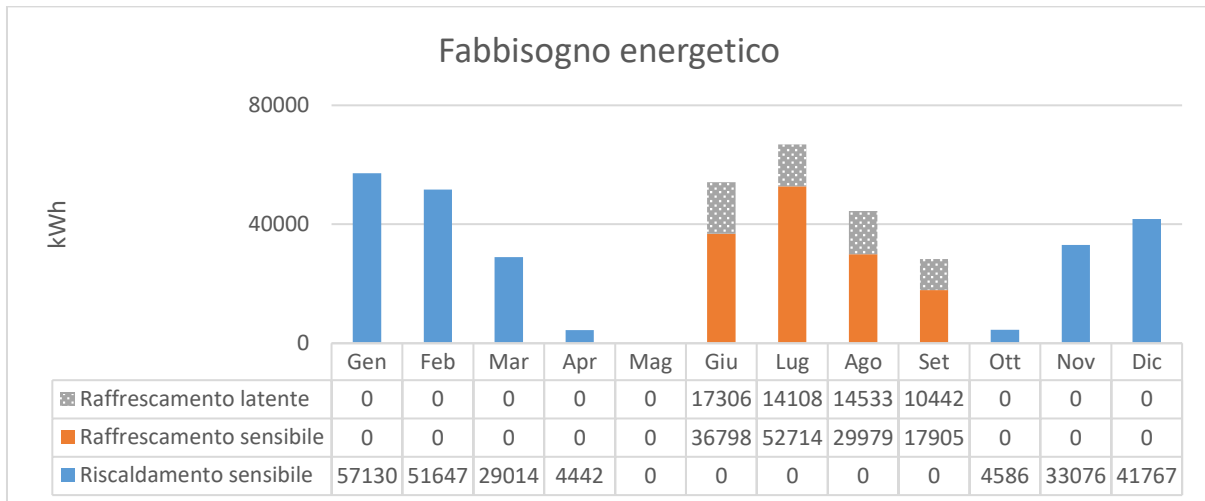
- Dipartimento di Geoscienze:



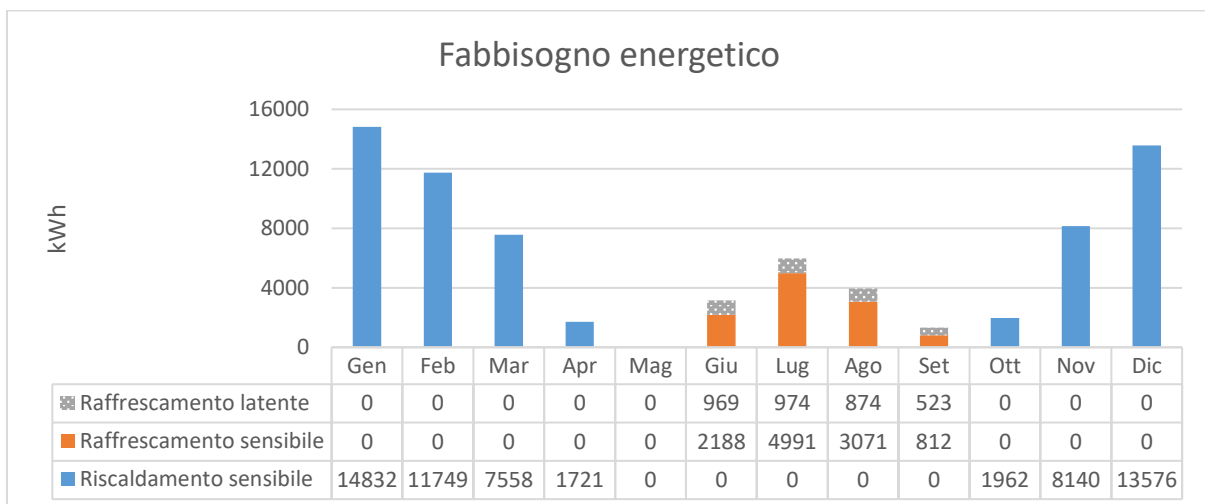
- Dipartimento di Ingegneria Industriale:



- Dipartimento di Ingegneria Informatica:

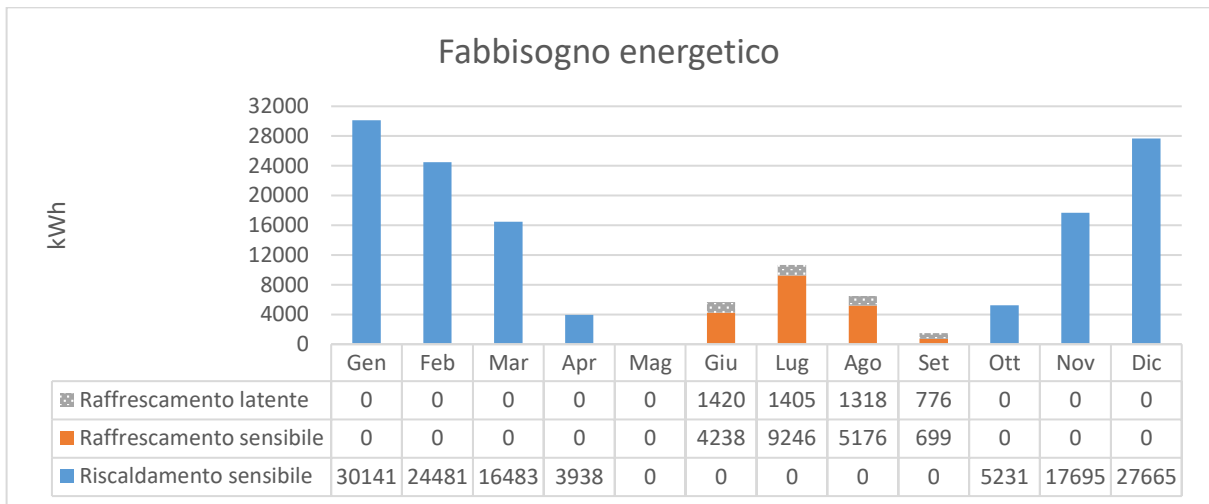


- Edificio residenziale Nord:

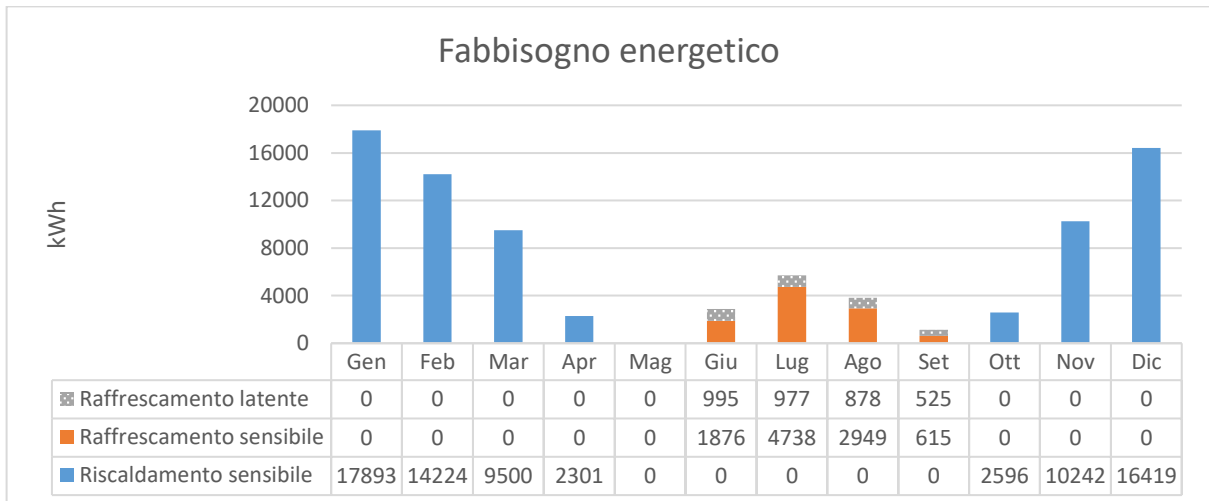




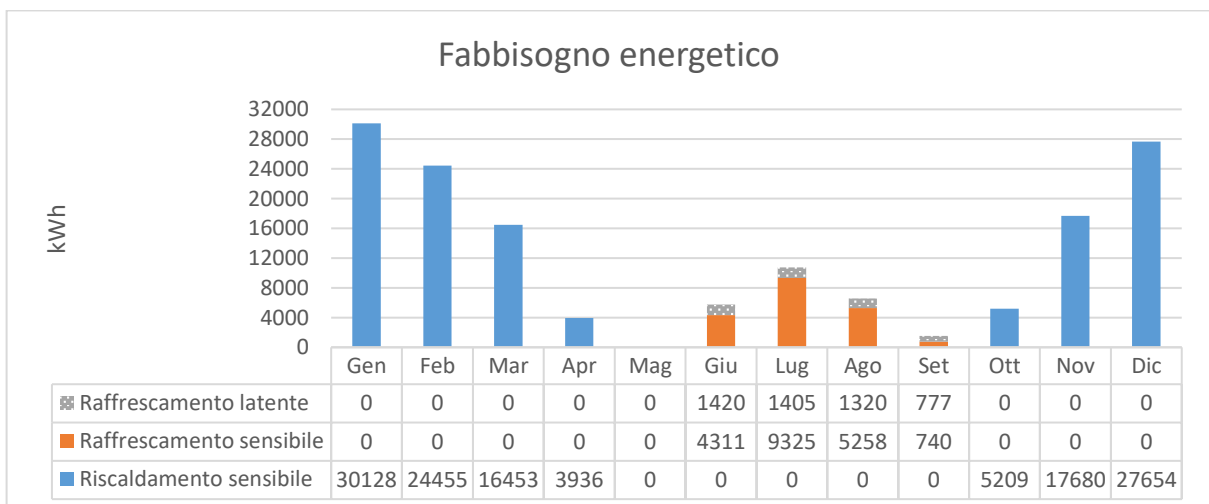
- Edificio residenziale Est:



- Edificio residenziale Sud:



- Edificio residenziale Ovest:



La tabella seguente riassume quanto descritto nei precedenti grafici, riportando il fabbisogno energetico invernale ed estivo totale per ciascun edificio. I valori indicati nella tabella verranno confrontati nel prossimo capitolo con quelli ottenuti dalle simulazioni in ambiente EnergyPlus e riportati al paragrafo 2.2.6

*Tabella 3: Risultati conseguiti con il modello dinamico semplificato a Resistenza-Capacità*

Edificio	Fabbisogno invernale	Fabbisogno estivo	Fabbisogno invernale specifico	Fabbisogno invernale specifico
-	[kWh/anno]	[kWh/anno]	[kWh/(m <sup>2</sup> anno)]	[kWh/(m <sup>3</sup> anno)]
Complesso didattico Piovego	112829	113707	40.2	13.9
Complesso A. Vallisneri	642862	1177785	25.2	7.2
Ex Complesso Dipartimentale di Ingegneria Meccanica	1162696	519949	71.9	18.0
Psicologia 1	171161	231956	28.8	8.0
Psicologia 2	134232	233151	26.9	7.5
Centro Linguistico di Ateneo	83756	294545	10.4	3.7
Dipartimento di Geoscienze	203548	402623	21.0	6.2
Dipartimento di Ingegneria Industriale	780913	436735	69.5	16.2
Dipartimento di Ingegneria Informatica	221662	193785	47.5	12.8
Edificio residenziale Nord	59539	14402	69.5	21.1
Edificio residenziale Est	125635	24278	84.7	24.9
Edificio residenziale Sud	73175	13553	85.5	25.9
Edificio residenziale Ovest	125516	24555	84.6	24.9
<b>TOTALE</b>	<b>3897524</b>	<b>3681024</b>	<b>41.6</b>	<b>11.5</b>

## CAPITOLO 4

### ANALISI DEI RISULTATI E CONFRONTO TRA I DUE MODELLI ENERGETICI

#### 4.1 Analisi dei risultati

I modelli energetici valutati in questo elaborato sono stati adoperati per il calcolo del fabbisogno energetico di alcuni edifici del distretto universitario di Padova. Dopo aver descritto, nei capitoli precedenti, le fasi della modellizzazione con entrambi i metodi di calcolo, in questo capitolo si intende confrontare e analizzare i risultati ottenuti al fine di trarne delle considerazioni sulla propria validità. Il confronto verrà effettuato distinguendo gli edifici in funzione della propria destinazione d'uso (residenziali e non).

##### 4.1.1 Confronto per gli edifici non residenziali

Ai paragrafi 2.2.6 3.3.4 sono stati presentati rispettivamente i risultati ottenuti con il modello dinamico dettagliato sviluppato in ambiente EnergyPlus e quelli ottenuti con il modello dinamico semplificato a Resistenza-Capacità sviluppato in ambiente MATLAB.

Di seguito sono indicati i risultati globali conseguiti:

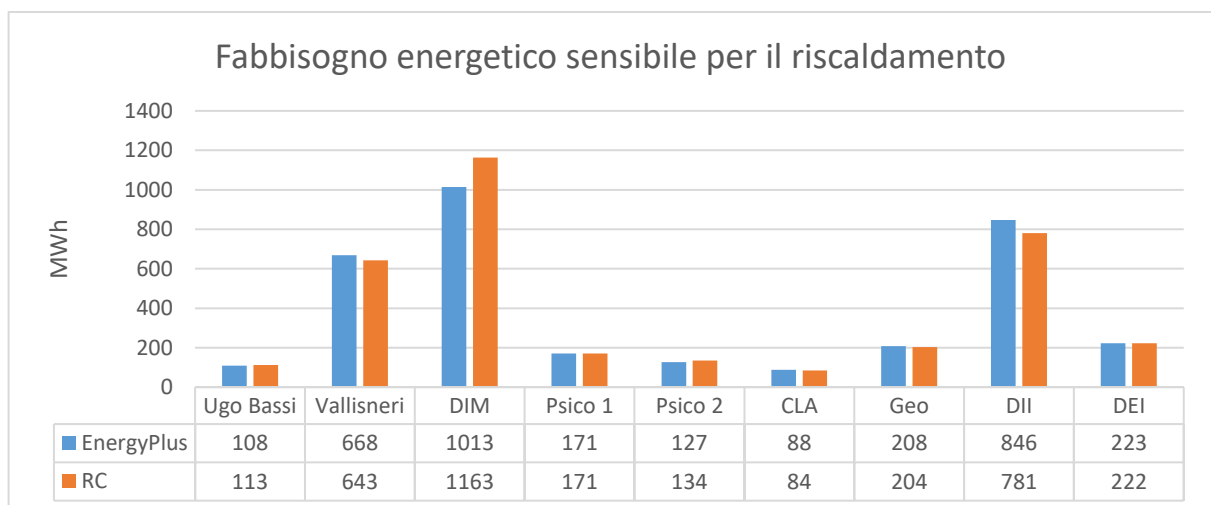


Figura 32: Fabbisogno energetico invernale calcolato con i due modelli energetici

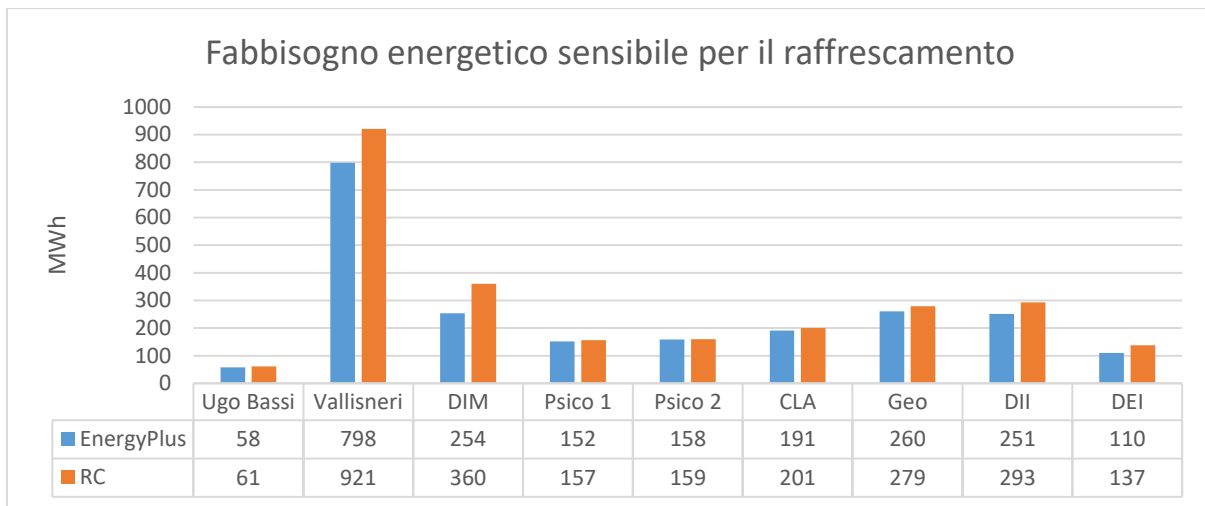


Figura 33: Fabbisogno energetico sensibile estivo calcolato con i due modelli

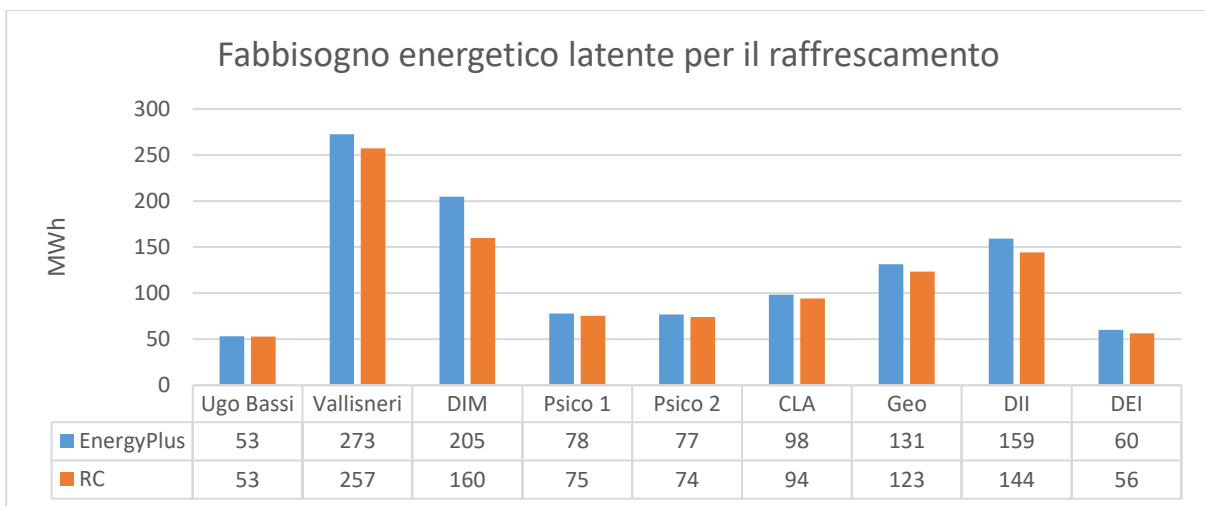


Figura 34: Fabbisogno energetico latente estivo calcolato con i due modelli

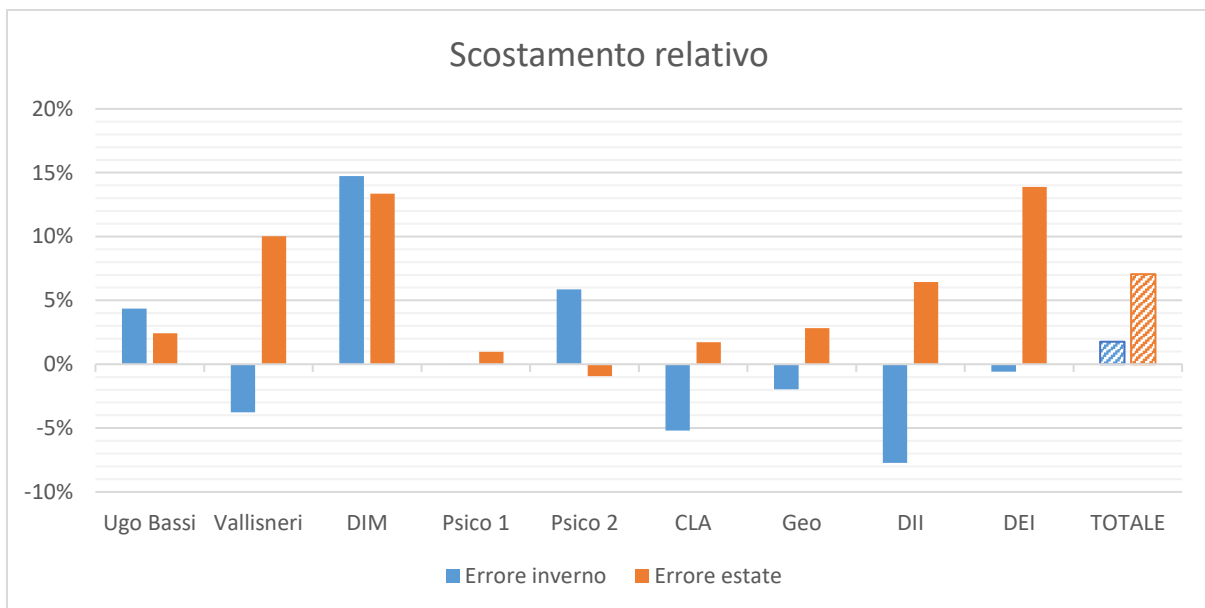


Figura 35: Errore relativo del modello RC rispetto al modello dettagliato in ambiente EnergyPlus

L'ultima tabella mostra gli scostamenti, in termini relativi, del fabbisogno risultante dal modello RC rispetto a quello riferito al modello in ambiente EnergyPlus. La natura del modello semplificato può portare ad errori più o meno rilevanti a seconda del caso, non potendo usufruire dello stesso grado di precisione del modello dettagliato. È importante, però, capire quali possano essere i motivi di tali scostamenti. Di seguito si cerca di darne una spiegazione considerando, edificio per edificio, le differenze tra i due modelli.

- *Complesso Didattico Piovego*: l'utilizzo del modello RC comporta un errore del 4% nella stagione di riscaldamento e del 2% nella stagione di raffrescamento (l'errore appare evidente solo nel calcolo del carico sensibile). Con il modello RC risulta che il volume riscaldato e l'area laterale totale, a causa della geometria semplificata, siano più grandi del 4% rispetto a quanto valutato in EnergyPlus. Questo implica una maggiore dispersione attraverso le pareti esterne e giustifica il fabbisogno invernale maggiore. L'elevato indice di ricambio orario per la ventilazione ( $2.2 \text{ h}^{-1}$ ) spiega perché il carico latente sia molto simile tra i due modelli, nonostante, generalmente, venga sottostimato dal modello RC per via del fatto che, basandosi su un bilancio stazionario, non tiene conto dell'accumulo di vapore durante le ore precedenti.
- *Complesso A. Vallisneri*: errore pari al -4% nella stagione di riscaldamento e al 10% nella stagione di raffrescamento con il modello RC. La geometria di questo edificio è molto complessa. Molte zone, nel corso dell'anno, risultano in ombra in EnergyPlus a causa del mutuo effetto di ombreggiamento tra le pareti stesse dell'edificio. Questo effetto non viene considerato nel modello semplificato e, inevitabilmente, produce dei risultati leggermente diversi.
- *Ex Complesso Dipartimentale di Ingegneria Meccanica*: errore pari al 15% nella stagione di riscaldamento e al 13% nella stagione di raffrescamento. La particolare geometria di questo complesso, costituito da più edifici collegati tramite corridoi su più livelli, genera uno scostamento maggiore che per gli altri edifici del distretto.
- *Psicologia 1*: scostamento trascurabile nella stagione di riscaldamento e pari all'1% nella stagione estiva. Il volume riscaldato è lo stesso in entrambi i modelli ma l'area laterale disperdente è maggiore del 4% nel modello RC. La maggiore superficie disperdente, in questo caso, non produce un errore significativo a causa del buon isolamento termico delle strutture.
- *Psicologia 2*: scostamento del 6% nella stagione invernale e del -1% nella stagione estiva (errore trascurabile sul dato sensibile). L'area laterale disperdente risulta il 10% più

ampia nel modello RC e giustifica l'errore invernale. La mancanza di un errore estivo può avere origine dal diverso metodo di calcolo della capacità termica con i due modelli, il cui valore influenza la velocità con cui, in estate, la radiazione solare agisce sulle pareti.

- *Centro Linguistico di Ateneo*: scostamento del -5% nella stagione di riscaldamento e del 2% nella stagione di raffrescamento. Nel modello RC l'area laterale disperdente risulta il 6% più ampia ma la radiazione solare attraverso gli elementi vetrati risulta maggiore. Il primo dato farebbe pensare ad un aumento del fabbisogno energetico invernale ma il secondo produce un effetto contrario. La combinazione dei due spiega il risultato conseguito.
- *Dipartimento di Geoscienze*: scostamento del -2% nella stagione invernale e del 3% nella stagione estiva. In questo caso la geometria semplificata del modello RC sottostima il volume riscaldato del 3% e l'area laterale disperdente del 10%. Questo implica una minore dispersione durante la stagione invernale e, al tempo stesso, un carico solare minore durante la stagione estiva che farebbe diminuire il fabbisogno energetico estivo. Lo scostamento estivo, quindi, più che dal carico solare, dipende dalla geometria. In EnergyPlus l'edificio presenta un piano interrato e due cavedi, elementi che non vengono considerati nel modello RC.
- *Dipartimento di Ingegneria Industriale*: errore del -8% nella stagione di riscaldamento e del 6% nella stagione di raffrescamento. L'area laterale disperdente è più piccola del 13% rispetto al modello in EnergyPlus, giustificando l'errore invernale. Inoltre, l'edificio, come altri, presenta una forma particolare, semplificata nel modello RC.
- *Dipartimento di Ingegneria Informatica*: errore trascurabile nella stagione invernale e pari al 14% nella stagione estiva. L'errore estivo dipende in particolar modo dalla geometria dell'edificio, costituito da tre corpi collegati tramite un corridoio al piano terra.

Il linea generale, osservando i grafici, si può notare che per ognuno degli edifici considerati si riscontra sempre una sovrastima del carico sensibile estivo e una sottostima del carico latente estivo. Il fatto che questo effetto sia comune a tutti gli edifici indica che il modello è stato applicato correttamente a ciascuno di essi. Inoltre, dall'analisi dei risultati si evince quanto sia importante l'input geometrico per la modellizzazione energetica. Gli edifici con forme particolari e complesse risultano quelli con il valore maggiore dello scostamento relativo.

#### 4.1.2 Confronto per gli edifici residenziali

Gli edifici residenziali meritano di essere valutati separatamente per diverse ragioni: i carichi interni sono distribuiti in modo completamente diverso e il numero di occupanti risulta sensibilmente minore; le schedule di impianto sono differenti; la ventilazione meccanica non è presente; le infiltrazioni sono descritte da schedule che tengono conto anche dell'apertura manuale delle finestre e i fabbisogni calcolati, tipicamente, presentano ordini di grandezza molto diversi dagli edifici non residenziali.

Nei grafici seguenti sono sintetizzati i risultati ottenuti dalla modellizzazione dei quattro edifici residenziali facenti parte del distretto "social housing":

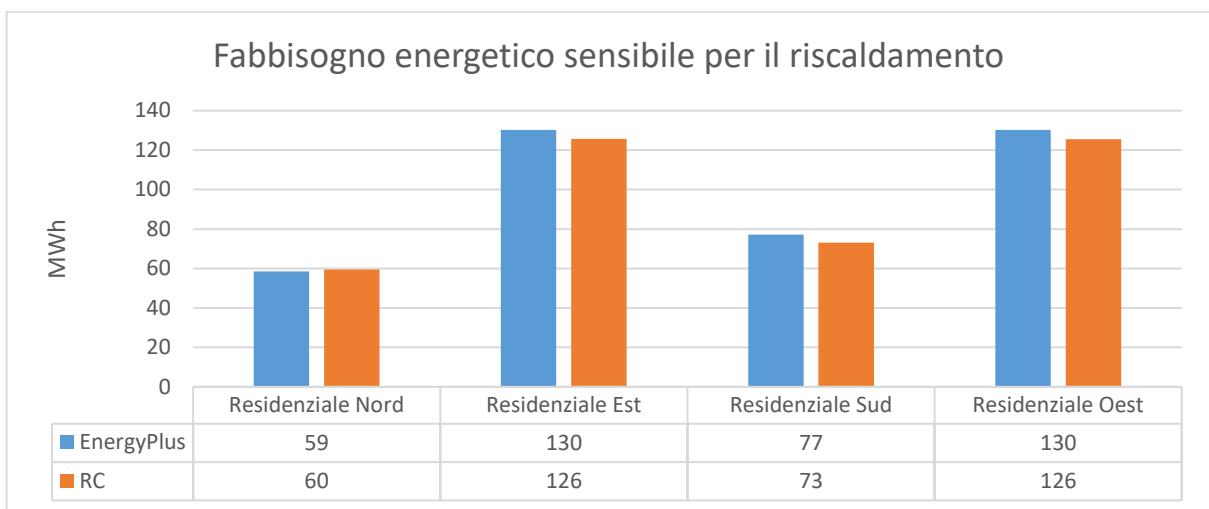


Figura 36: Fabbisogno energetico invernale calcolato con i due modelli energetici

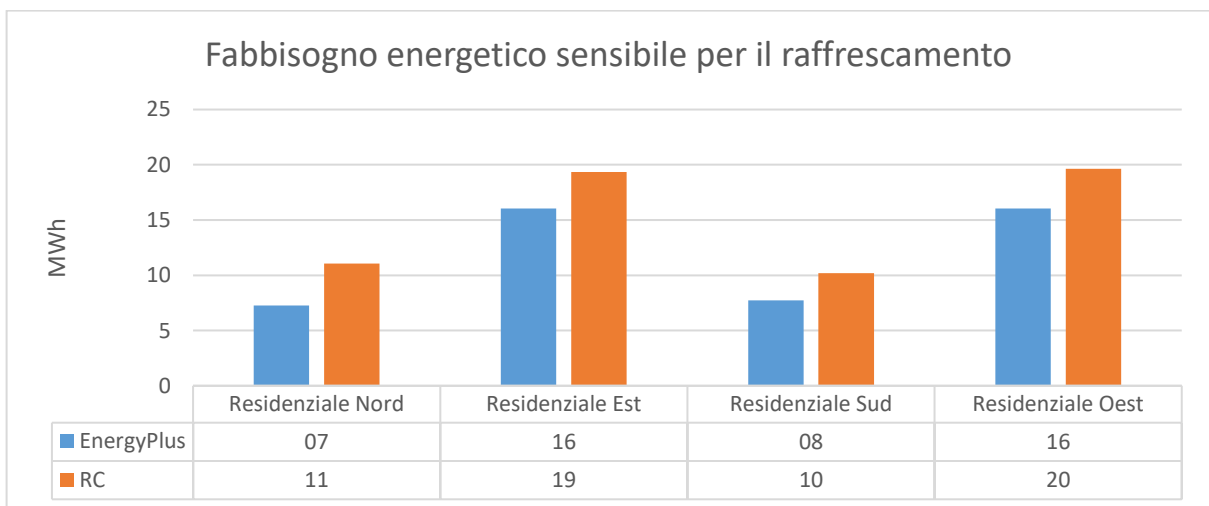


Figura 37: Fabbisogno energetico sensibile estivo calcolato con i due modelli energetici

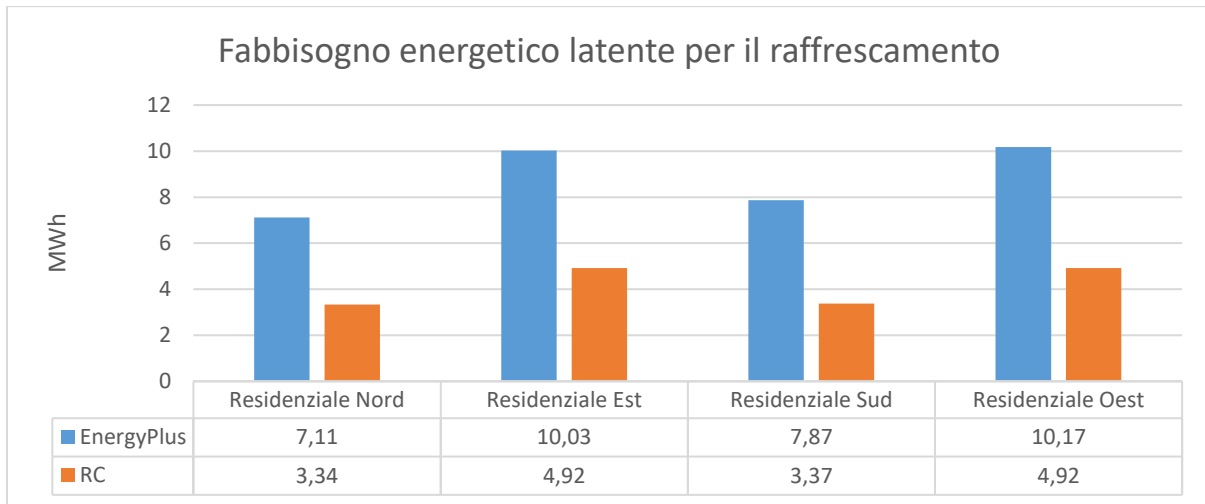


Figura 38: Fabbisogno energetico latente estivo calcolato con i due modelli

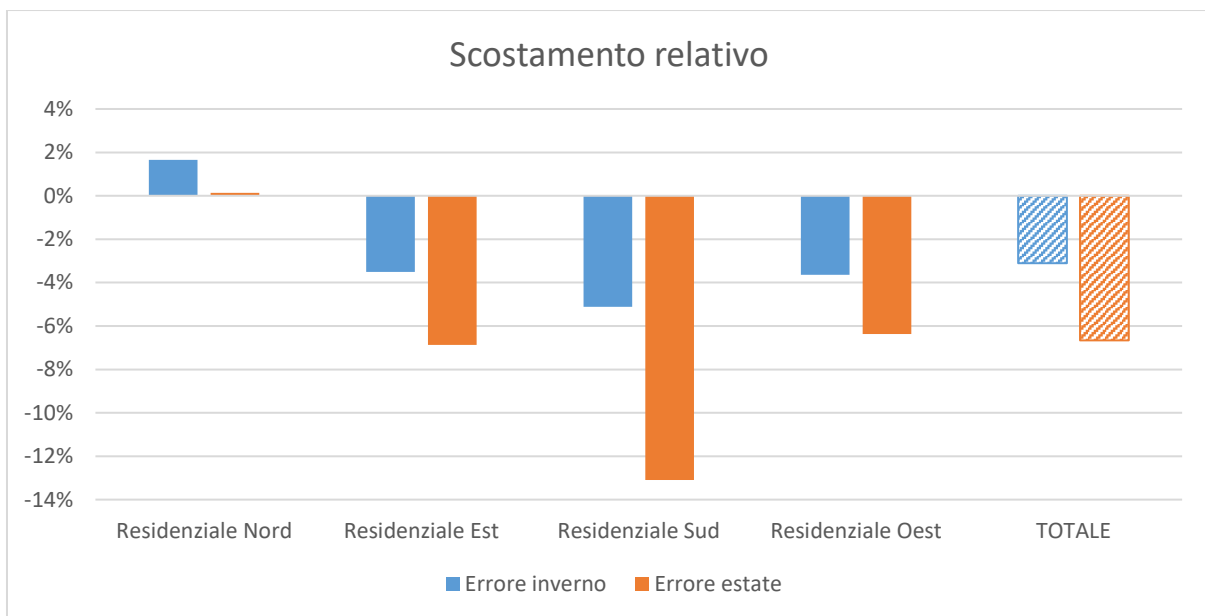


Figura 39: Errore relativo del modello RC rispetto al modello dettagliato in ambiente EnergyPlus

Si ricorda che gli edifici residenziali considerati in questo caso studio sono molto simili tra di essi. In particolare: gli edifici orientati ad Est e ad Ovest hanno un volume maggiore ma, dal punto di vista strutturale, sono uguali agli altri due; l'edificio a Nord ha subito una riqualificazione energetica e presenta uno strato aggiuntivo esterno di isolamento termico delle pareti verticali. Aldilà di questi due particolari, l'unica altra distinzione tra questi quattro edifici è l'orientazione.

A conferma di quanto detto, osservando i risultati rappresentati nei grafici in alto, si può notare come l'edificio orientato ad Est presenti lo stesso fabbisogno energetico sensibile invernale di quello orientato ad Ovest con entrambi i modelli. Questi due edifici sono identici ma orientati in due direzioni opposte, le quali, in un'intera giornata, assorbono un carico solare



simile ma traslato nel tempo. Lo stesso dicasi per il fabbisogno energetico sensibile e latente estivo. Anche in questo caso, come per gli edifici non residenziali, il modello RC tende a sovrastimare il carico sensibile estivo e a sottostimare il carico latente estivo.

Il risparmio energetico conseguito dall'intervento di efficientamento energetico dell'edificio esposto a Nord sembra maggiore nella modellizzazione in ambiente EnergyPlus se confrontato con il fabbisogno dell'edificio esposto a Sud. Anche in questo caso, infatti, bisogna considerare che il carico solare assorbito dai due edifici è uguale perché l'area finestrata esposta a Nord e a Sud è la stessa per entrambi gli edifici. L'errore del modello RC rispetto al modello dettagliato è pari al 2% nella stagione di riscaldamento per l'edificio esposto a Nord e pari al -5% per l'edificio esposto a Sud, nello stesso periodo. Questo risultato implica che la diversa stratigrafia (seppur minima) comporta una diversa dinamica di scambio termico. La presenza di uno strato isolante modifica la capacità termica e riduce la variazione temporale della temperatura interna. La minore oscillazione termica migliora l'efficacia del metodo semplificato e riduce l'errore relativo. D'altronde, l'errore relativo generato dall'edificio esposto a Sud risulta coerente con gli errori degli edifici esposti ad Est e ad Ovest, per cui, più che la diversa orientazione, è proprio lo strato di isolamento termico a determinare il differente risultato dell'edificio esposto a Nord. Per quanto riguarda l'errore relativo estivo, sia sensibile che latente, l'andamento è lo stesso degli altri due edifici.

In generale, come per gli edifici non residenziali, il modello RC tende a sovrastimare il carico sensibile estivo e a sottostimare il carico latente estivo. In questo caso, però, è molto più evidente lo scostamento sul carico latente e, di conseguenza, lo scostamento relativo medio risulta negativo nella stagione di raffrescamento. La mancanza di una portata di ventilazione meccanica, presente in tutti gli edifici non residenziali, riduce il gap nel calcolo del fabbisogno energetico sensibile e lo amplifica nel calcolo del fabbisogno energetico latente.

## **4.2 Analisi comparativa dei modelli energetici proposti**

Il confronto tra i risultati ottenuti con l'utilizzo dei due modelli energetici ha confermato l'efficacia del modello dinamico semplificato nel calcolo del fabbisogno energetico. Tuttavia, l'analisi dei risultati non è l'unico aspetto rilevante nel confronto tra due modelli energetici.

Uno degli obiettivi principali in questo lavoro di Tesi Magistrale è lo sviluppo di un modello dinamico semplificato che, non solo consenta di calcolare il fabbisogno energetico in modo

corretto, ma che permetta anche di inglobare un gran numero di edifici senza compromettere il funzionamento del modello ed evitando di prolungare eccessivamente i tempi di simulazione.

Il *tempo di simulazione*, quindi, è un aspetto molto importante in questo tipo di analisi. In questo elaborato sono stati presi in considerazione tredici edifici, di cui alcuni molto complessi, ed è stato necessario creare tredici modelli energetici in ambiente EnergyPlus, uno per ciascun edificio, suddiviso inoltre in più zone termiche. Il modello RC, invece, permette di eseguire un'unica simulazione valida per tutti gli edifici, rappresentati ciascuno come un'unica zona termica.

Il tempo di simulazione medio in ambiente EnergyPlus si aggira intorno ai cinque minuti a edificio (o modello), per un totale di circa 65 minuti. La simulazione con il modello RC ha una durata di circa dieci minuti e comprende le prime due fasi descritte nel capitolo precedente: pre-processing e simulazione energetica. In verità, la simulazione vera e propria ha una durata di circa quattro secondi, in quanto la maggior parte del tempo è richiesto per il caricamento dei dati di input, provenienti tutti da file esterni. Nonostante questo, è evidente il vantaggio nell'utilizzo del modello RC rispetto ad EnergyPlus. Questo vantaggio, inoltre, risulta tanto più evidente quanto più alto è il numero di edifici considerati. Di seguito viene proposta una tabella con i tempi richiesti dal modello RC per completare le varie fasi della simulazione.

*Tabella 4: Tempi di simulazione nel caso di acquisizione dei dati di input dall'esterno*

EDIFICI: 13	5R1C	EnergyPlus
Fase	Tempo	Tempo
-	[s]	[s]
Input geometrico	52	Il tempo necessario per eseguire ciascuna fase non è indicato
Input climatico	0.2	
Carichi interni	454	
Schedule di impianto	82	
Simulazione energetica	4	
<b>Totale</b>	<b>592</b>	<b>3900</b>

L'acquisizione dei dati di input, come evidente, risulta la fase più critica nella simulazione del modello RC. La possibilità di poter settare tutti gli input dall'esterno consente anche agli utenti meno esperti di poter interagire con il modello senza dover modificare il codice di calcolo ma, inevitabilmente, prolunga il tempo di simulazione. Un obiettivo futuro può essere quello di migliorare il sistema di acquisizione dei dati di input dall'esterno e ridurre i tempi necessari per questa fase. Tuttavia, il codice di calcolo è stato scritto dando la possibilità di scelta tra due metodi di generazione dei dati di input: l'acquisizione dall'esterno e la generazione all'interno

del codice stesso. Scegliendo questa seconda possibilità i tempi di simulazione cambiano e sono schematizzati nella tabella alla pagina seguente.

Tabella 5: Tempi di simulazione nel caso di generazione interna dei dati di input

EDIFICI: 13	5R1C	EnergyPlus
Fase	Tempo	Tempo
-	[s]	[s]
Input geometrico	52	Il tempo necessario per eseguire ciascuna fase non è indicato
Input climatico	0.2	
Carichi interni	0.5	
Schedule di impianto	0.1	
Simulazione energetica	4	
<b>Totale</b>	<b>57</b>	<b>3900</b>

Come prevedibile, i tempi di simulazione si sono ridotti notevolmente, in quanto la generazione interna dei dati di input richiede uno sforzo computazionale minore. Tuttavia, questa scelta prevede che l'utente interagisca molto con il codice di calcolo qualora si vogliono modificare le schedule d'impianto o altri parametri relativi ai carichi.

Un altro aspetto da tenere in considerazione nel confronto tra due modelli energetici è la *radiazione solare*. Come già spiegato nel paragrafo 3.3.3.1 il calcolo dei carichi solari nel modello RC è stato effettuato con l'implementazione della function *SimpleGlazingModel* per la determinazione delle curve del fattore solare in funzione dell'angolo di incidenza. Questa function ha permesso di ridurre il gap tra il valore orario calcolato in ambiente EnergyPlus e quello calcolato con il modello RC. Nei grafici seguenti sono rappresentate le curve della radiazione solare totale trasmessa attraverso le finestre dei primi tre piani dell'edificio residenziale esposto a Est in tre diversi periodi dell'anno.

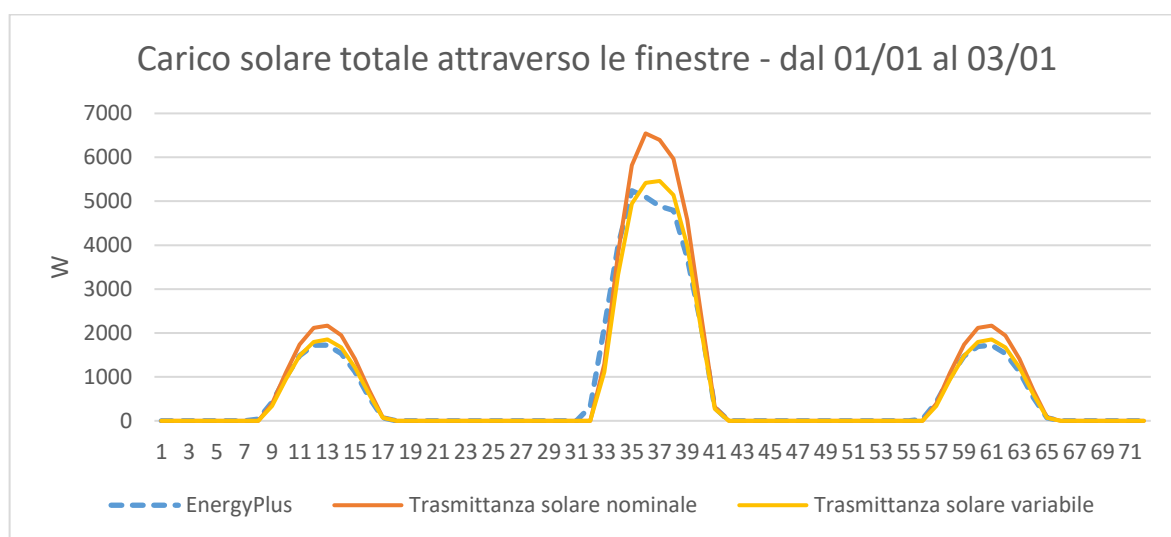


Figura 40: Radiazione solare invernale trasmessa attraverso le finestre dell'edificio residenziale esposto ad Est

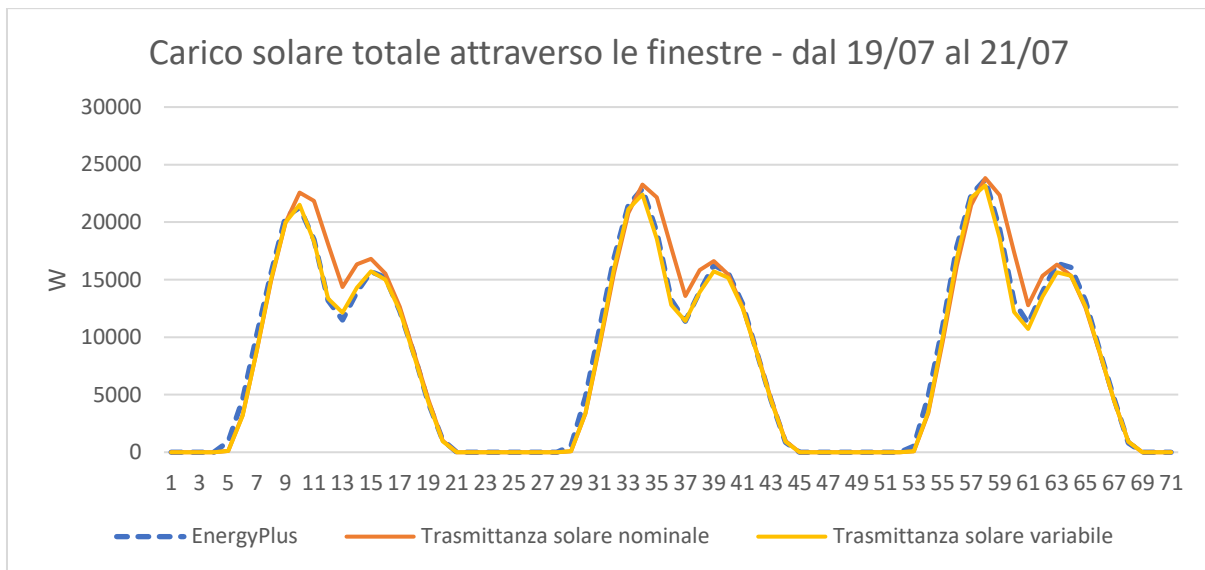


Figura 41: Radiazione solare estiva trasmessa attraverso le finestre dell'edificio residenziale esposto ad Est

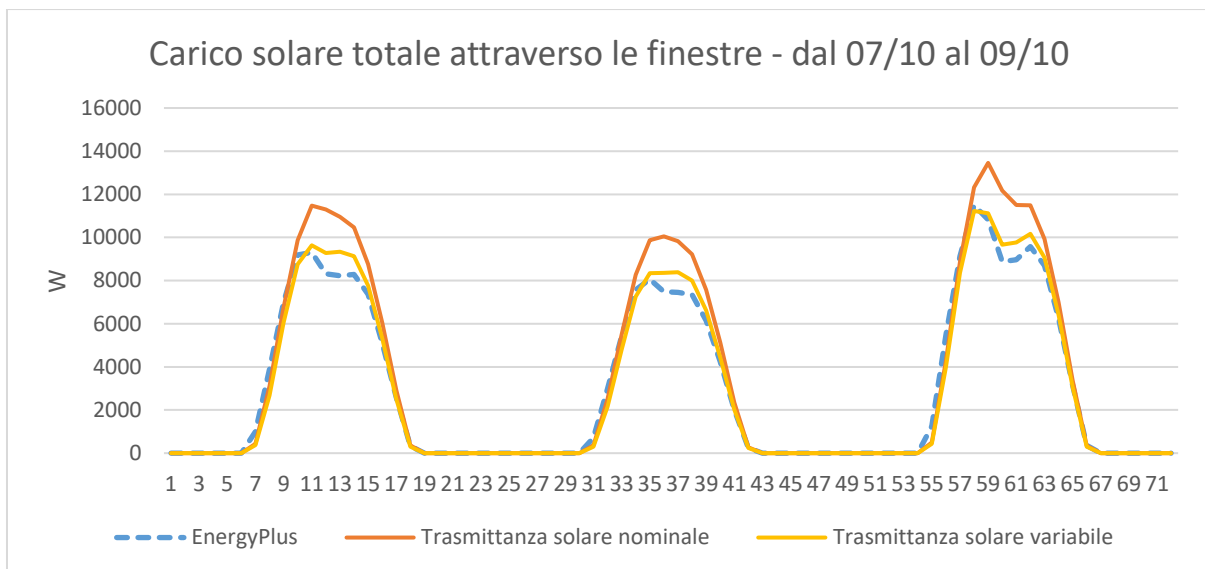


Figura 42: Radiazione solare autunnale trasmessa attraverso le finestre dell'edificio residenziale esposto ad Est

Osservando i grafici risulta evidente che l'utilizzo di un profilo orario del fattore solare abbia permesso di ottenere dei risultati migliori rispetto all'utilizzo del solo valore nominale fornito da scheda tecnica. Tuttavia, bisogna considerare due aspetti:

- EnergyPlus è un software di tipo geometrico in grado di valutare il mutuo ombreggiamento tra gli elementi strutturali dell'edificio, non ancora possibile nel modello RC (effetto poco visibile per l'edificio considerato nei grafici);
- l'angolo di incidenza in ambiente EnergyPlus varia in modo discreto e non continuo come nel modello RC. Anche questo particolare potrebbe influenzare il carico solare totale.

## **CAPITOLO 5**

# **IPOTESI DI INTERVENTI DI EFFICIENTAMENTO ENERGETICO**

### **5.1 Premessa**

Il modello sviluppato consente di calcolare il fabbisogno energetico di un gran numero di edifici con un metodo dinamico semplificato, il modello 5R1C, che permette di ottenere buoni risultati in tempi compatibili. Il codice può essere utilizzato anche per la valutazione veloce di interventi di retrofit in pochi semplici passaggi. A tal proposito, in questo capitolo, sono proposte delle possibili azioni rivolte al miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici.

La Comunità Europea ha indicato ai Paesi membri la strada da percorrere in materia di efficienza energetica con la Direttiva 2002/91/CE, successivamente aggiornata con la Direttiva UE 2018/844. L'Italia ha recepito questa direttiva con il Decreto Ministeriale del 26 giugno 2015 che stabilisce i requisiti minimi richiesti per i diversi ambiti di applicazione: nuove costruzioni, ristrutturazioni e riqualificazioni. La distinzione tra ristrutturazione e riqualificazione dipende dal rapporto tra la superficie interessata dall'intervento di retrofit e l'area totale disperdente dell'edificio.

### **5.2 Riqualificazione energetica della copertura**

Il primo intervento proposto è la riqualificazione della copertura, superficie disperdente durante la stagione invernale e particolarmente esposta alla radiazione solare durante la stagione di raffrescamento. Per questo tipo di intervento la quasi totalità degli edifici considerati sarebbe soggetta a riqualificazione. Il Decreto Ministeriale stabilisce che le strutture opache orizzontali o inclinate di copertura verso l'esterno, in caso di riqualificazione, debbano rispettare la trasmittanza termica limite di  $0.26 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  per interventi dal 1° ottobre 2015 e di  $0.24 \text{ W}/(\text{m}^2$

K) per interventi dal 1° gennaio 2021. Inoltre, secondo quanto stabilito dal DM 26/1/10, per accedere alle detrazioni fiscali, pari al 65% per questo tipo di intervento, è necessario che la trasmittanza termica della copertura non superi i 0.24 W/(m<sup>2</sup> K). Si è stabilito, quindi, di ridurre la trasmittanza termica della copertura degli edifici fino a tale valore con l'introduzione di un pannello in poliuretano espanso rigido calpestabile con le seguenti proprietà termofisiche:

- conduttività termica: 0.022 W/(m K);
- densità: 36 kg/m<sup>3</sup>;
- calore specifico 1453 J/(kg K)

Lo spessore dello strato, indicato nella tabella seguente, è stato calcolato in modo da ottenere la trasmittanza termica totale desiderata ed è un indicatore dell'iniziale prestazione energetica della copertura. Maggiore è lo spessore minimo richiesto, maggiore è il costo necessario per l'intervento e minore è la prestazione energetica della copertura allo stato iniziale. Nella tabella è indicato, inoltre, il costo totale della fornitura e della posa in opera dell'isolamento termico della copertura secondo quanto stabilito dal Prezzario Regionale dei Lavori Pubblici della Regione Veneto (edizione 2013) [39].

*Tabella 6: Dettaglio dell'ipotesi di riqualificazione della copertura*

Edificio	Spessore minimo richiesto	Costo totale intervento
-	[cm]	[k€]
Complesso didattico Piovego	-	-
Complesso A. Vallisneri	3.0	52
Ex Complesso Dipartimentale di Ingegneria Meccanica	8.2	137
Psicologia 1	4.2	19.5
Psicologia 2	4.1	12
Centro Linguistico di Ateneo	1.0	14
Dipartimento di Geoscienze	5.1	45
Dipartimento di Ingegneria Industriale	4.6	70
Dipartimento di Ingegneria Informatica	4.6	29
Edificio residenziale Nord	7.5	7.5
Edificio residenziale Est	7.5	9.5
Edificio residenziale Sud	7.5	7.5
Edificio residenziale Ovest	7.5	9.5

Per questa prima ipotesi di retrofit valgono le seguenti precisazioni:

- il Complesso didattico Piovego non necessita della riqualificazione della copertura;

- il Centro Linguistico di Ateneo presentava già in origine un pannello isolante come ultimo strato esterno per la copertura. Per questo edificio si è stabilito di incrementare lo spessore di tale strato fino al raggiungimento della trasmittanza termica totale desiderata;
- per gli edifici residenziali, costituiti da coperture a falde con tegole, si è stabilito che il pannello isolante fosse installato tra le tegole e il pannello in legno.

Il risparmio energetico conseguito con il pannello isolante è riportato nella tabella e nel grafico seguenti. Gli edifici indicati in grassetto non necessitano dell'intervento di retrofit.

Tabella 7: Risultati conseguiti a seguito della riqualificazione della copertura

EDIFICIO		STAGIONE DI RISCALDAMENTO		STAGIONE DI RAFFRESCAMENTO		RAPPORTO DEI FABBISOGNI H/C	
Nome	Codice	Base	Retrofit 1	Base	Retrofit 1	Base	Retrofit 1
-	-	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	-	-
<b>Ugo Bassi</b>	<b>1</b>	<b>112829</b>	<b>112829</b>	<b>113707</b>	<b>113707</b>	<b>1.0</b>	<b>1.0</b>
Vallisneri	2	642862	630223	1177785	1179159	0.5	0.5
DIM	3	1162696	969768	519949	495473	2.2	2.0
Psicologia 1	4	171161	163084	231956	232183	0.7	0.7
Psicologia 2	5	134232	129837	233151	233408	0.6	0.6
CLA	6	83756	83158	294545	294577	0.3	0.3
Geoscienze	7	203548	182399	402623	403729	0.5	0.5
DII	8	780913	760669	436735	436594	1.8	1.7
DEI	9	221662	211361	193785	194154	1.1	1.1
Res. Nord	10	59539	50116	14402	13534	4.1	3.7
Res. Est	11	125635	113961	24278	23260	5.2	4.9
Res. Sud	12	73175	64407	13553	12703	5.4	5.1
Res. Ovest	13	125516	113839	24555	23536	5.1	4.8

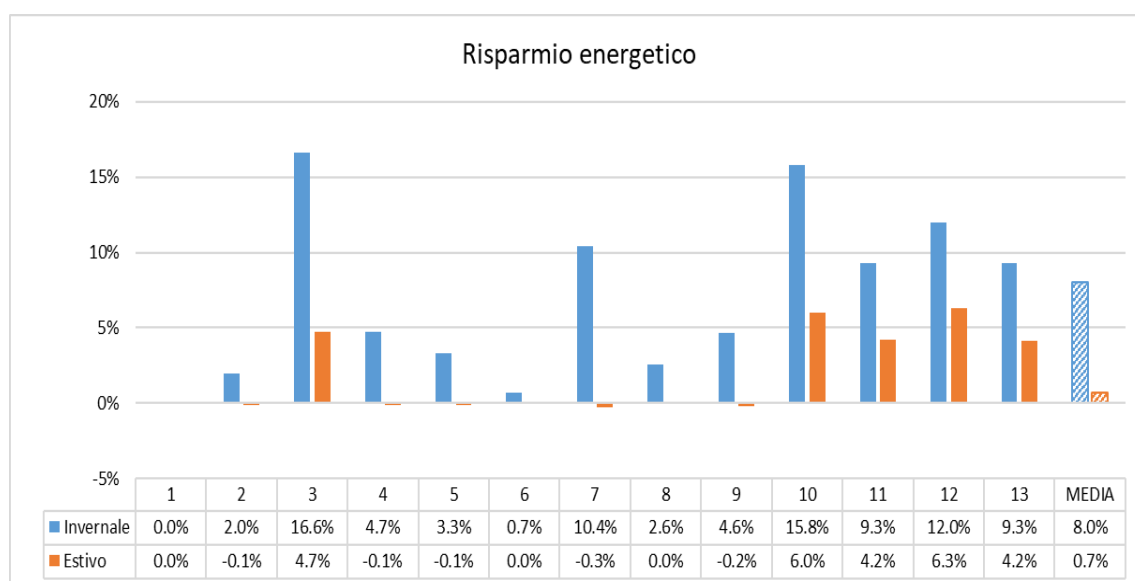


Figura 43: Risparmio energetico conseguito con la riqualificazione della copertura

Osservando il grafico si può notare che:

- l'Ex Complesso Dipartimentale di Ingegneria Meccanica (3) consegue un risparmio energetico importante a causa della copertura originale dalle prestazioni molto scarse;
- il Dipartimento di Geoscienze (7) presenta un risparmio energetico elevato, nonostante sia un edificio di recente costruzione, a causa della copertura non molto isolata e dell'elevato rapporto tra la superficie interessata dall'intervento di efficientamento e l'area disperdente totale;
- gli edifici residenziali, oltre a presentare uno scarso isolamento termico della copertura, sono edifici con un numero ridotto di piani e privi della ventilazione meccanica (dispersione termica attraverso l'involucro più rilevante).

Inoltre, il dato medio indicato nel grafico testimonia che l'effetto negativo più evidente di uno scarso isolamento termico della copertura è la dispersione durante la stagione invernale piuttosto che l'esposizione alla radiazione estiva.

### 5.3 Sostituzione dei serramenti

La sostituzione dei serramenti è uno dei principali interventi di riqualificazione energetica perché consente di ottenere diversi risultati:

- la riduzione della dispersione termica per conduzione attraverso le finestre;
- la riduzione del carico solare termico estivo attraverso l'elemento vetrato della finestra;
- la riduzione delle infiltrazioni dovute ad un non perfetto isolamento perimetrale del serramento.

Interventi di questo tipo rientrano nell'ambito delle riqualificazioni energetiche perché interessano, tipicamente, una porzione di area disperdente minore del 25%. Il Decreto Ministeriale stabilisce che le chiusure tecniche trasparenti e opache verso l'esterno e ambienti non climatizzati, in caso di riqualificazione, debbano rispettare la trasmittanza termica limite di  $1.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  per gli interventi dal 1° ottobre 2015 e di  $1.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  per gli interventi dal 1° gennaio 2021. Inoltre, il Decreto stabilisce che il fattore di trasmissione solare totale  $g_{gl+sh}$  per componenti finestrati con orientamento da Est a Ovest passando per Sud, in presenza di una schermatura mobile, sia inferiore a 0.35 sia per interventi dal 1° ottobre 2015 che per interventi dal 1° gennaio 2021. Infine, secondo quanto stabilito dal DM 26/1/10, per accedere alle detrazioni fiscali, pari al 50%, è necessario che la trasmittanza termica del serramento sia



inferiore a 1.8 W/(m<sup>2</sup> K). In questo caso, si è deciso di rispettare il limite per interventi dal 1° gennaio 2021.

Nella tabella seguente è indicata l'area finestrata totale in m<sup>2</sup> e il costo totale dell'azione di retrofit per ciascun edificio secondo quanto stabilito dal Prezzario Regionale dei Lavori Pubblici della Regione Veneto (edizione 2013) [39].

*Tabella 8: Dettaglio dell'ipotesi di sostituzione dei serramenti*

<b>Edificio</b>	<b>Area finestrata</b>	<b>Costo totale intervento</b>
-	[m <sup>2</sup> ]	[k€]
Complesso didattico Piovego	265	92
Complesso A. Vallisneri	5841	2025
Ex Complesso Dipartimentale di Ingegneria Meccanica	3020	1047
Psicologia 1	564	196
Psicologia 2	848	294
Centro Linguistico di Ateneo	-	-
Dipartimento di Geoscienze	-	-
Dipartimento di Ingegneria Industriale	1919	665
Dipartimento di Ingegneria Informatica	-	-
Edificio residenziale Nord	124	43
Edificio residenziale Est	226	79
Edificio residenziale Sud	124	43
Edificio residenziale Ovest	226	79

Per questa ipotesi di retrofit vale la seguente precisazione: il Centro Linguistico di Ateneo, il Dipartimento di Geoscienze e il Dipartimento di Ingegneria Informatica (DEI) presentano dei serramenti con trasmittanze termiche inferiori al limite imposto dal Decreto. Per questi edifici si è stabilito, quindi, di non eseguire nessun intervento di retrofit.

Il risparmio energetico conseguito con la sostituzione dei serramenti è riportato nella tabella alla pagina seguente e nel grafico sottostante. Gli edifici indicati in grassetto non necessitano dell'intervento di retrofit.

Tabella 9: Risultati conseguiti a seguito della sostituzione dei serramenti

EDIFICIO		STAGIONE DI RISCALDAMENTO		STAGIONE DI RAFFRESCAMENTO		RAPPORTO DEI FABBISOGNI H/C	
Nome	Codice	Base	Retrofit 2	Base	Retrofit 2	Base	Retrofit 2
-	-	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	-	-
Ugo Bassi	1	112829	103397	113707	110466	1.0	0.9
Vallisneri	2	642862	370483	1177785	1000332	0.5	0.4
DIM	3	1162696	1114276	519949	457449	2.2	2.4
Psicologia 1	4	171161	148965	231956	221507	0.7	0.7
Psicologia 2	5	134232	126607	233151	202616	0.6	0.6
<b>CLA</b>	<b>6</b>	<b>83756</b>	<b>83756</b>	<b>294545</b>	<b>294545</b>	<b>0.3</b>	<b>0.3</b>
<b>Geoscienze</b>	<b>7</b>	<b>203548</b>	<b>203548</b>	<b>402623</b>	<b>402623</b>	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>
DII	8	780913	614187	436735	372156	1.8	1.7
<b>DEI</b>	<b>9</b>	<b>221662</b>	<b>221662</b>	<b>193785</b>	<b>193785</b>	<b>1.1</b>	<b>1.1</b>
Res. Nord	10	59539	56239	14402	12787	4.1	4.4
Res. Est	11	125635	119490	24278	20011	5.2	6.0
Res. Sud	12	73175	70836	13553	11712	5.4	6.0
Res. Ovest	13	125516	119407	24555	20185	5.1	5.9

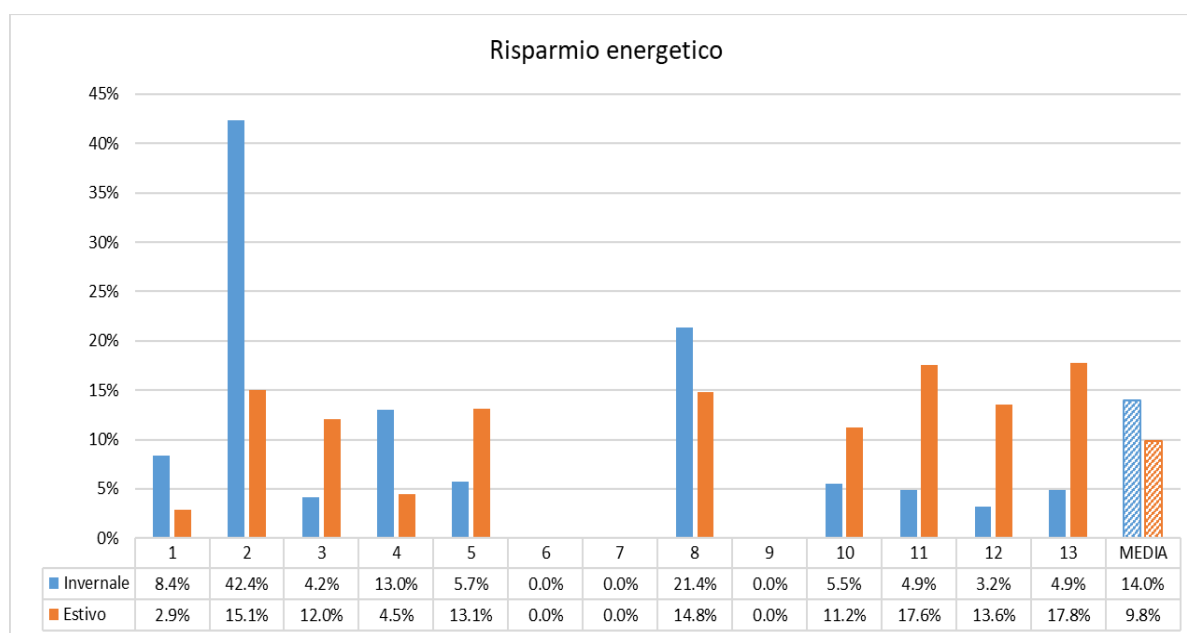


Figura 44: Risparmio energetico conseguito con la sostituzione dei serramenti

Osservando il grafico si possono notare alcuni risultati interessanti:

- il massimo risparmio energetico è conseguito dal Complesso A. Vallisneri (2), l'edificio con il più alto rapporto tra la superficie finestrata totale e l'area disperdente totale (31.3% contro una media del 13.2%);
- gli edifici identificati con i numeri 6, 7 e 9 sono quelli costituiti da serramenti con valori di trasmittanza inferiori al limite imposto dal Decreto, per i quali si è stabilito di non

eseguire nessun intervento. Se fosse stato deciso di ridurre il fattore di trasmissione solare con l'introduzione delle schermature mobili per tutto l'anno, il risultato sarebbe stato una riduzione della radiazione solare entrante sia durante la stagione estiva che durante la stagione invernale. Questo avrebbe prodotto un risparmio positivo nella stagione estiva ma negativo nella stagione invernale, durante la quale la presenza delle schermature produce solo un effetto negativo rispetto allo stato iniziale;

- il DIM (3) presenta un risparmio energetico sotto la media nonostante sia costituito da serramenti dall'isolamento termico molto scarso perché presenta un rapporto tra l'area finestrata totale e l'area disperdente totale abbastanza basso. La riduzione del fabbisogno, di conseguenza, risulta poco evidente con questo tipo di intervento.

#### **5.4 Ristrutturazione delle pareti verticali esterne**

Il terzo intervento di efficientamento energetico proposto è l'introduzione di uno strato di isolamento termico esterno in corrispondenza delle pareti verticali esterne. In questo caso tutti gli edifici sarebbero soggetti ad un intervento di ristrutturazione, in quanto la superficie interessata dall'azione di retrofit è di gran lunga superiore al 25%. Il Decreto Ministeriale stabilisce che le strutture opache verticali verso l'esterno debbano rispettare, in questi casi, un valore limite di trasmittanza termica pari a  $0.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  per interventi dal 1° ottobre 2015 e pari a  $0.28 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  per interventi dal 1° gennaio 2021. Inoltre, secondo quanto stabilito dal DM 26/1/10, per accedere alle detrazioni fiscali, pari al 65%, è necessario che la trasmittanza termica della parete opaca sia inferiore a  $0.27 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ . Si è stabilito, quindi, di ridurre la trasmittanza termica delle pareti verticali esterne degli edifici fino a tale valore con l'introduzione di un pannello in polistirene con le seguenti proprietà termofisiche:

- conduttività termica:  $0.06 \text{ W}/(\text{m K})$ ;
- densità:  $25 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;
- calore specifico  $1500 \text{ J}/(\text{kg K})$

Come per la riqualificazione della copertura, lo spessore dello strato, indicato nella tabella seguente, è stato calcolato in modo da ottenere la trasmittanza termica totale desiderata ed è un indicatore dell'iniziale prestazione energetica delle pareti verticali. È indicato, inoltre, il costo totale della fornitura e della posa in opera dell'isolamento termico delle pareti verticali esterne

secondo quanto stabilito dal Prezzario Regionale dei Lavori Pubblici della Regione Veneto (edizione 2013) [39].

Tabella 10: Dettaglio dell'ipotesi di ristrutturazione delle pareti verticali

Edificio	Spessore minimo richiesto	Costo totale intervento
-	[cm]	[k€]
Complesso didattico Piovego	15	64
Complesso A. Vallisneri	13	345
Ex Complesso Dipartimentale di Ingegneria Meccanica	18	535
Psicologia 1	12	170
Psicologia 2	12	155
Centro Linguistico di Ateneo	8	149
Dipartimento di Geoscienze	10	157
Dipartimento di Ingegneria Industriale	18	387
Dipartimento di Ingegneria Informatica	18	191
Edificio residenziale Nord	18	47
Edificio residenziale Est	20	76
Edificio residenziale Sud	20	47
Edificio residenziale Ovest	20	76

Il risparmio energetico conseguito con l'introduzione del pannello isolante è riportato nella tabella seguente e nel grafico alla pagina seguente.

Tabella 11: Risultati conseguiti a seguito della ristrutturazione delle pareti verticali esterne

EDIFICIO		STAGIONE DI RISCALDAMENTO		STAGIONE DI RAFFRESCAMENTO		RAPPORTO DEI FABBISOGNI H/C	
Nome	Codice	Base	Retrofit 3	Base	Retrofit 3	Base	Retrofit 3
-	-	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	-	-
Ugo Bassi	1	112829	92676	113707	115892	1.0	0.8
Vallisneri	2	642862	576846	1177785	1190189	0.5	0.5
DIM	3	1162696	935341	519949	543416	2.2	1.7
Psicologia 1	4	171161	139532	231956	235805	0.7	0.6
Psicologia 2	5	134232	108028	233151	237421	0.6	0.5
CLA	6	83756	72747	294545	296502	0.3	0.2
Geoscienze	7	203548	185316	402623	405916	0.5	0.5
DII	8	780913	596540	436735	461700	1.8	1.3
DEI	9	221662	121452	193785	211226	1.1	0.6
Res. Nord	10	59539	32555	14402	16404	4.1	2.0
Res. Est	11	125635	59251	24278	28255	5.2	2.1
Res. Sud	12	73175	33749	13553	16016	5.4	2.1
Res. Ovest	13	125516	59135	24555	28513	5.1	2.1

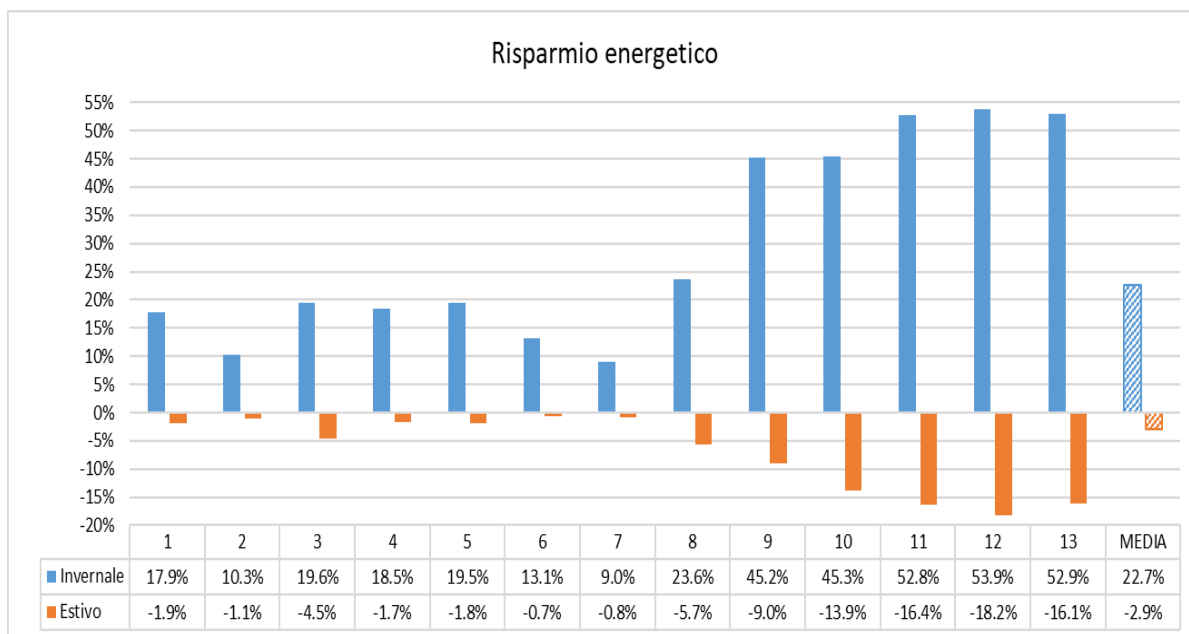


Figura 45: Risparmio energetico conseguito con la ristrutturazione delle pareti verticali esterne

Dal grafico si possono osservare alcuni risultati interessanti:

- il segno del risparmio energetico è coerente per tutti gli edifici; il risparmio è positivo durante la stagione invernale a causa della riduzione delle dispersioni attraverso le pareti ed è negativo durante la stagione estiva per lo stesso motivo, una minore dispersione termica comporta una maggiore difficoltà ad estrarre il calore interno in eccesso quando la temperatura esterna è minore di quella interna (ad esempio durante la notte);
- il Dipartimento di Geoscienze (7) consegue un risparmio energetico minore in termini percentuali rispetto al Centro Linguistico di Ateneo (6) nonostante necessiti di uno strato maggiore di isolamento termico a causa del basso rapporto tra la superficie interessata dall'intervento e l'area disperdente totale (29.8% contro una media del 44.5%);
- gli edifici 3,8 e 9 necessitano dello stesso spessore di isolamento termico (ben 18 cm) ma presentano risultati diversi a causa del diverso rapporto tra la superficie interessata dall'intervento e l'area disperdente totale.

## 5.5 Retrofit della copertura, dei serramenti e delle pareti verticali esterne

Il quarto intervento di efficientamento energetico proposto è la ristrutturazione generale degli edifici. Si eseguono, quindi, tutti gli interventi applicati nei precedenti casi. I valori limite da rispettare, definiti dal Decreto Ministeriale, sono gli stessi indicati nei precedenti paragrafi

e il costo complessivo dell'operazione è la somma dei costi indicati nei paragrafi precedenti ed è riportato nella tabella seguente.

Tabella 12: Dettaglio dell'ipotesi di ristrutturazione generale dell'involucro edilizio

Edificio	Costo complessivo
-	[k€]
Complesso didattico Piovego	156
Complesso A. Vallisneri	2421
Ex Complesso Dipartimentale di Ingegneria Meccanica	1719
Psicologia 1	386
Psicologia 2	461
Centro Linguistico di Ateneo	163
Dipartimento di Geoscienze	202
Dipartimento di Ingegneria Industriale	1122
Dipartimento di Ingegneria Informatica	221
Edificio residenziale Nord	97
Edificio residenziale Est	164
Edificio residenziale Sud	97
Edificio residenziale Ovest	164

Il risparmio energetico conseguito è rappresentato nella tabella seguente e nel grafico alla pagina seguente.

Tabella 13: Risultati conseguiti a seguito dell'intervento di retrofit generale dell'involucro

EDIFICIO		STAGIONE DI RISCALDAMENTO		STAGIONE DI RAFFRESCAMENTO		RAPPORTO DEI FABBISOGNI H/C	
Nome	Codice	Base	Retrofit 4	Base	Retrofit 4	Base	Retrofit 4
-	-	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	-	-
Ugo Bassi	1	112829	82462	113707	112607	1.0	0.7
Vallisneri	2	642862	289152	1177785	1014596	0.5	0.3
DIM	3	1162696	643564	519949	446010	2.2	1.4
Psicologia 1	4	171161	108464	231956	225754	0.7	0.5
Psicologia 2	5	134232	94790	233151	206535	0.6	0.5
CLA	6	83756	72167	294545	296539	0.3	0.2
Geoscienze	7	203548	163986	402623	407187	0.5	0.4
DII	8	780913	363957	436735	395929	1.8	0.9
DEI	9	221662	109814	193785	212264	1.1	0.5
Res. Nord	10	59539	16972	14402	13995	4.1	1.2
Res. Est	11	125635	35428	24278	22150	5.2	1.6
Res. Sud	12	73175	18730	13553	13063	5.4	1.4
Res. Ovest	13	125516	35347	24555	22327	5.1	1.6

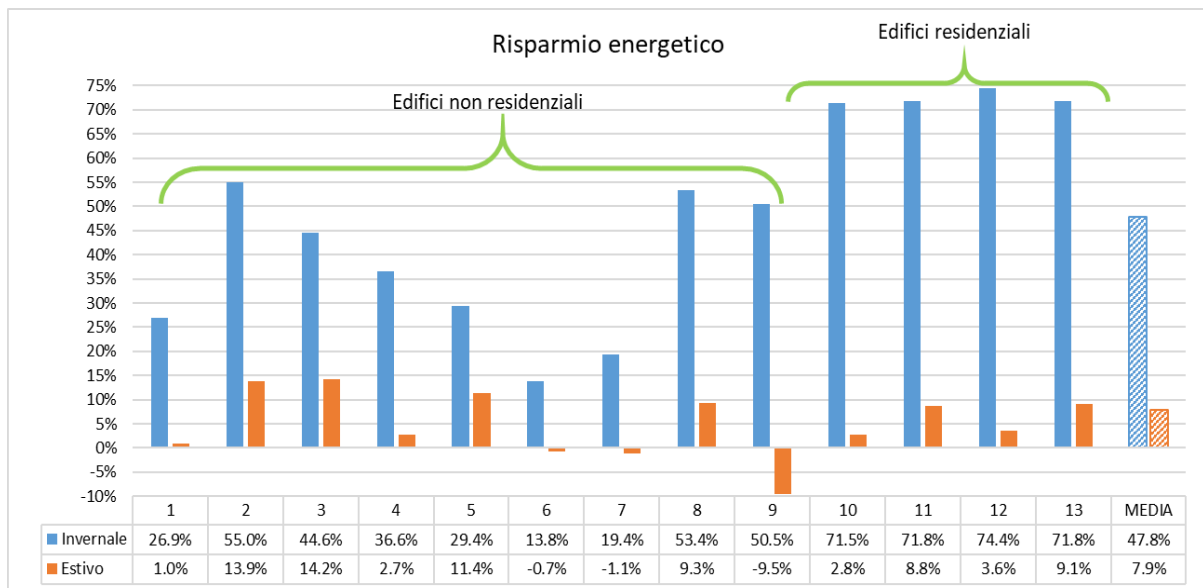


Figura 46: Risparmio energetico conseguito con la ristrutturazione generale degli edifici

Osservando il grafico si può notare che:

- il risparmio energetico estivo conseguito dagli edifici indicati con i numeri 6,7 e 9 risulta negativo. Questo risultato dipende dal fatto che, per questi edifici, non siano stati sostituiti i serramenti, i quali contribuiscono molto alla riduzione del carico solare estivo. La riqualificazione della copertura e l'introduzione di un isolamento termico aggiuntivo in corrispondenza delle pareti verticali esterne riduce la dispersione termica per conduzione attraverso le pareti e se da un lato provoca la riduzione del fabbisogno energetico invernale, dall'altro provoca, inevitabilmente, un aumento del fabbisogno energetico estivo;
- gli edifici residenziali (numerati da 10 a 13) presentano il maggior risparmio energetico invernale (circa il 72%) a causa della mancanza di una portata di ventilazione. Il fabbisogno, per questi edifici, dipende soprattutto dalle dispersioni attraverso l'involucro, interessato da questi interventi di retrofit;
- il Complesso Didattico Piovego (1) presenta un risparmio energetico invernale non molto elevato a causa della portata di ventilazione piuttosto alta,  $2.2 \text{ h}^{-1}$ . Il fabbisogno energetico di questo edificio dipende, quindi, soprattutto dalla ventilazione piuttosto che dalla dispersione attraverso l'involucro.

## 5.6 Introduzione di un recuperatore di calore nell'impianto di ventilazione

Il quinto intervento di efficientamento energetico non riguarda l'involucro edilizio ma l'impianto di ventilazione e si applica soltanto agli edifici non residenziali. Allo stato iniziale in tutti gli edifici non residenziali si presuppone che l'immissione dell'aria nella zona termica avvenga alle condizioni climatiche esterne (temperatura e umidità specifica). Negli edifici residenziali, invece, l'impianto di ventilazione non è presente in quanto il ricambio dell'aria si presuppone avvenga tramite l'apertura manuale delle finestre.

L'introduzione di un recuperatore di calore a flussi incrociati permette di recuperare il calore, accumulato nella zona termica e rigettato verso l'esterno, cedendolo alla portata d'aria di rinnovo proveniente dall'esterno. Questa tipologia di recuperatore permette soltanto il recupero del calore sensibile per cui l'umidità specifica dell'aria di rinnovo mantiene le condizioni esterne. L'efficienza del recuperatore è stata fissata pari al 60%, nonostante oggi si trovino sul mercato recuperatori con efficienze più alte, per dare un'idea del vantaggio conseguito da questo tipo di retrofit. La tabella seguente riporta il valore dell'indice di ricambio orario della ventilazione per ciascun edificio. Una più alta portata comporta un peso maggiore della ventilazione nel calcolo del fabbisogno energetico. Inoltre, la tabella riporta il numero di recuperatori necessari e il costo totale dell'operazione per ciascun edificio a partire dal costo della fornitura e della posa in opera di un singolo recuperatore secondo quanto stabilito dal Prezzario Regionale dei Lavori Pubblici della Regione Veneto (edizione 2018) [40].

Tabella 14: Dettaglio dell'ipotesi di introduzione del recuperatore di calore

VENTILAZIONE	EDIFICI								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ricambio orario [ $h^{-1}$ ]	2.20	0.93	0.71	1.41	1.21	1.22	1.32	1.03	1.23
Recuperatori	6	28	15	10	7	9	14	17	7
Costo totale [k€]	17	80	43	28.5	20	26	40	48	20

Il risparmio energetico conseguito è rappresentato nella tabella alla pagina seguente e nel grafico sottostante. Gli edifici residenziali, non disponendo di un impianto di ventilazione, non sono stati presi in considerazione per questo intervento.



Tabella 15: Risultati conseguiti a seguito dell'introduzione del recuperatore di calore nell'UTA

EDIFICIO		STAGIONE DI RISCALDAMENTO		STAGIONE DI RAFFRESCAMENTO		RAPPORTO DEI FABBISOGNI H/C	
Nome	Codice	Base	Retrofit 5	Base	Retrofit 5	Base	Retrofit 5
-	-	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	-	-
Ugo Bassi	1	112829	45733	113707	110574	1.0	0.4
Vallisneri	2	642862	374812	1177785	1165598	0.5	0.3
DIM	3	1162696	956504	519949	503226	2.2	1.9
Psicologia 1	4	171161	75219	231956	226992	0.7	0.3
Psicologia 2	5	134232	66568	233151	229823	0.6	0.3
CLA	6	83756	31691	294545	290471	0.3	0.1
Geoscienze	7	203548	87161	402623	396112	0.5	0.2
DII	8	780913	561121	436735	422382	1.8	1.3
DEI	9	221662	135529	193785	189795	1.1	0.7

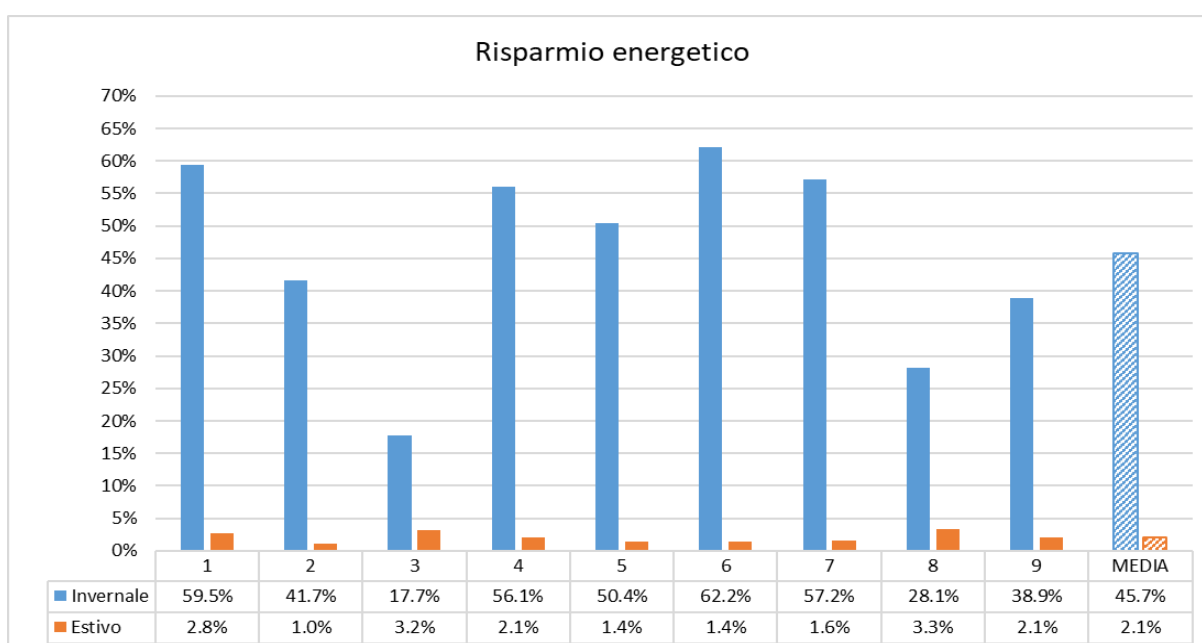


Figura 47: Risparmio energetico conseguito con l'introduzione del recuperatore di calore a flussi incrociati

Osservando il grafico si può notare che:

- il Complesso Didattico Piovego (1) presenta un risparmio energetico tra i più alti a causa dell'elevata portata di ventilazione che, come già detto nel paragrafo precedente, fa sì che il fabbisogno energetico dipenda principalmente dalla ventilazione. Per edifici di questo tipo, adibiti ad aule didattiche e con portate di ventilazione elevate, un intervento di efficientamento energetico dell'impianto di ventilazione produce ottimi risultati con costi molto ridotti. Il risparmio conseguito con questo intervento è maggiore di quello del caso precedente nonostante quest'ultimo supponesse la ristrutturazione di tutto

l'involucro (riqualificazione della copertura, sostituzione dei serramenti e ristrutturazione delle pareti opache verticali).

- l'Ex Complesso Dipartimentale di Ingegneria Industriale (3), al contrario, presenta un risparmio energetico ridotto a causa della minore portata di ventilazione e a causa delle più alte dispersioni attraverso l'involucro, soprattutto attraverso la copertura.
- il Centro Linguistico di Ateneo (6) presenta il più alto risparmio energetico nonostante non abbia una portata d'aria molto alta perché, essendo un edificio di recente costruzione, ha un involucro ben isolato che fa sì che il fabbisogno energetico dipenda principalmente dall'impianto di ventilazione.

## **5.7 Installazione di un impianto fotovoltaico sulla copertura degli edifici**

L'ultimo intervento di efficientamento energetico riguarda l'installazione di un impianto fotovoltaico sulla copertura degli edifici. In questo caso il retrofit non comporta una riduzione del fabbisogno energetico ma riduce i consumi elettrici. A tal fine è stato implementato lo script *District\_PVGIS\_estimation* per il calcolo della produzione fotovoltaica nel caso in cui si possa disporre di una superficie pari al 20%, al 30% o al 40% dell'area totale della copertura. Di solito, infatti, gli impianti di ventilazione, i chiller o altri macchinari che necessitano di scambiare calore con l'aria esterna, vengono installati sulla copertura, limitando la superficie disponibile. Inoltre, bisogna considerare che i pannelli, se inclinati, devono essere distanti abbastanza gli uni dagli altri per evitare il mutuo ombreggiamento tra gli stessi. Per queste ragioni si è stabilito di considerare al massimo il 40% della superficie totale della copertura degli edifici.

Il calcolo della produzione elettrica si articola in diverse fasi, la prima delle quali riguarda la definizione dei dati di input, ovvero le informazioni climatiche e le caratteristiche dell'impianto. Le informazioni climatiche richieste sono già caricate all'interno del codice di calcolo perché utilizzate anche per il calcolo del fabbisogno energetico. L'unica variabile aggiunta appositamente per questa ipotesi di retrofit è il vettore della velocità del vento per tutte le ore dell'anno, parametro che influenza la resa dei pannelli.

Le caratteristiche dell'impianto sono le seguenti:

- angolo di inclinazione dei pannelli rispetto al piano orizzontale (tilt) pari a 30°;
- angolo di orientamento della superficie rispetto alla direzione Sud (azimuth) pari a 0°;

- rendimento nominale del pannello in condizioni standard pari al 15%;
- impianto realizzato con moduli in silicio monocristallino

La seconda fase riguarda il calcolo dell'irradianza solare globale per unità di superficie con il modello di *Hottel e Woertz* [41] per il quale si considera l'ipotesi di cielo isotropo. Si utilizza la function *sun\_position* per il calcolo dei profili dell'angolo di incidenza ( $\theta$ ) e dell'altezza solare ( $\alpha$ ), indispensabili per il calcolo orario del coefficiente  $R_b$  definito dal modello come il rapporto tra l'irradianza diretta sulla superficie inclinata e l'irradianza diretta sulla superficie orizzontale.

Di seguito vengono definite le equazioni necessarie per il calcolo dell'irradianza solare diretta ( $BRTS$ ), diffusa ( $DRTS$ ), riflessa ( $RRTS$ ) e globale ( $TRTS$ ), tutte per unità di superficie:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\sin \alpha} \quad (5.1)$$

$$BRTS = BRH \cdot R_b \quad (5.2)$$

$$DRTS = DRH \cdot (1 + \cos \beta) \cdot 0.5 \quad (5.3)$$

$$RRTS = TRH \cdot 0.5 \cdot (1 - \cos \beta) \cdot \rho_g \quad (5.4)$$

$$TRTS = BRTS + DRTS + RRTS \quad (5.5)$$

dove  $\rho_g$  è il coefficiente di riflessione del terreno,  $BRH$  è la radiazione solare diretta sulla superficie orizzontale,  $DRH$  è la radiazione solare diffusa sulla superficie orizzontale e  $TRH$  è la radiazione solare globale sulla superficie orizzontale, espresse in  $W/m^2$ .

La terza e ultima fase riguarda la stima della potenza elettrica prodotta dall'impianto con l'utilizzo del modello di PVGIS (*Photovoltaic Geographical Information System*) [42], un programma di calcolo della radiazione solare realizzato in collaborazione tra diversi enti tra cui la Commissione Europea e l'Istituto per l'Energia e i Trasporti. Il modello definisce le seguenti correlazioni per il calcolo dell'efficienza relativa  $\eta_{rel}$  e della potenza elettrica del modulo  $P$ :

$$\eta_{rel} = 1 + k_1 \ln g + k_2 \ln g^2 + k_3 t_m + k_4 t_m \ln g + k_5 \ln g^2 + k_6 t_m^2 \quad (5.6)$$

$$P = 1/1000 \cdot P_{nom} \cdot \eta_{rel} \cdot (BRTS \cdot (1 - FB) + DRTS \cdot (1 - FD) + RRTS \cdot (1 - FA)) \quad (5.7)$$

dove i coefficienti  $k$  sono calcolati in funzione della tipologia di modulo fotovoltaico,  $g$  è l'irradianza solare globale sulla superficie inclinata espressa in  $kW/m^2$ ,  $t_m$  è la temperatura del modulo che si calcola in funzione della temperatura dell'aria esterna, dell'irradianza solare

globale sulla superficie inclinata, della velocità del vento e di due coefficienti scelti in funzione della tipologia di modulo fotovoltaico,  $P_{nom}$  è la potenza nominale del modulo calcolata in condizioni standard e  $FB$ ,  $FD$  e  $FA$  sono i coefficiente che tengono conto delle perdite per riflessione del modulo quando l'angolo di incidenza è molto ampio per ognuna delle componenti della radiazione solare incidente sulla superficie inclinata.

Si ricordi che il risultato finale non tiene conto delle perdite d'impianto (inverter, cablaggio, ombreggiamento, sporcamento dei moduli e altro) che vengono definite attraverso il rendimento del BOS (*Balance of System*).

La tabella seguente mostra i risultati ottenuti in termini di producibilità fotovoltaica nei tre diversi casi.

Tabella 16: Producibilità fotovoltaica a seguito dell'installazione di un impianto fotovoltaico sulla copertura degli edifici

Edificio	PRODUCIBILITA' FOTOVOLTAICA		
	20% della copertura	30% della copertura	40% della copertura
	[kWh/anno]	[kWh/anno]	[kWh/anno]
Complesso didattico Piovego	21094	31641	42188
Complesso A. Vallisneri	109734	164601	219468
Ex Complesso Dipartimentale di Ingegneria Meccanica	162076	243114	324152
Psicologia 1	35711	53566	71421
Psicologia 2	21449	32173	42898
Centro Linguistico di Ateneo	34480	51720	68960
Dipartimento di Geoscienze	72809	109214	145619
Dipartimento di Ingegneria Industriale	112745	169117	225489
Dipartimento di Ingegneria Informatica	46806	70209	93612
Edificio residenziale Nord	8585	12878	17171
Edificio residenziale Est	11161	16741	22322
Edificio residenziale Sud	8587	12880	17173
Edificio residenziale Ovest	11161	16741	22322

## 5.8 Considerazioni finali

Nei precedenti paragrafi sono stati proposti diversi tipi di interventi di efficientamento energetico, rivolti sia al miglioramento delle prestazioni dell'involucro (i primi quattro) che all'introduzione di nuovi impianti (gli ultimi due). Tutti gli interventi mirano alla riduzione del

fabbisogno energetico, fatta eccezione per l'ultimo caso relativo all'installazione di un impianto fotovoltaico, non trattato in questa sezione.

In questo paragrafo si cerca di riassumere e confrontare i risultati ottenuti dall'applicazione dei diversi interventi, indicando quali di questi possano essere più efficaci. Il confronto tiene conto sia del costo totale dell'operazione che del risparmio energetico conseguito per ciascun edificio. A tal fine, nella tabella seguente viene calcolato il rapporto tra questi due dati, distinguendo la stagione di riscaldamento (H) da quella di raffrescamento (C). Le celle contenenti il simbolo “-” si riferiscono ai casi in cui il retrofit non sia stato applicato all'edificio mentre le celle contenenti la scritta “NO” si riferiscono ai casi in cui l'applicazione dell'intervento provochi un aumento del fabbisogno energetico.

*Tabella 17: Investimento economico necessario per ridurre il fabbisogno energetico degli edifici dell'1%*

EDIFICIO [k€/%]	Retrofit 1		Retrofit 2		Retrofit 3		Retrofit 4		Retrofit 5	
	H	C	H	C	H	C	H	C	H	C
Ugo Bassi	-	-	11.0	32.2	3.6	NO	5.8	160.8	0.3	6.2
Vallisneri	26.3	NO	47.8	134.4	33.6	NO	44.0	174.7	1.9	77.0
DIM	8.2	29.0	251.4	87.1	27.3	NO	38.5	120.8	2.4	13.3
Psico 1	4.1	NO	15.1	43.4	9.2	NO	10.5	144.1	0.5	13.3
Psico 2	3.6	NO	51.8	22.4	7.9	NO	15.7	40.3	0.4	13.9
CLA	19.4	NO	-	-	11.3	NO	11.7	NO	0.4	18.5
Geoscienze	4.3	NO	-	-	17.5	NO	10.4	NO	0.7	24.6
DII	26.9	2155.8	31.2	45.0	16.4	NO	21.0	120.1	1.7	14.7
DEI	6.2	NO	-	-	4.2	NO	4.4	NO	0.5	9.7
Res. Nord	0.5	1.2	7.7	3.8	1.0	NO	1.4	34.2	-	-
Res. Est	1.0	2.2	16.0	4.5	1.4	NO	2.3	18.6	-	-
Res. Sud	0.6	1.2	13.4	3.2	0.9	NO	1.3	26.8	-	-
Res. Ovest	1.0	2.3	16.1	4.4	1.4	NO	2.3	18.0	-	-

La tabella permette di individuare facilmente quale sia la tipologia di intervento economicamente più conveniente, a parità di risparmio energetico conseguito, per ciascun edificio. Si consideri, ad esempio, l'Ex Complesso Dipartimentale di Ingegneria Meccanica (DIM); si noti che per conseguire un risparmio energetico dell'1% nella stagione di riscaldamento è necessario un investimento di circa 8.000 euro nel caso di riqualificazione della copertura, di circa 251.000 euro nel caso di sostituzione dei serramenti e di soli 2.500 euro nel caso di introduzione di un recuperatore di calore. È evidente, quindi, che l'intervento più efficace dal punto di vista economico sia l'introduzione del recuperatore o la riqualificazione della copertura nel caso si voglia agire soltanto sull'involucro.

Inoltre, dalla tabella si può osservare che:

- l'investimento necessario per ridurre dell'1% il fabbisogno energetico estivo è sempre molto alto, a testimonianza del fatto che gli interventi di efficientamento energetico siano rivolti soprattutto alla riduzione del fabbisogno invernale;
- per gli edifici non residenziali l'introduzione del recuperatore di calore risulta sempre la tipologia di intervento più efficace dal punto di vista economico a causa dell'elevato livello di occupazione da cui consegue un elevato indice di ricambio orario;
- per gli edifici residenziali la riqualificazione della copertura e l'applicazione di un isolamento termico sulle pareti verticali risultano essere gli interventi più convenienti.

Si ricorda che questa tabella, pur indicando quale sia l'intervento più economico per unità di risparmio energetico non fornisce nessuna indicazione sull'effettivo risparmio energetico relativo all'applicazione di un retrofit. Per il Complesso A. Vallisneri, ad esempio, dalla tabella si evince che per conseguire un risparmio energetico dell'1% nella stagione di riscaldamento sia necessario un investimento di circa 26.000 euro nel caso di riqualificazione della copertura e di circa 48.000 euro nel caso di sostituzione dei serramenti. Dai grafici ai paragrafi 5.2 e 5.3 si può osservare, però, che nel primo caso il risparmio conseguito sia pari al 2% mentre nel secondo caso sia pari al 42%. È importante, pertanto, tenere in considerazione sia l'aspetto economico che quello energetico: un investimento maggiore che comporti un risparmio energetico maggiore, nel lungo periodo potrebbe risultare vantaggioso.

Un altro aspetto importante è il peso dell'intervento di efficientamento energetico di un edificio sull'intero distretto. La tabella seguente indica l'investimento economico necessario per ridurre dell'1% il fabbisogno energetico dell'intero distretto agendo soltanto su un edificio.

Tabella 18: Investimento necessario per ridurre il fabbisogno energetico del distretto dell'1%

EDIFICIO	Retrofit 1	Retrofit 2	Retrofit 3	Retrofit 4	Retrofit 5
[k€/%]	H	H	H	H	H
Ugo Bassi	-	379	123	200	10
Vallisneri	159	290	203	267	12
DIM	<b>28</b>	843	92	129	<b>8</b>
Psico 1	94	343	210	239	12
Psico 2	104	1503	230	455	11
CLA	905	-	526	547	19
Geoscienze	83	-	335	199	13
DII	134	<b>155</b>	82	105	9
DEI	109	-	74	77	9
Res. Nord	30	507	67	89	-
Res. Est	31	498	<b>44</b>	71	-
Res. Sud	32	715	46	<b>69</b>	-
Res. Ovest	31	501	<b>44</b>	71	-

Nella tabella è indicato in grassetto, per ciascun retrofit, l'edificio o gli edifici che permettono di ridurre dell'1% il fabbisogno energetico del distretto con il minore investimento iniziale. La copertura del DIM, i serramenti del DII e le pareti verticali degli edifici residenziali rivolti a Est, Sud e Ovest sono i componenti dell'involucro che necessitano più di tutti di un intervento di efficientamento energetico. L'introduzione di un recuperatore di calore si conferma essere il metodo migliore per ridurre il fabbisogno energetico degli edifici non residenziali.





## CONCLUSIONI

“Gli edifici sono elementi fondamentali per le politiche di efficienza energetica dell’Unione, in quanto rappresentano circa il 40% del consumo di energia finale.”

È questo il primo punto definito dalla Commissione Europea nella Raccomandazione Europea 2016/1318, a testimonianza di quanto sia importante intervenire nel settore edilizio per mitigare la dipendenza dalle fonti fossili. Il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici è un traguardo fondamentale che può essere conseguito sviluppando metodi innovativi per progettare, gestire e rinnovare gli edifici.

In questo lavoro di Tesi Magistrale è stato sviluppato un modello dinamico semplificato basato sull’analogia elettrica (Resistenza-Capacità, RC) in grado di simulare in modo efficace il comportamento dinamico di un numero elevato di edifici. Il modello è stato confrontato con il software EnergyPlus, basato su un modello dinamico dettagliato, utilizzato frequentemente per la modellizzazione energetica del singolo edificio.

I due modelli sono stati applicati al caso studio del distretto universitario di Padova, situato nell’area circostante il canale Piovego e comprensivo di tredici edifici, per un totale di 23.000 m<sup>2</sup> di area in pianta e circa 346.000 m<sup>3</sup> di volume lordo. In particolare, il modello semplificato è stato applicato all’intero distretto mentre il modello dettagliato è stato applicato a ciascun edificio singolarmente.

I due modelli sono stati utilizzati per calcolare il fabbisogno energetico del distretto nella stagione di riscaldamento e nella stagione di raffrescamento. Il modello RC è stato ampliato in modo da calcolare il fabbisogno energetico latente e per la corretta valutazione dei carichi solari. I risultati conseguiti dalla simulazione energetica con i due modelli sono illustrati nella tabella seguente, nella quale si distinguono gli edifici residenziali (4) dai non residenziali (9).

Tabella 19: Risultati conseguiti dalla simulazione energetica con i due modelli

Tipologia edilizia	Riscaldamento			Raffrescamento		
	RC	EP	Scostamento relativo	RC	EP	Scostamento relativo
-	[MWh]	[MWh]	%	[MWh]	[MWh]	%
Non residenziale	3514	3453	2	3604	3367	7
Residenziale	383	396	-3	77	82	-7

In entrambi i casi lo scostamento relativo è molto contenuto (inferiore al 10%) e dimostra l'efficacia del modello semplificato e delle ottimizzazioni implementate. In particolare, nella stagione di riscaldamento non risulta esserci un andamento comune a tutti gli edifici e lo scostamento dipende soprattutto dalla geometria. Nella stagione di raffrescamento il modello RC tende a sovrastimare il carico sensibile e a sottostimare il carico latente. Per gli edifici non residenziali l'effetto sul carico sensibile ha una valenza maggiore di quello sul carico latente, mentre per gli edifici residenziali avviene il contrario. Questo giustifica il fatto che il segno dello scostamento relativo sia opposto tra le due tipologie edilizie.

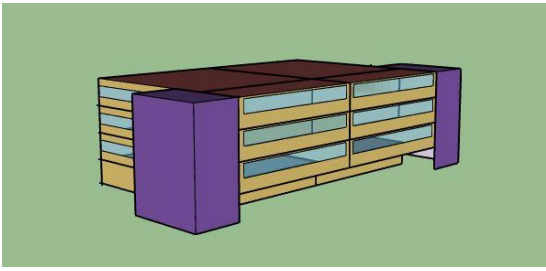
Uno dei vantaggi principali del modello RC è rappresentato dal minore livello di dettaglio richiesto per i dati di input, soprattutto per quanto riguarda le informazioni geometriche. Il software EnergyPlus, al contrario, necessita anche della rappresentazione grafica dell'edificio.

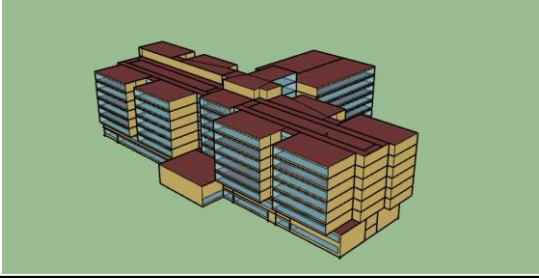
Inoltre, il modello RC consegue tempi di simulazione più brevi, in quanto il sistema di equazioni è ridotto e può essere risolto analiticamente evitando problemi di convergenza e stabilità che si possono presentare con modelli dinamici dettagliati. Questo aspetto è una delle ragioni principali per cui questo modello sia stato scelto per simulare il comportamento dinamico di un numero elevato di edifici.

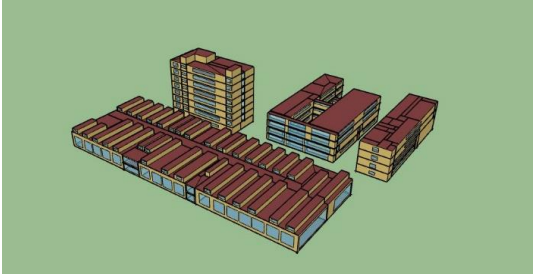
Il modello RC consente anche di valutare diversi scenari di retrofit in tempi molto brevi e in modo semplice. È possibile, ad esempio, effettuare una modifica all'involucro degli edifici agendo sui file esterni contenenti le informazioni geometriche degli stessi e attendere alcuni minuti per lo svolgimento della simulazione energetica del distretto. Questa tecnica permette di confrontare i risultati ottenuti in termini di risparmio energetico sia sul singolo edificio che sull'intero distretto e facilita, di conseguenza, la scelta dell'azione di efficientamento più efficace. A tal proposito, nel Capitolo 5 sono stati proposti interventi per il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici. L'analisi ha evidenziato come la soluzione migliore dal punto di vista energetico ed economico, sia l'introduzione di un recuperatore di calore per gli edifici con un alto indice di ricambio orario. Per gli edifici residenziali, sprovvisti di un impianto di ventilazione, è conveniente intervenire sull'involucro edilizio.

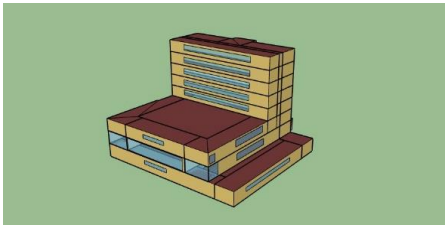
In conclusione, il modello energetico sviluppato durante lo svolgimento di questo elaborato ha permesso di ottenere risultati più che soddisfacenti in termini di fabbisogno energetico invernale ed estivo. Tuttavia, modifiche aggiuntive relative alla gestione dei dati di input e all'introduzione di nuovi strumenti di calcolo potrebbero migliorare ulteriormente i risultati senza compromettere i tempi di simulazione e garantendo la possibilità di simulare un numero elevato di edifici.

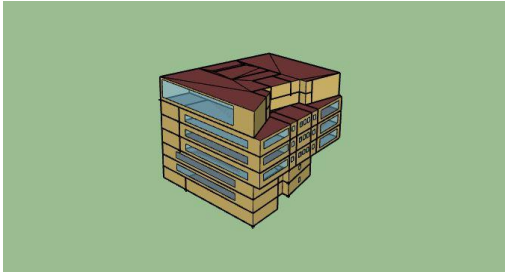
# **APPENDICE**

<b>Complesso Didattico Piovego</b>			
<i>Parametro</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Note</i>
<b>Geometria</b>			
Area in pianta	m <sup>2</sup>	701	
Area totale	m <sup>2</sup>	2804	
Numero di piani	-	4	
Area laterale totale	m <sup>2</sup>	1289	
Volume riscaldato	m <sup>3</sup>	8133	
Window-wall-ratio	%	18.96 a Nord - 33.26 a Est - 18.96 a Sud - 10.13 a Ovest	
Rappresentazione grafica dell'edificio	-		1_Ugo_Bassi_model
<b>Struttura</b>			
<i>Muri esterni</i>			
Stratigrafia	m	CLS (0.050) - Polistirene alleggerito (0.100) - CLS (0.050) - Polistirene (0.030) - Cartongesso (0.010)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.69	
<i>Muri interni</i>			
Stratigrafia	m	Intonaco interno (0.015) - Cartongesso (0.015) - Lana di vetro (0.040) - Cartongesso (0.015) - Intonaco interno (0.015)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.74	
<i>Solaio interpiano</i>			
Stratigrafia	m	Linoleum (0.002) - CLS (0.080) - Polistirene (0.200) - CLS (0.070) - Poliuretano (0.040) - Massetto (0.040)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.16	
<i>Pavimento contro terra</i>			
Stratigrafia	m	Massetto (0.040) - Poliuretano (0.040) - CLS (0.070) - Polistirene (0.200) - CLS (0.080) - Linoleum (0.002)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.16	
<i>Copertura</i>			
Stratigrafia	m	Bitume (0.004) - Poliuretano (0.040) - CLS alleggerito (0.180) - CLS (0.070) - Polistirene (0.200) - CLS (0.080)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.14	
<i>Finestre</i>			
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	2.5	
SHGn	-	0.5	
<b>Carichi interni e schedules (UNI EN ISO 18523)</b>			
Occupazione	W/m <sup>2</sup>	3.6 (Office corridor) - 59.5 (Lecture room)	54.62% sensibile
Densità di occupazione	pers/m <sup>2</sup>	0 (Office corridor) - 0.5 (Lecture room)	Sensibile
Illuminazione artificiale	W/m <sup>2</sup>	15 (Office corridor) - 20 (Lecture room)	Sensibile
Apparecchi elettrici	W/m <sup>2</sup>	0 (Office corridor) - 2 (Lecture room)	Sensibile
On-off impianto	-	07:00 - 21:00	
Ricambio orario	1/h	2.2	On-off come impianto
Infiltrazione nominale	1/h	0.1	Costante
Setpoint invernale	°C	22	
Setpoint estivo	°C	26	
Umidità di setpoint	%	50	Estate
<b>Risultati</b>			
Fabbisogno invernale	kWh/anno	112829	Sensibile
Fabbisogno estivo	kWh/anno	60747 (sensibile) - 52960 (latente)	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>2</sup> anno)	42.5	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>3</sup> anno)	14.5	

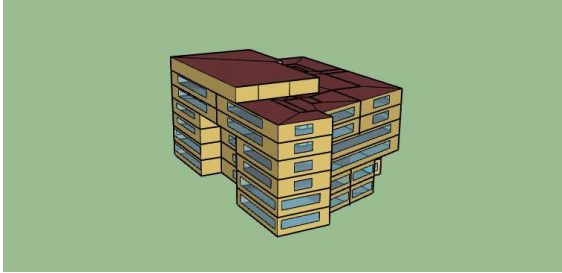
Complesso Pluridipartimentale di Biologia A. Vallisneri			
Parametro	Unità di misura	Descrizione	Note
<b>Geometria</b>			
Area in pianta	m <sup>2</sup>	3647	
Area totale	m <sup>2</sup>	25531	
Numero di piani	-	7	
Area laterale totale	m <sup>2</sup>	11372	
Volume riscaldato	m <sup>3</sup>	89358	
Window-wall-ratio	%	33.82 a Nord - 62.76 a Est - 33.89 a Sud - 64.97 a Ovest	
Rappresentazione grafica dell'edificio	-		2_Vallisneri_model
<b>Struttura</b>			
<i>Muri esterni</i>			
Stratigrafia	m	CLS (0.210) - Cartongesso (0.014) - Lana di vetro (0.072) - Cartongesso (0.014) - Intonaco interno (0.020)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.58	
<i>Muri interni</i>			
Stratigrafia	m	Intonaco interno (0.010) - Cartongesso (0.010) - Lana di vetro (0.070) - Cartongesso (0.010) - Intonaco interno (0.010)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.61	
<i>Solaio interpiano</i>			
Stratigrafia	m	Linoleum (0.002) - Massetto in CLS (0.040) - Argilla espansa (0.120) - CLS armato (0.140)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.73	
<i>Pavimento contro terra</i>			
Stratigrafia	m	Lana di roccia (0.120) - CLS armato (0.140) - Argilla espansa (0.120) - Massetto in CLS (0.040) - Linoleum (0.002)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.26	
<i>Copertura</i>			
Stratigrafia	m	Bitume (0.016) - Polistirene espanso (0.100) - Massetto in CLS (0.040) - Argilla espansa (0.120) - CLS armato (0.140)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.33	
<i>Finestre</i>			
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	3.3	
SHGn	-	0.75	
<b>Carichi interni e schedules (UNI EN ISO 18523)</b>			
Occupazione	W/m <sup>2</sup>	11.9 (Office room) - 3.6 (Office corridor) - 59.5 (Lecture room)	54.62% sensibile
Densità di occupazione	pers/m <sup>2</sup>	0.1 (Office room) - 0 (Office corridor) - 0.5 (Lecture room)	Sensibile
Illuminazione artificiale	W/m <sup>2</sup>	12 (Office room) - 15 (Office corridor) - 20 (Lecture room)	Sensibile
Apparecchi elettrici	W/m <sup>2</sup>	12 (Office room) - 0 (Office corridor) - 2 (Lecture room)	Sensibile
On-off impianto	-	07:00 - 21:00	
Ricambio orario	1/h	0.93	On-off come impianto
Infiltrazione nominale	1/h	0.1	Costante
Setpoint invernale	°C	22	
Setpoint estivo	°C	26	
Umidità di setpoint	%	50	Estate
<b>Risultati</b>			
Fabbisogno invernale	kWh/anno	642862	Sensibile
Fabbisogno estivo	kWh/anno	920612 (sensibile) - 257172 (latente)	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>2</sup> anno)	22.4	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>3</sup> anno)	7.1	

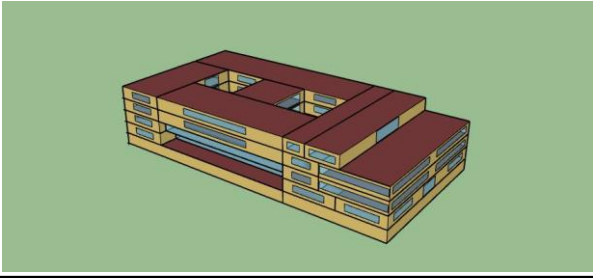
Ex Complesso Dipartimentale di Ingegneria Meccanica			
Parametro	Unità di misura	Descrizione	Note
<b>Geometria</b>			
Area in pianta	m <sup>2</sup>	5387	
Area totale	m <sup>2</sup>	16161	
Numero di piani	-	3	
Area laterale totale	m <sup>2</sup>	11599	
Volume riscaldato	m <sup>3</sup>	64644	
Window-wall-ratio	%	38.47 a Nord - 17.70 a Est - 35.57 a Sud - 14.72 a Ovest	
Rappresentazione grafica dell'edificio	-		3_DIM_model
<b>Struttura</b>			
<i>Muri esterni</i>			
Stratigrafia	m	CLS armato (0.200) - Pannello isolante (0.020) - Mattone forato (0.100) - Intonaco interno (0.015)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.18	
<i>Muri interni</i>			
Stratigrafia	m	Intonaco interno (0.015) - Mattone forato (0.100) - Intonaco interno (0.015)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.75	
<i>Solaio interpiano</i>			
Stratigrafia	m	Linoleum (0.003) - Massetto (0.050) - CLS armato (0.050) - Latero cemento (0.240) - Intonaco interno (0.015)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.07	
<i>Pavimento contro terra</i>			
Stratigrafia	m	CLS armato (0.300) - Massetto (0.050) - Piastrelle (0.020)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	2.98	
<i>Copertura</i>			
Stratigrafia	m	Bitume (0.005) - Massetto (0.050) - Latero cemento (0.200) - Intonaco interno (0.015)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.68	
<i>Finestre</i>			
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	3	
SHGn	-	0.7	
<b>Carichi interni e schedules (UNI EN ISO 18523)</b>			
Occupazione	W/m <sup>2</sup>	11.9 (Office room) - 3.6 (Office corridor) - 59.5 (Lecture room)	54.62% sensibile
Densità di occupazione	pers/m <sup>2</sup>	0.1 (Office room) - 0 (Office corridor) - 0.5 (Lecture room)	Sensibile
Illuminazione artificiale	W/m <sup>2</sup>	12 (Office room) - 15 (Office corridor) - 20 (Lecture room)	Sensibile
Apparecchi elettrici	W/m <sup>2</sup>	12 (Office room) - 0 (Office corridor) - 2 (Lecture room)	Sensibile
On-off impianto	-	07:00 - 21:00	
Ricambio orario	1/h	0.71	On-off come impianto
Infiltrazione nominale	1/h	0.1	Costante
Setpoint invernale	°C	22	
Setpoint estivo	°C	26	
Umidità di setpoint	%	50	Estate
<b>Risultati</b>			
Fabbisogno invernale	kWh/anno	1162696	Sensibile
Fabbisogno estivo	kWh/anno	360013 (sensibile) - 159936 (latente)	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>2</sup> anno)	75.1	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>3</sup> anno)	16.7	

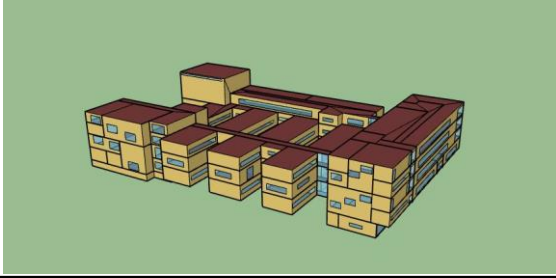
Psicologia 1			
Parametro	Unità di misura	Descrizione	Note
<b>Geometria</b>			
Area in pianta	m <sup>2</sup>	1187	
Area totale	m <sup>2</sup>	5935	
Numero di piani	-	5	
Area laterale totale	m <sup>2</sup>	3297	
Volume riscaldato	m <sup>3</sup>	21365	
Window-wall-ratio	%	12.64 a Nord - 14.66 a Est - 11.36 a Sud - 30.95 a Ovest	
Rappresentazione grafica dell'edificio	-		4_Psico1_model
<b>Struttura</b>			
<i>Muri esterni</i>			
Stratigrafia	m	Intonaco esterno (0.015) - CLS armato (0.270) - Lana di vetro (0.060) - Cartongesso (0.012) - Intonaco interno (0.003)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.53	
<i>Muri interni</i>			
Stratigrafia	m	Intonaco interno (0.005) - Cartongesso (0.012) - Polistirene (0.066) - Cartongesso (0.012) - Intonaco interno (0.005)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.5	
<i>Solaio interpiano</i>			
Stratigrafia	m	PVC (0.020) - Massetto alleggerito (0.100) - Solaio Predalles (0.400) - Intonaco interno (0.015)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.57	
<i>Pavimento contro terra</i>			
Stratigrafia	m	CLS armato (0.300) - Ghiaia (0.050) - CLS armato (0.200) - Guaina bituminosa (0.050) - Poliuretano espanso (0.030) - Massetto (0.050)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.61	
<i>Copertura</i>			
Stratigrafia	m	Lamiera (0.001) - CLS armato (0.200) - Polietilene (0.005) - Poliuretano (0.050) - Polietilene (0.005) - Massetto alleggerito (0.100)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.41	
<i>Finestre</i>			
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	2.83	
SHGn	-	0.6	
<b>Carichi interni e schedules (UNI EN ISO 18523)</b>			
Occupazione	W/m <sup>2</sup>	11.9 (Office room) - 3.6 (Office corridor)	54.62% sensibile
Densità di occupazione	pers/m <sup>2</sup>	0.1 (Office room) - 0 (Office corridor)	Sensibile
Illuminazione artificiale	W/m <sup>2</sup>	12 (Office room) - 15 (Office corridor)	Sensibile
Apparecchi elettrici	W/m <sup>2</sup>	12 (Office room) - 0 (Office corridor)	Sensibile
On-off impianto	-	07:00 - 21:00	
Ricambio orario	1/h	1.41	On-off come impianto
Infiltrazione nominale	1/h	0.1	Costante
Setpoint invernale	°C	22	
Setpoint estivo	°C	26	
Umidità di setpoint	%	50	Estate
<b>Risultati</b>			
Fabbisogno invernale	kWh/anno	171161	Sensibile
Fabbisogno estivo	kWh/anno	156605 (sensibile) - 75351 (latente)	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>2</sup> anno)	28	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>3</sup> anno)	8.1	

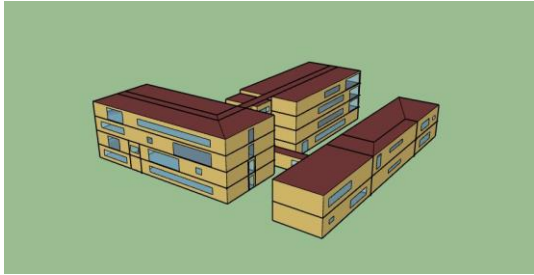
<b>Psicologia 2</b>			
<i>Parametro</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Note</i>
<b>Geometria</b>			
Area in pianta	m <sup>2</sup>	713	
Area totale	m <sup>2</sup>	4990	
Numero di piani	-	7	
Area laterale totale	m <sup>2</sup>	3328	
Volume riscaldato	m <sup>3</sup>	17965	
Window-wall-ratio	%	27.31 a Nord - 30.31 a Est - 14.12 a Sud - 29.95 a Ovest	
Rappresentazione grafica dell'edificio	-		5_Psico2_model
<b>Struttura</b>			
<i>Muri esterni</i>			
Stratigrafia	m	Intonaco esterno (0.015) - CLS armato (0.270) - Lana di vetro (0.060) - Cartongesso (0.012) - Intonaco interno (0.003)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.53	
<i>Muri interni</i>			
Stratigrafia	m	Intonaco interno (0.005) - Cartongesso (0.012) - Polistirene (0.066) - Cartongesso (0.012) - Intonaco interno (0.005)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.5	
<i>Solaio interpiano</i>			
Stratigrafia	m	PVC (0.020) - Massetto alleggerito (0.100) - Solaio Predalles (0.400) - Intonaco interno (0.015)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.57	
<i>Pavimento contro terra</i>			
Stratigrafia	m	CLS armato (0.300) - Ghiaia (0.050) - CLS armato (0.200) - Bitume (0.050) - Poliuretano esp. (0.030) - Massetto (0.020)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.61	
<i>Copertura</i>			
Stratigrafia	m	Lamiera (0.001) - CLS armato (0.200) - Polietilene (0.005) - Poliuretano (0.050) - Polietilene (0.005) - Massetto (0.100)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.41	
<i>Finestre</i>			
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	2.17	
SHGn	-	0.7	
<b>Carichi interni e schedules (UNI EN ISO 18523)</b>			
Occupazione	W/m <sup>2</sup>	11.9 (Office room) - 3.6 (Office corridor) - 59.5 (Lecture room)	54.62% sensibile
Densità di occupazione	pers/m <sup>2</sup>	0.1 (Office room) - 0 (Office corridor) - 0.5 (Lecture room)	Sensibile
Illuminazione artificiale	W/m <sup>2</sup>	12 (Office room) - 15 (Office corridor) - 20 (Lecture room)	Sensibile
Apparecchi elettrici	W/m <sup>2</sup>	12 (Office room) - 0 (Office corridor) - 2 (Lecture room)	Sensibile
On-off impianto	-	07:00 - 21:00	
Ricambio orario	1/h	1.21	On-off come impianto
Infiltrazione nominale	1/h	0.1	Costante
Setpoint invernale	°C	22	
Setpoint estivo	°C	26	
Umidità di setpoint	%	50	Estate
<b>Risultati</b>			
Fabbisogno invernale	kWh/anno	134232	Sensibile
Fabbisogno estivo	kWh/anno	159198 (sensibile) - 73954 (latente)	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>2</sup> anno)	24.8	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>3</sup> anno)	7.4	

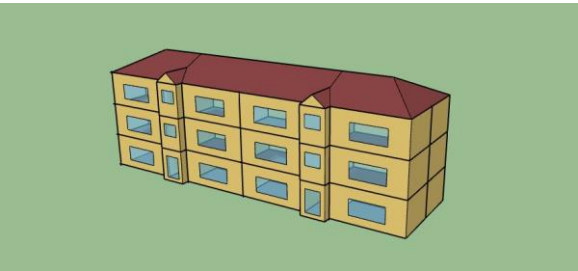


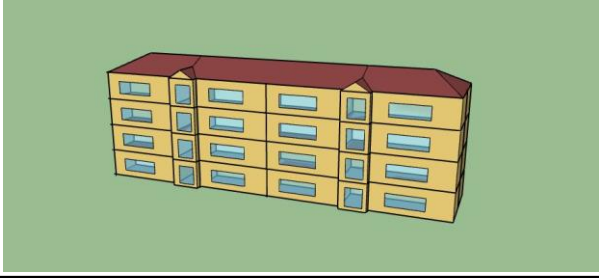
Centro Linguistico di Ateneo			
Parametro	Unità di misura	Descrizione	Note
<b>Geometria</b>			
Area in pianta	m <sup>2</sup>	1146	
Area totale	m <sup>2</sup>	8022	
Numero di piani	-	7	
Area laterale totale	m <sup>2</sup>	3242	
Volume riscaldato	m <sup>3</sup>	22863	
Window-wall-ratio	%	27.47 a Nord - 25.42 a Est - 27.19 a Sud - 26.02 a Ovest	
Rappresentazione grafica dell'edificio	-		7_CLA_model
<b>Struttura</b>			
<i>Muri esterni</i>			
Stratigrafia	m	Intonaco esterno (0.020) - Polistirene espanso (0.040) - CLS armato (0.270) - Lana di vetro (0.050) - Cartongesso (0.012)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.38	
<i>Muri interni</i>			
Stratigrafia	m	Cartongesso (0.025) - Lana di vetro (0.060) - Cartongesso (0.025)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.5	
<i>Solaio interpiano</i>			
Stratigrafia	m	Linoleum (0.010) - Massetto (0.070) - Massetto all. (0.110) - Solaio Predalles (0.600) - Aria (0.030) - Controsoffitto (0.030)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.42	
<i>Pavimento contro terra</i>			
Stratigrafia	m	Solaio Predalles (0.500) - Massetto (0.040) - Polietilene (0.010) - Massetto all. (0.200) - CLS (0.700) - Linoleum (0.010)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.41	
<i>Copertura</i>			
Stratigrafia	m	Polistirene esp. (0.090) - Poliet. (0.020) - Massetto (0.170) - Poliet. (0.010) - Solaio Predal. (0.400) - Controsoffitto (0.030)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.24	
<i>Finestre</i>			
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.1	
SHGn	-	0.5	
<b>Carichi interni e schedules (UNI EN ISO 18523)</b>			
Occupazione	W/m <sup>2</sup>	11.9 (Office room) - 3.6 (Office corridor) - 59.5 (Lecture room)	54.62% sensibile
Densità di occupazione	pers/m <sup>2</sup>	0.1 (Office room) - 0 (Office corridor) - 0.5 (Lecture room)	Sensibile
Illuminazione artificiale	W/m <sup>2</sup>	12 (Office room) - 15 (Office corridor) - 20 (Lecture room)	Sensibile
Apparecchi elettrici	W/m <sup>2</sup>	12 (Office room) - 0 (Office corridor) - 2 (Lecture room)	Sensibile
On-off impianto	-	07:00 - 21:00	
Ricambio orario	1/h	1.22	On-off come impianto
Infiltrazione nominale	1/h	0.1	Costante
Setpoint invernale	°C	22	
Setpoint estivo	°C	26	
Umidità di setpoint	%	50	Estate
<b>Risultati</b>			
Fabbisogno invernale	kWh/anno	83756	Sensibile
Fabbisogno estivo	kWh/anno	200509 (sensibile) - 94036 (latente)	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>2</sup> anno)	10.8	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>3</sup> anno)	3.6	

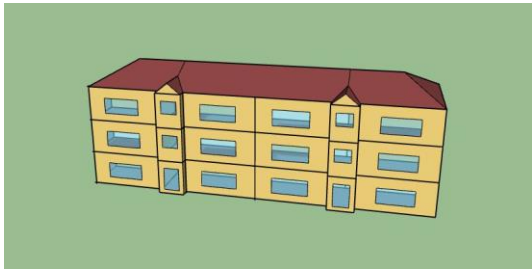
Dipartimento di Geoscienze			
Parametro	Unità di misura	Descrizione	Note
<b>Geometria</b>			
Area in pianta	m <sup>2</sup>	2420	
Area totale	m <sup>2</sup>	9680	
Numero di piani	-	4	
Area laterale totale	m <sup>2</sup>	3608	
Volume riscaldato	m <sup>3</sup>	32912	
Window-wall-ratio	%	30.16 a Nord - 35.54 a Est - 29.13 a Sud - 25.63 a Ovest	
Rappresentazione grafica dell'edificio	-		9_Geoscienze_model
<b>Struttura</b>			
<i>Muri esterni</i>			
Stratigrafia	m	Lamiera metallica (0.002) - Aria (0.030) - Isolante polimerico (0.050) - CLS (0.250) - Cartongesso (0.010)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.45	
<i>Muri interni</i>			
Stratigrafia	m	Cartongesso (0.020) - Lana di roccia (0.060) - Cartongesso (0.020)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.5	
<i>Solaio interpiano</i>			
Stratigrafia	m	Piastrelle (0.015) - Massetto (0.050) - Solaio Predalles (0.250) - CLS armato (0.050) - Intonaco interno (0.010)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.55	
<i>Pavimento contro terra</i>			
Stratigrafia	m	Ciottoli (0.250) - Sabbia e ghiaia (0.300) - CLS armato (0.250) - Massetto (0.050)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.11	
<i>Copertura</i>			
Stratigrafia	m	Bitume (0.030) - Lana di roccia (0.060) - Massetto (0.050) - Solaio Pred. (0.250) - CLS arm. (0.050) - Intonaco int. (0.010)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.45	
<i>Finestre</i>			
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.27	
SHGn	-	0.591	
<b>Carichi interni e schedules (UNI EN ISO 18523)</b>			
Occupazione	W/m <sup>2</sup>	11.9 (Office room) - 3.6 (Office corridor) - 59.5 (Lecture room)	54.62% sensibile
Densità di occupazione	pers/m <sup>2</sup>	0.1 (Office room) - 0 (Office corridor) - 0.5 (Lecture room)	Sensibile
Illuminazione artificiale	W/m <sup>2</sup>	12 (Office room) - 15 (Office corridor) - 20 (Lecture room)	Sensibile
Apparecchi elettrici	W/m <sup>2</sup>	12 (Office room) - 0 (Office corridor) - 2 (Lecture room)	Sensibile
On-off impianto	-	07:00 - 21:00	
Ricambio orario	1/h	1.32	On-off come impianto
Infiltrazione nominale	1/h	0.1	Costante
Setpoint invernale	°C	22	
Setpoint estivo	°C	26	
Umidità di setpoint	%	50	Estate
<b>Risultati</b>			
Fabbisogno invernale	kWh/anno	203548	Sensibile
Fabbisogno estivo	kWh/anno	279393 (sensibile) - 123230 (latente)	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>2</sup> anno)	17.8	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>3</sup> anno)	6	

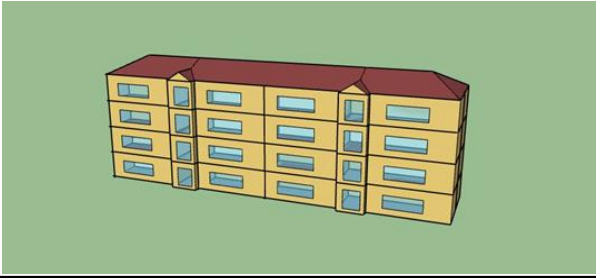
Dipartimento di Ingegneria Industriale			
Parametro	Unità di misura	Descrizione	Note
<b>Geometria</b>			
Area in pianta	m <sup>2</sup>	3747	
Area totale	m <sup>2</sup>	11242	
Numero di piani	-	3	
Area laterale totale	m <sup>2</sup>	8128	
Volume riscaldato	m <sup>3</sup>	48341	
Window-wall-ratio	%	24.58 a Nord - 22.79 a Est - 20.15 a Sud - 29.71 a Ovest	
Rappresentazione grafica dell'edificio	-		10_DEI_G_model
<b>Struttura</b>			
<i>Muri esterni</i>			
Stratigrafia	m	Mattone forato (0.140) - Aria (0.020) - Mattone forato (0.140) - Intonaco interno (0.010)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.22	
<i>Muri interni</i>			
Stratigrafia	m	Intonaco interno (0.010) - Mattone forato (0.08) - intonaco interno (0.010)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	2.54	
<i>Solaio interpiano</i>			
Stratigrafia	m	Piastrelle (0.015) - Massetto (0.050) - CLS armato (0.050) - Latero cemento (0.250) - Intonaco interno (0.015)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.25	
<i>Pavimento contro terra</i>			
Stratigrafia	m	Ciottoli (0.250) - Sabbia e ghiaia (0.300) - CLS armato (0.250) - Massetto (0.050) - Piastrelle (0.015)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.09	
<i>Copertura</i>			
Stratigrafia	m	Bitume (0.030) - Lana di roccia (0.060) - Massetto (0.050) - CLS arm. (0.050) - Latero cemento (0.250) - Intonaco int. (0.010)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.43	
<i>Finestre</i>			
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	5.68	
SHGn	-	0.855	
<b>Carichi interni e schedules (UNI EN ISO 18523)</b>			
Occupazione	W/m <sup>2</sup>	11.9 (Office room) - 3.6 (Office corridor) - 59.5 (Lecture room)	54.62% sensibile
Densità di occupazione	pers/m <sup>2</sup>	0.1 (Office room) - 0 (Office corridor) - 0.5 (Lecture room)	Sensibile
Illuminazione artificiale	W/m <sup>2</sup>	12 (Office room) - 15 (Office corridor) - 20 (Lecture room)	Sensibile
Apparecchi elettrici	W/m <sup>2</sup>	12 (Office room) - 0 (Office corridor) - 2 (Lecture room)	Sensibile
On-off impianto	-	07:00 - 21:00	
Ricambio orario	1/h	1.03	On-off come impianto
Infiltrazione nominale	1/h	0.1	Costante
Setpoint invernale	°C	22	
Setpoint estivo	°C	26	
Umidità di setpoint	%	50	Estate
<b>Risultati</b>			
Fabbisogno invernale	kWh/anno	780913	Sensibile
Fabbisogno estivo	kWh/anno	292635 (sensibile) - 144100 (latente)	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>2</sup> anno)	69	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>3</sup> anno)	15.7	

Dipartimento di Ingegneria Informatica			
Parametro	Unità di misura	Descrizione	Note
<b>Geometria</b>			
Area in pianta	m <sup>2</sup>	1556	
Area totale	m <sup>2</sup>	4667	
Numero di piani	-	3	
Area laterale totale	m <sup>2</sup>	3810	
Volume riscaldato	m <sup>3</sup>	17268	
Window-wall-ratio	%	20.04 a Nord - 17.76 a Est - 22.00 a Sud - 14.98 a Ovest	
Rappresentazione grafica dell'edificio	-		11_DEI_model
<b>Struttura</b>			
<i>Muri esterni</i>			
Stratigrafia	m	Intonaco esterno (0.020) - Mattone forato (0.250) - Aria (0.050) - Mattone forato (0.080) - Intonaco interno (0.020)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.15	
<i>Muri interni</i>			
Stratigrafia	m	Intonaco interno (0.010) - Mattone forato (0.08) - intonaco interno (0.010)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	2.54	
<i>Solaio interpiano</i>			
Stratigrafia	m	Piastrelle (0.015) - Massetto (0.050) - CLS armato (0.050) - Latero cemento (0.250) - Intonaco interno (0.015)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.25	
<i>Pavimento contro terra</i>			
Stratigrafia	m	Ciottoli (0.250) - Sabbia e ghiaia (0.300) - CLS armato (0.250) - Massetto (0.050) - Piastrelle (0.015)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.09	
<i>Copertura</i>			
Stratigrafia	m	Bitume (0.030) - Lana di roccia (0.060) - Massetto (0.050) - CLS arm. (0.050) - Latero cemento (0.250) - Intonaco int. (0.010)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.43	
<i>Finestre</i>			
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.4	
SHGn	-	0.74	
<b>Carichi interni e schedules (UNI EN ISO 18523)</b>			
Occupazione	W/m <sup>2</sup>	11.9 (Office room) - 3.6 (Office corridor) - 59.5 (Lecture room)	54.62% sensibile
Densità di occupazione	pers/m <sup>2</sup>	0.1 (Office room) - 0 (Office corridor) - 0.5 (Lecture room)	Sensibile
Illuminazione artificiale	W/m <sup>2</sup>	12 (Office room) - 15 (Office corridor) - 20 (Lecture room)	Sensibile
Apparecchi elettrici	W/m <sup>2</sup>	12 (Office room) - 0 (Office corridor) - 2 (Lecture room)	Sensibile
On-off impianto	-	07:00 - 21:00	
Ricambio orario	1/h	1.23	On-off come impianto
Infiltrazione nominale	1/h	0.1	Costante
Setpoint invernale	°C	22	
Setpoint estivo	°C	26	
Umidità di setpoint	%	50	Estate
<b>Risultati</b>			
Fabbisogno invernale	kWh/anno	221662	Sensibile
Fabbisogno estivo	kWh/anno	137396 (sensibile) - 56389 (latente)	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>2</sup> anno)	41.8	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>3</sup> anno)	12.5	

Edificio residenziale Nord			
Parametro	Unità di misura	Descrizione	Note
<b>Geometria</b>			
Area in pianta	m <sup>2</sup>	285	
Area totale	m <sup>2</sup>	856	
Numero di piani	-	3	
Area laterale totale	m <sup>2</sup>	872	
Volume riscaldato	m <sup>3</sup>	2825	
Window-wall-ratio	%	22.94 a Nord - 0 a Est - 13.02 a Sud - 0 a Ovest	
Rappresentazione grafica dell'edificio	-		14_R_B_1_model
<b>Struttura</b>			
<i>Muri esterni</i>			
Stratigrafia	m	Pannello isolante (0.030) - Mattone forato (0.250) - Intonaco interno (0.015)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.16	
<i>Muri interni</i>			
Stratigrafia	m	Intonaco interno (0.015) - Mattone forato (0.25) - intonaco interno (0.015)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.41	
<i>Solaio interpiano</i>			
Stratigrafia	m	Cemento magro (0.050) - CLS (0.040) - Mattone forato (0.120) - Intonaco interno (0.015) - Aria (0.030) - Cartongesso (0.015)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.17	
<i>Pavimento contro terra</i>			
Stratigrafia	m	Ghiaione (0.500) - Massetto (0.100) - Massetto alleggerito (0.080) - Cemento magro (0.040) - Piastrelle (0.010)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.84	
<i>Copertura</i>			
Stratigrafia	m	Tegole (0.015) - Pannello di legno (0.040) - Travi (0.057)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.07	
<i>Finestre</i>			
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	2.56	
SHGn	-	0.55	
<b>Carichi interni e schedules (UNI EN ISO 18523)</b>			
Occupazione zona giorno	W/pers	180 (adulto) - 126 (bambino)	54.62% sensibile
Occupazione zona notte	W/pers	115 (adulto) - 80.5 (bambino)	54.62% sensibile
Apparecchi zona giorno	Wh/giorno	2431 (feriale) - 1494 (festivo) - 2833 (sabato e domenica)	Sensibile
Apparecchi zona notte	Wh/giorno	726 (feriale) - 662 (festivo) - 993 (sabato e domenica)	Sensibile
On-off impianto	-	07:00 - 11:00, 12:00 - 14:00, 16:00 - 24:00	
Ricambio orario	1/h	0	
Infiltrazione nominale zona giorno	1/h	0.2	
Infiltrazione nominale zona notte	1/h	0.45	
Setpoint invernale	°C	20	
Setpoint estivo	°C	26	
Umidità di	%	50	Estate
<b>Risultati</b>			
Fabbisogno invernale	kWh/anno	59539	Sensibile
Fabbisogno estivo	kWh/anno	11062 (sensibile) - 3340 (latente)	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>2</sup> anno)	52.1	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>3</sup> anno)	19.3	

Edificio residenziale Est			
Parametro	Unità di misura	Descrizione	Note
<b>Geometria</b>			
Area in pianta	m <sup>2</sup>	371	
Area totale	m <sup>2</sup>	1484	
Numero di piani	-	4	
Area laterale totale	m <sup>2</sup>	1437	
Volume riscaldato	m <sup>3</sup>	5045	
Window-wall-ratio	%	0 a Nord - 24.82 a Est - 0 a Sud - 13.1 a Ovest	
Rappresentazione grafica dell'edificio	-		15_R_B_2_model
<b>Struttura</b>			
<i>Muri esterni</i>			
Stratigrafia	m	Intonaco esterno (0.015) - Mattone forato (0.250) - Intonaco interno (0.015)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.27	
<i>Muri interni</i>			
Stratigrafia	m	Intonaco interno (0.015) - Mattone forato (0.25) - intonaco interno (0.015)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.41	
<i>Solaio interpiano</i>			
Stratigrafia	m	CLS (0.040) - Mattone forato (0.120) - Intonaco interno (0.015)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.82	
<i>Pavimento contro terra</i>			
Stratigrafia	m	Ghiaione (0.500) - Massetto (0.100) - Massetto alleggerito (0.080) - Cemento magro (0.040) - Piastrelle (0.010)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.84	
<i>Copertura</i>			
Stratigrafia	m	Tegole (0.015) - Pannello di legno (0.040) - Travi (0.057)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.07	
<i>Finestre</i>			
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	2.56	
SHGn	-	0.55	
<b>Carichi interni e schedules (UNI EN ISO 18523)</b>			
Occupazione zona giorno	W/pers	180 (adulto) - 126 (bambino)	54.62% sensibile
Occupazione zona notte	W/pers	115 (adulto) - 80.5 (bambino)	54.62% sensibile
Apparecchi zona giorno	Wh/giorno	2431 (feriale) - 1494 (festivo) - 2833 (sabato e domenica)	Sensibile
Apparecchi zona notte	Wh/giorno	726 (feriale) - 662 (festivo) - 993 (sabato e domenica)	Sensibile
On-off impianto	-	07:00 - 11:00 , 12:00 - 14:00 , 16:00 - 24:00	
Ricambio orario	1/h	0	
Infiltrazione nominale zona giorno	1/h	0.2	
Infiltrazione nominale zona notte	1/h	0.45	
Setpoint invernale	°C	20	
Setpoint estivo	°C	26	
Umidità di	%	50	Estate
<b>Risultati</b>			
Fabbisogno invernale	kWh/anno	125635	Sensibile
Fabbisogno estivo	kWh/anno	19359 (sensibile) - 4919 (latente)	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>2</sup> anno)	84.7	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>3</sup> anno)	24.9	

Edificio residenziale Sud			
Parametro	Unità di misura	Descrizione	Note
<b>Geometria</b>			
Area in pianta	m <sup>2</sup>	285	
Area totale	m <sup>2</sup>	856	
Numero di piani	-	3	
Area laterale totale	m <sup>2</sup>	872	
Volume riscaldato	m <sup>3</sup>	2825	
Window-wall-ratio	%	13.02 a Nord - 0 a Est - 22.94 a Sud - 0 a Ovest	
Rappresentazione grafica dell'edificio	-		16_R_B_3_model
<b>Struttura</b>			
<i>Muri esterni</i>			
Stratigrafia	m	Intonaco esterno (0.015) - Mattone forato (0.250) - Intonaco interno (0.015)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.27	
<i>Muri interni</i>			
Stratigrafia	m	Intonaco interno (0.015) - Mattone forato (0.25) - intonaco interno (0.015)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.41	
<i>Solaio interpiano</i>			
Stratigrafia	m	CLS (0.040) - Mattone forato (0.120) - Intonaco interno (0.015)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.82	
<i>Pavimento contro terra</i>			
Stratigrafia	m	Ghiaione (0.500) - Massetto (0.100) - Massetto alleggerito (0.080) - Cemento magro (0.040) - Piastrelle (0.010)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.84	
<i>Copertura</i>			
Stratigrafia	m	Tegole (0.015) - Pannello di legno (0.040) - Travi (0.057)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.07	
<i>Finestre</i>			
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	2.56	
SHGn	-	0.55	
<b>Carichi interni e schedules (UNI EN ISO 18523)</b>			
Occupazione zona giorno	W/pers	180 (adulto) - 126 (bambino)	54.62% sensibile
Occupazione zona notte	W/pers	115 (adulto) - 80.5 (bambino)	54.62% sensibile
Apparecchi zona giorno	Wh/giorno	2431 (feriale) - 1494 (festivo) - 2833 (sabato e domenica)	Sensibile
Apparecchi zona notte	Wh/giorno	726 (feriale) - 662 (festivo) - 993 (sabato e domenica)	Sensibile
On-off impianto	-	07:00 - 11:00, 12:00 - 14:00, 16:00 - 24:00	
Ricambio orario	1/h	0	
Infiltrazione nominale zona giorno	1/h	0.2	
Infiltrazione nominale zona notte	1/h	0.45	
Setpoint invernale	°C	20	
Setpoint estivo	°C	26	
Umidità di	%	50	Estate
<b>Risultati</b>			
Fabbisogno invernale	kWh/anno	73175	Sensibile
Fabbisogno estivo	kWh/anno	10178 (sensibile) - 3374 (latente)	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>2</sup> anno)	64	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>3</sup> anno)	23.7	

Edificio residenziale Ovest			
Parametro	Unità di misura	Descrizione	Note
<b>Geometria</b>			
Area in pianta	m <sup>2</sup>	371	
Area totale	m <sup>2</sup>	1484	
Numero di piani	-	4	
Area laterale totale	m <sup>2</sup>	1437	
Volume riscaldato	m <sup>3</sup>	5045	
Window-wall-ratio	%	0 a Nord - 13.1 a Est - 0 a Sud - 24.82 a Ovest	
Rappresentazione grafica dell'edificio	-		17_R_B_4_model
<b>Struttura</b>			
<i>Muri esterni</i>			
Stratigrafia	m	Intonaco esterno (0.015) - Mattone forato (0.250) - Intonaco interno (0.015)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.27	
<i>Muri interni</i>			
Stratigrafia	m	Intonaco interno (0.015) - Mattone forato (0.25) - intonaco interno (0.015)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.41	
<i>Solaio interpiano</i>			
Stratigrafia	m	CLS (0.040) - Mattone forato (0.120) - Intonaco interno (0.015)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.82	
<i>Pavimento contro terra</i>			
Stratigrafia	m	Ghiaione (0.500) - Massetto (0.100) - Massetto alleggerito (0.080) - Cemento magro (0.040) - Piastrelle (0.010)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	0.84	
<i>Copertura</i>			
Stratigrafia	m	Tegole (0.015) - Pannello di legno (0.040) - Travi (0.057)	
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	1.07	
<i>Finestre</i>			
Trasmittanza termica	W/(m <sup>2</sup> K)	2.56	
SHGn	-	0.55	
<b>Carichi interni e schedules (UNI EN ISO 18523)</b>			
Occupazione zona giorno	W/pers	180 (adulto) - 126 (bambino)	54.62% sensibile
Occupazione zona notte	W/pers	115 (adulto) - 80.5 (bambino)	54.62% sensibile
Apparecchi zona giorno	Wh/giorno	2431 (feriale) - 1494 (festivo) - 2833 (sabato e domenica)	Sensibile
Apparecchi zona notte	Wh/giorno	726 (feriale) - 662 (festivo) - 993 (sabato e domenica)	Sensibile
On-off impianto	-	07:00 - 11:00 , 12:00 - 14:00 , 16:00 - 24:00	
Ricambio orario	1/h	0	
Infiltrazione nominale zona giorno	1/h	0.2	
Infiltrazione nominale zona notte	1/h	0.45	
Setpoint invernale	°C	20	
Setpoint estivo	°C	26	
Umidità di	%	50	Estate
<b>Risultati</b>			
Fabbisogno invernale	kWh/anno	125516	Sensibile
Fabbisogno estivo	kWh/anno	19633 (sensibile) - 4922 (latente)	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>2</sup> anno)	84.6	
Fabbisogno specifico	kWh/(m <sup>3</sup> anno)	24.9	



## BIBLIOGRAFIA

- [1] United Nations: world Urbanization Prospects: the 2014 Revision, UN Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York NY, 2014.
- [2] New York NY, City of New York: one City Built to Last, 2014.
- [3] City of Boston: Greenovate Boston 2014 Climate Action Plan Update. Boston MA, 2014.
- [4] BP, Statistical Review of World Energy, 2019.
- [5] Reinhart C.F., Cerezo C. Urban building energy modeling – A review of a nascent field, *Building and Environment* (2016), Vol. 97 (2016), pages 196-202.
- [6] Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, Raccomandazione 2016/1318 della Commissione del 29 luglio 2016.
- [7] Madsen H., Holst J. Estimation of continuous-time models for the heat dynamics of a building, *Energy and buildings* (1995), Vol. 22 (1995), pages 67–79.
- [8] International Organization for Standardization ISO 13790:2008. Energy performance of buildings: calculation of energy use for space heating and cooling. 2nd ed. Geneva, Switzerland.
- [9] Privara S., Cigler J., Vana Z., Oldewurtel F., et al. Building modeling as a crucial part for building predictive control, *Energy and Buildings* (2013), Vol. 56 (2013), pages 8-22.
- [10] Sito ufficiale dell'Università degli Studi di Padova ([www.unipd.it](http://www.unipd.it)).
- [11] UNI EN ISO 6946:2008 Componenti ed elementi per edilizia – Resistenza termica e trasmittanza termica – Metodi di calcolo.
- [12] U.S. Department of Energy, EnergyPlus Version 9.2.0 Documentation. Getting Started: [https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel\\_custom/pdfs/pdfs\\_v9.2.0/GettingStarted.pdf](https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel_custom/pdfs/pdfs_v9.2.0/GettingStarted.pdf)
- [13] U.S. Department of Energy, EnergyPlus Version 9.2.0 Documentation. Engineering Reference: [https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel\\_custom/pdfs/pdfs\\_v9.2.0/EngineeringReference.pdf](https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel_custom/pdfs/pdfs_v9.2.0/EngineeringReference.pdf)
- [14] U.S. Department of Energy, EnergyPlus Version 9.2.0 Documentation. Input Output Reference: [https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel\\_custom/pdfs/pdfs\\_v9.2.0/InputOutputReference.pdf](https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel_custom/pdfs/pdfs_v9.2.0/InputOutputReference.pdf)

- [15] File climatico di tipo IGDG “Gianni de Giorgio”. Link seguente: [https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/weather/weather\\_files/italia\\_dati\\_climatici\\_g\\_de\\_giorgio.pdf](https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/weather/weather_files/italia_dati_climatici_g_de_giorgio.pdf)
- [16] Erbs D.G., Kein S.A., Duffie J.A. Estimation of the Diffuse Solar Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly-Average Global Radiation, *Solar Energy* (1982), Vol. 28 (1982), page 293.
- [17] Liu B.Y.H., Jordan R.C. The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation, *Solar Energy* (1960), Vol. 4, Iss. 3 (1960), pages 1-19.
- [18] Collares-Pereira M., Rabl A. The Average Distribution of Solar Radiation- Correlation Between Diffuse and Hemispherical and between Daily and Hourly Insolation Values, *Solar Energy* (1979), Vol. 22 (1979), page 175.
- [19] BS ISO 18523-1:2016. Energy performance of buildings – Schedule and condition of building, zone and space usage for energy calculation. Part 1: Non-residential buildings.
- [20] BS ISO 18523-2:2018. Energy performance of buildings – Schedule and condition of building, zone and space usage for energy calculation. Part 2: Residential buildings.
- [21] UNI EN ISO 7730:2006. Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
- [22] DPR 412 del 26 Agosto 1993. [http://www.certificazione-energetica.com/docs/dpr\\_412-93.pdf](http://www.certificazione-energetica.com/docs/dpr_412-93.pdf)
- [23] Beuken K.L. Wärmeverluste bei periodisch betriebenen Öfen, Dissertation Freiburg (1936).
- [24] Rouvel L. Berechnung des wärmetechnischen Verhaltens von Räumen bei dynamischen Wärmelasten, *Brennst-Wärme-Kraft* (1972), Vol. 24 (1972), Nr. 6 (in German).
- [25] Laret L. Use of general models with a small number of parameters: part 1-theoretical analysis, in: Proc. of 7th Int.Congress of Heating and AirConditioning CLIMA 2000, Budapest, 1980.
- [26] Lorenz F., Masy G. Méthode d'évaluation de l'économie d'énergie apportée par l'intermittence de chauffage dans les bâtiments. Traitement par differences finies d'un model a deux constantes de temps, in: Report No.GM820130-01. Faculte des Sciences Appliquees, University de Liege, Liege, Belgium, 1982 (in French).

- [27] Crabb J.A, Murdoch N., Penman J.M. A simplified thermal response model, *Building Services Engineering Research and Technology* (1987), Vol. 8 (1987), pages 13-19.
- [28] Tindale A. Third-order lumped-parameter simulation method, *Building Services Engineering Research and Technology* (2003), Vol. 14, Iss. 3 (2003), pages 87–97.
- [29] Antonopoulos K.A., Koronaki E. Apparent and effective thermal capacitance of buildings, *Energy* (1998), Vol. 23, Iss. 3 (1998), pages 183–192.
- [30] Fraisse G., Viardot C., Lafabrie O., Achard G. Development of a simplified and accurate building model based on electrical analogy, *Energy and Buildings* (2002), Vol. 34 (2002), pages 1017–1031.
- [31] Nielsen T.R. Simple tool to evaluate energy demand and indoor environment in the early stages of building design, *Solar Energy* (2005), Vol. 78, Iss. 1 (2005), pages 73–83.
- [32] Kämpf J.H., Robinson D. A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows, *Energy and Buildings* (2007), Vol. 39 (2007), pages 445–453.
- [33] Gouda M.M, Danaher S., Underwood C.P. Building thermal model reduction using non linear constrained optimization, *Building and Environment* (2002), Vol. 37 (2002), pages 1255-1265.
- [34] Rouvel L., Zimmermann F. Berechnung des instationären thermischen Gebäudeverhaltens. LH Vol. 55 Iss. 3 (2004), pages 39–46; LH Vol. 55 Iss.4 (2004), pages 24-30.
- [35] VDI 6007-1:2015 German Association of Engineers, Calculation of transient thermal response of rooms and buildings – modelling of room. BeuthVerlag GmbH, Düsseldorf, 2012.
- [36] Comini G., Savino S. La Captazione dell’Energia Solare. International Centre for Mechanical Sciences (2013).
- [37] Arasteh D., Kohler J.C., Griffith B. Modeling Windows in EnergyPlus with Simple Performance Indices. Lawrence Berkeley National Laboratory (2009).
- [38] International Organization for Standardization ISO 13788:2012: Hygrothermal performance of building components and building elements - Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - Calculation methods.
- [39] Prezzario Regionale dei Lavori Pubblici. Prezzi aggiornati a settembre 2013. Osservatorio Regionale degli Appalti (2013).

- [40] Prezzario Regionale dei Lavori Pubblici. Aggiornamento del prezzario al 2018. Osservatorio Regionale degli Appalti (2018).
- [41] Hottel H.C., Woertz, B.B. Evaluation of flat-plate solar heat collector. Transactions of the ASME (1942), Vol. 64 (1942), pages 64-91.
- [42] Metodo di calcolo di PVGIS: <https://ec.europa.eu/jrc/en/PVGIS/docs/methods>.

## RINGRAZIAMENTI

A conclusione di questo elaborato, vorrei ringraziare tutte le persone che hanno contribuito, in un modo o nell'altro, alla realizzazione di questo lavoro di tesi magistrale.

Un ringraziamento particolare va al prof. Angelo Zarrella che mi ha dato la possibilità di affrontare un tema innovativo ed entusiasmante. Grazie per la sua disponibilità e per i suoi suggerimenti.

Desidero ringraziare anche Enrico, Jacopo e Laura che mi hanno aiutato durante questi mesi di lavoro, mostrandosi disponibili e sempre volenterosi. In particolar modo, ringrazio Enrico che mi ha seguito per tutto il percorso.

Ringrazio i miei genitori per tutti i sacrifici che hanno fatto per me e per la famiglia, per i valori che mi hanno insegnato e per avermi dato la possibilità di arrivare fin qui. Ringrazio anche mia sorella, per i suoi consigli e per la sua pazienza.

Ringrazio Stefania per essere stata al mio fianco giorno dopo giorno e per aver creduto sempre in me. Spero di condividere tanti altri traguardi insieme a te.

Ringrazio Enzo e Mauro, amici veri, per avermi supportato sempre anche a distanza e per avermi insegnato il valore dell'amicizia.

Pierdonato