



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

**CONFRONTO DELLE PRESTAZIONI TERMICHE E IMPIANTISTICHE
DI UN EDIFICIO AL VARIARE DELLA SUA STRATIGRAFIA**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF BUILDING THERMAL AND SYSTEMS
PERFORMANCE UNDER DIFFERENT ENVELOPE STRATIGRAPHS**

Relatore:

Prof. Gianluca Coccia

Tesi di Laurea di:

Alessandro Acciarri

A.A. 2025/2026

Dedico questa tesi alla mia famiglia,
che mi ha sempre spinto a dare il massimo;
ai miei amici conosciuti ad Ancona,
dove abbiamo passato momenti stupendi insieme,
a tutte le persone che mi vogliono bene
e che mi hanno dato una mano per raggiungere
questo traguardo che sembrava così lontano.

INDICE

INTRODUZIONE	VII
CAPITOLO 1 STATO DELL'ARTE	1
1.1 Lo sviluppo normativo europeo	1
1.2 Lo sviluppo normativo italiano	5
CAPITOLO 2 CASO STUDIO	16
2.1 Descrizione dell'edificio.....	16
2.2 Configurazione di riferimento.....	19
2.3 Configurazione alternativa.....	22
CAPITOLO 3 METODOLOGIA	25
3.1 Verifica della condensa superficiale	25
3.2 Verifica della condensa interstiziale	30
3.3 Valutazione dei carichi termici di ventilazione.....	33
3.4 Calcolo dei carichi termici per trasmissione	39
CAPITOLO 4 RISULTATI	49
CAPITOLO 5 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	56
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	58

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. Esempio di un'etichetta di efficienza energetica di una lavatrice.....	2
Figura 2. Confronto Legislazioni europee sul rendimento energetico in edilizia	3
Figura 3. Dpr n.412-93	7
Figura 4: ripartizione del patrimonio edilizio italiano in base alle classi energetiche	14
Figura 5. Pianta del piano terra dell'edificio	17
Figura 6. Vista dall'alto dell'edificio	17
Figura 7. Sezione B-B dell'edificio	18
Figura 8. Vista della copertura e dei pannelli fotovoltaici	18
Figura 9. diagramma psicrometrico dell'aria umida	27
Figura 10. Circuito dei pannelli radianti nell'edificio.....	50

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1. Numero di gradi giorno in base alla zona climatica in cui si trova l'edificio	6
Tabella 2. Valori di U limite per strutture opache verticali.....	8
Tabella 3. Valori di U limite per strutture opache orizzontali – COPERTURE	8
Tabella 4. Valori di U limite per strutture opache orizzontali – PAVIMENTI.....	9
Tabella 5. Valori di U limite per chiusure trasparenti con infisso.....	9
Tabella 6. Valori di U limite per i vetri.....	10
Tabella 7. Oneri a carico dello stato e tipologie di edifici interessati dal SuperBonus, dati aggiornati al 30 aprile 2026 ¹	13
Tabella 8. Stratigrafie delle pareti opache nella configurazione di riferimento	20
Tabella 9. Stratigrafie dei serramenti nella configurazione di riferimento	21
Tabella 10. Stratigrafie delle pareti opache nella configurazione alternativa	23
Tabella 11. Stratigrafia dei serramenti nella configurazione alternativa.....	24
Tabella 12. Temperature esterne medie mensili nell'area climatica E	28
Tabella 13 Condizione soddisfatta per la parete esterna	29
Tabella 14. Condizione soddisfatta per il pavimento e per il soffitto	29
Tabella 15. Condizione soddisfatta per tutti i componenti finestrati.....	30
Tabella 16. Condizione soddisfatta per ogni componente opaco	32
Tabella 17. Numero minimo di ricambi orari secondo UNI 10339	35
Tabella 18. Coefficiente di schermatura e secondo UNI 12831.....	36
Tabella 19. Coefficiente di schermatura in funzione del locale, secondo UNI 12831	36
Tabella 20. Fattore di correzione per l'altezza ϵ , secondo UNI 12831	36
Tabella 21: Tasso orario di infiltrazione dell'edificio n_{50} , secondo UNI 12831	37
Tabella 22. Confronto dei valori di portata volumetrica nei due metodi di calcolo per ogni locale	37

Tabella 23. Confronto tra l'entità dei carichi termici invernali divisi per locali e per tipologia di dispersione termica.....	38
Tabella 24. Valori di altezza netta e media per ogni locale.....	40
Tabella 25. Superficie vetrata suddivisa per locali.....	41
Tabella 26. Carichi termici per trasmissione divisi per tipologia e locale	42
Tabella 27. Carichi termici complessivi.....	44
Tabella 28. Carico termico maggiorato diviso per locali	45
Tabella 29. Carichi termici della configurazione di riferimento	45
Tabella 30. Fabbisogno di energia dell'ACS in un anno	48
Tabella 31. Parametri per il calcolo della potenza termica massima sprigionabile.....	50
Tabella 32. Confronto tra le superfici dei pannelli radianti divisi per locali.....	51
Tabella 33. Confronto tra la massima potenza sprigionabile dal pannello radiante e la potenza maggiorata da soddisfare, divisa per locali	52
Tabella 34. Esempio di scaldasalvietta elettrica.....	53
Tabella 35. Coefficiente di prestazione	53
Tabella 36. Potenza utile	53
Tabella 37. Energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico in un anno.....	55
Tabella 38. Energia elettrica utilizzata, esportata e prodotta dall'edificio di riferimento in un anno	55

ACRONIMI E SIMBOLI

APE: Attestato di Prestazione Energetica
AQE: Attestato di Qualificazione Energetica
CE: Comunità Europea
CECA: Comunità Europea del Carbone e dell'Acciaio
CEE: Comunità Economica Europea
CLT: Cross Laminated Timber
EPBD: Energy Performance of Buildings Directive
EPgl,nren: Indice di prestazione energetica globale non rinnovabile
EPS: Expanded Polystyrene
EURATOM: Comunità Europea dell'Energia Atomica
GG: Gradi Giorno
GNL: Gas Naturale Liquefatto
HWBD: Hot Water Boiler Directive
IEA: International Energy Agency
NZEB: Nearly Zero Energy Building
SAVE: Special Action for Vigorous Energy Efficiency
UE: Unione Europea
XPS: Extruded Polystyrene
ZEB: Zero Emission Building

INTRODUZIONE

In questo lavoro si è svolto un confronto dal punto di vista dei carichi termici tra due stratigrafie differenti dello stesso edificio, in modo tale da evidenziare come nuovi materiali edilizi riescano a modificare in maniera sostanziali i consumi di energia richiesti nel periodo invernale.

Come riporta l'executive summary del Gas Market Report del Q2-2026 dell'IEA [1], a partire dalla chiusura di fatto dello Stretto di Hormuz all'inizio di Marzo 2026 a causa del conflitto Stati Uniti-Israele-Iran, si è creata una situazione di incertezza mai così grave nei mercati dell'energia: la perdita temporanea del 20% dell'offerta globale di GNL e del danneggiamento delle infrastrutture di liquefazione del gas naturale hanno prodotto un rialzo dei prezzi e una loro volatilità che ricorda la situazione appena successiva all'inizio del conflitto russo - ucraino. Questa situazione impatta pesantemente per i cittadini europei perché:

- circa il 40% dell'energia consumata nell'UE viene utilizzata dagli edifici
- circa il 50% del consumo europeo di gas naturale è attribuibile agli edifici
- circa l'80% dell'energia utilizzata nelle case dei cittadini dell'UE è destinata al riscaldamento, al raffrescamento e all'acqua calda sanitaria [2]

Se da una parte questa crisi evidenzia la fragilità europea e globale nell'approvvigionamento di gas naturale da un numero limitato di fonti, dall'altra può essere un'occasione di investimento sia su altre fonti energetiche, sia in misure di risparmio energetico, come per esempio una migliore coibentazione degli edifici [3].

Il primo capitolo di questo lavoro è dedicato all'evoluzione normativa italiana ed europea in merito al rendimento energetico delle abitazioni, ad una panoramica delle soluzioni più innovative per coibentare efficacemente un edificio residenziale e ad un confronto con quelle passate. Nel secondo capitolo verrà analizzato il caso studio, con la descrizione dell'edificio e i motivi del confronto tra due soluzioni così differenti. Successivamente, nel terzo capitolo verrà mostrata la metodologia che è alla base dell'intero lavoro e nel quarto capitolo verrà mostrato e commentato il risultato di tale analisi, confrontando le prestazioni termiche ed impiantistiche delle due possibili soluzioni. Infine, nel quinto ed ultimo capitolo si trarranno le conclusioni e si parlerà dei possibili sviluppi futuri di questa analisi.

Capitolo 1

STATO DELL'ARTE

1.1 Lo sviluppo normativo europeo

Per comprendere il contesto nel quale si inserisce il presente lavoro è necessario analizzare l'evoluzione del quadro normativo europeo che ha portato alla definizione degli attuali requisiti prestazionali degli edifici. Verranno messi in luce i principali provvedimenti che hanno contribuito all'evoluzione della progettazione energetica degli edifici e all'introduzione di standard e obiettivi sempre più ambiziosi nel tempo.

Uno dei primi interventi effettivi adottati dalla CEE per contenere i consumi energetici nel settore civile è stato quello rivolto agli impianti di riscaldamento. Le crisi petrolifere del 1973-1974 e del 1979-1980 (e quindi la necessità di mettere in campo misure di austerità energetico a causa dell'impennata dei prezzi), hanno messo in luce che una parte significativa dell'energia che veniva utilizzata negli edifici dipendeva dalle prestazioni dei generatori di calore e dalla qualità dell'involucro edilizio e che la mancanza di standard comuni tra i Paesi membri della CECA (1951) ed EURATOM (1957) (primi trattati multilaterali tra Stati europei riguardo la politica energetica) rendeva molto complesso ottenere miglioramenti diffusi a livello europeo [4].

Infatti, in una prima fase la CEE emanava delle semplici indicazioni generali sulle caratteristiche dei generatori destinati al riscaldamento degli ambienti e alla produzione di acqua calda sanitaria, lasciando però ai singoli Stati la definizione dei requisiti minimi da rispettare [4].

Tuttavia, questo approccio aveva portato alla presenza di standard molto differenti tra i diversi Paesi. Per questa ragione, nel 1992 venne emanata la Direttiva 92/42/CEE [5], nota come Direttiva sulle caldaie ad acqua calda (Hot Water Boiler Directive, HWBD), con l'obiettivo di introdurre criteri uniformi per la valutazione dell'efficienza energetica delle nuove caldaie alimentate a combustibili liquidi o gassosi. La normativa riguardava apparecchi con potenza compresa tra 4 e 400 kW e distingueva diverse tipologie di generatori, tra cui le caldaie standard, quelle a bassa temperatura e quelle a condensazione. L'introduzione di valori minimi comuni di rendimento ha gradualmente contribuito al rinnovamento del parco impiantistico europeo, incentivando l'impiego di tecnologie più efficienti rispetto a quelle diffuse fino a quel momento [4].

Parallelamente a tutto ciò, la direttiva promuoveva una maggiore trasparenza nelle informazioni fornite ai consumatori da parte delle aziende costruttrici per mezzo di etichette di

efficienza energetica (come mostrato nella Figura 1), consentendo di confrontare agevolmente le prestazioni energetiche dei diversi prodotti presenti sul mercato [4].

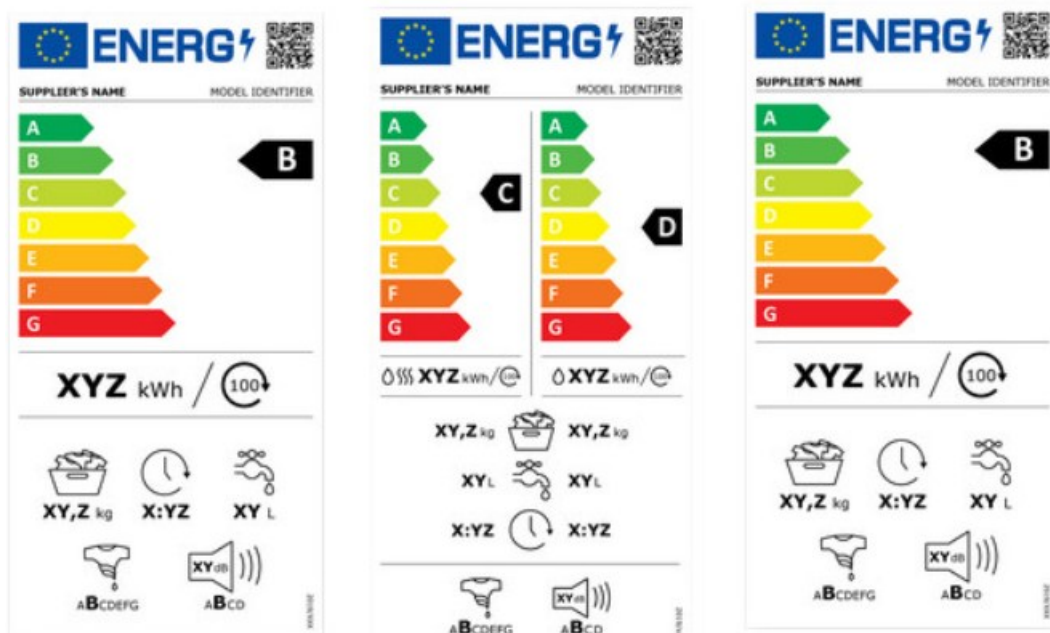


Figura 1. Esempio di un'etichetta di efficienza energetica (versione più recente in vigore dal 1° Marzo 2021) [6]

Dal successo della HWBD inizia a farsi largo l'idea di rendere più efficiente l'utilizzo di energia in tutti i settori, inizialmente con risoluzioni (risoluzione del Consiglio del 9 giugno 1980, GU C 149/1 e risoluzione del Consiglio del 16 settembre 1986, 86/C 241/01) e poi con la direttiva SAVE (93/76/CEE) [7] del 1993 che invitava gli stati membri a promulgare delle leggi riguardo l'isolamento termico dei nuovi edifici, senza però essere granché incisiva nelle imposizioni, anche perché alcuni Paesi membri avevano già sviluppato dei propri codici normativi (compresa l'Italia con la legge 10 del 1991).

Solo dal 2000 in poi la Commissione Europea è riuscita ad essere più esplicita nel delineare la propria strategia riguardo l'efficienza energetica e nell'applicare i piani d'azione in maniera più stringente per la totalità dei paesi dell'UE. Una spinta importante è stata l'adozione del Protocollo di Kyoto (1997) [8] da parte degli Stati membri, che imponeva di ridurre le emissioni di gas serra dell'8% per il periodo 2008-2012 rispetto ai livelli del 1990, forzando i Paesi firmatari ad azioni più coordinate e stringenti riguardo la politica energetica e climatica [4]. Nel 2002 viene introdotta la Direttiva sulla prestazione energetica degli edifici (EPBD, 2002/91/CE) [9], che ha definito per tutti i paesi Europei degli standard minimi di prestazione energetica per i nuovi edifici e per quelli che hanno bisogno di importanti lavori di ristrutturazione.

Le principali disposizioni sono:

1. l'adozione di requisiti minimi di prestazione energetica (ossia le trasmittanze termiche riferite alle principali componenti dell'involucro edilizio (come il tetto, le pareti, le finestre ed il pavimento), in base al Paese membro (come mostrato in Figura 2, dove ovviamente i paesi del Nord Europa avevano già negli anni '2000 valori più stringenti rispetto ai paesi dell'Europa meridionale).
2. l'istituzione di certificazioni di prestazione energetica per ogni Stato membro (APE: rappresenta il consumo energetico di un edificio) per incentivare la domanda di edifici ad alta efficienza energetica ed infine ispezioni periodiche e valutazioni dell'efficienza di impianti di climatizzazione e caldaie,
3. l'ispezione delle caldaie e la valutazione della loro efficienza, in quanto la metà del consumo energetico residenziale europeo proviene dal riscaldamento degli edifici. Inoltre, le ditte costruttrici sono tenute a proporre ai clienti soluzioni più efficienti, come caldaie con un rendimento migliore oppure pompe di calore, sempre per limitare il più possibile le emissioni di anidride carbonica. Lo stesso vale per gli impianti di climatizzazione, soprattutto a causa della loro ampia diffusione negli ultimi decenni in Europa Meridionale, come conseguenza del cambiamento climatico. [3]

Modena 7 Maggio 2008

12/103

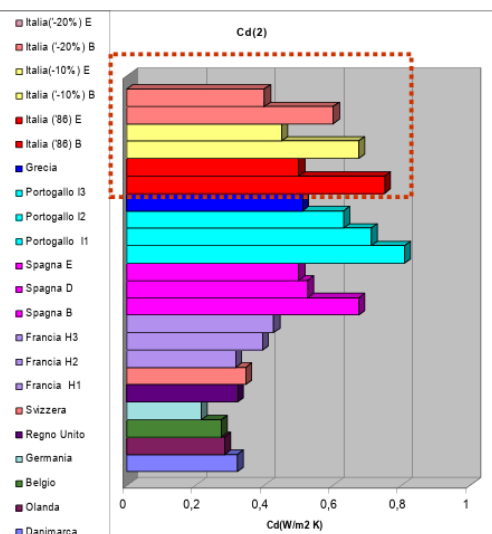
Confronto Legislazioni europee sul rendimento energetico in edilizia

1- Uvalues- limite

Nazioni	U-roof	U-wall	U-window	U-floor
Danimarca	0,2	0,35	2,9	0,3
Olanda	0,28	0,33	1,8	0,33
Germania	0,2	0,5	1,8	0,35
Regno Unito	0,2	0,45	3	0,35
Svizzera	0,3	0,4	3	0,4
Francia H1	0,25	0,6	2,25	0,4
H2	0,25	0,6	2,45	0,4
H3	0,25	0,6	2,45	0,45
Portogallo I1	1,1	1,4	4,2	1,1
I2	0,85	1,2	4,2	0,85
I3	0,75	0,95	4,2	0,75
Grecia	0,46	0,7	4,2	0,46

U-wall (DLgs311/06)-E= 0,46 W/m²K

2- Livello di isolamento



Ing. Giorgio Galbusera

Figura 2. Confronto Legislazioni europee sul rendimento energetico in edilizia [10]

La Direttiva 2009/28/CE [11] presentava obiettivi più ambiziosi, trovando un accordo tra i leader dei Paesi membri per rendere l'UE un'economia ad alta efficienza energetica e a basse emissioni di CO₂ attraverso gli obiettivi 20-20-20, ossia:

- ridurre del 20% le emissioni di gas serra rispetto ai livelli del 1990,
- aumentare del 20% la quota di energia da fonti rinnovabili,
- risparmiare il 20% del consumo annuo di energia primaria attraverso opere di efficienza energetica.

Con l'adozione della Direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica degli edifici, viene introdotto, in accordo ai nuovi obiettivi UE sulla riduzione delle emissioni da gas serra, il concetto di Nearly Zero Energy Building (NZEB). Secondo la definizione presente nella direttiva, NZEB rappresenta un edificio caratterizzato da prestazioni energetiche molto elevate, il cui fabbisogno energetico risulta estremamente ridotto e viene coperto prevalentemente mediante energia prodotta da fonti rinnovabili. Il principio alla base degli NZEB consiste nella riduzione del fabbisogno energetico attraverso un'attenta progettazione dell'involucro edilizio e dei sistemi impiantistici e vengono implementate soluzioni come: un importante isolamento termico delle pareti opache, la limitazione dei ponti termici, l'utilizzo di serramenti ad alte prestazioni, il controllo degli apporti solari e l'utilizzo di impianti caratterizzati da elevati rendimenti energetici, in modo tale di ridurre i consumi energetici all'osso per poi soddisfare il fabbisogno con fonti rinnovabili. Come già visto precedentemente la direttiva non ha imposto un unico valore limite valido per tutti i Paesi dell'Unione Europea, ma ha lasciato agli Stati membri il compito di definire i requisiti prestazionali in funzione delle proprie condizioni climatiche, delle caratteristiche del patrimonio edilizio già esistente e della particolare situazione economica nazionale. Per questo motivo i criteri adottati per la classificazione degli NZEB presentano delle differenze tra i vari Paesi europei, seppur mantenendo invariato il principio alla base.

La Direttiva 2010/31/UE [12] ha solamente stabilito una progressiva introduzione degli obblighi prestazionali per incentivare i Paesi membri a tener fede agli accordi pattuiti. In particolare, gli edifici pubblici di nuova costruzione avrebbero dovuto rispettare i requisiti NZEB a partire dal 2018, mentre dal 2020 questi requisiti sono stati estesi a tutti i nuovi edifici realizzati all'interno dell'Unione Europea.

Nonostante i progressi significativi che si sono registrati negli ultimi anni, il raggiungimento degli obiettivi fissati per il 2050 (ottenere un patrimonio edilizio europeo decarbonizzato)

continua a presentare parecchie criticità, soprattutto riguardo gli edifici esistenti. Infatti, gran parte del patrimonio edilizio europeo è stato costruito prima dell'introduzione delle normative già trattate e gli interventi di riqualificazione sono spesso molto complessi e costosi. Per questa ragione, la nuova Direttiva UE 2024/1275 [13] proroga le scadenze rispettivamente al 2028 per tutti i nuovi edifici pubblici e al 2030 in generale per tutti i nuovi edifici, ma si passa al concetto molto più ambizioso di Zero Emission Buildings (ZEB) per cui nel 2050 l'intero patrimonio edilizio europeo dovrà avere emissioni di gas serra pari a zero [4].

1.2 Lo sviluppo normativo italiano

L'evoluzione della normativa italiana in materia di efficienza energetica degli edifici è strettamente legata al recepimento delle direttive europee, che nel corso degli anni hanno orientato le politiche nazionali verso standard prestazionali sempre più elevati. A partire dagli anni '70, i provvedimenti legislativi intrapresi hanno progressivamente favorito il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici e la diffusione delle fonti rinnovabili, promuovendo da una parte la riqualificazione del patrimonio edilizio già esistente e dall'altra il raggiungimento degli obiettivi per compiere la transizione energetica, applicato soprattutto agli edifici di nuova costruzione.

L'origine della normativa nazionale riguardo l'efficienza energetica nell'edilizia è stata la Legge 373/1976 "Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici" [14]. Questo provvedimento, emanato nel bel mezzo della crisi energetica degli anni Settanta, rappresentò il primo tentativo di regolamentare il fabbisogno energetico degli edifici attraverso l'imposizione di limiti alle dispersioni termiche dell'involucro edilizio.

Un importante passo avanti fu compiuto con la Legge 10/1991 [15] (e il suo decreto di attuazione D.P.R. 412/1993 [16]), "Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili". Questo provvedimento rappresenta ancora oggi una delle basi fondamentali della legislazione energetica italiana, poiché per la prima volta non vi era solo un'imposizione di restrizioni alle dispersioni termiche degli edifici, ma veniva introdotto il concetto di uso razionale dell'energia, andando a promuovere da una parte l'utilizzo di tecnologie più efficienti per contenere i consumi energetici e dall'altra l'impiego delle fonti energetiche rinnovabili, in modo tale da ridurre la dipendenza dalle fonti fossili importate. L'introduzione dell'obbligo di redigere una relazione tecnica energetica per gli edifici di nuova costruzione e per importanti interventi edilizi è stata senza dubbio l'innovazione più significativa, tant'è che l'attuale documento viene ancora oggi

comunemente definito "Relazione ex Legge 10". Gli altri aspetti introdotti ancora oggi utilizzati sono stati:

- suddividere il territorio nazionale, come mostrato nella Tabella 1, in 6 zone climatiche (dalla A alla F) in funzione del numero dei gradi giorno (GG), ossia la somma delle differenze positive tra la temperatura media esterna giornaliera (ricavata dalla UNI 10349) e la temperatura ambiente (20 °C) nel periodo in cui gli impianti di riscaldamento sono in funzionamento (nella zona E dal 15 ottobre al 15 aprile);

Tabella 1. Numero di gradi giorno rispetto alla zona climatica in cui si trova l'edificio [17]

Zona climatica	Numero di gradi giorno
A	$GG \leq 600$
B	$600 < GG \leq 900$
C	$900 < GG \leq 1.400$
D	$1.400 < GG \leq 2.100$
E	$2.100 < GG \leq 3.000$
F	$GG > 3.000$

- come mostrato nella Figura 3, classificare gli edifici per destinazione d'uso, in quanto edifici diversi avranno esigenze diverse e quindi regolamentazioni differenti.

DECRETO DEL PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA 26 agosto 1993, n. 412

Art. 3 Classificazione generale degli edifici per categorie

1. Gli edifici sono classificati in base alla loro destinazione d'uso nelle seguenti categorie:

E.1 Edifici adibiti a residenza e assimilabili:

E.1 (1) abitazioni adibite a residenza con carattere continuativo, quali abitazioni civili e rurali, collegi, conventi, case di pena, caserme;

E.1 (2) abitazioni adibite a residenza con occupazione saltuaria, quali case per vacanze, fine settimana e simili;

E.1 (3) edifici adibiti ad albergo, pensione ed attività similari;

E.2 Edifici adibiti a uffici e assimilabili: pubblici o privati, indipendenti o contigui a costruzioni adibite anche ad attività industriali o artigianali, purché siano da tali costruzioni scorporabili agli effetti dell'isolamento termico;

E.3 Edifici adibiti a ospedali, cliniche o case di cura e assimilabili ivi compresi quelli adibiti a ricovero o cura di minori o anziani nonché le strutture protette per l'assistenza ed il recupero dei tossico-dipendenti e di altri soggetti affidati a servizi sociali pubblici;

E.4 Edifici adibiti ad attività ricreative, associative o di culto e assimilabili:

E.4 (1) quali cinema e teatri, sale di riunione per congressi;

E.4 (2) quali mostre, musei e biblioteche, luoghi di culto;

E.4 (3) quali bar, ristoranti, sale da ballo;

E.5 Edifici adibiti ad attività commerciali e assimilabili:

quali negozi, magazzini di vendita all'ingrosso o al minuto, supermercati, esposizioni;

E.6 Edifici adibiti ad attività sportive:

E.6 (1) piscine, saune e assimilabili;

E.6 (2) palestre e assimilabili;

E.6 (3) servizi di supporto alle attività sportive;

E.7 Edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili;

E.8 Edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali e assimilabili.

2. Qualora un edificio sia costituito da parti individuabili come appartenenti a categorie diverse, le stesse devono essere considerate separatamente e cioè ciascuna nella categoria che le compete.

Figura 3. Dpr n.412-93 [18]

La Legge 10/1991 rappresentò il primo tentativo di integrare le politiche energetiche con quelle ambientali, anticipando temi che sarebbero divenuti centrali nelle successive direttive europee. Ancora oggi molti dei principi introdotti da questa norma, come il miglioramento dell'efficienza energetica, la riduzione dei consumi e la promozione delle energie rinnovabili costituiscono elementi cardinali della legislazione nazionale ed europea [17].

Con l'introduzione dell'EPBD (2002), l'Italia ha recepito quelle disposizioni attraverso il Decreto Legislativo 192/2005 [19], che ha introdotto una metodologia per il calcolo delle prestazioni energetiche unificata, stabilendo dei criteri omogenei applicabili in tutto il Paese. Inoltre, sono stati definiti dei requisiti minimi prestazionali per gli edifici di nuova costruzione e per gli interventi di ristrutturazione rilevante. Il decreto ha contribuito a promuovere una progettazione maggiormente orientata all'efficienza energetica, con verifiche più rigorose, in modo tale da rendere la prestazione energetica dell'edificio sempre più centrale in fase di progettazione o ristrutturazione [17].

Il successivo Decreto Legislativo 311/2006 [20] andava a rafforzare ulteriormente le prescrizioni precedenti, introducendo limiti più restrittivi alle trasmittanze termiche sia delle strutture opache che di quelle trasparenti. Come mostrato nelle Tabelle 2, 3, 4, 5 e 6, il Decreto prevedeva la presenza di tre soglie temporali di riferimento: gennaio 2006, 2008 e 2010,

promuovendo una progressiva riduzione dei fabbisogni energetici degli edifici (e quindi promuovendo la diffusione di tecnologie costruttive e materiali sempre più performanti). Inoltre, seguendo le disposizioni europee dell'EPBD, è stato introdotto con l'AQE il primo documento di certificazione energetica degli edifici in cui comparivano informazioni come il fabbisogno di energia primaria e la classe energetica dell'edificio [17].

Tabella 2. Valori di U limite per strutture opache verticali [10]

ALLEGATO C			
U limite per strutture opache verticali			
Zona climatica	U 2006 (W/m ² K)	U 2008 (W/m ² K)	U 2010 (W/m ² K)
A	0,85	0,72	0.62
B	0,64	0,54	0.48
C	0,57	0,46	0.40
D	0,50	0,40	0.36
E	0,46	0,37	0.34
F	0,44	0,35	0.33



Ing. Giorgio Galbusera

Tabella 3. Valori di U limite per strutture opache orizzontali – COPERTURE [10]

U limite per strutture opache orizzontali - COPERTURE			
Zona climatica	U 2006 (W/m ² K)	U 2008 (W/m ² K)	U 2010 (W/m ² K)
A	0,80	0,42	0.38
B	0,60	0,42	0.38
C	0,55	0,42	0.38
D	0,46	0,35	0.32
E	0,43	0,32	0.30
F	0,41	0,31	0.29



Ing. Giorgio Galbusera

Tabella 4. Valori di U limite per strutture opache orizzontali – PAVIMENTI [10]

Modena 7 Maggio 2008

30/103

U limite per strutture opache orizzontali - PAVIMENTI

Zona climatica	U 2006 (W/m ² K)	U 2008 (W/m ² K)	U 2010 (W/m ² K)
A	0,80	0,74	0.65
B	0,60	0,55	0.49
C	0,55	0,49	0.42
D	0,46	0,41	0.36
E	0,43	0,38	0.33
F	0,41	0,36	0.32



Ing. Giorgio Galbusera

Tabella 5. Valori di U limite per chiusure trasparenti con infisso [10]

Modena 7 Maggio 2008

31/103

U limite per chiusure trasparenti con infisso

Zona climatica	U 2006 (W/m ² K)	U 2008 (W/m ² K)	U 2010 (W/m ² K)
A	5,5	5,0	4.6
B	4,0	3,6	3.0
C	3,3	3,0	2.6
D	3,1	2,8	2.4
E	2,8	2,4	2.2
F	2,4	2,2	2.0



Ing. Giorgio Galbusera

Tabella 6. Valori di U limite per i vetri [10]

Modena 7 Maggio 2008

32/103

U limite vetri

Zona climatica	U 2006 (W/m ² K)	U 2008 (W/m ² K)	U 2011 (W/m ² K)
A	5.0	4.5	3.7
B	4.0	3.4	2.7
C	3.0	2.3	2.1
D	2.6	2.1	1.9
E	2.4	1.9	1.7
F	2.3	1.7	1.3



Ing. Giorgio Galbusera

Con la sostituzione dell'EPBD in favore della Direttiva 2010/31/UE, viene introdotto il concetto di nearly Zero Energy Building (nZEB), ovvero un edificio che abbia un fabbisogno energetico quasi nullo, coperto principalmente da energia proveniente da fonti rinnovabili prodotte autonomamente o in prossimità di esso.

La Legge 90/2013 [21] (e successivamente i tre Decreti Ministeriali del 26 giugno 2015 [22]) recepiscono la Direttiva nell'ordinamento italiano, andando a definire una strategia volta alla progressiva diffusione degli edifici nZEB mediante: introduzione dell'APE, linee guida nazionali per la certificazione energetica e modelli di relazione tecnica aggiornati. L'attuazione concreta di tale strategia è avvenuta attraverso i tre Decreti Ministeriali, in particolare il Decreto Requisiti Minimi ha introdotto un nuovo approccio basato sul confronto tra l'edificio reale e un edificio di riferimento. Quest'ultimo rappresenta un modello teorico avente la stessa geometria, orientamento e destinazione d'uso dell'edificio reale, ma caratterizzato da prestazioni energetiche standard fissate dalla normativa. Il progetto risulta conforme se l'edificio reale rispetta non solo le trasmittanze termiche delle pareti opache e delle strutture trasparenti dell'edificio di riferimento, ma vengono anche valutati altri parametri relativi al fabbisogno energetico globale, all'efficienza degli impianti, ai consumi estivi (e al loro contenimento) ed infine all'impiego e copertura delle fonti rinnovabili rispetto ai fabbisogni richiesti dall'edificio reale. L'APE (Attestato di Prestazione Energetica), è il documento ufficiale dove vengono descritte e classificate le prestazioni energetiche di un edificio e sostituisce l'AQE (che era facoltativo). Il suo scopo è quello di fornire

informazioni chiare e facilmente comprensibili ai proprietari e agli acquirenti, favorendo una maggiore trasparenza del mercato immobiliare e incentivando la realizzazione di interventi di efficientamento energetico. L'attestato attribuisce all'edificio una specifica classe energetica, sulla base dell'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile (EP_{gl}, nren), che misura il fabbisogno energetico complessivo dell'immobile (proveniente da fonti non rinnovabili). A partire dal 2015 è stata introdotta una nuova classificazione energetica articolata in dieci classi, dalla classe A4, che rappresenta gli edifici più efficienti, alla classe G, che invece rappresenta quelli meno efficienti. Oltre alla classe energetica, l'APE contiene informazioni sui consumi stimati, sulle emissioni di anidride carbonica, sulle caratteristiche dell'involucro edilizio e degli impianti ed anche raccomandazioni per il miglioramento della prestazione energetica dell'edifici [23]. Complessivamente, i decreti del 2015 hanno comportato il passaggio definitivo da una normativa prescrittiva ad un approccio che quantifica e disciplina la prestazione energetica complessiva dell'edificio. Si è quindi avuto come conseguenza la promozione di soluzioni più moderne, sostenibili ed integrate tra loro [24].

Durante il periodo più acuto della pandemia, che aveva provocato una contrazione senza precedenti dell'economia nazionale, è stato varato il Superbonus 110%, introdotto dall'articolo 119 del Decreto-Legge 34/2020, noto come Decreto Rilancio [25]. Tale incentivo era stato ideato in un contesto caratterizzato dalla necessità di rilanciare il settore delle costruzioni dopo la crisi economica legata alla pandemia da COVID-19, ma si inserì contemporaneamente nel più ampio quadro delle politiche nazionali ed europee di transizione energetica, sempre per favorire l'efficientamento energetico degli edifici. Gli interventi considerati "trainanti" erano: l'isolamento termico dell'involucro edilizio mediante sistemi a cappotto, la sostituzione degli impianti di climatizzazione invernale con impianti ad alta efficienza energetica e gli interventi di riduzione del rischio sismico. Inoltre, potevano essere associati ulteriori interventi come l'installazione di impianti fotovoltaici, sistemi di accumulo dell'energia e infrastrutture per la ricarica dei veicoli elettrici. Per accedere all'incentivo era necessario dimostrare, attraverso la redazione di un APE ante e post-intervento, il miglioramento di almeno due classi energetiche dell'edificio oppure il conseguimento della migliore classe energetica tecnicamente raggiungibile, in modo tale da migliorare contemporaneamente sia l'involucro che gli impianti [26]. L'obiettivo principale della misura era promuovere degli interventi di riqualificazione energetica profonda sugli edifici esistenti (deep renovation), riducendone i consumi energetici e le emissioni di anidride carbonica. Il meccanismo inizialmente prevedeva una detrazione fiscale pari al 110% delle spese sostenute (solo per alcune categorie di interventi), con l'utilizzo di sconti in fattura in favore del cliente (con l'acquisizione di un credito di imposta di pari importo da parte della ditta costruttrice) e cessione

del credito (dal cliente che trasferiva il proprio credito fiscale, alle banche o ad altri soggetti che in cambio fornivano la liquidità necessaria per l'intervento). Anche se il tentativo di stimolare ampie fasce della popolazione per promuovere profondi interventi di efficienza energetica degli edifici era in linea con le Direttive europee, la formulazione e l'applicazione del Superbonus hanno comportato (come si può vedere dalla Tabella 7), un enorme impatto sul bilancio statale con una riduzione limitata dei consumi energetici nazionali [26] [27]. Dal punto di vista dell'efficienza economica, un livello di incentivazione così elevato ha generato un'alterazione del mercato, poiché il beneficiario finale era sostanzialmente sollevato da oneri economici, si è verificata una riduzione dell'attenzione verso il contenimento dei costi nella progettazione degli interventi. Ciò ha contribuito ad un incremento dei prezzi dei materiali, delle lavorazioni e delle prestazioni professionali, producendo effetti inflattivi nel settore delle costruzioni, con il risultato che i costi degli interventi erano nettamente superiori rispetto ai valori registrati negli anni pre pandemia [28]. Dal punto di vista amministrativo e procedurale, le continue modifiche da parte del legislatore (soprattutto per il sistema di cessione del credito, con numerose aziende che non riuscivano a monetizzare i crediti fiscali) [28], hanno comportato delle notevoli difficoltà sia per i cittadini che per i professionisti, con rallentamenti continui dei cantieri. Inoltre, vi sono stati ulteriori problemi dal punto di vista sociale, dove i maggiori beneficiari sono stati quei pochi che avevano competenze tecniche, organizzative ed economiche per adempiere rapidamente agli oneri tecnico/amministrativi per accedere all'incentivo, a discapito di gran parte della popolazione che più necessitava quel tipo di intervento così vantaggioso dal punto di vista economico [27].

Tabella 7. Oneri a carico dello stato e tipologie di edifici interessati dal SuperBonus, dati aggiornati al 30 aprile 2026¹ [27]



SuperEcobonus

30 aprile 2026

		Dato Nazionale		
		% lavori realizzati (#)	% edifici	% Invest.
N. di edifici		505.421		
Totale investimenti(*)	127.259.122.474,42 €			
Totale investimenti ammessi a detrazione	125.454.068.203,82 €			
Totale investimenti per lavori conclusi ammessi a detrazione	123.043.686.618,52 €	98,1%		
Detrazioni maturate per i lavori conclusi	131.970.117.607,56 €	Onere a carico dello Stato		
di cui	Condomini			
	N. di edifici condominiali	141.756	28,0%	
	Totale investimenti(*)	86.856.567.975,09 €		
	Tot. Inv. Condominiali ammessi a detrazione	86.086.882.316,46 €		68,6%
	Tot. Lavori Condominiali realizzati ammessi a detrazione	84.326.315.127,86 €	98,0%	
	Edifici unifamiliari			
	N. di edifici unifamiliari	246.188	48,7%	
	Totale investimenti(*)	28.860.745.465,43 €		
	Tot. Inv. in edifici unifamiliari ammessi a detrazione	28.068.663.840,66 €		22,4%
	Tot. Lavori in edifici unifam. realizzati ammessi a detrazione	27.610.038.505,50 €	98,4%	
	U.I. funzionalmente indipendenti			
	N. di unità immobiliari funzionalmente indipendenti	117.472	23,2%	
	Totale investimenti(*)	11.539.918.260,67 €		
	Tot. Inv. in unità immob. indipend. ammessi a detrazione	11.297.465.979,73 €		9,0%
	Tot. Lavori in unità immob. indipend. realizzati	11.106.276.918,19 €	98,3%	
	A/9 aperti al pubblico			
	N. edifici A/9 aperti al pubblico	5	0,0%	
	Totale investimenti(*)	1.890.773,23 €		
	Tot. Inv. ammessi a detrazione	1.056.066,97 €		0,0%
	Tot. Lavori realizzati ammessi a detrazione	1.056.066,97 €	100,0%	
		Investimento medio(*)		
Condomini		612.718,81 €		
Edifici unifamiliari		117.230,51 €		
U.I. funzionalmente indipendenti		98.235,48 €		
A/9 aperti al pubblico		378.154,65 €		

(*) Investimento compreso le somme non ammesse a detrazione

(#) % lavori realizzati: è calcolato sulla stima del totale investimenti ammessi a detrazione

Nota generale

Il dato "Totale investimenti ammessi a detrazione" è una stima sulla base dei dati dichiarati all'interno dell'asseverazione e include spese con quattro possibili aliquote di detrazione (110, 90, 70, 65%). La percentuale di detrazione determina la spesa massima ammissibile per gli interventi trainati di cui al comma 2, articolo 119 del D. L. Rilancio: di conseguenza l'invio di ulteriori SAL (intermedi e finali) per gli interventi non ancora conclusi può comportare oscillazioni del dato complessivo.

¹ Da notare il numero limitato di edifici coinvolti e che quasi la metà di questi sono edifici unifamiliari, tipicamente non l'edificio delle classi sociali più in difficoltà.

Per quanto riguarda l'implementazione della Direttiva (UE) 2024/1275, nota come Direttiva "Case Green", l'Italia deve ancora recepirla (il limite è il 29 maggio 2026, salvo proroghe) [29], ma attualmente sono disponibili diversi incentivi per l'efficientamento energetico degli immobili, visto che, secondo i dati di siape enea mostrati nella Figura 4, quasi il 50% degli edifici censiti sono di classe F e G [30], ossia entro il 2030 sarà impossibile acquistare o vendere questi edifici, dato che nei contratti di locazione deve essere presente l'APE (che ha validità decennale). Inoltre,

prima di accedere agli incentivi, è necessario possedere un APE aggiornato del proprio edificio [30].

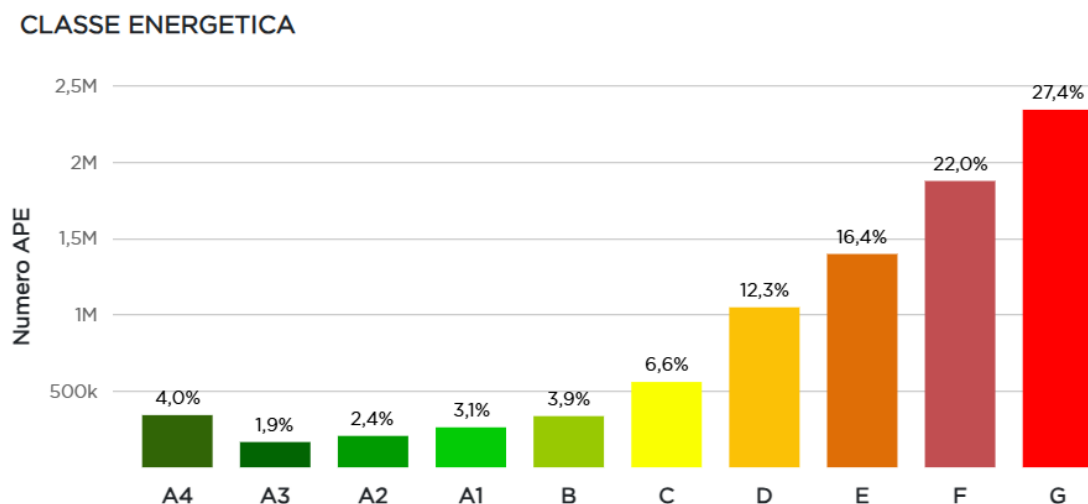


Figura 4. Ripartizione del patrimonio edilizio italiano in base alle classi energetiche [30]

La Legge di bilancio 2026 (Legge 199/2025) [31] prevede una serie di incentivi per l'efficientamento energetico degli edifici:

- Ecobonus, destinato alla riqualificazione degli edifici esistenti, per ridurre il fabbisogno energetico degli edifici e le emissioni di gas serra. Prevede una detrazione fiscale del 50% delle spese sostenute sulla prima casa, recuperabile in 10 quote annuali, con un massimale di spesa di 96.000 €. Al suo interno rientrano interventi come il miglioramento dell'isolamento termico dell'involucro edilizio (attraverso la realizzazione di un cappotto termico), la sostituzione degli infissi e l'installazione di impianti ad alta efficienza, come per esempio le pompe di calore (ma l'installazione di caldaie alimentate a combustibili fossili non è detraibile).
- Sismabonus, per cui si applicano le stesse percentuali di detrazione, è destinato alla messa in sicurezza degli edifici, con particolare riguardo alla sicurezza statica degli edifici nei centri storici.
- Bonus ristrutturazioni, che prevede sempre lo stesso schema di detrazione, è destinato ad opere di manutenzione ordinaria (nelle parti comuni degli edifici condominiali) straordinaria, di restauro e più in generale di ristrutturazione edilizia. Chiaramente il rifacimento degli impianti e il rinnovo degli elementi strutturali degli edifici sono gli interventi più impattanti per il miglioramento delle prestazioni

energetiche degli edifici, però il Bonus consente anche altre tipologie di opere, come l'eliminazione di barriere architettoniche, l'installazione di ascensori e scale di sicurezza.

- Bonus mobili ed elettrodomestici, destinato per l'acquisto di articoli aventi classe energetica elevata in edifici in ristrutturazione. Il massimale di spesa è di 5.000 €, con detrazione del 50% ripartita in 10 anni.

L'attuazione della Direttiva 2024/1275 comporterà nei prossimi anni delle novità nella normativa italiana, andando a modificare i requisiti prestazionali degli edifici in favore della sostenibilità e della riduzione delle emissioni. Il percorso normativo italiano iniziato con la Legge 10/1991 e che continuerà nei prossimi anni per continuare il processo di transizione ecologica, ha reso vitale per il settore delle costruzioni l'utilizzo di nuovi materiali e tecnologie per aumentare l'efficienza energetica degli edifici rispetto agli standard passati.

Capitolo 2

CASO STUDIO

2.1 Descrizione dell'edificio

La descrizione presente in questo capitolo della destinazione d'uso, della posizione geografica, della geometria dei locali e degli elementi costruttivi che caratterizzano l'edificio, è necessaria per comprendere i procedimenti successivi per il calcolo dei carichi termici invernali e del confronto tra le due configurazioni dell'involucro edilizio.

Come evidenzia il quadro normativo di riferimento, negli ultimi decenni il tema dell'efficienza energetica degli edifici ha assunto un ruolo sempre più rilevante sia per ragioni economiche (e geopolitiche) sia per motivazioni legate alla sostenibilità ambientale.

Secondo l'International Energy Agency, il settore edilizio rappresenta una delle principali voci di consumo energetico a livello mondiale ed è anche uno degli ambiti dove è possibile ottenere le maggiori riduzioni della domanda energetica attraverso interventi sull'involucro edilizio [32]. Inoltre, nel rapporto Energy Efficiency 2025 e nell'EPBD, viene evidenziato come il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici rappresenti una delle strategie più efficaci per ridurre i consumi energetici e per contribuire al raggiungimento degli ambiziosi obiettivi di decarbonizzazione fissati dall'UE [33] [34].

Per valutare in maniera quantitativa l'influenza delle caratteristiche dell'involucro edilizio sui carichi termici di progetto è stato scelto come caso studio un edificio residenziale unifamiliare ancora in costruzione nel comune di Montegiorgio, in provincia di Fermo. Come già intuibile dalle Figure 5, 6, 7 e 8, l'edificio si sviluppa su un unico livello ed è costituito oltre che da una zona destinata ad abitazione, anche da un volume secondario adibito a garage e locale tecnico. La copertura è a falde inclinate, con 18 pannelli fotovoltaici da 500 W_p installati lungo il lato sud e presenta superfici finestrate distribuite su tutte le stanze, in particolare nell'ampio soggiorno/sala da pranzo. Dal punto di vista energetico, l'edificio è stato modellato mantenendo costanti tutti i parametri geometrici ed impiantistici. In entrambe le configurazioni considerate risultano infatti invariati: la volumetria, la distribuzione interna degli ambienti, l'orientamento, le superfici disperdenti, le condizioni climatiche di riferimento e la tecnologia degli impianti installati. La scelta di mantenere costanti tali parametri consente di isolare l'effetto prodotto dalle sole caratteristiche dell'involucro edilizio, rendendo possibile un confronto diretto tra due diverse soluzioni costruttive e da lì partire per una considerazione sugli impianti utilizzati, per capire se siano sufficienti per sostenere i carichi termici dell'edificio nella configurazione più svantaggiata.

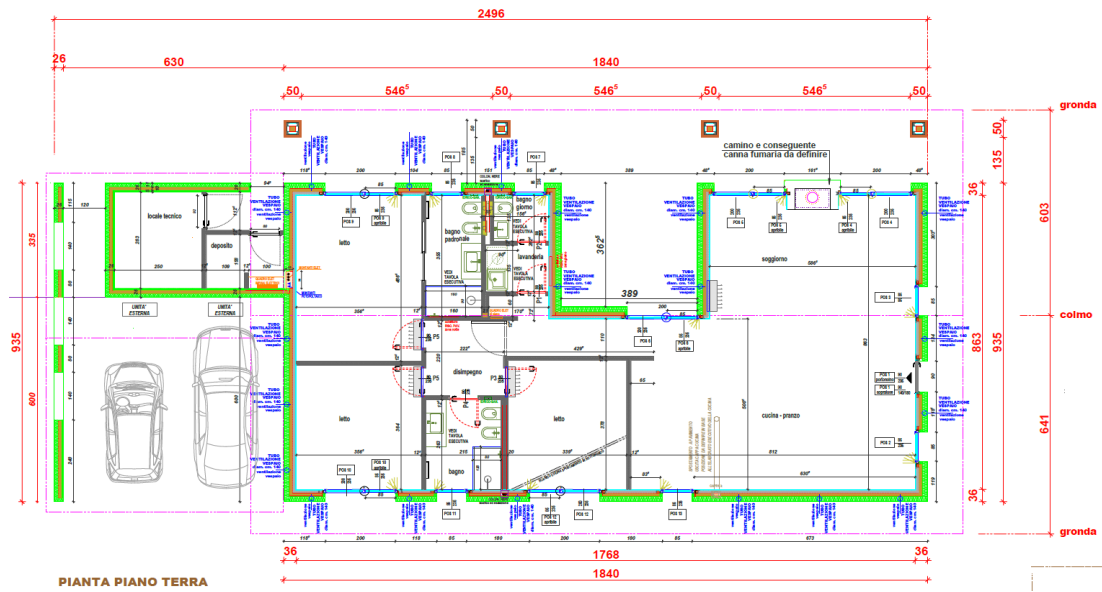


Figura 5. Pianta del piano terra dell'edificio

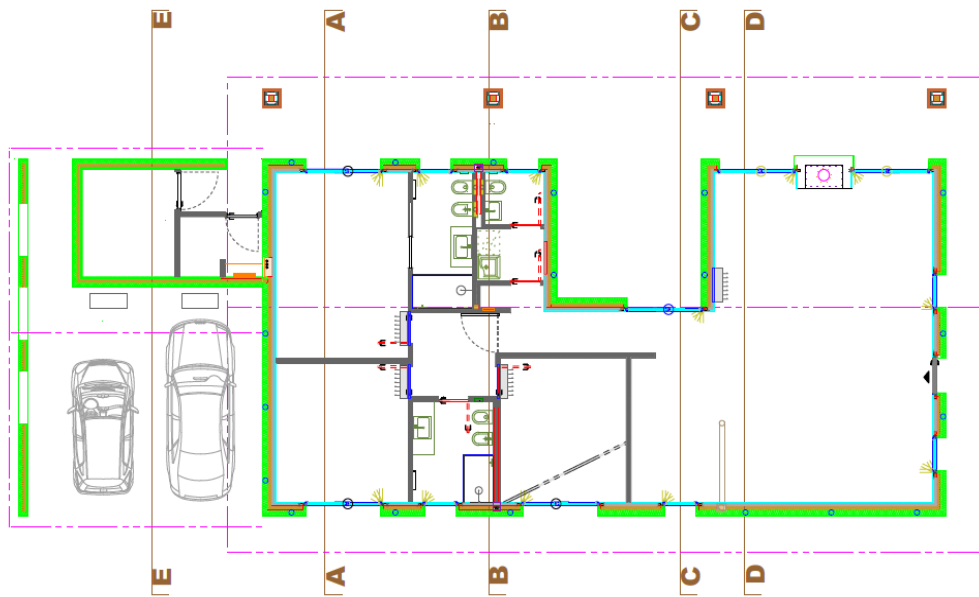


Figura 6. Pianta del piano terra con assi di riferimento per le sezioni

2.2 Configurazione di riferimento

Terminata la descrizione generale dell'involucro edilizio, si approfondiscono i principali materiali impiegati nelle pareti opache e nei componenti finestrati, evidenziando le superiori proprietà termofisiche della configurazione assunta come riferimento del confronto.

La configurazione assunta come riferimento corrisponde alla soluzione prevista nel progetto originario dell'edificio ed è descritta dalle Tabelle 8 e 9. Le pareti esterne sono caratterizzate dalla presenza di una struttura portante in pannelli in legno lamellare a strati incrociati (nome commerciale XLAM, noto come CLT) associata a strati isolanti dimensionati in maniera opportuna. Negli ultimi anni il Cross Laminated Timber si è diffuso sempre di più nell'edilizia perché riesce ad unire prestazioni strutturali, sostenibilità ambientale e buone caratteristiche termiche [35] [36]. Infatti, è stato evidenziato come le strutture realizzate in CLT possano contribuire alla riduzione delle dispersioni termiche attraverso l'involucro edilizio quando associate ad adeguati sistemi di isolamento [35] e nello stesso momento consente di ottenere condizioni di comfort interno all'edificio e stabilità delle prestazioni nel tempo [37]. Anche la copertura e il pavimento sono caratterizzati dall'impiego di strati isolanti che limitano gli scambi di calore con l'ambiente esterno, sempre per ridurre le dispersioni termiche. Per quanto riguarda gli elementi finestrati, sono stati adottati serramenti caratterizzati da prestazioni termiche elevate, con valori di trasmittanza inferiori rispetto a quelli previsti nella configurazione alternativa. La configurazione di riferimento rappresenta complessivamente un progetto orientato alla massimizzazione delle prestazioni energetiche dell'involucro edilizio, in linea con i piani UE per l'edilizia residenziale.

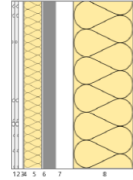
Tabella 8. Stratigrafie delle pareti opache nella configurazione di riferimento

CARATTERISTICHE TERMICHE E IGROMETRICHE DEI COMPONENTI OPACHI
secondo UNI EN 12831 - UNI EN ISO 6946 - UNI EN ISO 13370

Descrizione della struttura: **Parete esterna**

Codice: **M1**

Trasmittanza termica	0,112	W/m ² K
Spessore	410	mm
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	-2,7	°C
Permeanza	20,450	10 ⁻¹² kg/sm ² Pa
Massa superficiale (con intonaci)	92	kg/m ²
Massa superficiale (senza intonaci)	65	kg/m ²
Trasmittanza periodica	0,004	W/m ² K
Fattore attenuazione	0,038	-
Sfasamento onda termica	-15,2	h



Stratigrafia:

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Lastra Diamant KNAUF Cartongesso 12,5 mm	12,50	0,2500	0,050	840	0,84	8
2	Lastra GKB KNAUF Cartongesso 12,5 mm	12,50	0,2000	0,063	680	0,84	10
3	Intercapepine non ventilata Av<500 mm ² /m	14,90	0,0879	0,170	-	-	-
4	ROCKWOOL rivestimento in alluminio rinforzato per Pannello Airrock 33 ALU	0,10	220,000	0	0,000	900	0,96
5	Pannello Rockwool Airrock DD	60,00	0,0350	1,714	67	0,84	1
6	Intercapepine non ventilata Av<500 mm ² /m	5,00	0,0455	0,110	-	-	-
7	PANNELLO XLAM	100,00	0,1330	0,752	450	2,70	43
8	Pannello Rockwool Frontrock Pro	200,00	0,0340	5,882	80	1,03	1
9	ROCKWOOL REDArt Rasante Plus	5,00	0,6700	0,007	1500	1,00	15
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,040	-	-	-

Legenda simboli

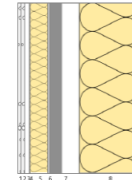
s	Spessore	mm
Cond.	Conduttività termica, comprensiva di eventuali coefficienti correttivi	W/mK
R	Resistenza termica	m ² K/W
M.V.	Massa volumica	kg/m ³
C.T.	Capacità termica specifica	kJ/kgK
R.V.	Fattore di resistenza alla diffusione del vapore in capo asciutto	-

CARATTERISTICHE TERMICHE E IGROMETRICHE DEI COMPONENTI OPACHI
secondo UNI EN 12831 - UNI EN ISO 6946 - UNI EN ISO 13370

Descrizione della struttura: **Parete verso locale tecnico**

Codice: **M2**

Trasmittanza termica	0,111	W/m ² K
Spessore	410	mm
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	6,4	°C
Permeanza	20,450	10 ⁻¹² kg/sm ² Pa
Massa superficiale (con intonaci)	92	kg/m ²
Massa superficiale (senza intonaci)	65	kg/m ²
Trasmittanza periodica	0,004	W/m ² K
Fattore attenuazione	0,038	-
Sfasamento onda termica	-15,4	h



Stratigrafia:

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Lastra Diamant KNAUF Cartongesso 12,5 mm	12,50	0,2500	0,050	840	0,84	8
2	Lastra GKB KNAUF Cartongesso 12,5 mm	12,50	0,2000	0,063	680	0,84	10
3	Intercapepine non ventilata Av<500 mm ² /m	14,90	0,0879	0,170	-	-	-
4	ROCKWOOL rivestimento in alluminio rinforzato per Pannello Airrock 33 ALU	0,10	220,000	0	0,000	900	0,96
5	Pannello Rockwool Airrock DD	60,00	0,0350	1,714	67	0,84	1
6	Intercapepine non ventilata Av<500 mm ² /m	5,00	0,0455	0,110	-	-	-
7	PANNELLO XLAM	100,00	0,1330	0,752	450	2,70	43
8	Pannello Rockwool Frontrock Pro	200,00	0,0340	5,882	80	1,03	1
9	ROCKWOOL REDArt Rasante Plus	5,00	0,6700	0,007	1500	1,00	15
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,130	-	-	-

Legenda simboli

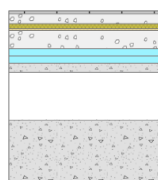
s	Spessore	mm
Cond.	Conduttività termica, comprensiva di eventuali coefficienti correttivi	W/mK
R	Resistenza termica	m ² K/W
M.V.	Massa volumica	kg/m ³
C.T.	Capacità termica specifica	kJ/kgK
R.V.	Fattore di resistenza alla diffusione del vapore in capo asciutto	-

CARATTERISTICHE TERMICHE E IGROMETRICHE DEI COMPONENTI OPACHI
secondo UNI EN 12831 - UNI EN ISO 6946 - UNI EN ISO 13370

Descrizione della struttura: **Pavimento su terreno**

Codice: **P1**

Trasmittanza termica	0,190	W/m ² K
Trasmittanza controterra	0,142	W/m ² K
Spessore	950	mm
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	-2,7	°C
Permeanza	0,001	10 ⁻¹² kg/sm ² Pa
Massa superficiale (con intonaci)	1078	kg/m ²
Massa superficiale (senza intonaci)	1078	kg/m ²
Trasmittanza periodica	0,002	W/m ² K
Fattore attenuazione	0,016	-
Sfasamento onda termica	-24,2	h



Stratigrafia:

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,170	-	-	-
1	Piastrelle in ceramica (piastrelle)	17,00	1,2000	-	2300	0,84	9999999
2	autolivellante per radiante KNAUF FE 80	55,00	1,9000	-	2100	0,88	30
3	Tubo del pannello - KLIMA SUPER STRONG	0,00	-	-	-	-	-
4	Polistirene per KLIMA SUPER STRONG	28,00	0,0330	-	30	1,30	70
5	Isolant underSpecial Classic (tappetino acustico) jsp.10	10,00	0,0350	-	50	2,10	3600
6	Sottofondo alleggerito calcestruzzo cellulare	100,00	0,1000	-	400	0,88	30
7	XPS per soai C.A.M.	40,00	0,0330	-	30	1,45	50
8	XPS per soai C.A.M.	40,00	0,0330	-	30	1,45	50
9	Massetto ripartitore in calcestruzzo con rete	50,00	1,4900	-	2200	0,88	70
10	Intercapepine debolmente ventilata Av=600 mm ² /m	260,00	-	-	-	-	-
11	C.I.S. di sabbia e ghiaia (pareti esterne)	350,00	1,6100	-	2200	1,00	-
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,040	-	-	-

Legenda simboli

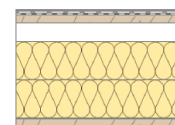
s	Spessore	mm
Cond.	Conduttività termica, comprensiva di eventuali coefficienti correttivi	W/mK
R	Resistenza termica	m ² K/W
M.V.	Massa volumica	kg/m ³
C.T.	Capacità termica specifica	kJ/kgK
R.V.	Fattore di resistenza alla diffusione del vapore in capo asciutto	-

CARATTERISTICHE TERMICHE E IGROMETRICHE DEI COMPONENTI OPACHI
secondo UNI EN 12831 - UNI EN ISO 6946 - UNI EN ISO 13370

Descrizione della struttura: **Copertura**

Codice: **S1**

Trasmittanza termica	0,164	W/m ² K
Spessore	309	mm
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	-2,7	°C
Permeanza	0,020	10 ⁻¹² kg/sm ² Pa
Massa superficiale (con intonaci)	89	kg/m ²
Massa superficiale (senza intonaci)	89	kg/m ²
Trasmittanza periodica	0,000	W/m ² K
Fattore attenuazione	0,000	-
Sfasamento onda termica	-34,9	h



Stratigrafia:

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,040	-	-	-
1	Copertura in tegole di argilla	10,00	0,9900	0,010	2000	0,84	1
2	Membrana Ardesista	4,00	0,1700	0,024	2700	0,88	20000
3	Pannello in tavole a fibre orientate	20,00	0,1300	0,154	650	1,70	50
4	Intercapepine non ventilata Av<500 mm ² /m	50,00	0,3125	0,160	-	-	-
5	Pannello fibra di legno C.A.M.	100,00	0,0370	2,703	160	2100,00	5
6	Pannello fibra di legno C.A.M.	100,00	0,0370	2,703	160	2100,00	5
7	Barriera vapore foglio di alluminio (.025-.05 mm)	1,00	220,000	0	0,000	2700	0,88
8	Legno di abete flussio perpend. alle fibre	24,00	0,1200	0,200	450	1,60	625
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,100	-	-	-

Legenda simboli

s	Spessore	mm
Cond.	Conduttività termica, comprensiva di eventuali coefficienti correttivi	W/mK
R	Resistenza termica	m ² K/W
M.V.	Massa volumica	kg/m ³
C.T.	Capacità termica specifica	kJ/kgK
R.V.	Fattore di resistenza alla diffusione del vapore in capo asciutto	-

Tabella 9. Stratigrafie dei serramenti nella configurazione di riferimento

CARATTERISTICHE TERMICHE DEI COMPONENTI FINESTRATI
secondo UNI EN 12831 - UNI EN ISO 6946 - UNI EN ISO 10077

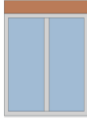
Descrizione della finestra: *Finestra 200x235* Codice: *W1*

Caratteristiche del serramento	
Tipologia di serramento	Singolo
Classe di permeabilità	Classe 4 secondo Norma UNI EN 12207
Trasmissione termica	U_s 1,272 W/m ² K
Trasmissione solo vetro	U_g 1,029 W/m ² K

Dati per il calcolo degli apporti solari	
Emissività	ϵ 0,837 -
Fattore tendaggi (invernali)	$f_{t,w}$ 0,45 -
Fattore tendaggi (estivi)	$f_{t,e}$ 0,45 -
Fattore di trasmissione solare	g_{gl} 0,450 -
Fattore trasmissione solare totale	$g_{gl,tot}$ 0,199 -

Caratteristiche delle chiusure assicurati	
Resistenza termica chiusura	R_{ch} 0,12 m ² K/W
f shut	0,6 -

Dimensioni e caratteristiche del serramento	
Larghezza	200,0 cm
Altezza H	235,0 cm



Caratteristiche del telaio	
Trasmissione termica del telaio	U_t 1,20 W/m ² K
K distorsione	K_d 0,080 W/mK
Area totale	A_{st} 4,700 m ²
Area vetro	A_v 3,632 m ²
Area totale	A_t 3,088 m ²
Fattore di forma	F_r 0,77 -
Perimetro vetro	L_v 11,960 m
Perimetro telaio	L_t 8,700 m

Stratigrafia del pacchetto vetrato			
Descrizione strati	s	A	R
Resistenza superficiale interna	-	-	0,130
Primo vetro	6,0	1,00	0,005
Interpaccchia	-	-	0,790
Secondo vetro	6,0	1,00	0,005
Resistenza superficiale esterna	-	-	0,040



35

ESATEC PROGETTI
VIA MARCONI 17 - 53021 PORTO SANT'ELPIDIO (PI)

Legenda simboli	
s	Spessore
A	Conduttività termica
R	Resistenza termica

Caratteristiche del modulo

Trasmissione termica del modulo	U	1,269 W/m ² K
---------------------------------	---	--------------------------

Struttura opaca associata	M4	Cassonetto
Trasmissione termica	U	0,200 W/m²K
Altezza	H _{cas}	30,00 cm
Larghezza	L _{cas}	200,0 cm
Profondità	P _{cas}	41,00 cm
Area frontale		0,60 m²

Fonte termica del serramento	
Porte termica associata	24 W - Parete - Telaio
Trasmissione termica lineica	ψ 0,048 W/mK
Lunghezza perimetrale	6,70 m

CARATTERISTICHE TERMICHE DEI COMPONENTI FINESTRATI
secondo UNI EN 12831 - UNI EN ISO 6946 - UNI EN ISO 10077

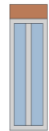
Descrizione della finestra: *Finestra 85x235* Codice: *W2*

Caratteristiche del serramento	
Tipologia di serramento	Singolo
Classe di permeabilità	Classe 4 secondo Norma UNI EN 12207
Trasmissione termica	U_s 1,459 W/m ² K
Trasmissione solo vetro	U_g 1,029 W/m ² K

Dati per il calcolo degli apporti solari	
Emissività	ϵ 0,837 -
Fattore tendaggi (invernali)	$f_{t,w}$ 0,45 -
Fattore tendaggi (estivi)	$f_{t,e}$ 0,45 -
Fattore di trasmissione solare	g_{gl} 0,450 -
Fattore trasmissione solare totale	$g_{gl,tot}$ 0,199 -

Caratteristiche delle chiusure assicurati	
Resistenza termica chiusura	R_{ch} 0,12 m ² K/W
f shut	0,6 -

Dimensioni e caratteristiche del serramento	
Larghezza	85,0 cm
Altezza H	235,0 cm



Caratteristiche del telaio	
Trasmissione termica del telaio	U_t 1,20 W/m ² K
K distorsione	K_d 0,080 W/mK
Area totale	A_{st} 1,997 m ²
Area vetro	A_v 1,140 m ²
Area totale	A_t 0,858 m ²
Fattore di forma	F_r 0,67 -
Perimetro vetro	L_v 6,660 m
Perimetro telaio	L_t 4,400 m

Stratigrafia del pacchetto vetrato			
Descrizione strati	s	A	R
Resistenza superficiale interna	-	-	0,130
Primo vetro	6,0	1,00	0,005
Interpaccchia	-	-	0,790
Secondo vetro	6,0	1,00	0,005
Resistenza superficiale esterna	-	-	0,040



32

ESATEC PROGETTI
VIA MARCONI 17 - 53021 PORTO SANT'ELPIDIO (PI)

Legenda simboli	
s	Spessore
A	Conduttività termica
R	Resistenza termica

Caratteristiche del modulo

Trasmissione termica del modulo	U	1,810 W/m ² K
---------------------------------	---	--------------------------

Struttura opaca associata	M4 Cassonetto
Trasmittanza termica	U 0,200 W/m²K
Altezza	H _{cas} 30,00 cm
Larghezza	L _{cas} 85,0 cm
Profondità	P _{cas} 41,00 cm
Area frontale	0,25 m²

Porta termica del serramento		
Porta termica associata	Z4	W - Parete - Telaio
Trasmittanza termica lineica	ψ	0,048 W/mK
Lunghezza perimetrale	L	6,40 m

CARATTERISTICHE TERMICHE DEI COMPONENTI FINESTRATI
secondo UNI EN 12831 - UNI EN ISO 6946 - UNI EN ISO 10077

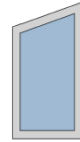
Descrizione della finestra: *Finestra 90x135-165* Codice: *W3*

Caratteristiche del serramento	
Tipologia di serramento	Singolo
Classe di permeabilità	Classe 4 secondo Norma UNI EN 12207
Trasmissione termica	U_s 1,324 W/m ² K
Trasmissione solo vetro	U_g 1,029 W/m ² K

Dati per il calcolo degli apporti solari	
Emissività	ϵ 0,837 -
Fattore tendaggi (invernali)	$f_{t,w}$ 0,45 -
Fattore tendaggi (estivi)	$f_{t,e}$ 0,45 -
Fattore di trasmissione solare	g_{gl} 0,450 -
Fattore trasmissione solare totale	$g_{gl,tot}$ 0,199 -

Caratteristiche delle chiusure assicurati	
Resistenza termica chiusura	R_{ch} 0,12 m ² K/W
f shut	0,6 -

Dimensioni e caratteristiche del serramento	
Larghezza	90,0 cm
Altezza H	135,0 cm
Altezza H2	165,0 cm



Caratteristiche del telaio	
Trasmissione termica del telaio	U_t 1,30 W/m ² K
K distorsione	K_d 0,080 W/mK
Area totale	A_{st} 1,350 m ²
Area vetro	A_v 0,908 m ²
Area totale	A_t 0,444 m ²
Fattore di forma	F_r 0,67 -
Perimetro vetro	L_v 4,027 m
Perimetro telaio	L_t 4,969 m

Stratigrafia del pacchetto vetrato			
Descrizione strati	s	A	R
Resistenza superficiale interna	-	-	0,130
Primo vetro	6,0	1,00	0,005
Interpaccchia	-	-	0,790
Secondo vetro	6,0	1,00	0,005
Resistenza superficiale esterna	-	-	0,040



36

ESATEC PROGETTI
VIA MARCONI 17 - 53021 PORTO SANT'ELPIDIO (PI)

Legenda simboli	
s	Spessore
A	Conduttività termica
R	Resistenza termica

Caratteristiche del modulo

Trasmissione termica del modulo	U	1,495 W/m ² K
---------------------------------	---	--------------------------

Porte termico associato	Z4 W - Parete - Telaio
Trasmittanza termica lineica	Ψ 0,048 W/mK
Lunghezza perimetrale	4,85 m

CARATTERISTICHE TERMICHE DEI COMPONENTI FINESTRATI
secondo UNI EN 12831 - UNI EN ISO 6946 - UNI EN ISO 10077

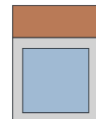
Descrizione della finestra: *Finestra 85x80* Codice: *W4*

Caratteristiche del serramento	
Tipologia di serramento	Singolo
Classe di permeabilità	Classe 4 secondo Norma UNI EN 12207
Trasmissione termica	U_s 1,396 W/m ² K
Trasmissione solo vetro	U_g 1,029 W/m ² K

Dati per il calcolo degli apporti solari	
Emissività	ϵ 0,837 -
Fattore tendaggi (invernali)	$f_{t,w}$ 0,45 -
Fattore tendaggi (estivi)	$f_{t,e}$ 0,45 -
Fattore di trasmissione solare	g_{gl} 0,450 -
Fattore trasmissione solare totale	$g_{gl,tot}$ 0,199 -

Caratteristiche delle chiusure assicurati	
Resistenza termica chiusura	R_{ch} 0,12 m ² K/W
f shut	0,6 -

Dimensioni e caratteristiche del serramento	
Larghezza	85,0 cm
Altezza H	80,0 cm



Caratteristiche del telaio	
Trasmissione termica del telaio	U_t 1,30 W/m ² K
K distorsione	K_d 0,080 W/mK
Area totale	A_{st} 0,680 m ²
Area vetro	A_v 0,390 m ²
Area totale	A_t 0,390 m ²
Fattore di forma	F_r 0,67 -
Perimetro vetro	L_v 2,900 m
Perimetro telaio	L_t 3,300 m

Stratigrafia del pacchetto vetrato			
Descrizione strati	s	A	R
Resistenza superficiale interna	-	-	0,130
Primo vetro	6,0	1,00	0,005
Interpaccchia	-	-	0,790
Secondo vetro	6,0	1,00	0,005
Resistenza superficiale esterna	-	-	0,040



40

ESATEC PROGETTI
VIA MARCONI 17 - 53021 PORTO SANT'ELPIDIO (PI)

Legenda simboli	
s	Spessore
A	Conduttività termica
R	Resistenza termica

Caratteristiche del modulo

Trasmissione termica del modulo	U	1,313 W/m ² K
---------------------------------	---	--------------------------

Struttura opaca associata	M4	Cassonetto
Trasmittanza termica	U	0,200 W/m²K
Altezza	H _{cas}	30,00 cm
Larghezza	L _{cas}	85,0 cm
Profondità	P _{cas}	41,00 cm
Area frontale		0,25 m²

<u>Ponte termico del serramento</u>	
Ponte termico associato	Z4 W - Parete - Telaio
Trasmittanza termica lineica	ψ 0,048 W/mK
Lunghezza perimetrale	L 3,30 m

2.3 Configurazione alternativa

Una volta conclusa l'analisi della configurazione di riferimento, viene presentata la configurazione alternativa, sviluppata mantenendo invariati gli aspetti geometrici e impiantistici dell'edificio ma modificando le stratigrafie dell'involucro edilizio (come si può vedere dalle Tabelle 10 e 11). Vengono descritti i materiali impiegati comunemente utilizzati più di un decennio fa, mostrando le differenze con quelli più recenti della configurazione di riferimento. Questo confronto qualitativo funge da presupposto per il confronto quantitativo sviluppato successivamente.

La seconda configurazione è stata messa a confronto con quella che verrà effettivamente implementata dallo Studio Tecnico dove ho svolto il tirocinio, con l'obiettivo di rappresentare una soluzione riconducibile alle tecniche costruttive diffuse nell'edilizia residenziale fino a 10/15 anni fa. Le pareti esterne sono realizzate impiegando materiali più comunemente utilizzati nelle costruzioni residenziali, come blocchi in laterizio porizzato, EPS e Porothersm. Analogamente, la copertura è stata modificata mediante l'utilizzo di uno strato di Poliuretano con velo bituminoso tra due membrane impermeabilizzanti, mentre il pavimento prevede uno strato di EPS (invece che di XPS), l'assenza di un'intercapedine d'aria, mentre tra le piastrelle e il sottofondo in calcestruzzo ho solamente uno strato di cemento magro e non l'autolivellante, lo strato isolante in EPS e il tappetino acustico per ridurre la trasmissione dei rumori. Chiaramente si ipotizza che entrambe le configurazioni abbiano la stessa tipologia di tubazione adatta ai pannelli radianti, che comunque non contribuiscono alla resistenza termica del pavimento. Per quanto riguarda gli elementi finestrati, sono stati adottati serramenti caratterizzati da valori di trasmittanza termica superiori rispetto a quelli della configurazione di riferimento, affinché vi sia una maggiore dispersione di calore attraverso le superfici trasparenti. L'obiettivo di questa configurazione non è rappresentare un edificio inefficiente dal punto di vista energetico, bensì fornire un termine di paragone realistico rispetto ad una soluzione progettata con particolare attenzione alle prestazioni dell'involucro.

Tabella 10. Stratigrafie delle pareti opache nella configurazione alternativa

CARATTERISTICHE TERMICHE E IGROMETRICHE DEI COMPONENTI OPACHI
secondo UNI EN 12831 - UNI EN ISO 6946 - UNI EN ISO 13370

Descrizione della struttura: Parete locale tecnico

Trasmissione termica	0,242	W/m ² K
Spessore	360	mm
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	10,1	°C
Permeanza	125,78	10 ⁻¹² kg/sm ² Pa
Massa superficiale (con intonaco)	291	kg/m ²
Massa superficiale (senza intonaco)	243	kg/m ²
Trasmissione periodica	0,022	W/m ² K
Fattore attenuazione	0,089	-
Sfasamento onda termica	-16,2	h

Stratigrafia:

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Intonaco di gesso e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
2	Porotherm Bio Incastro 12-50	120,00	0,2010	0,597	986	1,00	5
3	Lana di roccia 70 C.A.M.	90,00	0,0340	2,647	70	1,03	1
4	Porotherm Bio Incastro 12-50	120,00	0,2010	0,597	986	1,00	5
5	Intonaco di gesso e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,130	-	-	-

Legenda simboli

s	Spessore	mm
Cond.	Conduttività termica, comprensiva di eventuali coefficienti correttivi	W/mK
R	Resistenza termica	m ² K/W
M.V.	Massa volumica	kg/m ³
C.T.	Capacità termica specifica	kJ/kgK
R.V.	Fattore di resistenza alla diffusione del vapore in capo asciutto	-

CARATTERISTICHE TERMICHE E IGROMETRICHE DEI COMPONENTI OPACHI
secondo UNI EN 12831 - UNI EN ISO 6946 - UNI EN ISO 13370

Descrizione della struttura: Parete esterna 1

Trasmissione termica	0,199	W/m ² K
Spessore	423	mm
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	0,1	°C
Permeanza	40,080	10 ⁻¹² kg/sm ² Pa
Massa superficiale (con intonaco)	292	kg/m ²
Massa superficiale (senza intonaco)	258	kg/m ²
Trasmissione periodica	0,011	W/m ² K
Fattore attenuazione	0,058	-
Sfasamento onda termica	-15,3	h

Stratigrafia:

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Intonaco di gesso e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
2	BLOCCO TERMICO PORIZZATO 30x25x19 TOPPETTI art.292	300,00	0,1900	1,579	855	0,84	7
3	EPS con graffite per pareti C.A.M.	100,00	0,0310	3,226	15	1,45	25
4	Intonaco plastico per cappotto	8,00	0,3000	0,027	1300	0,84	30
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,040	-	-	-

Legenda simboli

s	Spessore	mm
Cond.	Conduttività termica, comprensiva di eventuali coefficienti correttivi	W/mK
R	Resistenza termica	m ² K/W
M.V.	Massa volumica	kg/m ³
C.T.	Capacità termica specifica	kJ/kgK
R.V.	Fattore di resistenza alla diffusione del vapore in capo asciutto	-

CARATTERISTICHE TERMICHE E IGROMETRICHE DEI COMPONENTI OPACHI
secondo UNI TS 11300-1 - UNI EN ISO 6946 - UNI EN ISO 13370

Descrizione della struttura: X Alessandro

Trasmissione termica	0,178	W/m ² K
Spessore	450	mm
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	-2,7	°C
Permeanza	0,039	10 ⁻¹² kg/sm ² Pa
Massa superficiale (con intonaco)	421	kg/m ²
Massa superficiale (senza intonaco)	397	kg/m ²
Trasmissione periodica	0,019	W/m ² K
Fattore attenuazione	0,105	-
Sfasamento onda termica	-15,1	h

Stratigrafia:

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,062	-	-	-
1	Plastrele in ceramica o cotto	15,00	1,3000	0,012	2300	0,84	10000
2	Massetto per pendenza coperture	73,00	0,1500	0,487	600	1,00	30
3	Guaina/membrana bituminosa impermeabilizzante	4,00	0,1700	0,024	2000	1,70	180000
4	Poluretano con velo bituminoso C.A.M.	100,00	0,0220	4,545	44	1,47	4312
5	Barriera vapore / membrana impermeabilizzante	2,50	0,1700	0,015	2700	0,88	1500000
6	Sottofondo di cemento magro	20,00	0,7000	0,029	1600	0,88	20
7	Blocco da solaio	220,00	0,6670	0,330	1214	0,84	9
8	Intonaco di gesso e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,100	-	-	-

Legenda simboli

s	Spessore	mm
Cond.	Conduttività termica, comprensiva di eventuali coefficienti correttivi	W/mK
R	Resistenza termica	m ² K/W
M.V.	Massa volumica	kg/m ³
C.T.	Capacità termica specifica	kJ/kgK
R.V.	Fattore di resistenza alla diffusione del vapore in capo asciutto	-

CARATTERISTICHE TERMICHE E IGROMETRICHE DEI COMPONENTI OPACHI
secondo UNI EN 12831 - UNI EN ISO 6946 - UNI EN ISO 13370

Descrizione della struttura: Pavimento su terreno

Trasmissione termica	0,354	W/m ² K
Trasmissione controterra	0,214	W/m ² K
Spessore	370	mm
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	0,1	°C
Permeanza	0,002	10 ⁻¹² kg/sm ² Pa
Massa superficiale (con intonaco)	533	kg/m ²
Massa superficiale (senza intonaco)	533	kg/m ²
Trasmissione periodica	0,069	W/m ² K
Fattore attenuazione	0,323	-
Sfasamento onda termica	-12,6	h

Stratigrafia:

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,170	-	-	-
1	Plastrele in ceramica (piastrele)	10,00	1,3000	0,008	2300	0,84	9999999
2	Sottofondo di cemento magro	60,00	0,9000	0,067	1800	0,88	30
3	Calcestruzzo cellulare sottofondo Fassa	100,00	0,1000	1,000	400	0,88	30
4	EPS per pavimenti C.A.M.	50,00	0,0340	1,471	30	1,45	30
5	C.I.s. di sabbia e ghiaia (pareti esterne)	150,00	2,1500	0,070	2400	1,00	90
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,040	-	-	-

Legenda simboli

s	Spessore	mm
Cond.	Conduttività termica, comprensiva di eventuali coefficienti correttivi	W/mK
R	Resistenza termica	m ² K/W
M.V.	Massa volumica	kg/m ³
C.T.	Capacità termica specifica	kJ/kgK

Tabella 11. Stratigrafia dei serramenti nella configurazione alternativa

CARATTERISTICHE TERMICHE DEI COMPONENTI FINESTRATI
secondo UNI EN 12831 - UNI EN ISO 6946 - UNI EN ISO 10077

Descrizione della finestra: **Finestra 166x234 P1**

Codice: **W10**

Caratteristiche del serramento

Tipologia di serramento *Singolo*
Classe di permeabilità *Senza classificazione*
Trasmittanza termica U_w **1,410** W/m²K
Trasmittanza solo vetro U_g **1,029** W/m²K

Dati per il calcolo degli apporti solari

Emissività ϵ **0,837** -
Fattore tendaggi (invernale) $f_{c,inv}$ **0,80** -
Fattore tendaggi (estivo) $f_{c,est}$ **0,45** -
Fattore di trasmittanza solare $g_{gl,n}$ **0,500** -
Fattore trasmissione solare totale g_{gl+sh} **0,393** -

Caratteristiche delle chiusure oscuranti

Resistenza termica chiusure **0,22** m²K/W
f shut **0,6** -

Dimensioni e caratteristiche del serramento

Larghezza **166,0** cm
Altezza H **234,0** cm

Caratteristiche del telaio

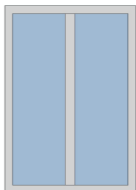
Trasmittanza termica del telaio U_f **1,60** W/m²K
K distanziale K_d **0,080** W/mK
Area totale A_w **3,884** m²
Area vetro A_g **2,868** m²
Area telaio A_f **1,017** m²
Fattore di forma F_f **0,74** -
Perimetro vetro L_g **11,240** m
Perimetro telaio L_f **6,000** m

Stratigrafia del pacchetto vetrato

Descrizione strato	s	λ	R
Resistenza superficiale interna	-	-	0,130
Primo vetro	6,0	1,00	0,006
Intercapedine	-	-	0,790
Secondo vetro	6,0	1,00	0,006
Resistenza superficiale esterna	-	-	0,040

Legenda simboli

s Spessore mm
 λ Conduttività termica W/mK
R Resistenza termica m²K/W



CARATTERISTICHE TERMICHE DEI COMPONENTI FINESTRATI
secondo UNI EN 12831 - UNI EN ISO 6946 - UNI EN ISO 10077

Descrizione della finestra: **Finestra 70x240 PT**

Codice: **W7**

Caratteristiche del serramento

Tipologia di serramento *Singolo*
Classe di permeabilità *Senza classificazione*
Trasmittanza termica U_w **1,483** W/m²K
Trasmittanza solo vetro U_g **1,029** W/m²K

Dati per il calcolo degli apporti solari

Emissività ϵ **0,837** -
Fattore tendaggi (invernale) $f_{c,inv}$ **0,80** -
Fattore tendaggi (estivo) $f_{c,est}$ **0,45** -
Fattore di trasmittanza solare $g_{gl,n}$ **0,500** -
Fattore trasmissione solare totale g_{gl+sh} **0,393** -

Caratteristiche delle chiusure oscuranti

Resistenza termica chiusure **0,22** m²K/W
f shut **0,6** -

Dimensioni e caratteristiche del serramento

Larghezza **70,0** cm
Altezza H **240,0** cm

Caratteristiche del telaio

Trasmittanza termica del telaio U_f **1,60** W/m²K
K distanziale K_d **0,080** W/mK
Area totale A_w **1,680** m²
Area vetro A_g **1,100** m²
Area telaio A_f **0,580** m²
Fattore di forma F_f **0,65** -
Perimetro vetro L_g **5,400** m
Perimetro telaio L_f **6,200** m

Stratigrafia del pacchetto vetrato

Descrizione strato	s	λ	R
Resistenza superficiale interna	-	-	0,130
Primo vetro	6,0	1,00	0,006
Intercapedine	-	-	0,790
Secondo vetro	6,0	1,00	0,006
Resistenza superficiale esterna	-	-	0,040

Legenda simboli

s Spessore mm
 λ Conduttività termica W/mK
R Resistenza termica m²K/W



CARATTERISTICHE TERMICHE DEI COMPONENTI FINESTRATI
secondo UNI EN 12831 - UNI EN ISO 6946 - UNI EN ISO 10077

Descrizione della finestra: **Finestra 95x155 P2**

Codice: **W26**

Caratteristiche del serramento

Tipologia di serramento *Singolo*
Classe di permeabilità *Senza classificazione*
Trasmittanza termica U_w **1,632** W/m²K
Trasmittanza solo vetro U_g **1,029** W/m²K

Dati per il calcolo degli apporti solari

Emissività ϵ **0,837** -
Fattore tendaggi (invernale) $f_{c,inv}$ **0,80** -
Fattore tendaggi (estivo) $f_{c,est}$ **0,45** -
Fattore di trasmittanza solare $g_{gl,n}$ **0,500** -
Fattore trasmissione solare totale g_{gl+sh} **0,393** -

Caratteristiche delle chiusure oscuranti

Resistenza termica chiusure **0,22** m²K/W
f shut **0,6** -

Dimensioni e caratteristiche del serramento

Larghezza **95,0** cm
Altezza H **155,0** cm

Caratteristiche del telaio

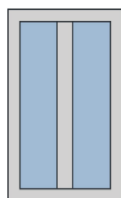
Trasmittanza termica del telaio U_f **1,60** W/m²K
K distanziale K_d **0,080** W/mK
Area totale A_w **1,472** m²
Area vetro A_g **0,850** m²
Area telaio A_f **0,622** m²
Fattore di forma F_f **0,58** -
Perimetro vetro L_g **6,660** m
Perimetro telaio L_f **5,000** m

Stratigrafia del pacchetto vetrato

Descrizione strato	s	λ	R
Resistenza superficiale interna	-	-	0,130
Primo vetro	6,0	1,00	0,006
Intercapedine	-	-	0,790
Secondo vetro	6,0	1,00	0,006
Resistenza superficiale esterna	-	-	0,040

Legenda simboli

s Spessore mm
 λ Conduttività termica W/mK
R Resistenza termica m²K/W



CARATTERISTICHE TERMICHE DEI COMPONENTI FINESTRATI
secondo UNI EN 12831 - UNI EN ISO 6946 - UNI EN ISO 10077

Descrizione della finestra: **Finestra 100x90 PT**

Codice: **W2**

Caratteristiche del serramento

Tipologia di serramento *Singolo*
Classe di permeabilità *Senza classificazione*
Trasmittanza termica U_w **1,668** W/m²K
Trasmittanza solo vetro U_g **1,029** W/m²K

Dati per il calcolo degli apporti solari

Emissività ϵ **0,837** -
Fattore tendaggi (invernale) $f_{c,inv}$ **0,80** -
Fattore tendaggi (estivo) $f_{c,est}$ **0,45** -
Fattore di trasmittanza solare $g_{gl,n}$ **0,500** -
Fattore trasmissione solare totale g_{gl+sh} **0,393** -

Caratteristiche delle chiusure oscuranti

Resistenza termica chiusure **0,22** m²K/W
f shut **0,6** -

Dimensioni e caratteristiche del serramento

Larghezza **100,0** cm
Altezza H **90,0** cm

Caratteristiche del telaio

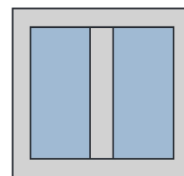
Trasmittanza termica del telaio U_f **1,60** W/m²K
K distanziale K_d **0,080** W/mK
Area totale A_w **0,900** m²
Area vetro A_g **0,476** m²
Area telaio A_f **0,424** m²
Fattore di forma F_f **0,53** -
Perimetro vetro L_g **4,160** m
Perimetro telaio L_f **3,800** m

Stratigrafia del pacchetto vetrato

Descrizione strato	s	λ	R
Resistenza superficiale interna	-	-	0,130
Primo vetro	6,0	1,00	0,006
Intercapedine	-	-	0,790
Secondo vetro	6,0	1,00	0,006
Resistenza superficiale esterna	-	-	0,040

Legenda simboli

s Spessore mm
 λ Conduttività termica W/mK
R Resistenza termica m²K/W



Capitolo 3

METODOLOGIA

3.1 Verifica della condensa superficiale

Prima di procedere alla determinazione dei carichi termici invernali dell'edificio è opportuno verificare che le stratigrafie impiegate garantiscono le condizioni imposte dalle normative. Verranno quindi descritti i parametri coinvolti e il procedimento impiegato per evitare il rischio di formazione di umidità sulle superfici interne dell'involucro edilizio.

Nella progettazione di un edificio, oltre che calcolare i carichi termici di progetto, risulta fondamentale effettuare anche un'analisi del comportamento igrometrico dell'involucro edilizio, in quanto la condensa presente all'interno delle pareti opache può compromettere negli anni le prestazioni energetiche dei materiali isolanti, favorire il degrado dei componenti costruttivi e creare condizioni ambientali non compatibili con il benessere degli occupanti (come per esempio la formazione di muffe). Detto ciò, le verifiche termoigrometriche rappresentano uno strumento indispensabile per valutare l'idoneità delle stratigrafie in fase progettuale. Il fenomeno della condensazione è strettamente legato alla presenza di vapore acqueo nell'aria. In condizioni ordinarie l'aria contiene sempre una determinata quantità di umidità sotto forma di vapore; tuttavia, la capacità dell'aria di trattenere tale umidità dipende fortemente dalla temperatura. All'aumentare della temperatura, infatti, l'aria è in grado di contenere una maggiore quantità di vapore acqueo, mentre al diminuire della temperatura la sua capacità di trattenimento si riduce progressivamente. Durante il periodo invernale si viene a creare un'importante differenza di temperatura tra l'ambiente interno, più caldo, e l'ambiente esterno, più freddo. Tale differenza genera contemporaneamente un gradiente di temperatura e un gradiente di pressione del vapore, che tenderà a diffondersi dall'interno verso l'esterno attraverso gli strati dell'involucro edilizio. Se, lungo il percorso attraverso la stratigrafia, la pressione parziale del vapore raggiunge o supera il valore della pressione di saturazione corrispondente alla temperatura locale, si verifica il fenomeno della condensazione interstiziale, mentre il fenomeno della condensazione superficiale insorge quando la temperatura superficiale della parete interna è maggiore della temperatura di rugiada dell'aria interna. La presenza di acqua liquida all'interno dei materiali da costruzione può produrre diverse conseguenze negative. In primo luogo, l'umidità tende a incrementare la conducibilità termica degli strati isolanti, riducendone l'efficacia e aumentando le dispersioni di calore attraverso l'involucro e la crescita di muffe, in particolare nelle aree dei ponti termici [38]. Inoltre, se la temperatura dovesse scendere sotto lo zero termico, avremmo il passaggio di stato

dell'acqua in ghiaccio, con conseguente aumento di volume (ed in seguito la formazione di pori nella struttura della parete) e quindi una riduzione di sezione resistente della parete, andando ad accelerare il degrado dei materiali, con possibili ripercussioni sia sulla durabilità delle strutture sia sulla qualità dell'ambiente interno [39]. Per queste ragioni, è stata eseguita una verifica termoigrometrica delle stratigrafie presenti nel lavoro, applicando il metodo di calcolo previsto dalla norma UNI EN ISO 13788, che consente di valutare il rischio di formazione di condensa superficiale ed interstiziale ipotizzando un regime stazionario.

L'equazione (1) mostra che la verifica ha esito positivo se la trasmittanza termica del componente edilizio U non supera il valore massimo U_{max} , il quale si ricava attraverso l'equazione (2):

$$U > U_{max} \quad (1)$$

$$U_{max} = \left(\frac{T_i - T_{si,sic}}{T_i - T_e} \right) \cdot h_{si} \quad (2)$$

Dove:

- T_i è la temperatura interna di progetto invernale (20°C);
- $T_{si, sic}$ è la temperatura di sicurezza della superficie interna, calcolata aggiungendo 1 °C alla temperatura di rugiada dell'aria interna all'edificio. Come mostrato nella Figura 9, attraverso l'utilizzo di un diagramma psicrometrico si impone nel punto A la condizione più gravosa per l'ambiente interno (20 °C e 70% di umidità relativa), per poi ricavarci nel punto B la temperatura di rugiada dell'aria in tali condizioni (14 °C). A questo punto $T_{si,sic}$ è pari a 15 °C;

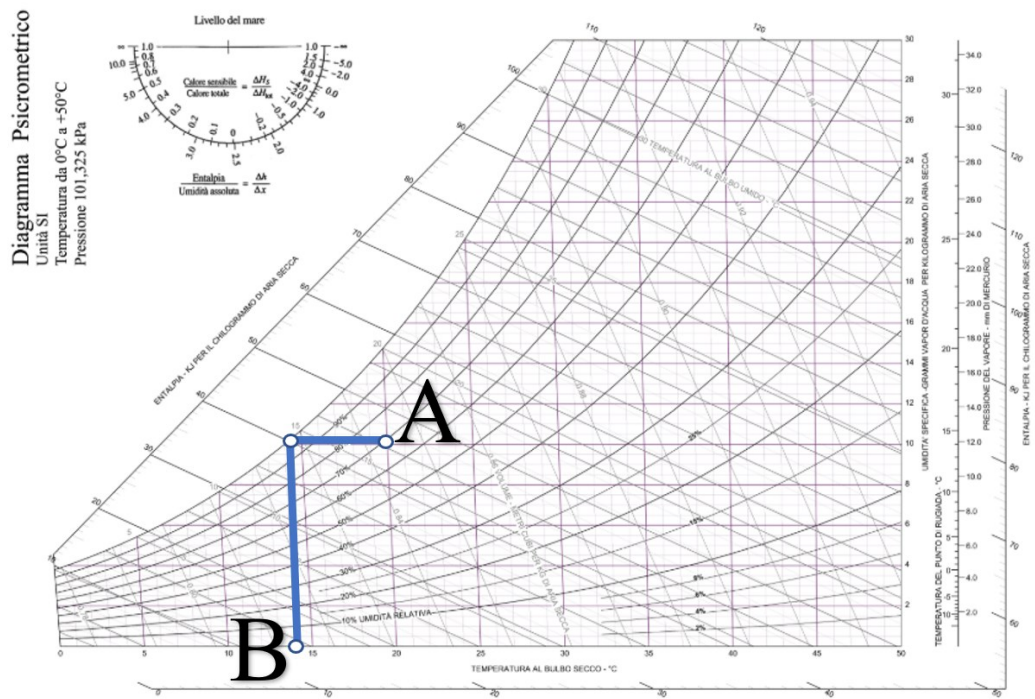


Figura 9. diagramma psicrometrico dell'aria umida [40]

- T_e è la Temperatura esterna media mensile, basata sui dati climatici del territorio in cui è in costruzione l'edificio e considerando il periodo di funzionamento dell'impianto di riscaldamento nella zona climatica E (ottobre-aprile, come evidenziato nella Tabella 12). Esisterà quindi per ogni componente edilizio sottoposto a verifica un valore diverso di U_{max} per ogni mese;

Tabella 12. Temperature esterne medie mensili nell'area climatica E

Mese	$T_{est, media}$ mensile (°C)
Gennaio	3,3
Febbraio	3,6
Marzo	6,8
Aprile	10,4
Maggio	12,5
Giugno	18,2
Luglio	22,0
Agosto	21,2
Settembre	17,2
Ottobre	14,6
Novembre	9,0
Dicembre	4,3
$T_{est, media}$ stagione di riscaldamento (°C)	7,4

- h_{si} è il coefficiente di scambio termico superficiale, calcolato come l'inverso della resistenza termica specifica della superficie interna della parete opaca o del componente finestrato utilizzato.

Come mostrano le Tabelle 13, 14 e 15, la condizione (1) risulta ampiamente soddisfatta in tutti i casi.

Tabella 13 Condizione soddisfatta per la parete esterna

PARETE ESTERNA	
Trasmittanza massima U_{max}	trasmissione termica
$W/m^2 \cdot K$	$W/m^2 \cdot K$
2,30	0,209
2,35	
2,91	
4,01	
7,12	
3,50	
2,45	
7,12 > 0,209: condizione soddisfatta	

Tabella 14. Condizione soddisfatta per il pavimento e per il soffitto

PAVIMENTO SU TERRENO		SOFFITTO	
Trasmittanza massima U_{max}	trasmissione termica U_{pav}	Trasmittanza massima U_{max}	trasmissione termica
$W/m^2 \cdot K$	$W/m^2 \cdot K$	$W/m^2 \cdot K$	$W/m^2 \cdot K$
1,76	0,32	2,99	0,19
1,79		3,05	
2,23		3,79	
3,06		5,21	
5,45		9,26	
2,67		4,55	
1,87		3,18	
5,45 > 0,32: condizione soddisfatta		9,26 > 0,19: condizione soddisfatta	

Tabella 15. Condizione soddisfatta per tutti i componenti finestrati

FINESTRE				
Trasmittanza massima U_{max}	trasmittanza termica finestra 1 200x235 U_{w1}	trasmittanza termica finestra 2 85x235 U_{w2}	trasmittanza termica finestra 3 90x135-165 U_{w3}	trasmittanza termica finestra 4 85x80 U_{w4}
$W/m^2 \cdot K$	$W/m^2 \cdot K$	$W/m^2 \cdot K$	$W/m^2 \cdot K$	$W/m^2 \cdot K$
2,30	1,410	1,483	1,632	1,668
2,35				
2,91				
4,01				
7,12				
3,50				
2,45				
7,12 > U_{w1} : condizione soddisfatta per tutte le finestre				

3.2 Verifica della condensa interstiziale

Oltre al controllo della presenza di condensa superficiale, è altrettanto importante valutare il comportamento del vapore acqueo all'interno delle stratigrafie opache. I principi teorici ed i calcoli che seguono hanno lo scopo di dimostrare che non si verifichino fenomeni di condensa interstiziale, per garantire l'integrità dell'involucro edilizio.

La verifica prevede che la pressione parziale su ogni superficie di separazione tra ogni strato della parete sia inferiore alla corrispondente pressione di saturazione. Per effettuare questo confronto tra pressioni, devo prima determinare le condizioni di verifica: la Temperatura interna T_i rimane sempre pari a 20 °C e 70% di umidità relativa, mentre la temperatura esterna è pari alla temperatura esterna media nella stagione di riscaldamento $T_{est, media}$ pari a 7,4 °C e l'umidità relativa è al 90%. Per la temperatura interna della parete del locale tecnico e la temperatura esterna del pavimento ho utilizzato valori differenti: rispettivamente 10,1 °C e 12,5 °C. Questi accorgimenti sono motivati dal fatto che il locale tecnico non prevede un proprio impianto di riscaldamento a pavimento, mentre la superficie esterna del pavimento è a contatto col terreno. Sono già note le trasmittanze U , i coefficienti di scambio termico superficiale h_{si} e le resistenze termiche specifiche R' .

Inizialmente si calcolano le temperature superficiali per gli strati superficiali esterni ed interni, attraverso l'equazione (3) di seguito riportata:

$$T_{si} = T_i - \left[(T_i - T_e) \cdot \frac{U}{h_{si}} \right] \quad (3)$$

per poi calcolare la differenza di temperatura ΔT tra lo strato più esterno (o più interno) e quello immediatamente adiacente utilizzando l'equazione (4):

$$\Delta T_1 = (T_i - T_e) \cdot U \cdot R_1' \quad (4)$$

L'equazione (4) permette di ricavare le temperature superficiali degli strati interni delle pareti opache, sottraendo T_{si} a ΔT e procedendo a cascata per tutti gli altri strati interni. Successivamente si determinano le pressioni di saturazione del vapore per ogni superficie tra uno strato e l'altro utilizzando la relazione empirica riportata nell'equazione (5), con T che rappresenta la temperatura superficiale di ogni strato.

$$p_{sat} = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot T}{237,3 + T}} \quad (5)$$

Per ottenere le relative pressioni parziali una volta note le pressioni di saturazione di ogni strato grazie all'equazione (5), bisogna prima calcolare la differenza di pressione tra uno strato e l'altro attraverso l'equazione (6):

$$\Delta p = \frac{Z}{Z_{tot}} \cdot (p_{sat,i} - p_{sat,e}) \quad (6)$$

dove z rappresenta la resistenza alla diffusione del vapore dello strato considerato, mentre Z_{tot} quella complessiva della parete opaca, mentre $p_{sat,i}$ e $p_{sat,e}$ sono le pressioni di saturazione delle superfici interne ed esterne. Il termine z rappresenta l'opposizione che il materiale che compone il singolo strato della parete offre al passaggio del vapore acqueo attraverso il proprio spessore a causa della differenza di pressione di vapore tra le 2 superfici dello strato.

Noti tutti i Δp interni alla parete, si calcolano prima le pressioni parziali delle superfici interne ed esterne della parete moltiplicando le pressioni di saturazione per le umidità relative

corrispondenti. Infine, le pressioni parziali interne sono calcolate sottraendo le pressioni parziali della superficie interna (o esterna) della parete ai Δp di ogni strato interno.

Come mostrato dai valori sotto le colonne p_{sat} e p_{parz} presenti nella Tabella 16, le pressioni parziali di ogni superficie di separazione tra gli strati dei componenti opachi sono inferiori alle corrispondenti pressioni di saturazioni, per cui la verifica termoigrometrica non ha riscontrato anomalie.

Tabella 16. Condizione soddisfatta per ogni componente opaco

PARETE ESTERNA				
Temperature superficiali (°C)	ΔT attraverso lo strato (°C)	p_{sat} kPa	Δp (interno - esterno) kPa	p_{parz} kPa
19,66		2,29		1,60
19,62	0,04	2,28	0,17	1,43
15,47	4,15	1,76	0,12	1,31
7,59	7,88	1,04	0,43	0,87
7,54	0,04	1,04	0,52	0,35
7,53		1,04		0,93

PAVIMENTO SU TERRENO				
Temperature superficiali (°C)	ΔT attraverso lo strato (°C)	p_{sat} kPa	Δp (interno - esterno) kPa	p_{parz} kPa
19,59		2,28		1,59
19,57	0,02	2,28	0,82	0,77
19,41	0,16	2,25	0,00	0,77
16,99	2,42	1,93	0,00	0,77
13,42	3,56	1,54	0,00	0,77
12,60	0,82	1,46	0,00	0,77
12,60		1,46		1,31

SOFFITTO				
Temperature superficiali (°C)	ΔT attraverso lo strato (°C)	p_{sat} kPa	Δp (interno - esterno) kPa	p_{parz} kPa
19,77		2,30		1,61
19,72	0,04	2,30	0,00	1,61
19,45	0,28	2,26	0,00	1,61
19,38	0,07	2,25	0,00	1,61
19,35	0,03	2,24	1,11	0,50
8,77	10,57	1,13	0,00	0,50
8,72	0,05	1,13	0,14	0,36
7,59	1,13	1,04	0,00	0,36
7,56	0,03	1,04	0,01	0,35
7,57		1,04		0,94

PARETE LOCALE TECNICO				
Temperature superficiali (°C)	ΔT attraverso lo strato (°C)	p_{sat} kPa	Δp (interno - esterno) kPa	p_{parz} kPa
10,04		1,23		0,86
10,03	0,01	1,23	0,06	0,80
8,98	1,05	1,15	0,03	0,77
1,72	7,26	0,69	0,01	0,76
0,67	1,05	0,64	0,03	0,73
0,64	0,03	0,64	0,06	0,67
7,49		1,04		0,93

3.3 Valutazione dei carichi termici di ventilazione

Una volta verificate le condizioni termoigrometriche dell'involucro, è stata descritta prima la teoria e i parametri impiegati per il calcolo del carico termico per ventilazione, per poi quantificare le portate volumetriche d'aria dovuta ai ricambi d'aria e alle infiltrazioni d'aria nell'edificio, scegliere il valore maggiore dei due ed infine calcolare le dispersioni termiche.

Nella valutazione del fabbisogno termico invernale di un edificio non è sufficiente considerare solamente le dispersioni di calore attraverso le strutture opache e trasparenti dell'involucro edilizio perché una parte del fabbisogno energetico è dovuta ai ricambi d'aria che avvengono tra l'ambiente interno e l'ambiente esterno. Ogni volta che aria fredda entra nell'edificio, il sistema di riscaldamento deve fornire una determinata quantità di energia per portare l'aria alle condizioni di comfort richieste all'interno dei locali (20 °C e 50% di umidità relativa). Questo contributo prende il nome di carico termico per ventilazione e, soprattutto negli edifici residenziali, può rappresentare una quota significativa del carico termico complessivo.

Dal punto di vista fisico, accade che durante il periodo invernale la temperatura esterna risulta generalmente inferiore a quella presente all'interno dell'edificio. Di conseguenza, l'aria che entra nei locali attraverso i normali ricambi d'aria o mediante infiltrazioni accidentali possiede una quantità di energia inferiore rispetto all'aria interna. Affinché le condizioni di benessere termoigrometrico rimangano costanti, il sistema di riscaldamento deve quindi compensare questa differenza di energia, riscaldando continuamente l'aria proveniente dall'esterno.

Il calcolo del carico termico per ventilazione $\dot{Q}_{h,ve}$ viene eseguito mediante l'equazione (7):

$$\dot{Q}_{h,ve} = G \cdot c_p \cdot (T_i - T_e) = \rho \cdot W \cdot c_p \cdot (T_i - T_e) \quad (7)$$

dove:

- ρ è la densità dell'aria (kg/m³);
- c_p è il calore specifico dell'aria a pressione costante (kJ/(kg K));
- G rappresenta la portata massica d'aria entrante dall'esterno (kg/h);
- T_i è la temperatura interna di progetto (°C);
- T_e è la temperatura esterna di progetto (°C);
- W è la portata volumetrica d'aria (m³/h).

L'equazione (7) mostra che il fabbisogno termico per ventilazione dipende essenzialmente da due fattori:

1. dalla differenza di temperatura tra ambiente interno ed esterno: tanto più l'aria esterna è fredda, tanto maggiore sarà l'energia necessaria per riscaldarla;
2. dalla quantità d'aria che entra nell'edificio nell'unità di tempo. Quest'ultimo parametro assume un ruolo particolarmente importante poiché rappresenta la variabile sulla quale il progettista può intervenire direttamente attraverso le scelte costruttive e impiantistiche.

Per quanto riguarda le condizioni interne di progetto, sono stati adottati i valori indicati dalla norma UNI 10339. In particolare, nel soggiorno e nelle camere da letto è stata assunta una temperatura interna pari a 20 °C, mentre per i servizi igienici è stata considerata una temperatura di 22 °C. Tale differenza deriva dalle diverse esigenze di comfort associate ai vari ambienti e rappresenta un metodo già consolidato e presente nelle norme riguardo la progettazione degli impianti di climatizzazione. Per la temperatura esterna di progetto è stato invece utilizzato il valore di minima temperatura esterna previsto per la località oggetto di studio, pari a -2,7 °C (anche se non è necessariamente la temperatura minima assoluta che può verificarsi durante l'anno, rappresenta un valore convenzionale utilizzato per il dimensionamento degli impianti di riscaldamento, in modo tale da garantire il mantenimento delle condizioni di comfort anche nelle situazioni climatiche più sfavorevoli).

Una volta definite le condizioni termiche di progetto, è stato necessario determinare la portata volumetrica d'aria. Nel caso in esame l'edificio è caratterizzato da ventilazione naturale e non è presente un sistema di ventilazione meccanica controllata. In queste condizioni la normativa prevede di considerare il maggiore tra due differenti valori di portata: la portata minima necessaria per garantire il corretto ricambio igienico dell'aria W_{min} e la portata dovuta alle infiltrazioni attraverso l'involucro edilizio W_{inf} . Con W_{min} viene rappresentata la quantità d'aria che deve essere immessa nei locali per assicurare condizioni accettabili di qualità dell'aria interna, limitando l'accumulo di umidità, anidride carbonica e altri inquinanti prodotti dalla normale permanenza degli occupanti all'interno dell'edificio. La portata minima viene determinata a partire dal numero di ricambi d'aria orari mediante l'equazione (8):

$$W_{min} = n_{min} \cdot V / 3600 \quad (8)$$

dove n_{min} rappresenta il numero di ricambi orari (1/h) e V il volume del locale, già calcolato precedentemente (m^3).

Ai fini del calcolo non è stato considerato il volume complessivo dell'edificio, ma si è deciso di suddividerlo nei differenti ambienti (ignorando così il volume del locale tecnico). Questo perché, ciascun locale presenta differenti esigenze di ventilazione. Infatti, come mostrato nella Tabella 17 che si basa sulla norma UNI 10339, nei locali nobili sono stati adottati 0,5 ricambi d'aria all'ora, mentre per i locali tecnici sono stati assunti 1,2 ricambi d'aria all'ora.

Tabella 17. Numero minimo di ricambi orari secondo UNI 10339

Locale		Numero minimo di ricambi orari per ora n_{min} (secondo UNI 10339) (1/h)
1	soggiorno-pranzo-cucina	0,5
2	letto centrale nord	0,5
3	letto nord-est	0,5
4	letto padronale	1,2
5	bagno N	1,2
6	bagno padronale	1,2
7	bagno giorno	0,5
8	Lavanderia	0,5

Successivamente è stata determinata la portata dovuta alle infiltrazioni d'aria, che si ricava attraverso l'equazione (9):

$$W_{inf} = 2 \cdot V \cdot n_{50} \cdot e \cdot \varepsilon / 3600 \quad (9)$$

dove con V viene sempre indicato il volume del singolo locale, e rappresenta il coefficiente di schermatura, che tiene conto del livello di esposizione dell'edificio al vento in funzione del contesto circostante e il cui valore si ricava dalla Tabella 18. Come si può notare dalla Tabella 19, il locale soggiorno-pranzo-cucina ha un valore appena superiore, in quanto presenta più di un'apertura esposta;

Tabella 18. Coefficiente di schermatura e secondo UNI 12831 [41]

prospetto NA.8 Coefficienti di schermatura e (-)		
Coefficiente e per classi di schermatura	Vano riscaldato con una apertura esposta	Vano riscaldato con più di una apertura esposta
<u>Nessuna schermatura</u> : edifici in zone ventose, edifici emergenti in altezza in centri abitati	0,03	0,05
<u>Schermatura moderata</u> : edifici in campagna con alberi o altri edifici intorno ad essi, periferie	0,02	0,03
<u>Schermatura pesante</u> : edifici di altezza media nei centri abitati, edifici nei boschi	0,01	0,02

Tabella 19. Coefficiente di schermatura in funzione del locale, secondo UNI 12831

Locale		Coefficiente di schermatura e (secondo UNI 12831)
		(/)
1	soggiorno-pranzo-cucina	0,03
2	letto centrale nord	0,02
3	letto nord-est	0,02
4	letto padronale	0,02
5	bagno N	0,02
6	bagno padronale	0,02
7	bagno giorno	0,02
8	Lavanderia	0,02

ε è un coefficiente correttivo legato all'altezza dell'edificio. Nel caso studio quest'ultimo è stato assunto pari a uno (come previsto dalla Tabella 20), poiché l'altezza dell'edificio risulta inferiore a 10 m;

Tabella 20. Fattore di correzione per l'altezza ε , secondo UNI 12831 [41]

prospetto NA.9 Fattore di correzione per l'altezza ε (-)	
Altezza del locale riscaldato "i" sopra il livello del terreno (m) (dal centro del locale al livello del terreno)	Fattore di correzione per l'altezza ε
0 -10	1
>10 -30	1,2
oltre 30	1,5

n_{50} rappresenta il numero di ricambi d'aria orari in presenza di una differenza di pressione di 50 Pascal tra ambiente interno ed esterno. Tale parametro può essere determinato sperimentalmente

mediante il cosiddetto Blower Door Test, una prova di pressurizzazione e depressurizzazione dell'edificio ampiamente utilizzata per la valutazione della permeabilità all'aria dell'involucro edilizio. La letteratura scientifica individua tale metodologia come il riferimento più diffuso per quantificare le perdite d'aria e per la verifica della qualità costruttiva degli edifici, grazie alla sua buona ripetibilità sperimentale e alla relativa semplicità di esecuzione [42], [43]. In questo lavoro n_{50} è pari a 5, perché ci si pone nel caso di un tipo di costruzione di qualità media, prendendo nota dalla Tabella 21.

Tabella 21: Tasso orario di infiltrazione dell'edificio n_{50} , secondo UNI 12831 [41]

prospetto NA.10 Valori del trafilemento d'aria per l'intero edificio n_{50} (1/h)			
Tipo di costruzione	Grado di tenuta all'aria dell'involucro edilizio (qualità dei serramenti)		
	alto (porte e finestre con elevate qualità di tenuta)	medio (finestre con doppio vetro, tenuta normale)	basso (finestre con vetro singolo, bassa tenuta)
Appartamenti unifamiliari	<4	4 -10	>10
Altri appartamenti o edifici	<2	2 -5	>5

Dal confronto tra le due portate volumetriche ottenute è emerso (e riportato nella Tabella 22) che il valore di $W_{\min}$ risulta essere superiore a quello derivante dalle infiltrazioni ($W_{\inf}$). Di conseguenza, ai fini del calcolo del carico termico per ventilazione, sono stati adottati i valori associati alla ventilazione naturale.

Tabella 22. Confronto dei valori di portata volumetrica nei due metodi di calcolo per ogni locale

Portata volumetrica minima dovuta ai ricambi d'aria $W_{\min}$	Portata volumetrica dovuta alle infiltrazioni nell'involucro edilizio $W_{\inf}$
(m^3/h)	(m^3/h)
125	75
22	9
23	9
85	14
23	4
27	4
4	2
5	2
313	119

Dai risultati ottenuti, osservabili nella Tabella 23, il carico termico totale per ventilazione dell'edificio risulta pari a circa 2,5 kW. Pur essendo inferiore al contributo dovuto alle dispersioni per trasmissione, tale valore rappresenta comunque una quota non trascurabile del fabbisogno termico complessivo e va sempre considerato sia nel dimensionamento dell'impianto di riscaldamento sia nella valutazione delle prestazioni energetiche dell'edificio nel suo insieme.

Tabella 23. Confronto tra l'entità dei carichi termici invernali divisi per locali e per tipologia di dispersione termica

Locale	$Q_{h,trasmissione}$	$Q_{h,ventilazione}$	$Q_{nd,COMPLESSIVO}$
	(W)	(W)	(W)
1 soggiorno-pranzo-cucina	2254	967	3222
2 letto centrale nord	361	167	528
3 letto nord-est	487	178	665
4 letto padronale	534	655	1189
5 bagno N	155	192	347
6 bagno padronale	147	224	371
7 bagno giorno	185	33	218
8 Lavanderia	67	37	104
TOTALE	4190	2454	6644

3.4 Calcolo dei carichi termici per trasmissione

Come già evidenziato dalla Tabella 23, una quota determinante del fabbisogno termico invernale è dovuta alle dispersioni di calore attraverso l'involucro edilizio. Pertanto in questo paragrafo è presente la descrizione dei criteri adottati per la determinazione del carico termico per trasmissione, analizzando il contributo delle pareti opache, dei serramenti, della copertura e del pavimento. Sono stati considerati anche l'influenza dei ponti termici attraverso un calcolo semplificato e una maggiorazione del carico termico complessivo (trasmissione più ventilazione) dovuta all'ipotesi di funzionamento intermittente dell'impianto di riscaldamento.

Attraverso la valutazione dei carichi termici invernali dell'edificio è possibile determinare la gran parte della quantità di potenza termica che l'edificio disperde verso l'ambiente esterno nelle condizioni climatiche più gravose e che, di conseguenza, quanta ne deve essere fornita dall'impianto per mantenere le temperature interne di progetto. Nel presente lavoro il calcolo è stato effettuato considerando tutte le principali superfici disperdenti dell'edificio: pareti esterne, serramenti, copertura, pavimento e portone di ingresso e si tiene conto sia delle dispersioni attraverso le superfici piane sia dell'influenza dei ponti termici [44]. I risultati ottenuti sono stati successivamente sommati per determinare il carico termico complessivo di trasmissione, che costituisce uno dei contributi principali del fabbisogno termico invernale dell'edificio. Il trasferimento di calore attraverso l'involucro di un edificio avviene principalmente per conduzione, a causa della differenza di temperatura esistente tra l'ambiente interno riscaldato e l'ambiente esterno. Durante il periodo invernale il calore tende naturalmente a fluire dall'interno verso l'esterno, determinando una perdita d'energia che dovrà essere compensata dall'impianto di riscaldamento. La quantità di calore dispersa totale che si ricava attraverso l'equazione (10), è la somma delle dispersioni delle componenti edilizie i-esime e dipende da tre grandezze:

- dalla trasmittanza termica del componente edilizio, che descrive la capacità dell'elemento di lasciar passare il calore;
- dalla superficie disperdente del componente;
- dalla differenza di temperatura tra ambiente interno ed esterno.

$$\dot{Q}_{h,tr} = \sum_i U \cdot A \cdot (T_i - T_e) \quad (10)$$

Poiché volumetria, destinazione d'uso e impianti rimangono invariati, le differenze riscontrate nei carichi termici possono essere attribuite direttamente alle diverse caratteristiche termo-fisiche dell'involucro. Le pareti esterne costituiscono una delle principali superfici disperdenti di un edificio residenziale. Come mostrato nella tabella 24, Il contributo delle pareti esterne è stato valutato separatamente in funzione dell'orientamento (Nord, Sud, Est e Ovest), in quanto la copertura dell'edificio è rappresentata da una falda inclinata di 19° rispetto all'orizzontale. Per facilitare il calcolo delle superfici disperdenti opache, è stato necessario calcolare dei valori di altezza media delle pareti, così come riportato nella Tabella 24.

Tabella 24. Valori di altezza netta e media per ogni locale

	Locale	Altezza netta	H _{nord}	H _{sud,1}	H _{sud,2}	H _{est,media,1}	H _{est,media,2}	H _{ovest,media}
		(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
1	soggiorno-pranzo-cucina-disimpegno	4,04	2,755	3,305	4,515	3,928		3,537
2	letto centrale nord	3,62	2,755					
3	letto nord-est	3,62	2,755			3,635		
4	letto padronale	4,29		3,305		4,380	3,768	
5	bagno N	3,45	2,755			riferita alla parete esterna	riferita alla parete del locale tecnico	
6	bagno padronale	4,22		3,305				
7	bagno giorno	3,86		3,305				3,860
8	Lavanderia	4,35						3,910

Per ciascuna parete è stata determinata la superficie disperdente netta, ottenuta sottraendo le superfici occupate dai componenti finestrati. Successivamente il carico termico è stato calcolato utilizzando la trasmittanza della stratigrafia considerata e la differenza di temperatura tra ambiente interno ed esterno.

Un aspetto particolarmente importante nella valutazione delle dispersioni termiche è rappresentato dai ponti termici, ossia quelle zone dell'involucro in cui il flusso di calore risulta alterato rispetto alle superfici circostanti a causa di:

- discontinuità geometriche, come l'incontro tra due pareti o tra parete e solaio;
- discontinuità dovute alla presenza di materiali con caratteristiche termiche differenti;
- interruzioni dell'isolamento in corrispondenza di serramenti, pilastri, travi o altro.

In queste zone il flusso di calore tende a concentrarsi, generando dispersioni superiori rispetto a quelle che si avrebbero con una parete perfettamente omogenea. Oltre all'aumento delle perdite energetiche, i ponti termici possono determinare un abbassamento delle temperature superficiali interne e favorire la formazione di condensa e muffe [45].

Se le norme tecniche (UNI EN ISO 14683 e UNI EN ISO 10211) prevedono metodi di calcolo semplificati o più dettagliati basati su simulazioni bidimensionali o tridimensionali, nel presente lavoro, è stato tuttavia adottato un metodo ancora più semplice, che consiste nell'incrementare le superfici disperdenti delle pareti di una quota pari allo spessore delle strutture in corrispondenza delle giunzioni. Chiaramente questo suppone di avere dei diedri dove si incontrano le pareti disperdenti, da qui l'idea di utilizzare valori medi di altezza delle pareti. Dal punto di vista progettuale, considerare i ponti termici nel calcolo è fondamentale perché si evita di sottostimare le dispersioni termiche dell'edificio, permettendo di dimensionare l'impianto di riscaldamento con un adeguato margine di sicurezza. Per quanto riguarda i serramenti, il carico termico disperso attraverso le finestre, descritto dall'equazione (11) viene determinato attraverso i seguenti termini:

- trasmittanza complessiva del serramento U , ricavata dalla Tabella 10 $W/(m^2 \cdot K)$;
- la superficie vetrata A , divisa per locale e anch'essa presente nella Tabella 25 (m^2);
- la differenza di temperatura tra interno ed esterno $T_i - T_e$ ($^{\circ}C$).

$$\dot{Q}_w = U \cdot A \cdot (T_i - T_e) \quad (11)$$

Tabella 25. Superficie vetrata suddivisa per locali

Locale		Superficie vetrata
		(m^2)
1	soggiorno-pranzo-cucina-disimpegno	26,16
2	letto centrale nord	6,70
3	letto nord-est	6,70
4	letto padronale	6,70
5	bagno N	2,00
6	bagno padronale	2,00
7	bagno giorno	2,00
8	Lavanderia	0,00

Visto che le superfici finestrate (pur essendo meno estese delle pareti) presentano dispersioni specifiche più elevate, la qualità e le prestazioni dei serramenti contribuiscono in maniera determinante alla riduzione del fabbisogno energetico dell'edificio, tant'è che sono le superfici che disperdono di più (1745 W) rispetto alle altre tipologie di strutture edilizie, secondo i dati della Tabella 26 [46].

Tabella 26. Carichi termici per trasmissione divisi per tipologia e locale

$Q_{\text{pareti esterne}}$				
somma (W)		409		
somma (W)		17		
somma (W)		89		
somma (W)		97		
somma (W)		23		
somma (W)		21		
somma (W)		54		
somma (W)		34		
TOTALE (W)		745		

Q_{finestre}	$Q_{\text{copertura}}$	$Q_{\text{a,pavimento}}$	$Q_{\text{b,pavimento}}$	Q_{portone}
(W)	(W)	(W)	(W)	(W)
890	326	401	150	79
218	57	43	26	
218	58	96	26	
218	79	105	36	
67	25	28	12	
67	25	22	12	
67	9	49	4	
0	10	18	5	
1745	589	762	271	TOTALE
		1032		

Il procedimento per il calcolo delle dispersioni attraverso la copertura risulta analogo a quello utilizzato per le pareti, ossia attraverso la trasmittanza complessiva della copertura, dalla superficie disperdente e dalla differenza di temperatura tra interno ed esterno. Poiché il calore tende naturalmente a stratificarsi verso l'alto, le dispersioni attraverso la copertura possono incidere in modo significativo sul fabbisogno di riscaldamento [47]. Lo stesso calcolo viene fatto per il portone d'ingresso.

Invece, il calcolo delle dispersioni attraverso il pavimento richiede delle considerazioni aggiuntive rispetto agli altri componenti dell'involucro. A differenza delle pareti e della copertura, il pavimento non confina direttamente con l'aria esterna ma con il terreno, che presenta un comportamento termico differente. Per questo motivo il calore disperso, che è la somma delle equazioni (13) e (15), è stato suddiviso in due sotto contributi:

- il primo ($\dot{Q}_a$) è legato alle condizioni esterne di progetto nelle zone in cui il pavimento risente maggiormente delle condizioni climatiche esterne e dal valore di U_3 ricavato dall'equazione (12);
- il secondo ($\dot{Q}_b$) invece è legato alla dispersione verso il terreno, valutata considerando la temperatura media del terreno pari a 12,5 °C e dal valore di U_2 ricavato dall'equazione (14).

$$U_3 = \frac{1}{\frac{1}{U_{\text{pav}}} + \frac{L}{\lambda}} \quad (12)$$

$$\dot{Q}_a = U_3 \cdot p \cdot (2 - L) \cdot (T_i - T_e) \quad (13)$$

$$U_2 = \frac{1}{\frac{1}{U_{\text{pav}}} + \frac{1}{C'}} \quad (14)$$

$$\dot{Q}_b = U_2 \cdot A \cdot (T_i - 12,5) \quad (15)$$

Dove:

- U_{pav} è il coefficiente globale del pavimento $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
- $L = 0 \text{ m}$ in quanto l'edificio non è seminterrato;
- λ è la conducibilità termica del terreno umido, pari a $2,9 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;
- p è il perimetro del pavimento, diviso tra i locali (m);
- C' è la conduttanza specifica del terreno umido, pari a $1,74 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
- T_i e T_e sono rispettivamente le temperature interne ed esterne di progetto ($^{\circ}\text{C}$).

Nell'equazione (15) per il contributo verso il terreno è stata utilizzata una temperatura media pari a $12,5^{\circ}\text{C}$, che rappresenta le condizioni termiche del suolo. Il risultato è che le dispersioni attraverso il suolo sono significativamente inferiori rispetto a quelle verso l'ambiente esterno. Questa distinzione è importante perché il terreno è caratterizzato da variazioni di temperatura molto più lente rispetto all'aria esterna e di conseguenza, il comportamento del pavimento risulta differente rispetto a quello delle altre strutture disperdenti [48].

Una volta calcolati tutti i contributi, è stata effettuata la sommatoria dei carichi termici per ottenere il carico termico di trasmissione necessario per la progettazione dell'impianto di riscaldamento. Dai risultati ottenuti nella Tabella 27, è emerso che il carico termico complessivo per trasmissione risulta pari a circa $4,2 \text{ kW}$. Tale valore rappresenta la potenza termica che l'edificio disperde attraverso l'involucro nelle condizioni invernali di progetto. Successivamente, al contributo per trasmissione è stato sommato il carico termico dovuto alla ventilazione, già precedentemente calcolato, ottenendo un carico termico totale dell'edificio pari a circa $6,6 \text{ kW}$, come osservabile nella Tabella 27.

Tabella 27. Carichi termici complessivi

$Q_{h,trasmissione}$	$Q_{h,ventilazione}$	$Q_{nd,COMPLESSIVO}$
(W)	(W)	(W)
2254	967	3222
361	167	528
487	178	665
534	655	1189
155	192	347
147	224	371
185	33	218
67	37	104
4190	2454	6644

Per il dimensionamento finale dell'impianto è stata inoltre applicata una maggiorazione del 15%, dovuta all'ipotesi di funzionamento intermittente dell'impianto di riscaldamento, previsto per 8-12 ore al giorno. In questo modo la potenza richiesta passa da circa 6,6 kW a circa 7,6 kW, valore osservabile nella Tabella 28 ed utilizzato come riferimento per la successiva verifica dell'impianto radiante a pavimento.

Tabella 28. Carico termico maggiorato diviso per locali

$Q_{nd,COMPLESSIVO}$	Funzionamento intermittente		$Q_{nd,maggiorato}$
	funzionamento ore/giorno	aumento %	
(W)			(W)
3222	8 - 12 h/giorno (consigliato)	15%	3705
528		15%	607
665		15%	765
1189		15%	1368
347		15%	400
371		15%	427
218		15%	250
104		0%	104
TOTALE			TOTALE
6644			7625

La configurazione di riferimento presenta invece una potenza totale maggiorata inferiore, pari a circa 6,2 kW, secondo i dati della Tabella 29 (considerando una maggiorazione dell'8%).

Tabella 29. Carichi termici della configurazione di riferimento

Coefficiente di sicurezza adottato

1,08 -

Zona 1 - Zona climatizzata fabbisogno di potenza dei locali

Loc	Descrizione	θ_i [°C]	n [1/h]	Φ_{tr} [W]	Φ_{ve} [W]	Φ_{rh} [W]	Φ_{hl} [W]	$\Phi_{hl\ sic}$ [W]
1	SOGGIORNO-PRANZO -CUCINA	20,0	0,50	1806	1089	0	2895	3126
2	LETTO CENTRALE NORD	20,0	0,50	323	168	0	491	530
3	LETTO NORD-EST	20,0	0,50	397	173	0	570	615
4	LETTO PATRONALE	20,0	0,50	399	278	0	677	731
5	BAGNO N	22,0	1,20	184	191	0	375	405
6	BAGNO PADRONALE	22,0	1,20	153	233	0	386	416
7	BAGNO GIORNO	22,0	1,20	153	78	0	231	250
8	LAVANDERIA	20,0	0,50	46	39	0	85	92
Totale:				3461	2249	0	5709	6166
Totale Edificio:				3461	2249	0	5709	6166

Legenda simboli

θ_i	Temperatura interna del locale
n	Ricambio d'aria del locale
Φ_{tr}	Potenza dispersa per trasmissione
Φ_{ve}	Potenza dispersa per ventilazione
Φ_{rh}	Potenza dispersa per intermittenza
Φ_{hl}	Potenza totale dispersa
$\Phi_{hl\ sic}$	Potenza totale moltiplicata per il coefficiente di sicurezza

Oltre al fabbisogno per il riscaldamento degli ambienti, sono state valutate anche il volume necessario per il serbatoio d'acqua, il calore orario ceduto all'acqua e il volume del vaso d'espansione, grandezze importanti per progettare un sistema di produzione di acqua calda sanitaria (ACS) nel caso di edificio monofamiliare. Seguendo le procedure presenti nei quaderni Caleffi [49], sono state impostate le seguenti grandezze:

- T_u è la temperatura di utilizzo dell'acqua calda: 40 °C;
- T_a è la temperatura di accumulo: 55 °C;
- C è il consumo d'acqua nel periodo di punta: 340 l (valore elevato a causa della presenza di tre bagni nell'edificio)
- t_{pr} è la durata del periodo di preriscaldamento: 2 h
- t_{pu} è la durata del periodo di punta: 1,5 h
- T_f è la temperatura dell'acqua fredda di alimentazione: 12 °C (caso Italia Centrale);

da cui ci si ricava, secondo le equazioni (16) e (17), il calore orario che deve essere ceduto dall'acqua Q_h (2,72 kcal/h) e il volume del bollitore V_B (95 l):

$$Q_h = \frac{C(T_u - T_f)}{t_{pr} + t_{bu}} \quad (16)$$

$$V_B = \frac{Q_h \cdot t_{pr}}{T_a - T_f} \quad (17)$$

Il volume del bollitore potrebbe risultare corretto se fosse alimentato da una caldaia che può reintegrare rapidamente l'acqua in uscita, ma con una pompa di calore il reintegro è notevolmente più lento, per cui è comune optare per serbatoi più capienti da 230 l. Successivamente è stato calcolato il volume del vaso di espansione V_v (pari a 1 l), che ha la funzione di compensare l'aumento del volume dell'acqua nel bollitore a causa dell'aumento della sua temperatura. Viene utilizzata la seguente formula, dove:

- V_B è il volume del bollitore, che si ricava dall'equazione (19) (l);
- e_B è il coefficiente di espansione dell'acqua alla temperatura di accumulo: 0,0121 a 50 °C

- e_0 è il coefficiente di espansione dell'acqua alla temperatura dell'acqua fredda di alimentazione: 0,0006 a 12 °C, ottenuto per approssimazione lineare
- P_a è la pressione assoluta di alimentazione del bollitore, pari a 1 bar
- P_e è la pressione assoluta di esercizio massima dell'impianto, che si ricava attraverso l'equazione (18) e che dipende dalla pressione di scarico della valvola di sicurezza P_{vs} (6 bar):

$$P_e = 0,9P_{vs} + 1 \quad (18)$$

$$V_v = \frac{V_B(e_B - e_v)}{1 - \frac{P_e}{P_a}} \quad (19)$$

Anche in questo caso il vaso di espansione da 1 l risulta troppo piccolo per l'applicazione in serbatoio da 230 l, infatti per pompe di calore tra gli 8 e gli 11 kW di taglia, sono presenti vasi di espansione che raggiungono i 12 l. Come osservabile nella Tabella 30, per l'acqua calda sanitaria viene svolto uno studio dal punto di vista energetico, calcolando i fabbisogni di energia nell'arco di un anno, mese per mese.

Per la configurazione di riferimento, il fabbisogno ideale per acqua sanitaria ($Q_{w,sys,out}$) è di circa 2500 kWh calcolati sull'intero anno, un numero verosimile se si considera la presenza di una famiglia composta da 4 persone che consumano circa 50 l/giorno di ACS.

Tabella 30. Fabbisogno di energia dell'ACS in un anno

Fabbisogno di energia primaria impianto acqua calda sanitaria

Mese	gg	$Q_{W,qn,in}$ [kWh]	$Q_{W,aux}$ [kWh]	$Q_{W,p,nren}$ [kWh]	$Q_{W,p,tot}$ [kWh]
gennaio	31	99	99	0	240
febbraio	28	89	89	0	216
marzo	31	87	87	0	227
aprile	30	74	74	0	208
maggio	31	71	71	0	209
giugno	30	57	57	0	189
luglio	31	52	52	0	187
agosto	31	54	54	0	189
settembre	30	59	59	0	191
ottobre	31	66	66	0	203
novembre	30	77	77	0	212
dicembre	31	96	96	0	236
TOTALI	365	882	882	0	2509

Legenda simboli

gg	Giorni compresi nel periodo di calcolo per acqua sanitaria
$Q_{W,qn,in}$	Energia termica totale in ingresso al sottosistema di generazione per acqua sanitaria
$Q_{W,aux}$	Fabbisogno elettrico totale per acqua sanitaria
$Q_{W,p,nren}$	Fabbisogno di energia primaria non rinnovabile per acqua sanitaria
$Q_{W,p,tot}$	Fabbisogno di energia primaria totale per acqua sanitaria

Capitolo 4

RISULTATI

Una volta determinati i carichi termici di progetto, è possibile analizzare le prestazioni del sistema impiantistico previsto per il caso studio e valutarne l'effettiva capacità di soddisfare il fabbisogno termico invernale dell'edificio. A partire dall'analisi dei risultati ottenuti nel capitolo precedente, si procede a valutare il comportamento dell'impianto radiante a pavimento, della pompa di calore e dell'impianto fotovoltaico della configurazione di riferimento ad un aumento del carico termico da soddisfare. Attraverso quest'ultimo confronto è possibile valutare se le soluzioni progettuali della configurazione di riferimento risultano comunque adeguate ad un edificio meno prestazionale, proponendo delle modifiche se necessarie.

Una volta determinato il carico termico invernale complessivo, è possibile verificare se l'impianto di riscaldamento previsto dal progetto dello studio tecnico sia effettivamente in grado di garantire le condizioni richieste. Questa fase è particolarmente importante perché si possono effettuare degli accorgimenti riguardo la taglia della pompa di calore e i pannelli fotovoltaici. La suddivisione dell'edificio in più locali permette di evidenziare in maniera più puntuale i fabbisogni termici, andando ad evidenziare alcune criticità dovute alla configurazione alternativa delle pareti opache e dei serramenti. Come si può osservare dalla Figura 10, l'edificio è riscaldato per mezzo di un sistema a pannelli radianti a pavimento, costituito da 16 pannelli distribuiti in sette locali (il locale tecnico non è riscaldato, mentre la lavanderia ospita un collettore, mentre l'altro è presente nel disimpegno, in prossimità delle camere da letto e dei bagni). I vantaggi dei pannelli radianti rispetto agli altri sistemi di emissione dell'energia sono molteplici [50]:

- un basso impatto ambientale, in linea con l'obiettivo europeo di avere un edificio di nuova costruzione che sia a zero emissioni, perché facilmente integrabile con una pompa di calore;
- un miglioramento della qualità dell'aria dell'ambiente interno, in quanto non vi è formazione di cenere o circolazione di polvere;
- non presentano vincoli di arredo per gli ambienti interni e non contribuiscono al deterioramento degli elementi edilizi;
- offrono condizioni di confort interno superiori alle alternative, in quanto scambiano calore soprattutto per irraggiamento e non per convezione naturale;
- riducono il consumo d'energia, utilizzando il fluido di lavoro (acqua) a temperature nettamente più basse rispetto alle alternative (35 °C rispetto ai 65/75 °C dei

radiatori), operando a gradienti termici tra pavimento e soffitto più ridotti, anche perché possono lavorare ad una temperatura operativa superiore.

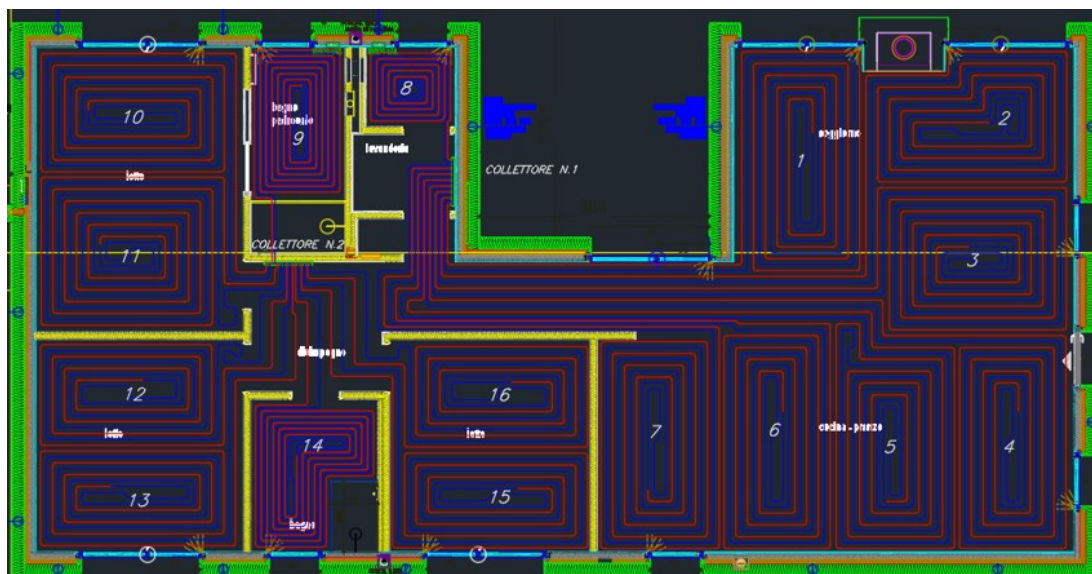


Figura 10. Circuito dei pannelli radianti nell'edificio

Per ogni circuito sono già note dalla documentazione progettuale i parametri geometrici ed idraulici, che vengono racchiusi nella Tabella 31.

Tabella 31. Parametri per il calcolo della potenza termica massima sprigionabile

Pannello	Posizione del pannello nel locale:	Superficie Pannelli		Passo	Lunghezza Tubazioni	Sezione Tubazioni	Portata
		(m²)		(m)	(m)	(mm)	(l/min)
1	1 soggiorno-pranzo-cucina-disimpegno	9,2	67	0,1	92	32	1,7
2		9,8		0,1	98		1,7
3		10		0,1	100		1,7
4		9,4		0,1	94		1,7
5		9,8		0,1	98		1,7
6		9,2		0,1	92		1,7
7		9,6		0,1	96		1,7
8	7 bagno giorno	1,8	1,8	0,05	36		2,5
9	6 bagno padronale	3,8	3,8	0,05	76		2,5
10	4 letto padronale	7,6	16,2	0,1	76		1,7
11		8,6		0,1	86		1,7
12	3 letto nord-est	6,2	12,6	0,1	62		1,7
13		6,4		0,1	64		1,7
14	5 bagno N	4,2	4,2	0,05	84		2,5
15	2 letto centrale nord	6,6	13	0,1	66		1,7
16		6,4		0,1	64		1,7
	Totale:	118,6					

T _{pavimento} (°C)	T _{perimetro} (°C)	T _{interna} (°C)	Potenza termica specifica q _p (W/m ² di pannello)	Rendimento Pannelli Radianti η (/)
29	35	20	100,0	0,97

Mentre per quanto riguarda le condizioni di funzionamento, sono stati adottati valori coerenti con la progettazione di edifici residenziali. [51]

Il primo controllo effettuato riguarda la verifica della superficie minima necessaria affinché ogni locale sia in grado di dissipare il carico termico precedentemente determinato. Per ogni locale è stata calcolata la superficie teoricamente richiesta secondo l'equazione 20, ossia dividendo il carico termico maggiorato del locale per la potenza specifica del pannello radiante.

$$S_{\min} = \frac{Q_{\text{nd,maggiorato}}}{q_p} \quad (20)$$

Successivamente tale valore è stato confrontato con la superficie effettivamente occupata dai pannelli radianti, in modo tale da verificare che il pannello installato sia sufficientemente esteso per garantire il fabbisogno termico del locale.

Tabella 32. Confronto tra le superfici dei pannelli radianti divisi per locali

	Locale	Superficie necessaria pannelli	Superficie attuale pannelli
		(m ²)	(m ²)
1	soggiorno-pranzo-cucina-disimpegno	37,0	67
2	letto centrale nord	6,1	13
3	letto nord-est	7,6	12,6
4	letto padronale	13,7	16,2
5	bagno N	4,0	4,2
6	bagno padronale	4,3	3,8
7	bagno giorno	2,5	1,8

Sono stati confrontati anche il carico termico maggiorato con la massima potenza termica sprigionabile dall'impianto, che secondo l'equazione (21) si ricava moltiplicando la superficie attuale dei pannelli per la potenza termica specifica per il rendimento dei pannelli stessi.

$$Q_{\max} = \eta \cdot q_p \cdot S_{\text{pannelli}} \quad (21)$$

Tabella 33. Confronto tra la massima potenza sprigionabile dal pannello radiante e la potenza maggiorata da soddisfare, divisa per locali

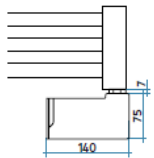
	Locale	Potenza termica sprigionabile massima	$Q_{nd,magiorato}$
		(W)	(W)
1	soggiorno-pranzo-cucina-disimpegno	6499	3705
2	letto centrale nord	1261	607
3	letto nord-est	1222	765
4	letto padronale	1572	1368
5	bagno N	407	400
6	bagno padronale	369	427
7	bagno giorno	175	250

Come si può notare dalle Tabelle 32 e 33, i pannelli installati nei bagni non garantiscono pienamente il rispetto dei carichi termici per questa configurazione, quindi si può intervenire in due maniere:

1. aumentare la superficie di scambio termico per aumentare la potenza termica (non fattibile per limiti di spazio) oppure aumentare la potenza termica specifica (anche questa non fattibile perché diminuirebbe il comfort termico, con una sensazione di calore eccessivo agli arti inferiori con il rischio di problemi circolatori per le persone già predisposte. Inoltre, vi potrebbero essere delle dilatazioni eccessive del massetto che circonda le tubazioni;
2. inserire degli scaldasalviette elettrici, dispositivi da qualche centinaio di Watt da accendere durante i giorni più rigidi dell'anno e per periodi di tempo prolungati (per esempio durante una doccia). Un valido esempio potrebbe essere il modello della Irsap presente nella Tabella 34, che può essere controllato da remoto con un'app dedicata, per programmarne e regolarne la temperatura. L'utilizzo di piccoli scaldasalviette elettrici permette di avere un confort termoigrometrico anche nei bagni, senza modificare nella sostanza il lavoro sul dimensionamento degli impianti [53].

Tabella 34. Esempio di scaldasalvietta elettrica [53]

ECO



SCALDASALVIETTE ARES CROMATO ELETTRICO CON CONTROLLO ELETTRONICO WIFI (E)

Modello	Codice	Profondità P mm	Altezza H mm	Larghezza L mm	Peso Kg	Potenza Elettrica Watt
818 - 15 tubi - 2 intervalli	EIS058 E 50 IR 01 NNN	30	818	580	10,6	300
1118 - 22 tubi - 2 intervalli	EIM048 E 50 IR 01 NNN	30	1118	480	13,9	300
	EIM058 E 50 IR 01 NNN	30	1118	580	14,7	400
1462 - 28 tubi - 3 intervalli	EILO48 E 50 IR 01 NNN	30	1462	480	17,8	400
	EILO58 E 50 IR 01 NNN	30	1462	580	18,6	400
1720 - 34 tubi - 3 intervalli	EIG048 E 50 IR 01 NNN	30	1720	480	20,5	400
	EIG058 E 50 IR 01 NNN	30	1720	580	22,2	700

Una volta verificato il corretto funzionamento dei pannelli radianti, si è passati all'analisi della capacità della pompa di calore di fornire la potenza richiesta dall'edificio nelle condizioni più sfavorevoli. Nell'edificio di riferimento viene utilizzata una pompa di calore da 8 kW (potenza di progetto) della ditta costruttrice Daikin (modello ERGA08E) di tipo aria-acqua, che presenta valori di COP e potenza utile rispettivamente nella Tabella 35 e nella Tabella 36.

Tabella 35. Coefficiente di prestazione

Coefficiente di prestazione COP

Temperatura sorgente fredda θ_f [°C]	Temperatura sorgente calda θ_c [°C]		
	35	45	55
-7	2,67	2,12	1,57
2	3,34	2,71	2,11
7	4,50	3,47	2,50
12	5,39	4,02	3,04

Tabella 36. Potenza utile

Potenza utile P_u [kW]

Temperatura sorgente fredda θ_f [°C]	Temperatura sorgente calda θ_c [°C]		
	35	45	55
-7	7,28	7,30	6,74
2	7,22	7,25	6,90
7	9,37	8,86	8,61
12	9,21	8,60	8,25

Come si può notare dalla Tabella 36, la pompa di calore risulta adeguata ai nuovi carichi solo fino a quando la temperatura della sorgente fredda (l'aria esterna) risulta superiore ai 7 °C, mentre a temperature inferiori non c'è un margine di sicurezza ampio abbastanza rispetto ai carichi termici complessivi non maggiorati (6,6 kW). Per questo motivo si deve optare per un aumento di taglia della pompa di calore, che passa da 8 kW a 11 kW di potenza di progetto (modello ERLA11), che come previsto alla scheda tecnica possiede una capacità di riscaldamento (ossia quanto calore riesce a fornire all'impianto di riscaldamento) di 12,44 kW e un COP pari a 4,83 nel caso di sorgente fredda a 7 °C e sorgente calda a 35 °C; mentre nel caso di sorgente fredda a -7 °C e sorgente calda a 35 °C presenta una capacità di riscaldamento di 9,02 kW e un COP di 2,98 [52]. La decisione di adottare una pompa di calore di taglia superiore permette al generatore di non lavorare in prossimità della propria potenza massima per un periodo di tempo prolungato e l'ampio margine di sicurezza rispetto ai carichi termici calcolati permette di valutare anche dei futuri incrementi del fabbisogno energetico. Il lato negativo di questa scelta è senza dubbio la maggiore spesa e il rischio di avere cicli di accensione e spegnimento troppo frequenti [54].

L'impianto fotovoltaico della configurazione di riferimento è composto da 18 moduli da 500 W di potenza nominale ciascuno, portando la potenza complessiva installata a 9 kWp. Questo dato va messo a confronto con la potenza assorbita da parte della pompa di calore da 11 kW in fase di riscaldamento, pari a 2,57 kW o a 3,02 kW nei due scenari di riferimento [52]. Essendo la potenza di picco erogabile dai pannelli fotovoltaici di gran lunga superiore all'assorbimento della pompa, l'impianto fotovoltaico è in grado di coprire interamente il fabbisogno elettrico della pompa di calore, specialmente nei mesi di forte produzione, con la possibilità di cedere energia alla rete elettrica nazionale. Tuttavia, senza un sistema di accumulo, l'edificio rischia di non produrre abbastanza energia per soddisfare i fabbisogni interni durante i mesi più freddi (e soprattutto di notte); per cui il supporto alla rete elettrica è assolutamente necessario. Dalla Tabella 37 si nota che nella configurazione di riferimento l'energia elettrica proveniente dall'impianto fotovoltaico è di circa 11,1 MWh/anno e dalla Tabella 38 si nota che il consumo è pari a 2,3 MWh/anno, con quindi circa 8,8 MWh/anno di energia elettrica immessa in rete.

Tabella 37. Energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico in un anno

Energia elettrica mensile dell'impianto fotovoltaico ($E_{el,pv,out}$)

Mese	$E_{el,pv,out}$ [kWh]
Gennaio	485
Febbraio	558
Marzo	843
Aprile	1088
Maggio	1296
Giugno	1380
Luglio	1493
Agosto	1354
Settembre	1046
Ottobre	701
Novembre	428
Dicembre	432
TOTALI	11103

Tabella 38. Energia elettrica utilizzata, esportata e prodotta dall'edificio di riferimento in un anno

Consuntivo energia

Energia consegnata o fornita (E_{del})	2306	kWh
Energia rinnovabile ($E_{gl,ren}$)	80,36	kWh/m ²
Energia esportata (E_{exp})	8797	kWh
Fabbisogno annuo globale di energia primaria ($E_{gl,tot}$)	80,36	kWh/m ²
Energia rinnovabile in situ (elettrica)	11103	kWh _e
Energia rinnovabile in situ (termica)	0	kWh

Capitolo 5

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Al termine delle analisi sviluppate nei capitoli precedenti, è possibile sintetizzare gli aspetti più significativi dell'attività svolta, mettendo in relazione i calcoli effettuati sull'involucro edilizio alternativo con le prestazioni del sistema impiantistico di riferimento per far emergere il risultato del confronto tra le due configurazioni, mostrando come una progettazione dell'involucro e degli impianti integrate tra loro possano portare ad un miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici. Oltre a riassumere i risultati raggiunti rispetto agli obiettivi prefissati all'inizio del lavoro, vengono inoltre evidenziati i principali limiti dell'analisi, individuando possibili temi da approfondire per uno sviluppo futuro della tesi.

L'obiettivo che ci si è posto in questo lavoro è stato quello di valutare l'influenza delle caratteristiche dell'involucro edilizio sulle prestazioni energetiche complessive di un edificio residenziale unifamiliare, confrontando due differenti configurazioni dello stesso edificio mantenendo costanti le altre variabili progettuali (geometria, destinazione d'uso, impianto di riscaldamento e condizioni di esercizio). Tale impostazione ha permesso di isolare il contributo delle sole stratigrafie e dei componenti finestrati, evidenziandone l'effetto sia sul fabbisogno termico dell'edificio sia sul comportamento dell'impianto di riscaldamento. Il risultato di questo studio è che con l'aumento percentuale medio delle trasmittanze termiche delle pareti opache del 65% e dei componenti finestrati del 13%, il carico termico invernale maggiorato è passato da 6166 W a 7625 W, con un aumento 23,66%. Come conseguenza, si è dovuta aumentare la taglia della pompa di calore, passando da 8 kW agli 11 kW di potenza di progetto, senza però modificare l'impianto fotovoltaico, che riesce comunque ad erogare circa 6 kW_p dei 9 kW_p di potenza di picco installata. L'impianto di riscaldamento a pannelli radianti si è dimostrato capace di poter assorbire una domanda maggiore di potenza termica tranne che per i bagni, dove è consigliabile l'installazione di una scaldasalvietta elettrica da qualche centinaio di watt per ciascun locale.

Complessivamente, il confronto tra le due configurazioni conferma come il miglioramento delle prestazioni dell'involucro edilizio non produca benefici solamente in termini di riduzione dei consumi energetici, ma influisca anche sul dimensionamento dei sistemi impiantistici. Un edificio caratterizzato da dispersioni inferiori richiede chiaramente una potenza termica minore, consentendo l'utilizzo di generatori di calore di taglia più contenuta e migliorando le condizioni di funzionamento dei sistemi radianti e delle pompe di calore, evitando che lavorino al limite per lunghi periodi di tempo. Come già visto nel percorso normativo europeo in materia di efficienza energetica presente nel primo capitolo, la progettazione integrata tra involucro e impianti rappresenta un elemento chiave per il raggiungimento degli obiettivi di efficienza energetica.

Nonostante i risultati ottenuti siano coerenti con gli obiettivi prefissati, il lavoro presenta alcune limitazioni. L'analisi è stata condotta facendo riferimento ad un unico edificio residenziale e ad una specifica zona climatica, perciò i risultati non possono essere estesi automaticamente ad altre tipologie edilizie o aree climatiche. Inoltre, il confronto è stato effettuato mantenendo costanti le condizioni di utilizzo dell'edificio e le caratteristiche degli impianti, senza considerare l'influenza dei comportamenti degli occupanti e il carico termico estivo necessario per soddisfare l'esigenza di raffrescamento dell'edificio. Anche la valutazione delle prestazioni energetiche è stata sviluppata mediante calcoli di progetto in regime stazionario, senza ricorrere a simulazioni energetiche dinamiche che avrebbero consentito di descrivere con maggiore accuratezza il comportamento reale dell'edificio durante l'anno.

Alla luce di tali considerazioni, un possibile sviluppo futuro del presente lavoro potrebbe consistere nell'estensione dell'analisi già svolta attraverso un software di simulazione dinamica, in grado di valutare il comportamento energetico dell'edificio nelle diverse condizioni climatiche stagionali e di considerare l'effetto dell'inerzia termica dei materiali. Un ulteriore approfondimento potrebbe riguardare il confronto tra differenti sistemi impiantistici, analizzando ad esempio pannelli radianti a soffitto o a parete, oppure sistemi ibridi con integrazione di accumuli termici. Si potrebbe anche valutare l'influenza di differenti configurazioni dell'impianto fotovoltaico e di sistemi di accumulo elettrico, in modo tale da ottimizzare l'autoconsumo dell'energia prodotta e per quindi incrementare ulteriormente l'efficienza complessiva dell'edificio. Infine, i risultati energetici ricavati precedentemente potrebbero essere integrati da un'analisi di tipo economico, valutando il tempo di ritorno dell'investimento e i benefici ottenibili nell'intero ciclo di vita dell'edificio.

In conclusione, il lavoro svolto ha consentito di mettere in evidenza il ruolo determinante dell'involucro edilizio nel definire le prestazioni energetiche di un edificio e di conseguenza il suo impatto sul dimensionamento degli impianti. I risultati ottenuti confermano come scelte progettuali orientate all'impiego di materiali più performanti e di componenti ad elevata efficienza possano ridurre significativamente il fabbisogno termico e migliorare il funzionamento sia dell'impianto che dell'edificio. Le metodologie adottate e le considerazioni sviluppate possono costituire una valida base di partenza per ulteriori approfondimenti nell'ambito della progettazione energeticamente efficiente degli edifici, sebbene l'analisi sia riferita ad un caso studio specifico.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] Gas Market Report, Q2-2026. IEA (2026), licenza CC BY 4.0.
<https://www.iea.org/reports/gas-market-report-q2-2026/executive-summary>
- [2] Eurostat energy balances and EEA Greenhouse Gas Inventory, 2023.
<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/annual-european-union-greenhouse-gas-inventory-2025>
- [3] T. Fleiter, R. Elsland, M. Rehfeldt, J. Steibach, U. Reiter, G. Catenazzi, P. Stabat. “*Heat Roadmap Europe - Profile of Heating and Cooling Demand in 2015*”. (2017)
https://heatroadmap.eu/wp-content/uploads/2019/03/Brochure_Heating-and-Cooling_web.pdf
- [4] M. Economidou, V. Todeschi, P. Bertoldi, D. D’Agostino, P. Zangheri e L. Castellazzi, “*Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings*”.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778820317229>
- [5] imq.it. <https://www.imq.it/it/direttive-ue/direttiva-rendimento-caldaie>
- [6] climatic.it. <https://www.climatic.it/news/nuove-etichette-energetiche.html>
- [7] anit.it. <https://www.anit.it/norma/direttiva-9376cee-save/>
- [8] mase.gov.it.
https://www.mase.gov.it/portale/documents/d/guest/documentazione_-_il_protocollo_di_kyoto_della_convenzione_sui_cambiamenti_climatici-pdf
- [9] Direttiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16 dicembre 2002 sul rendimento energetico nell'edilizia.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0091>
- [10] Presentazione di “*Evoluzione normativa in materia di rendimento energetico e certificazione degli edifici*” dell’Ing. Giorgio Galbusera per l’ANIT. Maggio 2008.
chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfefindmkaj/https://www.geometrimo.it/cms_rc/allegati/6257_21_0222_Galbusera_modena_7maggio08.pdf
- [11] Direttiva 2009/28/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 23 aprile 2009, sulla promozione dell’uso dell’energia da fonti rinnovabili.
<https://eur-lex.europa.eu/IT/legal-content/summary/2020-climate-and-energy-package.html>

[12] Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:02010L0031-20210101&from=DE>

[13] Direttiva (UE) 2024/1275 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 24 aprile 2024 sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione).
<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj/ita>

[14] Legge 30 aprile 1976, n. 373, Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici.
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1976/06/07/076U0373/sg>

[15] Legge 9 gennaio 1991, n. 10, “*Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili*”.
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1991/01/16/091G0015/sg>

[16] Decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412, “*Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici*”.
https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=1993-10-14&atto.codiceRedazionale=093G0451&normativi=false&tipoVigenza=originario&tipoSerie=serie_generale¤tPage=1

[17] Efficienza energetica: normativa di riferimento.
<https://biblus.acca.it/efficienza-energetica-normativa/>

[18] fastisol.it, “*Categorie edifici DPR 412/93*”.
<https://www.fastisol.it/notizie/categorie-edifici-dpr-412-93>

[19] Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192, “*Attuazione della Direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia*”.
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/2005/09/23/222/so/158/sg/pdf>

[20] Decreto Legislativo 29 dicembre 2006, n. 311, “*Disposizioni correttive e integrative al D.Lgs. 192/2005*”.
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2007/02/01/007G0007/sg>

[21] Legge 3 agosto 2013, n. 90, “*Conversione in legge del Decreto-Legge 4 giugno 2013, n. 63*”. https://www.tuttocamere.it/files/Archivio/2013_90.pdf

[22] Ministero dello Sviluppo Economico, “*Decreti Ministeriali 26 giugno 2015: Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*”.
<https://www.mimit.gov.it/index.php/it/normativa/decreti-interministeriali/decreto-interministeriale-26-giugno-2015-applicazione-delle-metodologie-di-calcolo-delle-prestazioni-energetiche-e-definizione-delle-prescrizioni-e-dei-requisiti-minimi-degli-edifici>

- [23] infosostenibile.it.
<https://www.infosostenibile.it/notizia/il-nuovo-attestato-di-prestazione-energetica-ape-dal-1deg-ottobre-vigore-italia-dal-12>
- [24] Olasolo-Alonso P., López-Ochoa L.M., Las-Heras-Casas J., López-González L.M., “*Energy Performance of Buildings Directive implementation in Southern European countries: A review*”, Energy and Buildings.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778822009227>
- [25] Decreto-Legge 19 maggio 2020, n. 34, “*Misure urgenti in materia di salute, sostegno al lavoro e all'economia, nonché di politiche sociali connesse all'emergenza epidemiologica da COVID-19*”.
https://www.gazzettaufficiale.it/atto/vediMenuHTML?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2020-05-19&atto.codiceRedazionale=20G00052&tipoSerie=serie_generale&tipoVigenza=originario
- [26] ENEA, “*Superbonus 110% – Portale informativo e documentazione tecnica*”, Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile.
<https://www.efficientaenergetica.enea.it/detrazioni-fiscali/superbonus>
- [27] ENEA, “*Rapporto dati nazionali Superbonus 110%*”, report periodici pubblicati sul portale ENEA.
<https://www.efficientaenergetica.enea.it/detrazioni-fiscali/superbonus/risultati-superbonus.html>
- [28] Corte dei Conti, “*memoria nell'ambito dell'indagine conoscitiva sugli effetti macroeconomici e di finanza pubblica derivanti dagli incentivi fiscali in materia edilizia vi commissione bilancio della camera dei deputati*”.
<https://www.corteconti.it/Download?id=644d75b9-86aa-4c52-a1eb-cc9f3b71278a>
- [29] dokicasa. <https://dokicasa.it/approfondimenti/direttiva-epbd-case-green-2026-proprietari#recepimento-italiano-cosa-sappiamo-a-oggi>
- [30] siape enea. <https://siape.enea.it/caratteristiche-immobili>
- [31] gazzetta ufficiale. <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2025/12/30/25G00212/SG>
- [32] International Energy Agency (IEA), *Buildings*.
<https://www.iea.org/energy-system/buildings>
- [33] Commissione Europea, “*Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)*”.
https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en
- [34] International Energy Agency (IEA), “*Energy Efficiency 2025*”, International Energy Agency, 2024.
<https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2025/executive-summary>
- [35] Q. Ye, Y. Gong, H. Ren, L. Peng, H. Zhang, “*Theoretical, Numerical and Experimental Studies on Thermal Insulation Performance of Different Cross Laminated Timber Walls*”.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223008197>

- [36] T. O. Adekunle, “*Evaluation of Energy Demands and Performance of Multi-Storey Cross-Laminated Timber Buildings*”. <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/4/933>
- [37] L. Setter, E. Smoorenburg, S. Wijesuriya, P. C. Tabares-Velasco, “*Energy and Hygrothermal Performance of Cross Laminated Timber Single-Family Homes Subjected to Constant and Variable Electric Rates*”. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710218312993>
- [38] Y. Xue, Fan, Y., Lu, J., & Ge, J. (2022). “*The moisture distribution in wall-to-floor thermal bridges and its influence on mould growth*”. UCL Open Environment, 4. <https://doi.org/10.14324/111.444/ucloe.000042>
- [39] M. Qin, R. Belarbi, A. Aït-Mokhtar L.-A. Nilsson, “*Coupled heat and moisture transfer in multi-layer building materials*”. https://www.researchgate.net/publication/223079674_Coupled_Heat_and_Moisture_Transfer_in_Multi-layer_Building_Materials
- [40] edilportale.com. https://www.edilportale.com/news/2023/03/impianti/progettare-una-unita-di-trattamento-aria-le-trasformazioni-psicrometriche_93240_25.html
- [41] Norma UNI EN 12831 “*Impianti di riscaldamento negli edifici. Metodo di calcolo del carico termico di progetto*” <https://store.uni.com/uni-en-12831-2006>
- [42] X. Zheng, E. Cooper, M. Gillott, C. Wood, “*A practical review of alternatives to the steady pressurisation method for determining building airtightness*”. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7370920/?report=classic>
- [43] J. Feijó-Muñoz, I. Poza-Casado, R. A. González-Lezcano, C. Pardal, V. Echarri, R. A. De Larriva, J. Fernández-Agüera, M. J. Dios-Viéitez, V. J. Del Campo-Díaz, M. M. Calderín, M. Á. Padilla-Marcos, A. Meiss, “*Methodology for the Study of the Envelope Airtightness of Residential Buildings in Spain: A Case Study*”. <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/4/704>
- [44] V. Echarri, A. Espinosa, C. Rizo, “*Thermal Transmission through Existing Building Enclosures: Destructive Monitoring in Intermediate Layers versus Non-Destructive Monitoring with Sensors on Surfaces*”. Sensors 2017. <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/12/2848>
- [45] M. Ahsan, M. A. Youssef, C. Van Dongen, D. Thompson, G. Stanier, “*Thermal Bridging in Buildings: A Critical Review of Mechanisms, Mitigation Strategies, Energy Impacts, and Research Needs*”. Building Services Engineering Research and Technology, 2026. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0143624426145333>

- [46] M. Ibrahim, P. H. Biwole, E. Wurtz, P. Achard, “*Limiting Windows Offset Thermal Bridge Losses Using a New Insulating Coating*”. Applied Energy, 2014.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914001871>
- [47] Z. Mayer, J. Kahn, M. Götz, Y. Hou et al. , “*Thermal Bridges on Building Rooftops*”. Scientific Data, 2023.
https://www.researchgate.net/publication/370657034_Thermal_Bridges_on_Building_Rooftops
- [48] D. Borelli, P. Cavalletti, A. Marchitto, C. Schenone, “*A Comprehensive Study Devoted to Determine Linear Thermal Bridges Transmittance in Existing Buildings*”. Energy and Buildings, 2020.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778819320079>
- [49] caleffi.com.
https://www.caleffi.com/sites/default/files/media/external-file/08514_IT.pdf
- [50] B. W. Olesen, “Radiant floor heating in theory and practice”. ASHRAE Journal, 2002.
<https://umh0717.umh.es/files/2015/03/Radiant-floor-heating.pdf>
- [51] B. W. Olesen, “*Radiant floor cooling systems*”. ASHRAE Journal, 2008.
https://www.tacomfort.com/documents/FileLibrary/Radiant_Floor_Cooling_Systems_-_ASHRAE_-_2008-9.pdf
- [52] Scheda tecnica della pompa di calore Daikin Altherma Integrated 3RF ERLA11,
https://media.puntoenergiashop.it/inserzioni/download/01_Fotovoltaico/11_PompeDiCalore/DS-EBVX11-16-2P-3P-ERLADV3-IT.pdf
- [53] Scheda tecnica scaricabile su Irsap.com. <https://www.irsap.com/it/heat/radiatore/ares>
- [54] International Energy Agency, “*The Future of Heat Pumps*”. IEA, 2022.
<https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps>