



**Politecnico
di Torino**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**STRATEGIA DI OTTIMIZZAZIONE ENERGETICA
BASATA SULLA RELAZIONE SISTEMICA TRA
INVOLUCRO ED IMPIANTO**

Relatori

Prof. Paolo Piantanida
Prof.ssa Valentina Villa
Prof. Bernardino Chiaia

Candidato

Ottavio Mirco Cannavà

Dicembre 2025

Indice

1. Abstract.....	1
2. Obiettivi e Metodo	5
3. Cenni Normativi	9
3.1. Quadro normativo per l'efficienza energetica	11
3.2. D.M. 26/06/2015 & UNI EN 14511	17
3.3. Norma UNI EN 16798-1.....	21
3.3.1. VMC e qualità dell'aria	23
3.3.2. Metodi per la definizione dell'IAQ	26
3.4. Analisi del ciclo di vita	29
3.4.1. Dichiarazioni ambientali.....	31
3.4.2. Parametri lca	35
4. Caso Studio	39
4.1. Analisi energetica, ambientale e tecnologica.....	42
4.1.1. Caratteristiche tecnologiche	42
4.1.2. Prestazioni pre-intervento.....	44
4.1.3. Individuazione delle criticità	45
4.2. Strategie di riqualificazione	46
4.2.1. Modellazione energetica dell'involucro	46
4.2.2. Scelta critica in funzione del LCA	57
4.2.3. Ventilazione meccanica controllata.....	69
4.2.4. Climatizzazione invernale ed estiva	77
4.2.5. Impianto fotovoltaico	87
5. Discussione dei Risultati.....	91
5.1. Il ruolo dell'involucro	96
5.2. Il ruolo del sistema impiantistico in rapporto all'edificio.....	99
5.3. Considerazioni finali	104
6. Bibliografia e Sitografia.....	107

Indice delle Figure

Figura 3-1:Dati SIAPE al 01/09/2025	11
Figura 3-2: Classificazione energetica APE.....	14
Figura 3-3: Effetto camino	24
Figura 3-4: Disposizione bocchette VMC	25
Figura 3-5: Schema del ciclo di vita.....	29
Figura 3-6: Schema tipo "Sistema prodotto"	30
Figura 3-7: Schema normativo ISO 14020.....	32
Figura 3-8: Schema funzionale per la realizzazione di un EPD	34
Figura 4-1: Classe energetica pre-intervento.....	44
Figura 4-2: Stralcio EC700 - Dati Climatici.....	47
Figura 4-3:Stralcio EC700 - Componenti involucro	47
Figura 4-4: Stralcio EC700 - Stratigrafia	48
Figura 4-5: Dettaglio stratigrafia pre-intervento	52
Figura 4-6: Dettaglio Tipo stratigrafia post-intervento	53
Figura 4-7: Finestra modellazione Ponti termici	54
Figura 4-8: Vista 3D a fine modellazione SUD-EST	55
Figura 4-9: Vista 3D a fine modellazione NORD-OVEST.....	56
Figura 4-10: Confini del sistema per materiali isolanti tramite approccio "dalla culla alla bara".....	58
Figura 4-11: Emissioni per singola fase	60
Figura 4-12: Posizione dei siti produttivi rispetto al sito di installazione	61
Figura 4-13: Serie ISPRA - Emissioni dei trasporti	62
Figura 4-14: Incidenza fase A4	64
Figura 4-15: Mix energetico nazionale per la produzione di energia elettrica 2023	66
Figura 4-16: Mix Energetico Regioni Valle D'Aosta e Calabria	67
Figura 4-17: Impianto di ventilazione	74
Figura 4-18: VMC con recuperatore di calore a flussi incrociati	75
Figura 4-19: Potenza dispersa per ventilazione	76
Figura 4-20: Impianto di climatizzazione.....	77
Figura 4-21: Funzionamento estivo Ventilconvettore	81
Figura 4-22: Funzionamento invernale Ventilconvettore.....	82
Figura 4-23: Ripartizione dei carichi tra generatori	86
Figura 5-1: Classe energetica Post-intervento	93
Figura 5-2: Fabbisogni di energia primaria Pre-intervento	96
Figura 5-3: Fabbisogni di energia primaria con il solo intervento di isolamento termico	96
Figura 5-4:Fabbisogni di energia primaria con il solo intervento di sostituzione del generatore di calore	97
Figura 5-5: Confronto fabbisogni di energia primaria - Interventi principali	98
Figura 5-6: Confronto emissioni di CO ₂ - Interventi principali	98
Figura 5-7:Fabbisogni di energia primaria a seguito di isolamento involucro e installazione pdc	99
Figura 5-8: Suddivisione emissioni CO ₂	100
Figura 5-9:Fabbisogni di energia primaria - Implementazione dei servizi	101
Figura 5-10:Fabbisogni di energia primaria dopo l'installazione dell'impianto fotovoltaico	101
Figura 5-11: Fabbisogni di energia primaria – Confronto interventi	102
Figura 5-12: Emissioni CO ₂ – Confronto interventi.....	102
Figura 5-13:Consumi elettrici dei vari scenari	103

Indice delle Tabelle

Tabella 3-1:Requisiti e condizioni di prova per pompe di calore per il servizio riscaldamento.....	19
Tabella 3-2: Requisiti e condizioni di prova per pompe di calore per il servizio raffrescamento	19
Tabella 3-3:Categorie IEQ.....	22
Tabella 3-4: Tassi di ventilazione minimi per la diluizione delle emissioni prodotte da adulti sedentari.....	28
Tabella 3-5: Tassi di ventilazione minimi per la diluizione delle emissioni prodotte da diverse tipologie di edificio	28
Tabella 3-6: Elementi delle dichiarazioni ambientali.....	32
Tabella 3-7: Moduli rappresentanti il ciclo di vita	36
Tabella 4-1: Trasmittanza termica limite pareti verticali	49
Tabella 4-2: Trasmittanza termica limite coperture	49
Tabella 4-3: Trasmittanza termica limite infissi.....	49
Tabella 4-4: Quantità e caratteristiche necessarie	51
Tabella 4-5: Risultati termici ottenuti.....	51
Tabella 4-6: EPD selezionati	59
Tabella 4-7: Potenziale di riscaldamento globale GWP _{tot} [kgCO ₂].....	59
Tabella 4-8: Potenziale di riscaldamento globale per m ³ di prodotto GWP _{tot} [kgCO ₂] .	60
Tabella 4-9: Dati ISPRA - Emissioni dei trasporti	62
Tabella 4-10: Emissioni in fase A4	63
Tabella 4-11: Emissioni totali materiali isolanti.....	63
Tabella 4-12: Emissioni in categoria A4 Veicolo elettrico	67
Tabella 4-13: Tassi di ventilazione minimi Metodo 3	69
Tabella 4-14: Divisione ambienti di ventilazione.....	70
Tabella 4-15: Assorbimenti VMC con scambiatore a flussi incrociati	75
Tabella 4-16: Potenza termica dispersa per ventilazione	76
Tabella 4-17: Carichi termici in raffrescamento Pre-Intervento	78
Tabella 4-18: Carichi termici in raffrescamento nell'ora di massimo carico post-intervento	80
Tabella 4-19: Dati tecnici ventilconvettori in raffrescamento	82
Tabella 4-20: Dati tecnici ventilconvettori in riscaldamento	83
Tabella 4-21: Assorbimenti elettrici del sistema di emissione	83
Tabella 4-22: Prestazioni pompa di calore in raffrescamento	84
Tabella 4-23: Potenza utile in riscaldamento Pu [kW].....	85
Tabella 4-24: Coefficiente di prestazione COP	85
Tabella 4-25: Dati modulo fotovoltaico di riferimento	87
Tabella 4-26: Producibilità mensile da PVGIS	88
Tabella 4-27: Distribuzione dell'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico	89
Tabella 5-1: Fattori di conversione in energia primaria	95
Tabella 5-2: Fabbisogni di energia primaria – Implementazione dei servizi	100
Tabella 5-3:Consumi elettrici dei vari scenari.....	103

1
0

Abstract



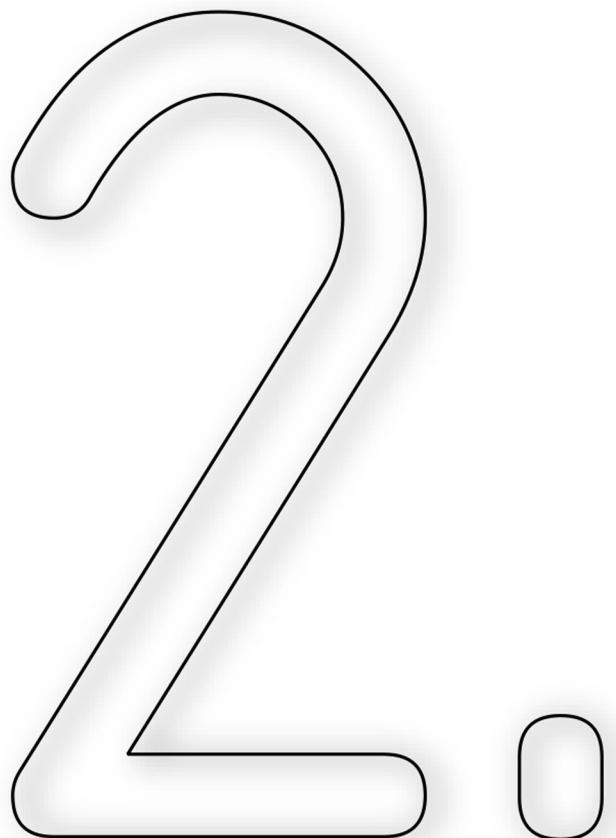
L'obiettivo di definire una strategia di efficientamento energetico, sistematica e replicabile, da applicare al patrimonio immobiliare italiano in ambito residenziale è affrontato tramite lo sviluppo normativo in campo energetico dagli anni '70 ad oggi e un caso di studio. È anche evidenziato come il patrimonio edilizio non riesca a stare al passo con l'evoluzione legislativa e tecnologica.

Vengono analizzati i metodi consolidati e più comuni di efficientamento energetico, consistenti nell'isolamento delle strutture disperdenti opache, sulla sostituzione dei serramenti e un sull'installazione di un sistema di climatizzazione invernale più efficiente. Aspetti che hanno trovato il loro innesto nelle realtà comuni grazie alle agevolazioni previste dall'articolo 119 del decreto-legge n. 34/2020, più comunemente denominato Superbonus 110%.

Parallelamente, sono state affrontate tematiche per le quali, ad oggi, ancora non si presta sufficiente attenzione come l'analisi del ciclo di vita (LCA) ed il comfort dell'occupante, introducendo dei servizi non obbligatori a livello normativo come la climatizzazione estiva ed il controllo della qualità dell'aria.

Tutto quello presente a livello teorico è poi stato applicato ad un caso studio, condotto su un edificio residenziale condominiale scelto per la sua rappresentatività del tessuto urbano e per la disponibilità di dati reali. Partendo da uno stato iniziale, privo di alcun tipo di efficientamento, si è giunti ad un intervento completo, analizzando tutti i pro e i contro di una riqualificazione di alto livello, mantenendo un focus sull'invasività dei singoli interventi e ponendo al primo posto il comfort offerto all'utente finale.

In questo modo è stato possibile affermare che una strategia di riqualificazione energetica a livello nazionale dovrebbe mirare alla riduzione complessiva ed omogenea dei fabbisogni energetici su tutto il territorio italiano in modo da diminuire la domanda sulla rete nazionale, ancora fortemente influenzata dai combustibili fossili. Pochi casi di edifici a energia quasi zero (nZEB) non riescono a mediare il contesto energetico nazionale.



Obiettivi e
Metodo



La presente tesi propone come primo obiettivo lo sviluppo di una strategia di riqualificazione sistematica in abito edilizio, proponendo un approccio integrato capace di tenere in considerazione i fondamentali aspetti influenzanti le prestazioni degli edifici al fine di identificare la soluzione che massimizzi maggiormente l'efficienza energetica, la sostenibilità a lungo termine e il benessere abitativo.

In seguito, si vuole verificare se, raggiungendo configurazioni prossime a edifici a energia quasi zero (nZEB), si riesce a migliorare significativamente gli indicatori di sostenibilità a livello nazionale.

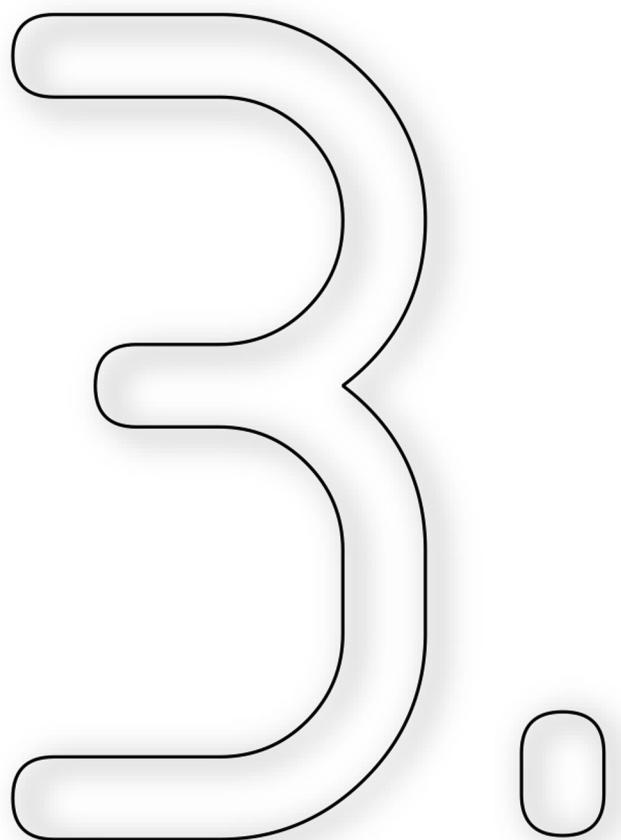
Per il raggiungimento degli obiettivi, si è fatto riferimento al patrimonio edilizio nazionale, il quale, avendo ormai più di settanta anni di età, necessita di essere riqualificato. È stato applicato un approccio critico nei confronti degli edifici nZEB favorendo invece una visione orientata verso un equilibrio energetico nazionale, ottimizzando consumi ed emissioni dell'intero patrimonio.

Per la modellazione energetica dei vari scenari di riqualificazione è stato utilizzato un software commercialmente disponibile e sviluppato da un'azienda italiana che unisce competenze termotecniche e informatiche: Edilclima EC700 versione 13.25.09.

L'applicativo risulta idoneo allo scopo della trattazione grazie alla sua certificazione in merito al rispetto delle norme UNI/TS 11300¹, la sua trasparenza nella restituzione dei dati intermedi e la possibilità di gestire la modellazione anche attraverso un input grafico tridimensionale.

Il procedimento metodologico si basa su un'analisi comparativa, tra diversi scenari, di ciascun aspetto analizzato. Implementando ad ogni passaggio i servizi centralizzati offerti, il comfort e le prestazioni energetiche del caso in esame. Non viene trattato il servizio “Acqua calda sanitaria” in quanto autonomo e non definibile in modo sistematico.

¹ UNI/TS 11300 – “Prestazione energetiche degli edifici”.



Cenni Normativi



3.1. Quadro normativo per l'efficienza energetica

In Italia, il 60% del patrimonio immobiliare risulta avere più di 45 anni ed è stato costruito antecedentemente all'introduzione di qualsiasi normativa nazionale sul risparmio energetico².

Attualmente più del 50% degli immobili presenti sul territorio italiano risultano essere nelle classi Energetiche a minori prestazioni come riportato sul sito dell'ENEA³.

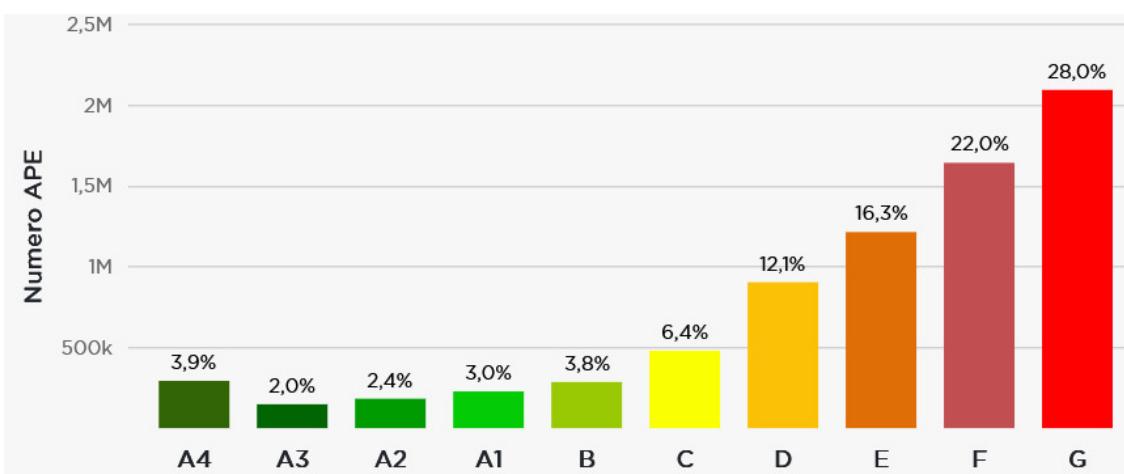


Figura 3-1:Dati SIAPE al 01/09/2025

La prima legge Nazionale ad introdurre delle prescrizioni sull'isolamento termico negli edifici di nuova costruzione o in ristrutturazione fu la Legge 373/1976⁴. Prima di essa non sussisteva nessun vincolo normativo in termini di prestazioni energetiche e gli edifici venivano costruiti riducendo al minimo gli oneri per le chiusure verticali, senza riguardo

² La consistenza del parco immobiliare nazionale - *F. Caffari, N. Calabrese, G. Murano, P. Signoretti*
ENEA - Dipartimento Unità Efficienza Energetica, Laboratorio Efficienza Energetica negli Edifici e Sviluppo Urbano.

³ SIAPE ENEA - <https://siape.enea.it/caratteristiche-immobili>

⁴ Legge n°373 del 30 Marzo 1976 – Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici.

alle prestazioni energetiche; il benessere era raggiunto grazie ai “nuovi e potenti” impianti tecnologici, a gestione automatica e poco costosa grazie al bassissimo prezzo dei combustibili fossili.

Questa norma nasce in risposta alla crisi energetica del 1973 in cui, l'interruzione delle forniture petrolifere da parte dei paesi leader (OPEC) in risposta al sostegno degli occidentali ad Israele, colpì duramente l'economia Europea ed Italiana fortemente dipendenti dalle importazioni fossili per il riscaldamento residenziale.

I concetti introdotti con la Legge 373/1976 rappresentano un primo tentativo per il contenimento dei consumi energetici attraverso l'intermittenza di funzionamento (motivata dal basso rendimento delle caldaie di allora) e la limitazione della potenza installabile, al fine di aumentare il fattore di carico sui generatori che tuttavia, risultò essere tecnicamente generico e limitato non tenendo il passo con l'evoluzione tecnologia del settore. A migliorare questo aspetto fu la Legge 10 del 1991⁵ che la sostituì in ogni sua parte ampliando il controllo al concetto di energia e strutturando l'effettivo quadro normativo in materia di efficienza energetica.

In essa, vengono introdotti i seguenti obblighi e prescrizioni:

- Obbligo della progettazione termotecnica per edifici di nuova costruzione e per quelli soggetti a ristrutturazioni rilevanti;
- Obbligo di una relazione tecnica per il contenimento dei consumi energetici;
- Nuove prescrizioni sull'isolamento termico, sulle prestazioni degli impianti e introduzione dello sfruttamento delle fonti rinnovabili;

La Legge 10 ha ricoperto un ruolo centrale nell'evoluzione della normativa sull'efficienza energetica tanto che, la relazione tecnica redatta ai sensi del D.Lgs. 192/2005 e dei relativi decreti attuativi viene denominata, per consuetudine, “relazione ex Legge 10”, nonostante il riferimento normativo attuale non sia più quello originario.

⁵ Legge n°10 del 9 Gennaio 1991 - *Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia.*

Il D.Lgs. 192/2005⁶ nasce in risposta alla direttiva europea 2002/91/CE – nota anche come EPBD I (Energy Performance of Buildings Directive) che mirava alla creazione di standard europei al fine di ridurre i consumi energetici e le emissioni di CO₂ degli edifici.

In questo Decreto viene introdotto:

- Il concetto di prestazione energetica globale dell’edificio basata su calcoli approfonditi a livello europeo che tengono in considerazione: isolamento termico, impianti riscaldamento, raffrescamento, ACS, ventilazione, ecc. (non solo riscaldamento come da precedente normativa), fonti rinnovabili, forma, orientamento, involucro.
- L’obbligo dell’Attestato di Certificazione Energetica detto ACE per gli edifici di nuova costruzione, le ristrutturazioni importanti, vendite e locazioni di immobili in particolare per il settore pubblico. L’ACE classifica l’edificio tramite un calcolo che si modula secondo il coefficiente di forma ed il clima, dalla classe A+ (più efficiente) alla G (meno efficiente).
- Il concetto di “Edificio di riferimento”, ossia un edificio simulato con le stesse caratteristiche geometriche e funzionali, ma con prestazioni conformi agli standard minimi. Esso viene utilizzato come termine di paragone per verificare la conformità del progetto.
- L’obbligo di progetto e redazione di relazione tecnica (ex Legge 10) aggiornata agli ultimi criteri prestazionali introdotti dal Decreto.

Una seconda direttiva europea denominata “EPBD II” stimola il quadro normativo italiano all’emissione di un nuovo decreto⁷ che introduce il concetto di APE (Attestato di

⁶ Decreto Legislativo n°192 del 19 Agosto 2005 - (*Attuazione della direttiva (UE) 2002/91/CE, che modifica la direttiva 2001/31/UE sulla prestazione energetica nell’edilizia e la direttiva 2002/27/CE sull’efficienza energetica, della direttiva 2001/31/UE, sulla prestazione energetica nell’edilizia, e della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell’edilizia*).

⁷ LEGGE 3 agosto 2013, n. 90 - *Conversione, con modificazioni, del decreto-legge 4 giugno 2013, n.63 Disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell’edilizia per la definizione delle procedure d’infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché altre disposizioni in materia di coesione sociale*.

Prestazione Energetica) in sostituzione della precedente certificazione ACE (Attestato di Certificazione Energetica).

L’APE, ad oggi, risulta il documento di riferimento per la classificazione energetica del patrimonio edilizio italiano in classi che spaziano dalla A4 (edificio più performante) alla G (edificio a più scarse prestazioni). Classi comunque relazionate con il fattore forma ed il clima.

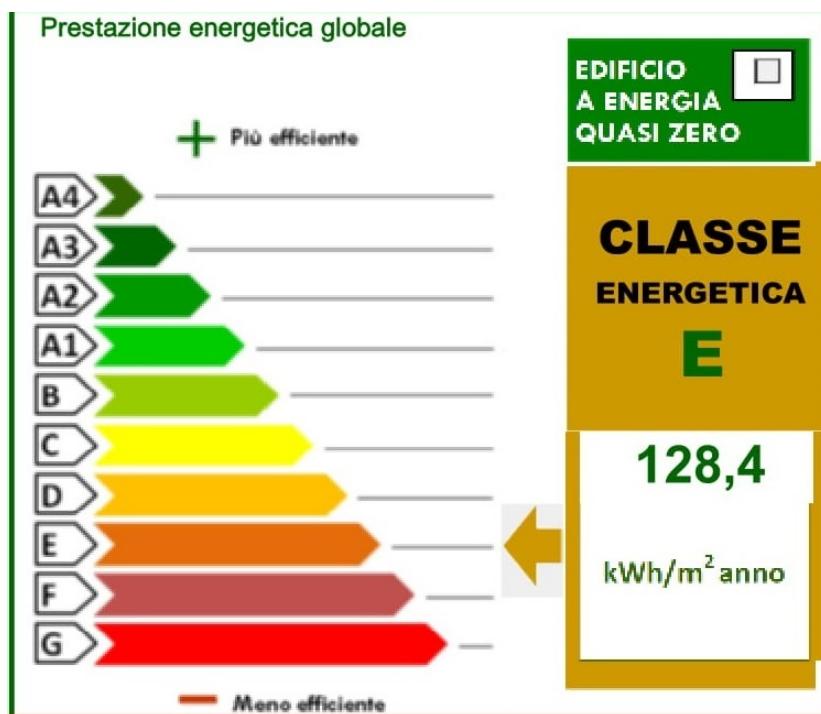


Figura 3-2: Classificazione energetica APE

Ad oggi, le metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici sono regolate dal Decreto interministeriale del 26 giugno 2015⁸. Applicando le Direttive 2010/31/UE – “Prestazioni energetiche dell’edilizia 2012/27/UE – “Efficienza energetica” ed includendo l’utilizzo delle fonti energetiche rinnovabili, il Decreto impone delle prescrizioni per gli edifici e delle unità immobiliari, nel rispetto dei criteri

⁸ MIMIT - Decreto interministeriale 26 giugno 2015 - *Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici.*

minimi generali già riportati nell'art. 4, comma 1, del Dgl del 19 agosto 2005 n. 192⁹ e nell' Allegato 1 dello stesso.

In particolare, tra i punti principali di tale decreto si stabiliscono:

- i requisiti minimi di prestazione energetica in base sia alla tipologia di intervento sia alla tipologia di costruzione su cui viene effettuato, nuova costruzione o edificio esistente;
- Le metodologie di calcolo dell’“edificio di riferimento”;
- Nuovi limiti prestazionali che evidenziano una forte spinta verso la progettazione nZEB.

L’edificio di riferimento è un modello virtuale generato tramite simulazione, rispettante i criteri minimi definiti dalla normativa vigente e costruito in similitudine dell’edificio reale oggetto di valutazione. Esso ne replica geometria, orientamento, ubicazione e destinazione d’uso, adottando al contempo le caratteristiche di efficienza impiantistica prescritta dal D.M. 26 giugno 2015⁸.

Ogni edificio esistente o in progetto viene confrontato con un edificio di riferimento specifico, il cui indice di prestazione energetica globale ($EP_{gl,nren}$) costituisce la base per la determinazione della classe energetica che deriva dal rapporto:

$$\frac{EP_{gl,nren} \text{ (edificio reale)}}{EP_{gl,nren} \text{ (edificio di riferimento)}}$$

Ne consegue che la scala delle classi energetiche, non essendo associata ad intervalli fissi, varia in funzione delle caratteristiche dell’edificio valutato. Pertanto, la classificazione

⁹ Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192 *Attuazione della direttiva (UE) 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell’edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull’efficienza energetica, della direttiva 2010/31/UE, sulla prestazione energetica nell’edilizia, e della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell’edilizia.*

non permette una comparazione assoluta tra edifici differenti bensì relativa al solo edificio modellizzato e al suo edificio di riferimento.

Sulla base di tali considerazioni, si ritiene che la classificazione basata sull'edificio di riferimento trova i suoi limiti quando si intende eseguire confronti oggettivi tra fabbisogni energetici reali. È infatti possibile che un edificio, ad esempio in classe A, presenti consumi di energia primaria non rinnovabile superiori rispetto ad un edificio di differente forma collocato in una classe nominalmente inferiore.

Un edificio di modeste dimensioni, già performante al momento della sua realizzazione grazie, ad esempio ad una limitata superficie finestrata, potrebbe collocarsi nella medesima classe di un edificio avente dimensioni considerevolmente superiori e dotato di un impianto significativamente più energivoro. In scenari di questo tipo, un intervento di sostituzione delle superfici vetrate andrebbe a premiare maggiormente, in termini di classe energetica, l'edificio di grandi dimensioni, consentendogli di accedere agli incentivi previsti dalla normativa, pur mantenendosi molto energivoro.

In conclusione, l'attuale sistema di classificazione non riflette pienamente l'energivoria del sito, tendendo a premiare edifici intrinsecamente energivori rispetto alle piccole realtà a basso assorbimento ed è pertanto necessario considerare le classi energetiche non in senso assoluto ma relativo all'edificio analizzato.

3.2. D.M. 26/06/2015 & UNI EN 14511

Viene definito come impianto termico di un edificio:

“L’impianto tecnologico destinato ai servizi di climatizzazione invernale o estiva degli ambienti, con o senza produzione di acqua calda sanitaria, indipendentemente dal vettore energetico utilizzato, comprendente eventuali sistemi di produzione, distribuzione, accumulo e utilizzazione del calore nonché gli organi di regolazione e controllo, esclusi i sistemi dedicati esclusivamente alla produzione di processi industriali.”⁹

Esso è costituito da tre elementi principali:

- **Generatore di calore:** Identificabile in caldaie o pompe di calore, è il componente di impianto capace di trasformare l’energia, da primaria o secondaria in energia termica.¹⁰
- **Sistema di distribuzione:** Rete di tubazioni o canalizzazioni in cui viene distribuito il fluido termovettore (aria, acqua o misto).
- **Sistema di emissione:** Insieme di componenti atte a trasferire il calore dal fluido termovettore all’ambiente da climatizzare. Le più comuni tipologie di sistemi di emissione sono i radiatori (acqua ad come fluido termovettore), i ventilconvettori (permettono una climatizzazione invernale ed estiva e sfruttano l’acqua come fluido termovettore) o le bocchette idroniche (caratterizzate dall’aria come fluido termovettore).

Ognuna di queste componenti può comportare un incremento dei fabbisogni energetici nella climatizzazione rispetto al modello teorico. Per questo possono essere ottimizzate

¹⁰ UNI EN 12828:2013 - *Impianti di riscaldamento negli edifici - Progettazione dei sistemi di riscaldamento ad acqua.*

singolarmente, in funzione anche alle risorse economiche disponibili, per aumentare l'efficienza complessiva dell'impianto.

Gli edifici esistenti sottoposti a riqualificazione energetica, dal punto di vista impiantistico, devono rispettare dei valori di efficienza media stagionale ben definiti dal Decreto Ministeriale del giugno 2015¹¹ attraverso dei parametri prestazionali delle macchine che si intendono utilizzare.

Nello specifico, i generatori di calore alimentati da combustibili fossili, sia in forma liquida che gassosa, devono rispettare il seguente valore minimo per il rendimento di generazione:

$$\eta \geq 90 + 2 * \log P_n$$

- *P_n: Potenza utile nominale del generatore espressa in kW e non superiore al limite massimo fissato a 400 kW.*

Per le macchine elettriche, intese sia come macchine frigorifere che come generatori di calore, si riporta uno stralcio del decreto sopra citato in cui si evidenziano i valori minimi di COP (Coefficiente di prestazione) e di EER (Rapporto di efficienza energetica) da rispettare:

¹¹ D.M. 26/06/2015, il Decreto Requisiti Minimi recante “*Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*” .

Tipo di pompa di calore Ambiente esterno/interno	Ambiente esterno [°C]	Ambiente interno [°C]	COP
aria/aria	Bulbo secco all'entrata : 7 Bulbo umido all'entrata : 6	Bulbo secco all'entrata: 20 Bulbo umido all'entr.: 15	3,5
aria/acqua potenza termica utile riscaldamento ≤ 35 kW	Bulbo secco all'entrata : 7 Bulbo umido all'entrata : 6	Temperatura entrata: 30 Temperatura uscita: 35	3,8
aria/acqua potenza termica utile riscaldamento ≥ 35 kW	Bulbo secco all'entrata : 7 Bulbo umido all'entrata : 6	Temperatura entrata: 30 Temperatura uscita: 35	3,5
salamoia/aria	Temperatura entrata: 0	Bulbo secco all'entrata: 20 Bulbo umido all'entr.: 15	4,0
salamoia/ acqua	Temperatura entrata: 0	Temperatura entrata: 30 Temperatura uscita: 35	4,0
acqua/aria	Temperatura entrata: 15 Temperatura uscita: 12	Bulbo secco all'entrata: 20 Bulbo umido entrata: 15	4,2
acqua/acqua	Temperatura entrata: 10	Temperatura entrata: 30 Temperatura uscita: 35	4,2

Tabella 3-1: Requisiti e condizioni di prova per pompe di calore per il servizio riscaldamento

Tipo di pompa di calore Ambiente esterno/interno	Ambiente esterno [°C]	Ambiente interno [°C]	EER
aria/aria	Bulbo secco all'entrata : 35 Bulbo umido all'entr.: 24	Bulbo secco all'entrata: 27 Bulbo umido all'entr.: 19	3,0
aria/acqua potenza termica utile riscaldamento ≤ 35 kW	Bulbo secco all'entrata : 35 Bulbo umido all'entr.: 24	Temperatura entrata: 23 Temperatura uscita: 18	3,5
aria/acqua potenza termica utile riscaldamento ≥ 35 kW	Bulbo secco all'entrata : 35 Bulbo umido all'entr.: 24	Temperatura entrata: 23 Temperatura uscita: 18	3,0
salamoia/aria	Temperatura entrata: 30 Temperatura uscita: 35	Bulbo secco all'entrata: 27 Bulbo umido all'entr.: 19	4,0
salamoia/ acqua	Temperatura entrata: 30 Temperatura uscita: 35	Temperatura entrata: 23 Temperatura uscita: 18	4,0
acqua/aria	Temperatura entrata: 30 Temperatura uscita: 35	Bulbo secco all'entrata: 27 Bulbo umido all'entr.: 19	4,0
acqua/acqua	Temperatura entrata: 30 Temperatura uscita: 35	Temperatura entrata: 23 Temperatura uscita: 18	4,2

Tabella 3-2: Requisiti e condizioni di prova per pompe di calore per il servizio raffrescamento

Con la UNI EN 14511:2022¹² “*Condizionatori, refrigeratori di liquido e pompe di calore con compressore elettrico per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti e refrigeratori per cicli di processo con compressore elettrico*” vengono definite le condizioni di prova e i metodi di misura delle prestazioni per le macchine termiche alimentati ad energia elettrica. In questo modo, i COP e gli EER di ogni macchina elettrica avente come fluido termovettore aria, acqua o salamoia devono essere misurati in accordo alla norma UNI EN 1451. I limiti di cui alle Tabella 3-1 e Tabella 3-2, sono ridotti del 5% in caso di funzionamento a velocità variabile.

Per quanto concerne i sistemi di distribuzione ed emissione, non sono presenti specifici vincoli normativi in termici di efficienza o efficacia. Tuttavia, la loro selezione riveste un ruolo fondamentale per le performance globali e va eseguita in stretta relazione con il tipo di generatore utilizzato; il valore della loro efficienza è tabulato nelle UNI TS 11300 e condiziona l’efficienza complessiva del sistema edificio-impianto.

In conclusione, nonostante si possano applicare scelte progettuali differenti sui singoli sistemi, l’efficacia dell’impianto è determinata dall’abbinamento dei quattro sistemi in funzione delle caratteristiche operative di ciascun componente (generazione, distribuzione, emissione e regolazione).

¹² UNI EN 14511-1:2022 - *Condizionatori, refrigeratori di liquido e pompe di calore con compressore elettrico per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti e refrigeratori per cicli di processo con compressore elettrico*

3.3. Norma UNI EN 16798-1

La norma in oggetto è la prima di una serie di norme che mirano ad uniformare i criteri di valutazione della prestazione energetica degli edifici. La norma si basa sul quadro giuridico pubblicato nella Direttiva 2010/31/EU dal Parlamento Europeo¹³ e va a sostituire la norma tecnica UNI EN 15251 del 2008¹⁴ “Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica” anch’essa nata come applicazione di linee guida passate.

La Direttiva 2010/31/EU al suo interno introduce anche il concetto di “edificio ad energia quasi zero” (nZEB) in termini tecnici ed economici. In particolare, il fabbisogno energetico di un edificio nZEB deve essere prossimo allo zero e conseguentemente, tutte le richieste energetiche devono essere soddisfatte da impianti interni (o in prossimità del sito) basati su energie rinnovabili.

Criteri di classificazione:

1. Prestazioni Energetiche
2. Efficienza dei sistemi impiantistici
3. Produzione di energia da fonti rinnovabili
4. Comfort degli occupanti

¹³ Direttiva Europea 2010/31/UE, 19 maggio 2010, del Parlamento Europeo e del Consiglio, sulla prestazione energetica nell’edilizia.

¹⁴ UNI EN 15251:2008 – Criteri per la progettazione dell’ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell’aria interna, all’ambiente termico, all’illuminazione e all’acustica.

Quest'ultimo punto viene analizzato dalla Norma UNI EN 16798-1¹⁵ che si pone come obiettivo la definizione dei requisiti minimi per la progettazione degli ambienti interni in cui vi è permanenza, anche sporadica, di persone in termini di: Qualità dell'aria, illuminazione, Comfort Termico ed acustico.

Nel suo primo modulo la Norma fa riferimento a due Appendici: l'Appendice A riporta delle "tabelle guida" prive di valori mentre, l'Appendice B riporta le "tabelle guida" da utilizzare in fase di progettazione e contenti i valori dei valori di default.

Molti studi, tra cui lo studio OFFICAIR¹⁶, hanno dimostrato che la percezione delle condizioni ambientali interne da parte degli occupanti influenza notevolmente il loro benessere nonché la loro produttività e la loro salute. Ad un livello superiore di qualità dell'ambiente si associa un effetto positivo sulle operazioni e sulla salute degli occupanti mentre, un livello basso, genera un discomfort agli occupanti che cercheranno di migliorare la loro condizione attraverso gesti autonomi come aprire/chiudere le finestre, accendere delle macchine che modifichino localmente la temperatura ecc. Questo tipo di azioni rende difficile la gestione ottimale di tutto il sistema che a sua volta si traduce in un dispendio di energia superiore causato dalla compensazione che gli impianti dovranno fornire a questi gesti autonomi.

La normativa categorizza gli ambienti interni in funzione del comfort dei suoi occupanti in quattro categorie che definiscono l'indice IEQ (Indoor Environmental Quality)¹⁵.

Categoria	Livello di aspettativa	Destinazione
I	Alto	Ospedali-Scuole-Asili
II	Medio	Edifici Nuovi o Ristrutturati
III	Moderato	Edifici in ristrutturazione o Esistenti
IV	Basso	Edifici Esistenti per periodi limitati

Tabella 3-3:Categorie IEQ

¹⁵ UNI EN 16798-1:2019 – Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica - Modulo M1-6.

¹⁶ Perceived Indoor Environment and Occupants 'Comfort in European "Modern" Office Buildings: The OFFICAIR Study - Ioannis A. Sakellaris, Dikaia E. Saraga, Corinne Mandin, Célina Roda, Serena Fossati, Yvonne de Kluizenaar, Paolo Carrer, Sani Dimitroulopoulou, Victor G. Mihucz, Tamás Szigeti, Otto Hänninen, Eduardo de Oliveira Fernandes, John G. Bartzis and Philomena M. Bluyssen.

La Tabella 3-3 classifica tutti gli ambienti in funzione del comfort percepito ma che comunque non risultano dannosi per la salute degli occupanti. La Classe I viene riservata agli ambienti in cui vi è presenza di persone sensibili mentre le Classi II e III rappresentano le normali condizioni di progettazione per gli edifici nuovi o da riqualificare.

Nel corso di questa trattazione si utilizzerà la norma in oggetto per dimensionare l’impianto di Ventilazione Meccanica Controllata (VMC) di un edificio residenziale. Pertanto, verranno approfonditi nel seguito solo gli aspetti inerenti a tale caso studio.

3.3.1. VMC e qualità dell’aria

Il Ministero della Salute¹⁷ definisce un indice molto simile all’IEQ ma focalizzandosi sul parametro di qualità dell’aria indoor (IAQ) per ambienti confinati come: abitazioni, uffici, strutture ospedaliere e ricreative, mezzi di trasporto ecc., escludendo dalla definizione di “ambiente confinato” tutte le tipologie di strutture in ambito industriale.

Negli ambienti chiusi o “confinati” in cui vi è permanenza di persone l’ossigeno presente nell’aria viene gradualmente sostituito da anidride carbonica e vapore acqueo a causa del naturale metabolismo umano. In assenza di ventilazione ciò porterebbe ad un degradarsi progressivo della qualità dell’aria.

La ventilazione, di conseguenza, ha un ruolo fondamentale nel concetto di “comfort” in quanto è in grado di portare all’esterno tutte le sostanze nocive appena citate e sostituirle con aria “fresca” proveniente dall’esterno. Essa può essere di *tipo naturale, meccanico o ibrido*.

Ventilazione naturale: si intende un ricambio d’aria fornito dalle componenti dell’involturco edilizio sia in termini di *infiltrazioni* (porosità nell’involturco, fessure tra giunti ecc.) sia in termini di azioni volontarie come aprire le finestre. Tuttavia, anch’essa è modellata in termini analitici e viene studiata e valorizzata in funzione delle differenze di pressione che si instaurano nell’intorno di un edificio causate dal vento e dall’effetto

¹⁷ Sito web Ministero della Salute - <https://www.salute.gov.it/new/it/tema/qualita-dellaria/qualita-dellaria-indoor/>

camino (Figura 3-3) che spinge l'aria calda e meno densa verso l'alto favorendo l'ingresso di aria fresca dal basso.

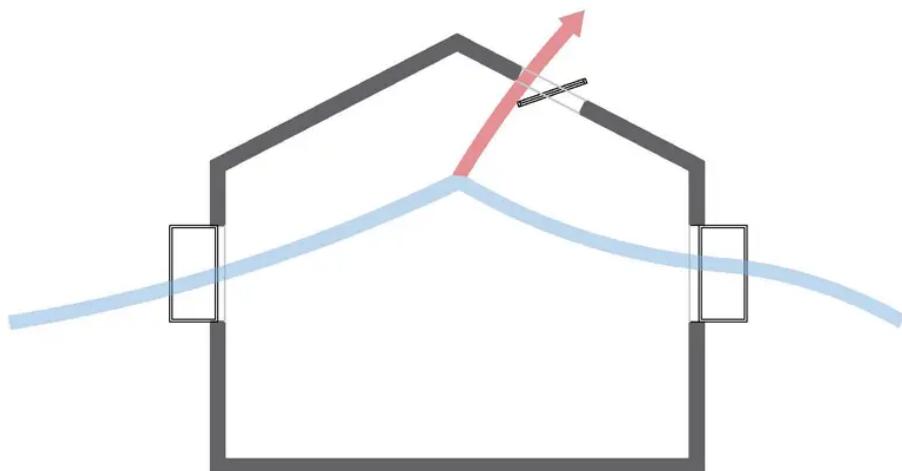


Figura 3-3: Effetto camino

Ventilazione Meccanica o VMC (Ventilazione Meccanica Controllata): si intende un sistema impiantistico a doppio flusso, in grado di garantire un ricambio dell'aria interna attraverso un'apposita macchina ed un sistema di bocchette di estrazione e di immissione che si occupano rispettivamente della rimozione dell'aria viziata e dell'introduzione di aria esterna pulita. In questo modo, è possibile automatizzare ed ottimizzare il processo di rimozione delle sostanze inquinanti variando le portate d'aria immesse ed estratte in funzione della presenza o meno di persone e tenendo anche in considerazione le sostanze inquinanti prodotte dagli arredi o dall'involucro stesso.

Un ulteriore elemento di cui possono essere dotate le VMC è il recuperatore di calore ovvero, un dispositivo in grado di captare una parte dell'energia termica contenuta nell'aria estratta e trasferirla all'aria in ingresso. Questo processo permette di diminuire i fabbisogni energetici dell'edificio soprattutto nelle stagioni intermedie (primavera e autunno) in cui le temperature esterne sono prossime a quelle ottimali previste per l'ambiente interno.

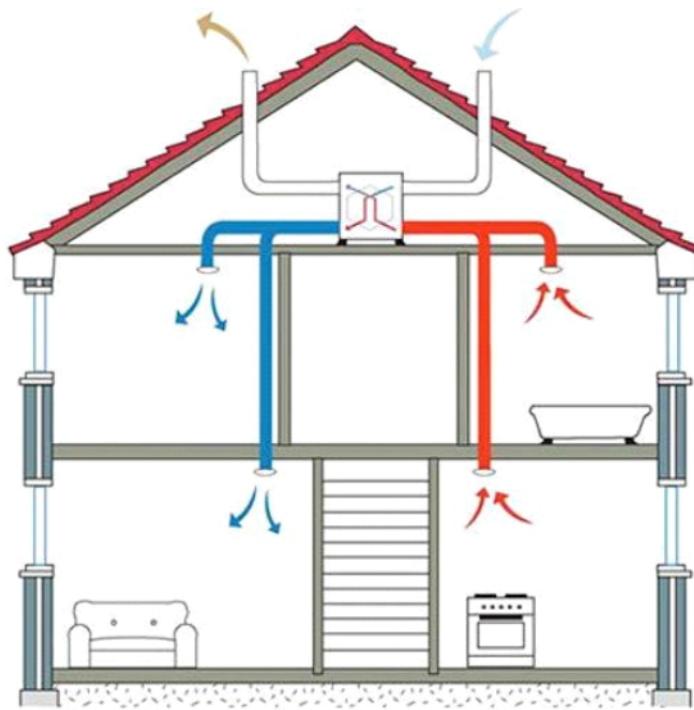


Figura 3-4: Disposizione bocchette VMC¹⁸

La rete di canali riportata in Figura 3-4 evidenzia un criterio di progettazione della VMC ovvero, si va a privilegiare gli ambienti nobili come saloni e camere dotandoli di bocchette di immissione e posizionando le bocchette di estrazione negli ambienti in cui l'aria si suppone essere già esausta come cucine e bagni.

Ventilazione ibrida: si intende l'utilizzo della ventilazione meccanica in assistenza a quella naturale. Viene ridotto il regime di funzionamento degli apparecchi sfruttando al massimo i ricambi d'aria naturali.

¹⁸ Immagine proveniente da - www.consiimpianti.it

3.3.2. Metodi per la definizione dell'IAQ

La Norma UNI EN 16798-1 definisce tre metodi differenti per la determinazione dei parametri della qualità dell'aria:

- **Metodo 1:** si basa sulla qualità dell'aria percepita. Esso applica il tasso di ventilazione più elevato tra il tasso richiesto per ottenere un determinato livello di qualità dell'aria e quello necessario alla riduzione di rischi per la salute dati da uno specifico inquinante.
- **Metodo 2:** utilizza dei valori limite per la concentrazione di sostanze inquinanti. Esso determina il tasso di ventilazione necessario per diluire le sostanze inquinanti secondo una specifica formula.
- **Metodo 3:** si basa su portate di ventilazione predefinite e viene utilizzato per definire i tassi di ventilazione minimi.

L'applicazione dei metodi di calcolo appena citate viene differenziata in relazione alla destinazione d'uso dell'edificio, distinguendo in particolare tra edifici residenziali (abitazioni, unità immobiliari ad uso domestico) e edifici non residenziali (uffici, scuole, attività commerciali, ricreative e assimilabili).

Nonostante le differenze funzionali e tipologiche tra le due categorie, la normativa stabilisce un principio comune:

- **Nei periodi di non occupazione** degli ambienti la ventilazione deve essere considerata assente, in quanto non vi è permanenza di persone e pertanto non si rendono necessarie portate d'aria dedicate al comfort dell'occupante.
- **Nei periodi di utilizzo** degli ambienti la ventilazione deve essere dimensionata in modo da garantire non solo l'apporto di aria esterna necessario al comfort degli occupanti, ma anche la corretta rimozione degli inquinanti prodotti dall'edificio e dai suoi elementi interni (impianti e arredi) durante i periodi di inattività.

Questo approccio consente di ottimizzare in modo efficace il rapporto tra consumo energetico e comfort abitativo. Inoltre, l'utilizzo di sistemi automatizzati, nei luoghi di

maggior attenzione, permette di eliminare la variabile umana mantenendo l'ambiente nelle condizioni termo-igrometriche definite per il suo utilizzo (Musei, scuole ecc..).

Il caso studio riportato in questa tesi applicherà il terzo metodo che, nonostante non approfondisca i concetti di “inquinanti” e dei loro produttori, permette di determinare i tassi di ventilazione minimi da applicare in ogni stanza in modo più che esaustivo per lo scopo dello studio. Esso applica dei tassi di ventilazione predefiniti alla formula introdotta dal metodo 1:

$$q_{tot} = n * q_p + A_R * q_b \quad [1]$$

q_{tot} = Tasso di ventilazione totale [l/s]

n = Numero di persone presenti nell'ambiente [-]

q_p = Tasso di ventilazione per la presenza di pesone [l/s * Persona]

A_r = Superficie utile del locale [m^2]

q_b = Tasso di ventilazione dovuto alle emissioni dell'edificio[l/s * m^2]

Il primo termine dell'equazione [1] prende in considerazione i tassi di ventilazione minimi necessari per la diluizione degli inquinanti prodotti dalle persone all'interno della zona in funzione del comfort percepito dagli stessi. (Tabella 3-4).

Il secondo termine invece, analizza le portate d'aria necessarie alla diluizione delle emissioni prodotte dall'edificio, arredamenti ed impianti ivi compresi., in funzione della tipologia di edificio stesso (dal meno al più inquinante). (Tabella 3-5).

Categoria	Percentuale attesa di insoddisfatti [%]	Portate d'aria per persona [l/s * persona]
I	15	10
II	20	7
III	30	4
IV	40	2,5

Tabella 3-4: Tassi di ventilazione minimi per la diluizione delle emissioni prodotte da adulti sedentari.¹⁹

Categoria	Edificio molto poco inquinante $l/(s * m^2)$	Edificio poco inquinante $l/(s * m^2)$	Edificio non poco inquinante $l/(s * m^2)$
I	0,5	1	2
II	0,35	0,7	1,4
III	0,2	0,4	0,8
IV	0,15	0,3	0,6

Tabella 3-5: Tassi di ventilazione minimi per la diluizione delle emissioni prodotte da diverse tipologie di edificio.²⁰

¹⁹ Tabella B6 – *Norma UNI EN 16798-1:2019 APPENDICE B.*

²⁰ Tabella B7 – *Norma UNI EN 16798-1:2019 APPENDICE B.*

3.4. Analisi del ciclo di vita

Il “Life Cycle Thinking (LCT)” o “pensiero del ciclo di vita”, è un approccio che paragona ogni prodotto e/o processo ad un organismo vivente che nasce, cresce e muore integrandosi perfettamente con l’ambiente circostante.²¹

Nato come un “*pensiero*”, l’LCT ha progressivamente acquisito rilevanza al punto da spingere gli enti normativi alla redazione di metodologie strutturate e standardizzate a livello internazionale definita ***Life Cycle Assessment (LCA)***. Questa metodologia consente di identificare, quantificare e valutare in maniera oggettiva i potenziali impatti ambientali che i singoli prodotti, processi e servizi possono generare durante tutto il loro ciclo di vita.

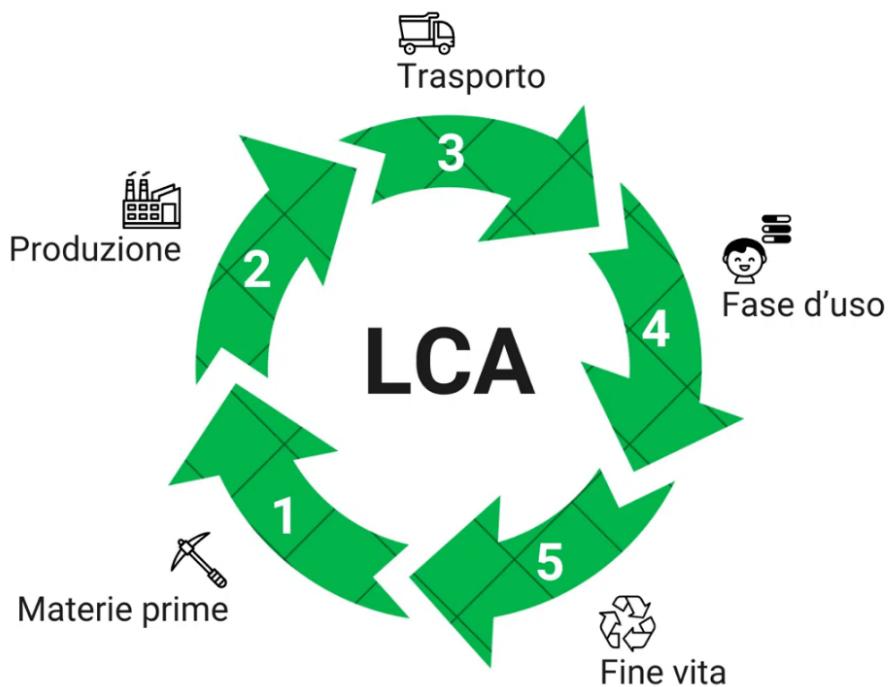


Figura 3-5: Schema del ciclo di vita²²

²¹ Jinming Lei, Beijia Huang, Ying Huang (2020). “*Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making*”.

²² www.ollum.it

L'LCA esamina in modo sistematico gli aspetti ambientali e gli impatti dei “sistemi di prodotto”, dall’acquisizione delle materie prime allo smaltimento finale. Il grado di dettaglio e l’estensione temporale dell’analisi variano in funzione dell’obiettivo e del settore di applicazione.

Non esistono basi scientifiche in grado di ridurre i risultati della metodologia ad un valore di tipo numerico in quanto, l’interpretazione del ciclo di vita richiede l’uso di un procedimento sistematico ma iterativo indirizzato verso l’obiettivo preposto.

La norma UNI EN ISO 14040 del 2021 “*Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Principi e quadro di riferimento*” modella il ciclo di vita come un sistema prodotto ovvero: un insieme di processi unitari collegati fra loro da flussi intermedi che tengono conto dell’utilizzo di rifiuti da trattare e delle energie necessarie per compiere tale operazione. A sua volta un sistema prodotto può essere parte di altri sistemi prodotto che tramite l’aggiunta di flussi elementari (visti come risorse esterne o scarti o emissioni del sistema precedente) innescano la formazione dei successivi sistemi.

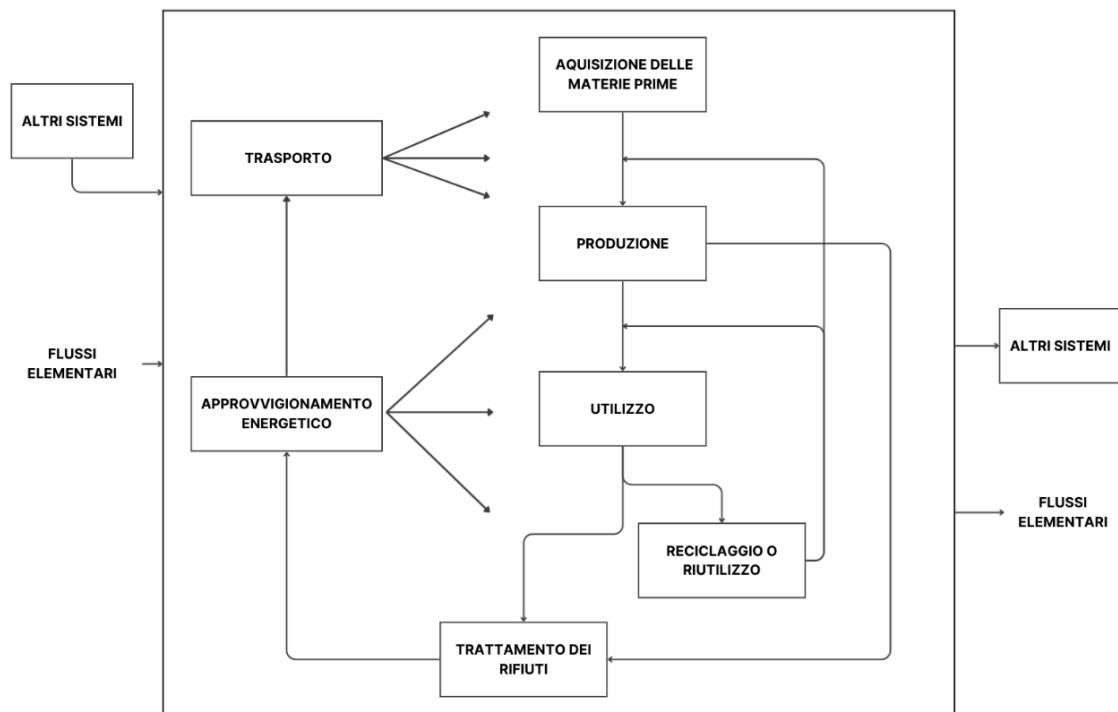


Figura 3-6: Schema tipo "Sistema prodotto"²³

²³ UNI EN ISO 14040:2021 – “*Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Principi e quadro di riferimento*”.

Il sistema deve comprendere gli elementi chiave del prodotto fisico che si vuole analizzare trascurando gli elementi che non modificano il comportamento globale del sistema. L’obiettivo principale è quello di costruire un modello semplificato ma funzionalmente rappresentativo, che miri a mantenere, sia in ingresso che in uscita, solo flussi elementari e/o flussi di prodotti.

La prima schematizzazione del problema prevede l’inserimento dei dati disponibili in letteratura scientifica o da altre fonti ritenute attendibili. Con le successive iterazioni, implementando nuovi dati in ingresso dovrebbero definirsi sempre di più i dati meno esaustivi.²⁴

3.4.1. Dichiarazioni ambientali

Nonostante il concetto di *ciclo di vita* sembri intuitivamente semplice, la sua applicazione risulta più laboriosa e complessa, proprio a causa della sua natura iterativa, soprattutto quando il sistema da analizzare è parte di un insieme più ampio. Per ovviare a tali criticità, la normativa ha introdotto una serie di disposizioni che stabiliscono dei principi generali ai quali tutti i produttori devono sottostare per rilasciare una certificazione ambientale.

Il *sistema prodotto* (in termini di materiale) viene corredato, già in fase di produzione, da tutti gli elementi necessari all’integrazione nel sistema successivo, favorendo l’elaborazione dello stesso e garantendo la tracciabilità e la conformità dei dati.

I principi e i requisiti per la comunicazione degli aspetti ambientali dei prodotti vengono riportati nella serie di norme ISO 14020²⁵ e spaziano da autodichiarazioni prodotte dal produttore fino ai documenti più completi ed esaustivi come gli EPD (Environmental Product Declaration o Dichiarazione Ambientale di Prodotto) e le comunicazioni sull’impronta. Una rappresentazione grafica della serie di norme appena citata viene riportata nella Figura 3-7 la quale riporta l’oggetto di ogni norma di interesse.

²⁴ UNI EN ISO 14044:2021 – “Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita -Requisiti e linee guida”.

²⁵ UNI EN ISO 14020 – “Dichiaraioni e programmi ambientali per i prodotti – Principi e requisiti generali”.

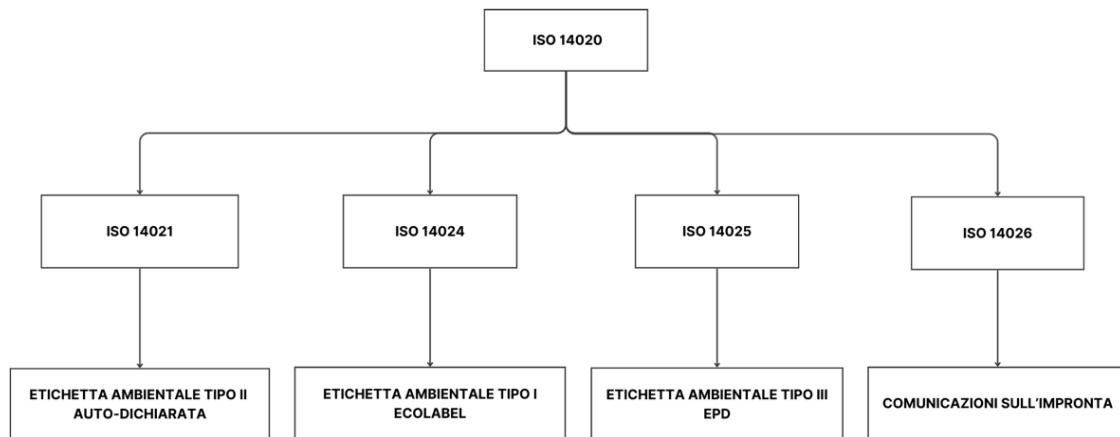


Figura 3-7: Schema normativo ISO 14020

Le diverse tipologie di etichette si differenziano in funzione dei processi interni necessari a generarle. Si riporta uno stralcio della norma ISO 14020 “*Dichiarazioni e programmi ambientali per i prodotti – Principi e requisiti generali*” contenente gli elementi obbligatori e facoltativi per ogni tipologia dichiarazione:

Requisiti richiesti dalle dichiarazioni ambientali	ISO 14021	ISO 14024	ISO 14025	ISO 14026
	Autodichiarazioni	Ecolabel	EPD	Comunicazioni sull'impronta
Programma di dichiarazione ambientale	Obbligatorio	Obbligatorio	Obbligatorio	Obbligatorio
Coinvolgimento delle parti interessate	Facoltativo	Obbligatorio	Obbligatorio	Facoltativo
Informazioni di supporto	Obbligatorio	Obbligatorio	Obbligatorio	Obbligatorio
LCA	Facoltativo	Facoltativo	Obbligatorio	Obbligatorio
Valutazioni della conformità	Facoltativo	Obbligatorio	Obbligatorio	Obbligatorio
Documentazione	Obbligatorio	Obbligatorio	Obbligatorio	Obbligatorio

Tabella 3-6: Elementi delle dichiarazioni ambientali

Ogni tipo di dichiarazione deve seguire delle regole definite all'interno di un programma di dichiarazione ambientale ovvero: un sistema organizzato e coordinato da un ente terzo, denominato operatore, avente il compito di stabilire le *Product Category Rules* (PCR), regole procedurali e metodologiche necessarie a rendere uniformi, affidabili e trasparenti le dichiarazioni ambientali.

Le dichiarazioni ambientali che seguono tale programma riportano in maniera oggettiva e verificabile i principali impatti ambientali derivanti dall'intero ciclo di vita del prodotto, tuttavia, in funzione dei dati in ingresso e da quelli integrati secondo la Tabella 3-6, possono assumere rilevanze differenti.

- **Etichetta ambientale autodichiarata (Tipo II):** informazioni pubblicate da persone o da organizzazioni coinvolte nella fornitura o nella commercializzazione del prodotto e ne puntualizza determinati aspetti positivi in modo da spingerlo maggiormente a livello di vendite;²⁶

Nonostante gli interessi personali il produttore deve fornire, all'interno della dichiarazione, elementi verificabili, pertinenti e non fuorvianti aventi come unico scopo la contestualizzazione ambientale dell'oggetto etichettato.

- **Etichetta ambientale Ecolabel (Tipo I):**²⁷ definisce una classificazione ambientale di una specifica categoria di prodotto sulla base di criteri di valutazione del ciclo di vita. Si tratta di sigle identificative o marchi, rilasciati da enti terzi, che certificano l'impatto ambientale del bene anche rapportandolo alla media dei beni appartenenti alla medesima categoria.

In ambito europeo, l'esempio più noto è il *marchio Ecolabel UE*, istituito dal Regolamento (CE) n. 66/2010. Esso, riconosciuto in tutti gli Stati membri, costituisce un riferimento di eccellenza per i consumatori che desiderano privilegiare prodotti e servizi caratterizzati da una maggiore sostenibilità ambientale.

²⁶ UNI EN ISO 14021:2021 – “*Etichette e dichiarazioni ambientali- Asserzioni ambientali auto-dichiarate (etichettatura ambientale Tipo II)*”.

²⁷ UNI EN ISO 14024:2018 – “*Etichette e dichiarazioni ambientali – Etichettatura ambientale Tipo I – Principi e procedure*”.

- **Etichetta ambientale Tipo III - EPD:**²⁸ riporta i dati ambientali predeterminati da uno studio LCA che tiene conto della categoria di impatto, dei flussi elementari, degli scarti o dei rifiuti prodotti per la realizzazione del prodotto che contrassegnano. Al suo interno sono riportati indicatori di vario tipo tra cui: impronta di Co2 equivalente, consumi energetici, produzione di rifiuti e consumo di acqua.

La certificazione EPD viene eseguita dal produttore applicando le prescrizioni presenti nel PCR (Product Category Rules) a sua volta prodotto dal gestore del programma e verificata da una parte terza e indipendente con l'obbiettivo di facilitare il confronto delle caratteristiche ambientali tra prodotti aventi requisiti funzionali equivalenti. Il PCR è una specifica di obbiettivo comune e di tutte le regole pertinenti all'LCA della categoria di prodotto, parametri predeterminati, regole per le informazioni ambientali aggiuntive, requisiti per la redazione di rapporti. Istruzioni scritte su come produrre i dati richiesti dalla dichiarazione.

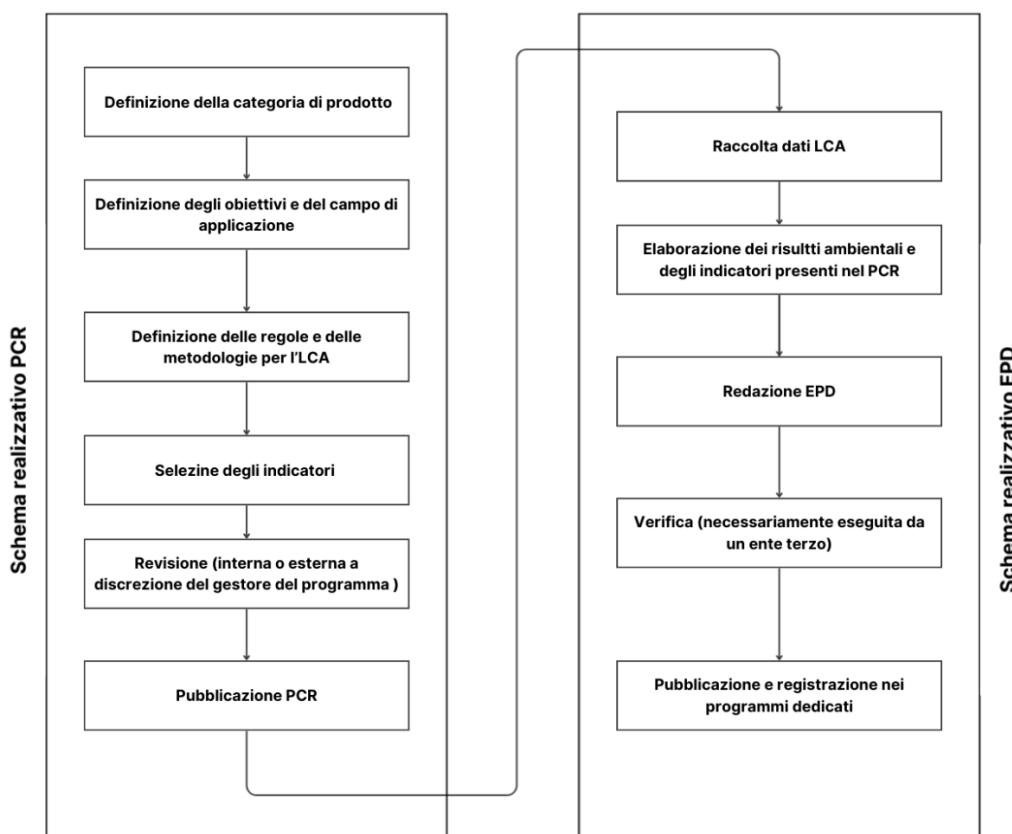


Figura 3-8: Schema funzionale per la realizzazione di un EPD

²⁸ UNI EN ISO 14025 del 2010 – “Etichette e dichiarazioni ambientali Tipo III principi e procedure”.

- **Comunicazione sull'impronta:** Fonte di garanzia e credibilità, fornisce una o più metriche correlate a una specifica area di interesse come impronta di carbonio, impronta idrica ecc. Questo tipo di etichetta permette di garantire informazioni verificabili, leggibili e comprensibili da qualsiasi tipo di pubblico unendo la valutazione tecnico-scientifica alla percezione che il mercato gli attribuisce.²⁹

3.4.2. Parametri LCA

Per vita utile di un prodotto si intende il lasso di tempo in cui lo stesso può essere utilizzato mantenendo al di sopra di un valore di progetto le sue prestazioni specifiche.

LCA e LCC utilizzano normalmente la vita utile di un edificio come periodo di calcolo e la differenzia in funzione del campo di utilizzo:

- Durata Tecnica: tempo in cui i materiali mantengono le prestazioni di progetto.
- Durata commerciale: Vita utile ridotta a causa dello scopo commerciale che ne impone la sostituzione prematura per mantenere o aumentare gli standard di progetto e/o sicurezza.
- Durata specifica: Si basa sui dati presenti sulle schede tecniche dei materiali e sulle loro dichiarazioni ambientali.
- Durate predefinite dai Paesi o consigliate da enti preposti es “Guida RICS”.

La Tabella 3-7 illustra in modo sistematico la struttura del metodo LCA. Questo metodo articola l'intero ciclo di vita del prodotto in quattro macro-fasi principali identificate convenzionalmente con le lettere A, B, C e D.

- La fase A include i processi relativi alla produzione e all'approvvigionamento delle materie prime tenendo in conto anche le componenti energetiche necessarie per la realizzazione del componente.

²⁹ UNI EN ISO 14026:2018 – “Etichette e dichiarazioni ambientali – Principi, requisiti e linee guida per la comunicazione dell'impronta ambientale”.

- La fase B identifica la fase di utilizzo del prodotto, includendo le operazioni di manutenzione, sostituzione, riparazione, consumo di acqua e di energia indispensabili per il mantenimento del componente.
- La fase C identifica il “Fine vita” identificando le attività di disassemblaggio, smaltimento e trattamento dei rifiuti.
- La fase D introduce il concetto di riciclo esplicitando i potenziali vantaggi e carichi ambientali evitati nel caso in cui sia possibile attuare manovre di recupero, riciclaggio o riutilizzo anche di poche parti del prodotto.

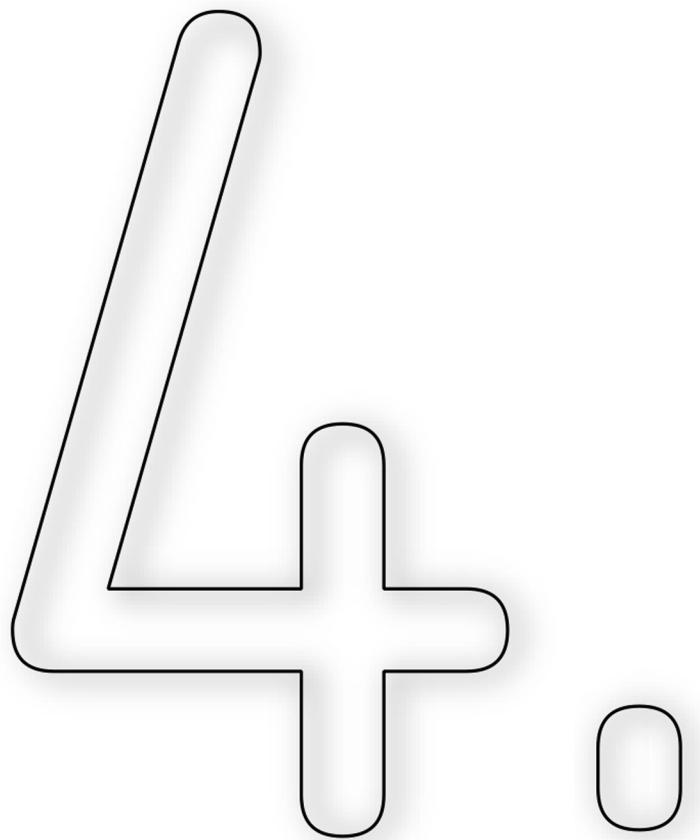
Ogni macro-fase viene ulteriormente suddivisa in specifiche sottocategorie, organizzate in ordine numerico e progressivo compreso tra 1 e 7. Questa ulteriore suddivisione permette di analizzare singolarmente i vari aspetti della categoria dettagliando maggiormente ogni passaggio al fine di abbattere le variabili in gioco.

	Materie prime	A1
Fase di produzione	Trasporto	A2
	Produzione	A3
Fase di costruzione	Trasporto	A4
	Installazione	A5
Fase d'uso	Uso	B1
	Manutenzione	B2
	Riparazione	B3
	Sostituzione	B4
	Ricondizionamento	B5
	Energia della fase d'uso	B6
	Consumo di acqua della fase d'uso	B7
Fase di fine vita	Demolizione	C1
	Trasporto	C2
	Processamento rifiuti	C3
	Dismissione	C4
Vantaggi e carichi oltre i confini del sistema	Potenziale riuso, recupero e riciclo	D

Tabella 3-7: Moduli rappresentanti il ciclo di vita

I moduli A1 e A3 regolano l'impatto ambientale in funzione del tipo e della quantità di energia che utilizza. Quest'ultima è stimabile in funzione al sito un cui avviene la produzione in quanto, l'impronta di carbonio rilasciata dalla stessa è funzione del mix energetico utilizzato. Una regione ad alto uso di energie fossili inciderà maggiormente di una regione basata su fonti rinnovabili.

La distanza di trasporto, identificata nei moduli A2, A4 e C2, è un parametro fondamentale per la valutazione degli impatti ambientali associati alla movimentazione di materiali, componenti o prodotti lungo il loro ciclo di vita. Questa componente è funzione del tipo di alimentazione del mezzo utilizzato, delle performance di carico e, nel caso di mezzi elettrici, dal mix energetico con cui viene ricaricato.



Caso Studio



In questo capitolo, si applicheranno i concetti teorici precedentemente trattati su un caso studio reale, per il quale si pone l'obiettivo di migliorare le prestazioni energetiche dell'edificio in esame. L'analisi sarà condotta attraverso un approccio integrato e multidisciplinare che tenga conto non solo dell'efficienza energetica, ma anche dell'impatto ambientale che i singoli interventi manifestano ed il benessere offerto all'utilizzatore finale.

Nell'ottica di un'edilizia sempre più sostenibile verrà applicata la metodologia del Life Cycle Assessment (LCA) alle diverse strategie di intervento. Essa permetterà di identificare le soluzioni ottimali che bilancino le esigenze di efficienza energetica ed impatto ambientale, promuovendo un processo decisionale e progettuale più responsabile allineato con gli obiettivi di decarbonizzazione e tutela dell'ambiente imposti dalla società.

Per questa analisi, si è deciso di considerare come caso studio un edificio condominiale edificato negli anni Settanta del Novecento che, come introdotto all'inizio di questa trattazione, risulta rappresentativo del tessuto urbano italiano.

4.1. Analisi energetica, ambientale e tecnologica

4.1.1. Caratteristiche tecnologiche

Il presente studio analizza un edificio condominiale avente sei piani fuori terra, situato nel comune di Settimo Torinese, comune situato nella prima cintura della città metropolitana di Torino a Nord-Ovest del capoluogo. L'immobile si inserisce in un contesto urbano caratterizzato da immobili di analoga tipologia e prevalentemente a uso residenziale.

Dal punto di vista architettonico, esso si presenta con una struttura portante in calcestruzzo armato, composta da telai di travi e pilasti e con solai in laterocemento. I tamponamenti perimetrali sono caratterizzati da muratura laterizia a “cassa vuota”. Le tegole marsigliesi della copertura poggiano direttamente su una struttura portante in legno a due falde distinte al disotto della quali è presente un sottotetto non abitabile.

Per quanto riguarda l'impianto termico si evidenzia un sistema centralizzato ed alimentato da una caldaia tradizionale che serve l'intero condominio attraverso una rete di distribuzione a colonne montanti e terminali di emissione (radiatorì).

La produzione di acqua calda sanitaria, invece, rimane in capo alla singola unità immobiliare che la gestisce tramite sistemi individuali elettrici o a gas.

Nel seguito si riportano le tavole grafiche riportanti planimetrie, prospetti e sezioni insieme alle assunzioni a cui si farà riferimento nel corso della trattazione:

PIANO TERRA

scala 1:100

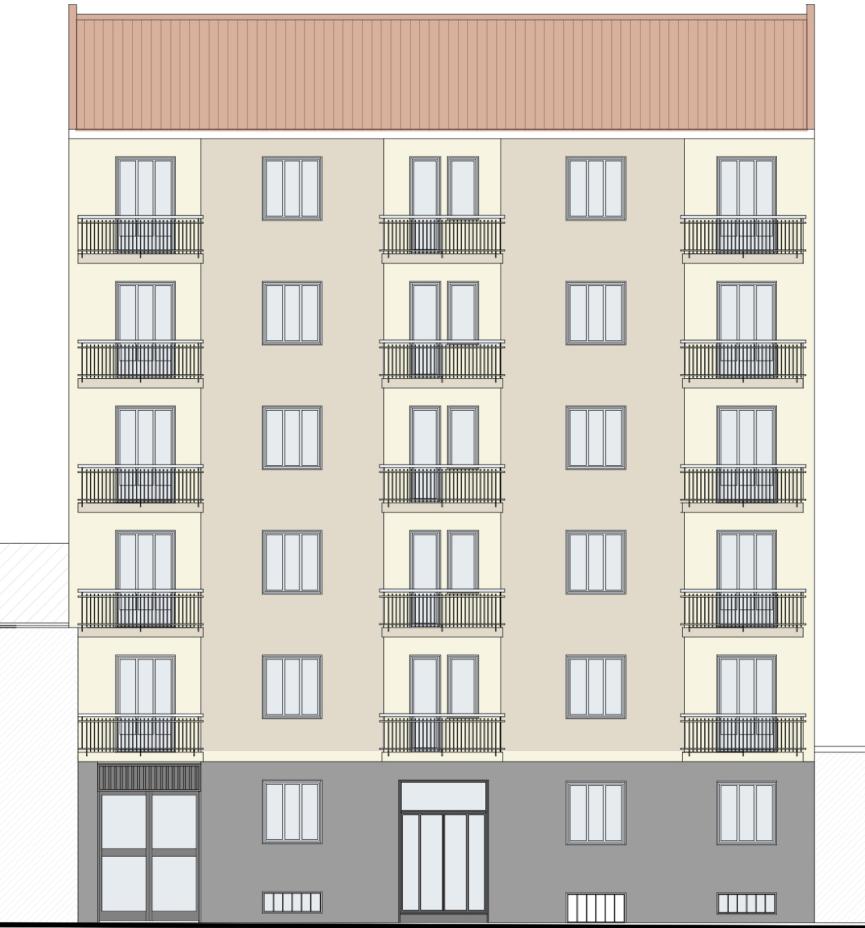


PIANO TIPO (piano dal 1° al 5°)

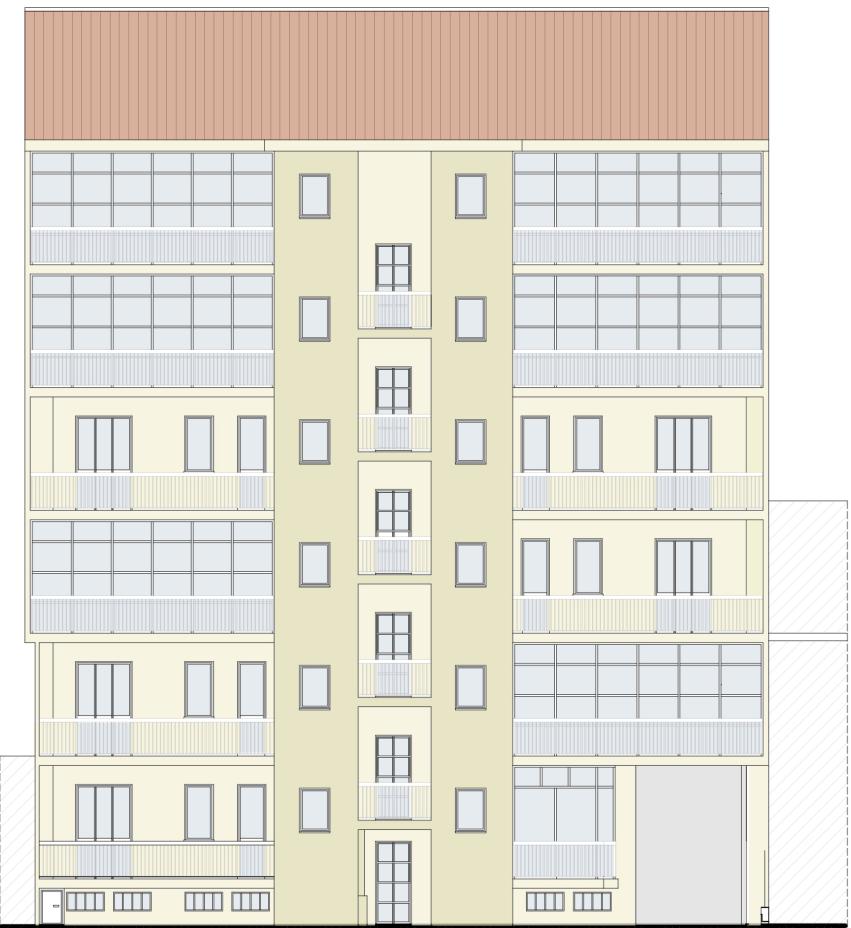
scala 1:100



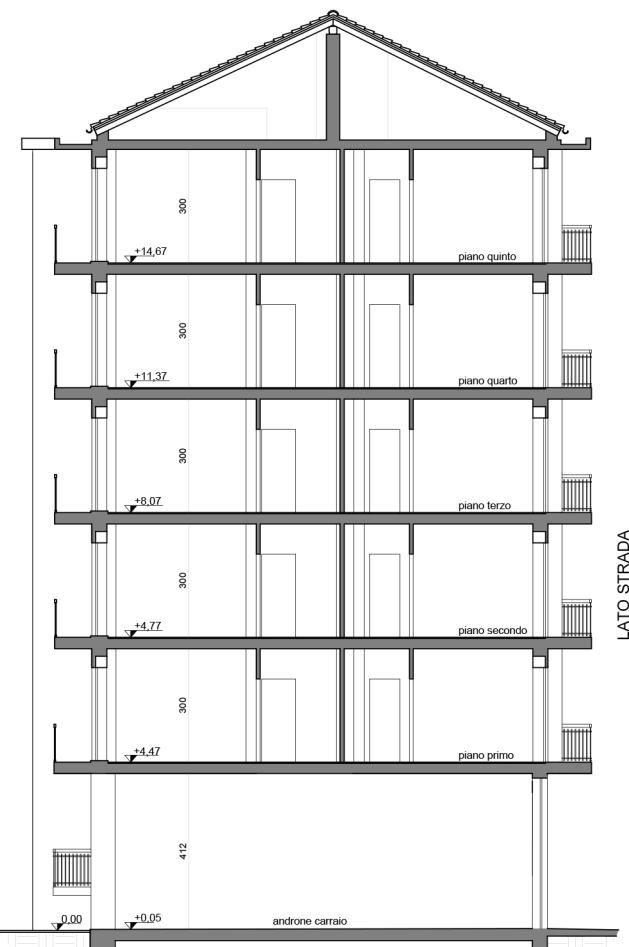
PROSPETTO LATO STRADA
SCALA 1:200



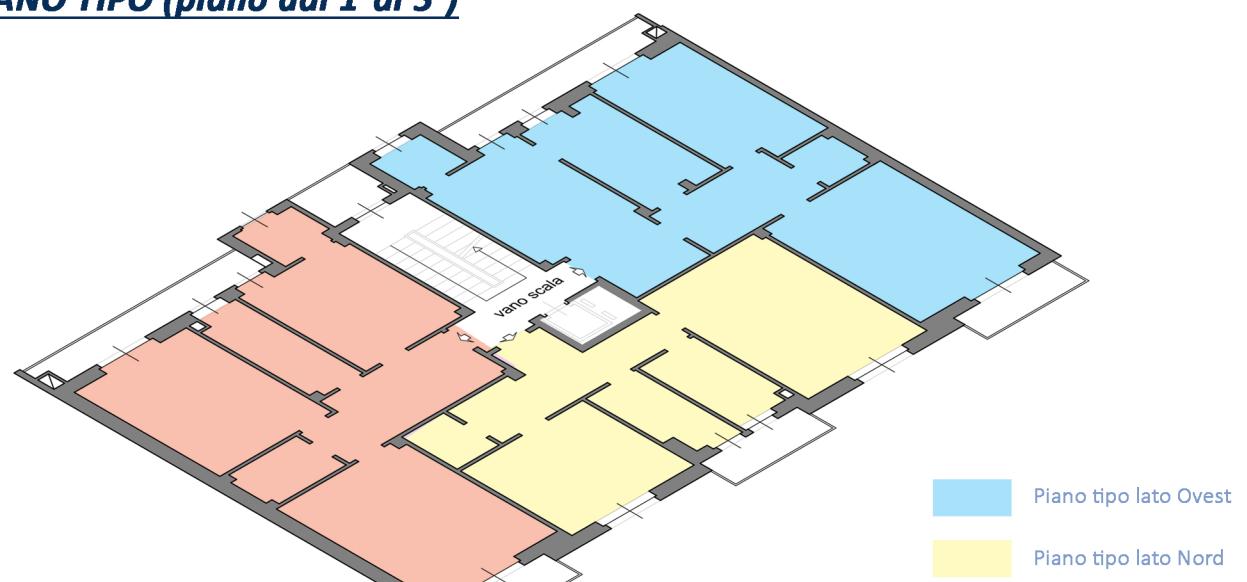
PROSPETTO LATO CORTILE
SCALA 1:200



SEZIONE TRASVERSALE
scala 1:200



SCHEMI TIPOLOGICI
PIANO TIPO (piano dal 1°al 5°)



PIANO TERRA



Politecnico
di Torino

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE
IN INGEGNERIA CIVILE
STRUTTURE

STRATEGIA DI OTTIMIZZAZIONE ENERGETICA BASATA
SULLA RELAZIONE SISTEMICA TRA INVOLUCRO ED
IMPIANTO

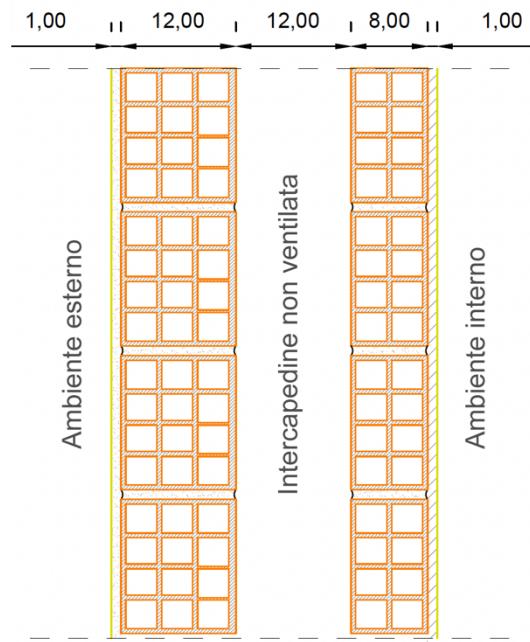
PROSPETTI, SEZIONE E SCHEMI
TIPOLOGICI

TAV 2/2

I tamponamenti perimetrali confinano direttamente con l'esterno e riportanti le seguenti stratigrafie:

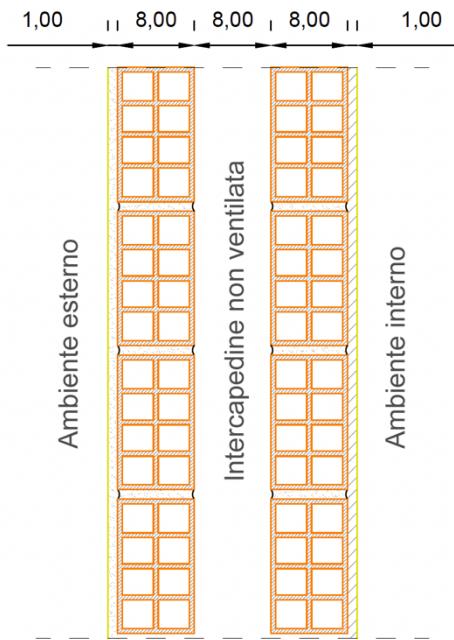
Lato Strada, Lato Cortile e Frontespizi

- Intonaco esterno sp=1 cm
- Mattone forato sp=12 cm
- Intercapedine non ventilata sp= 18 cm
- Mattone forato sp=8 cm
- Intonaco interno sp= 1cm



Avancorpi lato cortile

- Intonaco esterno sp= 1cm
- Mattone forato sp=8 cm
- Intercapedine non ventilata sp= 8 cm
- Mattone forato sp=8 cm
- Intonaco interno sp=1 cm



4.1.2. Prestazioni pre-intervento

L'analisi energetica dell'edificio in questione rileva prestazioni significativamente al di sotto dei livelli minimi previsti dalle normative vigenti. Il principale elemento di criticità è rappresentato dall'involucro edilizio che, come da tradizione degli anni 70, non presenta alcun tipo di isolamento termico mantenendo una tradizionale struttura il latero cemento avente un elevato coefficiente di dispersione termica (trasmittanza) sia da parte delle pareti che da parte dei solai.

La mancanza di isolamento incide negativamente sia sulle prestazioni invernali che su quelle estive, determinando un elevato carico termico in entrambe le situazioni a sua volta tradotto in un fabbisogno energetico importante per la climatizzazione.

Modellando l'involucro descritto tramite il software Edilclima³⁰ con il relativo impianto di riscaldamento centralizzato, ormai considerato poco efficiente, si ricava un Attestato di Prestazione Energetica (APE) che colloca l'edificio in classe F. Tale classificazione è associata a un elevato indice di prestazione energetica primaria (EPgl,nren) e potrebbe comportare ripercussioni significative sui costi di gestione a carico degli utenti finali e un considerevole impatto ambientale in termini di emissioni di CO₂ equivalente.

La Figura 4-1 riporta stralcio dell'APE appena citato in cui si evince la marcata non efficienza dell'edificio:



Figura 4-1: Classe energetica pre-intervento

³⁰ <https://www.edilclima.it>

4.1.3. Individuazione delle criticità

Le principali criticità riscontrate nell’edificio in esame sono riconducibili, in primo luogo, alle carenze prestazionali dell’involtucro edilizio, caratterizzato dall’assenza o dall’insufficienza di isolamento termico, con conseguente dispersione di calore nelle stagioni fredde e ridotte protezioni dall’irraggiamento solare nelle stagioni calde.

A ciò si aggiunge l’obsolescenza del sistema di riscaldamento, il quale non riesce a soddisfare il fabbisogno termico dell’edificio o che ci riesca a sfavore dei consumi.

L’interazione di questi due fattori si traduce in un fabbisogno energetico annuo sensibilmente superiore alla media, con ricadute dirette sul comfort e sui costi di gestione per i residenti al quale si aggiungono rilevanti impatti ambientali.

Un’ulteriore criticità è rappresentata dall’assenza di sistemi per la produzione di energia su base rinnovabile (impianti fotovoltaici e solari termici) che non rendono favorevole l’installazione di apparecchiature ad assorbimento elettrico quali le pompe di calore. La mancata adozione di questi generatori limita fortemente le possibilità di ridurre la dipendenza dai combustibili fossili e di ottimizzare la sostenibilità complessiva dell’edificio.

4.2. Strategie di riqualificazione

4.2.1. Modellazione energetica dell'involucro

I contenuti teorici e le metodologie illustrate nei capitoli precedenti trovano una concreta applicazione attraverso una modellazione energetica dell'edificio analizzato. Tale attività costituisce un passaggio centrale del lavoro di ricerca, in quanto consente di tradurre le considerazioni di carattere teorico e normativo in un approccio operativo.

La modellazione è stata condotta tramite un software specialistico che permette di rappresentare sia le caratteristiche dell'involucro sia la configurazione dei sistemi tecnologici utilizzati. Riprodurre e analizzare le diverse interazioni tra componenti passivi e attivi consente di valutare o simulare con maggiore accuratezza le prestazioni energetiche globali in funzione delle differenti variabili quali: i carichi termici, le condizioni climatiche esterne, profili di utilizzo e molto altro ancora.

Tra i vari software presenti sul mercato, nell'ambito della modellazione energetica, si è scelto di utilizzare il modulo EC700 di Edilclima in quanto, allo stato attuale, si ritiene uno tra i più “aperti” e funzionali alla analisi dei dati. Di seguito verranno esposti i principali passaggi eseguiti durante la modellazione del caso studio.

DATI GENERALI

In primo luogo, occorre definire la normativa di riferimento e selezionare la località in cui è situato l'edificio in esame. Inserendo i dati geografici il programma carica in automatico i dati climatici di riferimento per la zona in conformità alla normativa vigente.

Il caso in esame risulta essere in Zona Climatica E.

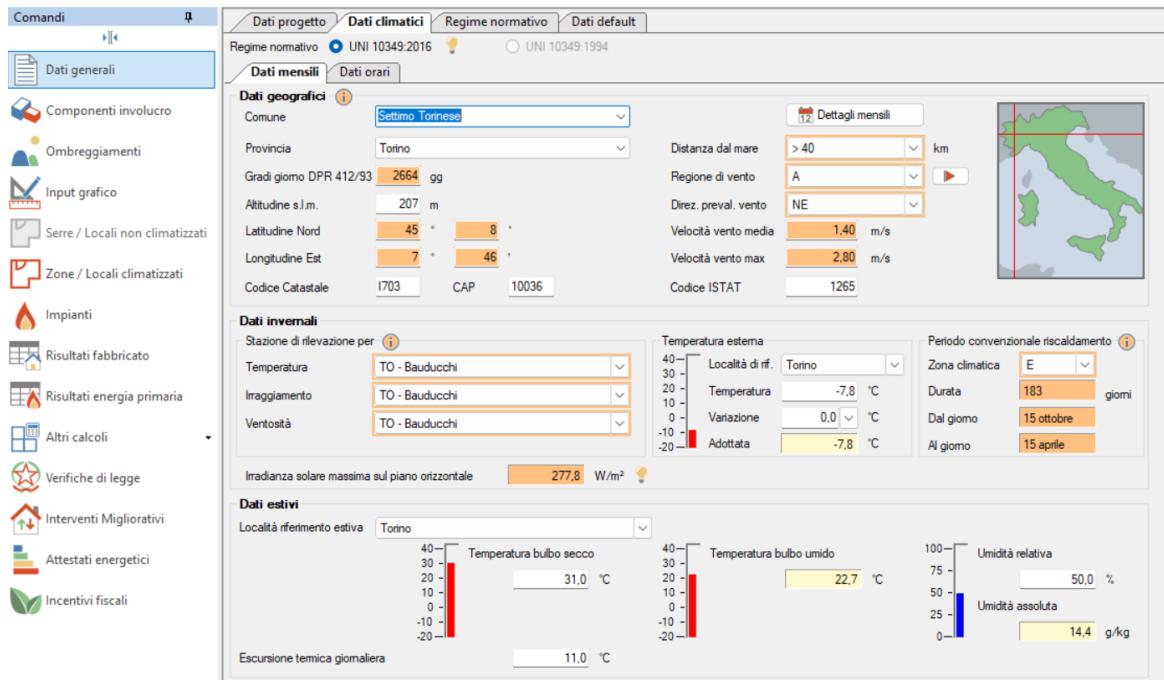


Figura 4-2: Stralcio EC700 - Dati Climatici

COMPONENTI INVOLUCRO

La seconda fase della modellazione è forse la più importante in quanto, occorre definire le stratigrafie di tutti gli elementi disperdenti opachi verticali (pareti, sottofinestra, casonetti, porte, ecc.), orizzontali (solette interpiano, coperture, sottotetti, solette controterra, ecc.), degli elementi trasparenti e dei ponti termici.

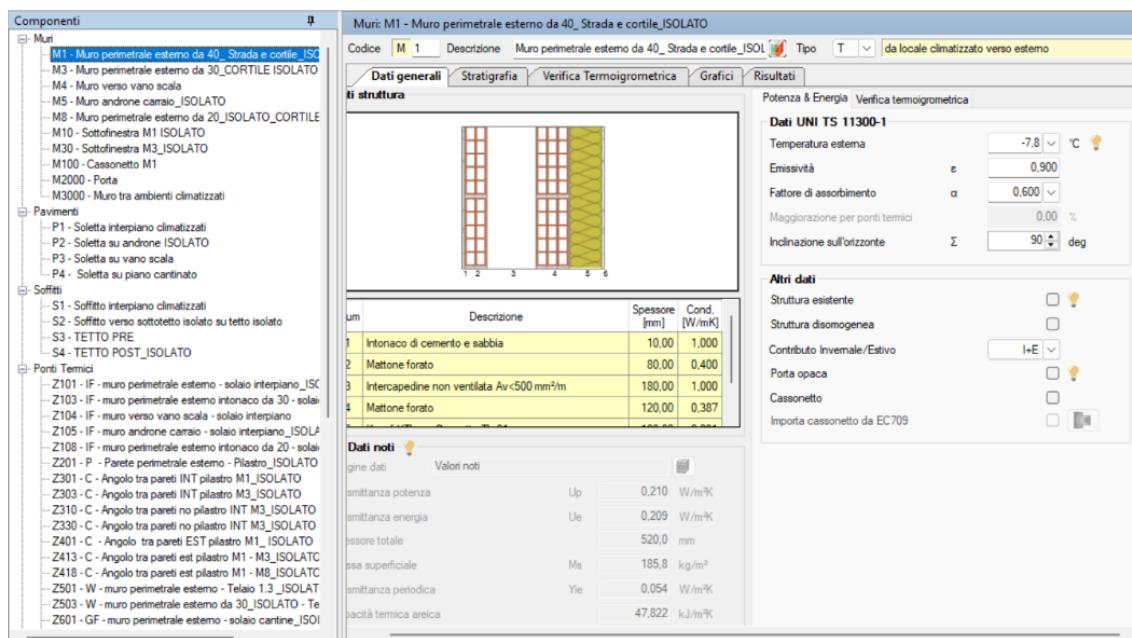


Figura 4-3:Stralcio EC700 - Componenti involucro

Per ogni elemento disperdente viene definita la propria stratigrafia, composta dai differenti materiali di cui è costituito. Di ogni materiale è necessario conoscere principalmente: lo spessore [mm], la conduttività λ [W/mK], la massa volumica ρ [kg/m³], la capacità termica specifica c [J/kgK] e la resistenza al vapore μ , [adimensionale].

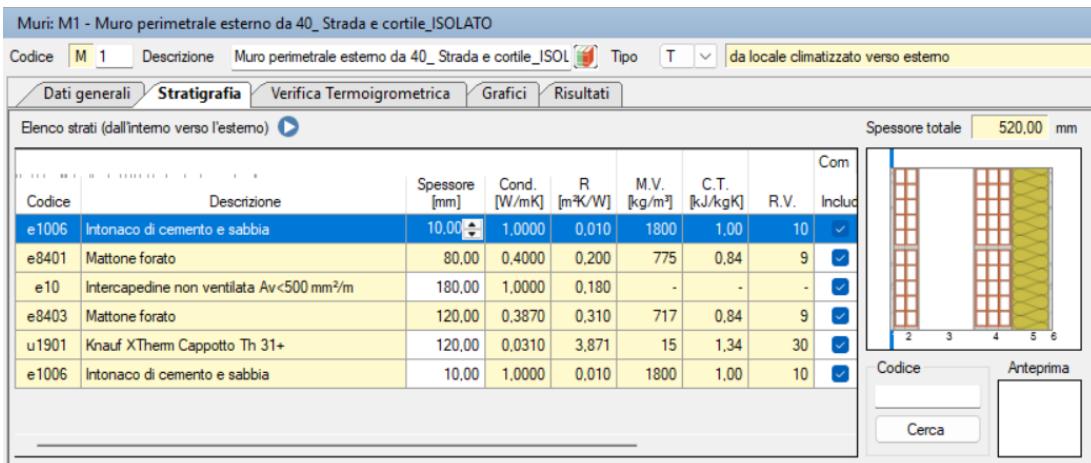


Figura 4-4: Stralcio EC700 - Stratigrafia

Ogni elemento della stratigrafia ha un ruolo nella determinazione della trasmittanza termica (U) del componente, espressa in W/m²·K e ricavata con la seguente formulazione:

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_{si} + \frac{S_i}{\lambda_i} + \frac{S_n}{\lambda_n} + R_n + R_a + R_{se}} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

R_{si} = Resistenza liminare della superficie interna della struttura $\left[\frac{m^2 K}{W} \right]$

$\frac{S}{\lambda}$ = Resistenza termica del singolo strato omogeneo $\left[\frac{m^2 K}{W} \right]$

R_n = Resistenza termica di strati non omogenei $\left[\frac{m^2 K}{W} \right]$

R_a = Resistenza termica intercapedini $\left[\frac{m^2 K}{W} \right]$

R_{se} = Resistenza liminare della superficie esterna della struttura $\left[\frac{m^2 K}{W} \right]$

Nell'ambito della riqualificazione energetica del patrimonio edilizio italiano, i valori limite di trasmittanza termica sono stabiliti dal D.M.26 giugno 2015 “*Requisiti minimi*” e variano in base alla zona climatica di appartenenza. Il rispetto di tali limiti è obbligatorio sia nel caso di riqualificazione energetica che nel caso di nuove costruzioni.

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015 ⁽¹⁾	2021 ⁽²⁾
A e B	0,45	0,40
C	0,40	0,36
D	0,36	0,32
E	0,30	0,28
F	0,28	0,26

Tabella 4-1: Trasmittanza termica limite pareti verticali

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015 ⁽¹⁾	2021 ⁽²⁾
A e B	0,34	0,32
C	0,34	0,32
D	0,28	0,26
E	0,26	0,24
F	0,24	0,22

Tabella 4-2: Trasmittanza termica limite coperture

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015 ⁽¹⁾	2021 ⁽²⁾
A e B	3,20	3,00
C	2,40	2,00
D	2,10	1,80
E	1,90	1,40
F	1,70	1,00

Tabella 4-3: Trasmittanza termica limite infissi

Nelle tabelle appena riportate sono già stati evidenziati i valori di trasmittanza termica minimi per la zona climatica di riferimento e che definiscono i tre elementi principali sul quale agire per migliorare le prestazioni energetiche di uno stabile:

- La sostituzione dei serramenti con soluzioni più moderne e performati come vetri camera basso emissivi e tali ad alta efficienza riducono drasticamente le dispersioni termiche con conseguente aumento del comfort interno.
- La sostituzione o la coibentazione del tetto rappresenta un intervento decisamente più invasivo, a causa della sua estensione e della sua esposizione alle intemperie, ma è anche il secondo intervento più impattante nel calcolo energetico.
- La coibentazione delle pareti esterne, andando ad interessare tutte le zone scaldate dell'edificio, è l'intervento strategicamente più efficace per aumentare le prestazioni energetiche dell'edificio.

Nel caso in esame, sono state realizzate le stratigrafie per ogni singola parete, solaio e componente finestrato per realizzare il modello base sul quale eseguire i successivi confronti. Su tali stratigrafie (esistenti) è stato eseguito un intervento di isolamento a cappotto sulla superficie esterna in quanto, risulta essere la soluzione più utilizzata ed impattante, in termini di impronta di carbonio, a causa dei grandi volumi in gioco. Nello specifico, sono stati esaminati cinque dei principali isolanti utilizzati nei sistemi a cappotto: polistirene espanso sinterizzato, lana di roccia, poliuretano espanso, resina fenolica ed una materiale naturale quale la canapa.

Ciascuno dei materiali considerati presenta specifiche proprietà meccaniche e termiche, che si riflettono direttamente nella fase di modellazione in quanto, è necessaria l'adozione di spessori differenti per il raggiungimento delle medesime performance energetiche. La scelta dello spessore ottimale, per ognuno dei prodotti considerati, è stata effettuata in modo da rispettare i valori limite di trasmittanza stabiliti dalla normativa per la zona climatica E. (Tabella 4-1).

Si riportano in modo compatto le specifiche dei materiali selezionati e le quantità necessarie al soddisfacimento dei requisiti di progetto insieme ad una stima dei costi ricavata tramite voci da Prezzario DEI anno 2025³¹ (Tabella 4-4).

Materiale	Area [m ²]	Spess. [cm]	Vol. [m ³]	Peso [kg]	Densità [kg/m ³]	Cond. Termica λ [W/mK]	Costo [€/m ²]
EPS	1408,50	12	169,02	2535,30	15,00	0,031	96,49 €
Lana di roccia	1408,50	14	197,19	13803,30	70,00	0,035	108,63 €
Poliuretano	1408,50	10	140,85	4822,70	34,24	0,025	93,36 €
Resina fenolica	1408,50	8	112,68	3943,80	35,00	0,019	117,00 €
Canapa	1408,50	18	253,53	8873,55	35,00	0,040	94,29 €

Tabella 4-4: Quantità e caratteristiche necessarie

Materiale	Trasmittanza termica U [W/m ² K]	Resistenza termica R [m ² K/W]	Epgl,nren [kWh/m ² anno]	Classe energetica	Costo [€]
EPS	0,278	3,597	78,46	B	135.906,17 €
Lana di roccia	0,268	3,731	78,05	B	153.005,36 €
Poliuretano	0,272	3,676	78,05	B	131.497,56 €
Resina fenolica	0,264	3,788	77,48	B	164.794,50 €
Canapa	0,262	3,817	77,75	B	132.807,47€

Tabella 4-5: Risultati termici ottenuti

Dal confronto tra le stratigrafie ante-intervento e post-intervento relative a una delle pareti esterne oggetto di riqualificazione emerge in modo evidente l'efficacia dell'azione isolante prevista. L'applicazione di uno qualsiasi dei materiali isolanti presi in considerazione, con gli spessori definiti in Tabella 4-4, comporta infatti una sensibile riduzione della trasmittanza termica del componente.

³¹ Elenco prezzi aggiornato all'anno di riferimento redatto e pubblicato dalla tipografia del Genio Civile.

In particolare, si registra un passaggio da un valore iniziale di trasmittanza pari a circa 1,0 W/m²·K a un valore post-intervento che si attesta intorno a 0,27 W/m²·K. Tale risultato conferma la significativa incidenza dell'intervento di coibentazione sull'efficienza energetica dell'involucro, contribuendo in maniera determinante alla riduzione delle dispersioni termiche e al conseguente miglioramento delle prestazioni complessive dell'edificio.

Descrizione della struttura: Muro perimetrale esterno

Codice: M1

Trasmittanza termica **1,091** W/m²K

Spessore **410** mm

Temperatura esterna
(calcolo potenza invernale) **-7,8** °C

Permeanza **68,729** 10⁻¹²kg/sm²Pa

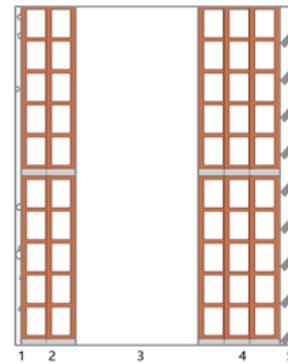
Massa superficiale
(con intonaci) **201** kg/m²

Massa superficiale
(senza intonaci) **183** kg/m²

Trasmittanza periodica **0,692** W/m²K

Fattore attenuazione **0,634** -

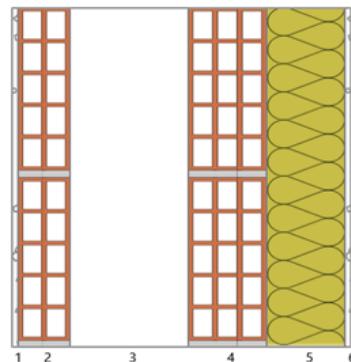
Sfasamento onda termica **-6,2** h



Stratigrafia:

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Intonaco di cemento e sabbia	10,00	1,0000	0,010	1800	1,00	10
2	Mattone forato	80,00	0,4000	0,200	775	0,84	9
3	Intercapedine non ventilata Av<500 mm ² /m	180,00	1,0000	0,180	-	-	-
4	Mattone forato	120,00	0,3870	0,310	717	0,84	9
5	Pietra artificiale	20,00	1,3000	0,015	1750	1,00	50
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,071	-	-	-

Figura 4-5: Dettaglio stratigrafia pre-intervento

Descrizione della struttura: Muro perimetrale esterno da 40_ Strada e cortile_ISOLATO**Codice: M1**Trasmittanza termica **0,209** W/m²KSpessore **520** mmTemperatura esterna (calcolo potenza invernale) **-7,8** °CPermeanza **35,651** 10^{-12} kg/sm²PaMassa superficiale (con intonaci) **186** kg/m²Massa superficiale (senza intonaci) **150** kg/m²Trasmittanza periodica **0,054** W/m²KFattore attenuazione **0,260** -Sfasamento onda termica **-8,9** h**Stratigrafia:**

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Intonaco di cemento e sabbia	10,00	1,0000	0,010	1800	1,00	10
2	Mattone forato	80,00	0,4000	0,200	775	0,84	9
3	Intercapedine non ventilata Av<500 mm ² /m	180,00	1,0000	0,180	-	-	-
4	Mattone forato	120,00	0,3870	0,310	717	0,84	9
5	Knauf XTherm Cappotto Th 31+	120,00	0,0310	3,871	15	1,34	30
6	Intonaco di cemento e sabbia	10,00	1,0000	0,010	1800	1,00	10
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,071	-	-	-

Figura 4-6: Dettaglio Tipo stratigrafia post-intervento

PONTI TERMICI

Oltre alla valutazione della trasmittanza termica delle singole strutture opache, una corretta modellazione energetica richiede un'analisi accurata dei *ponti termici*, ossia quelle zone dell'involucro edilizio caratterizzate da discontinuità geometriche o di materiale. Tali disomogeneità determinano una variazione locale del flusso termico rispetto alle aree circostanti, compromettendo la conservazione dei materiali a causa di condensazioni localizzate e le prestazioni energetiche dell'edificio.

Le dispersioni associate ai ponti termici, definite come “localizzate”, rappresentano in media circa il 20% delle perdite termiche totali di un edificio. Tuttavia, la loro incidenza non è costante: tende ad aumentare negli edifici caratterizzati da un involucro ad alto grado di isolamento, dove le dispersioni attraverso gli elementi opachi risultano ridotte ed in cui la presenza di numerosi punti critici può compromettere significativamente il bilancio energetico complessivo. Al contrario, negli edifici meno performanti, le dispersioni distribuite delle superfici assumono un ruolo preponderante rendendo trascurabili gli effetti dei ponti termici.

La modellazione dei ponti termici viene eseguita all'interno del software Edilclima sfruttando il modulo ivi contenuto EC709. Sono stati delineati i seguenti nodi critici: parete-solaio di interpiano, parete-sottotetto, parete-telaio, angolo parete, parete-pilastro, parete-balcone e parete-solaio rialzato.

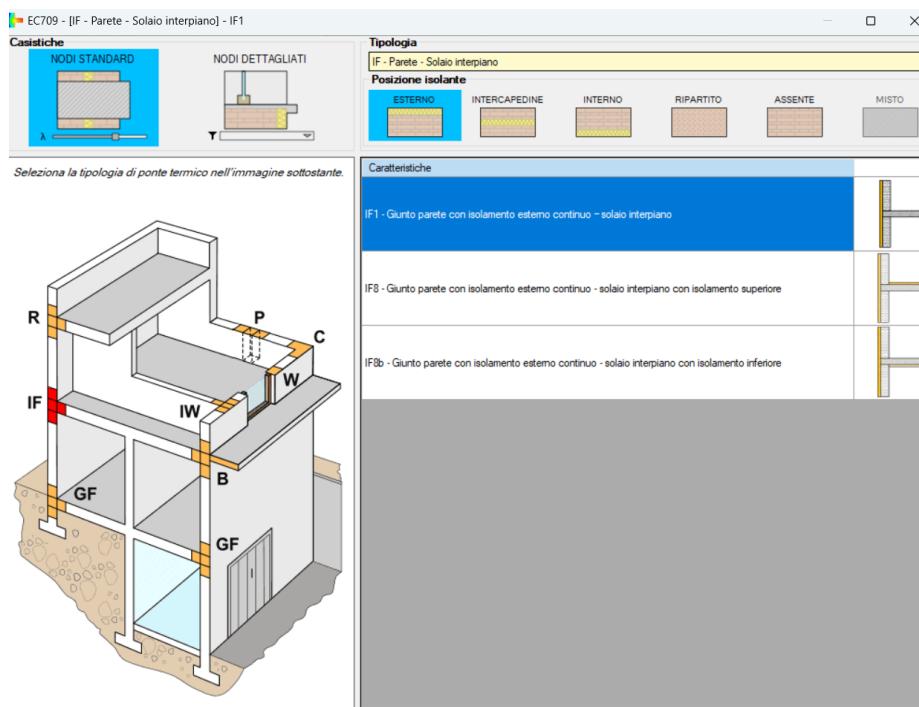


Figura 4-7: Finestra modellazione Ponti termici

INPUT GRAFICO

Sebbene nei paragrafi precedenti siano già stati riportati i risultati della modellazione in termini di trasmittanza del sistema a cappotto, è opportuno precisare che tali valori non sarebbero stati ottenibili senza una preventiva definizione delle superfici che il programma permette di effettuare per via grafica vettoriale. Fino a questo punto, infatti, non era stato ancora introdotto alcun dato di natura planimetrica o altimetrica relativo all'edificio oggetto di studio.

L'input grafico consiste nella ricostruzione tridimensionale dell'edificio e del contesto circostante, ottenuta a partire dall'importazione di una planimetria, appositamente prodotta, in formato *DWG* e sulla quale vengono tracciati con precisione tutti gli elementi dell'involucro edilizio, consentendo di ridurre sia i tempi di modellazione che gli errori

derivanti da una classica rappresentazione geometrica. Sempre all'interno di questa sezione è possibile inserire tutti gli elementi creati in precedenza nella sezione componenti involucro come: pavimenti, i soffitti, le coperture, i serramenti e i ponti termici.

Il software adottato offre inoltre la possibilità di integrare un'ortofoto derivata ad es. da Google Maps, tramite la quale è possibile delineare con buona precisione la presenza di edifici o ostacoli nell'intorno del fabbricato. Tale operazione insieme alla corretta definizione del Nord geografico, permette di delineare in linea di massima gli ingombri esercitati dalle strutture limitrofe al sito oggetto di studio per valutare gli ombreggiamenti che essi recano allo stesso.

Gli ombreggiamenti possono incidere in misura rilevante sui guadagni solari e sulla distribuzione dell'irraggiamento sulle superfici opache e trasparenti e a tal fine il programma ha mantenuto una sezione dedicata, che occorre lanciare per il relativo calcolo ogni qual volta si modifichi un paramento dell'input grafico.

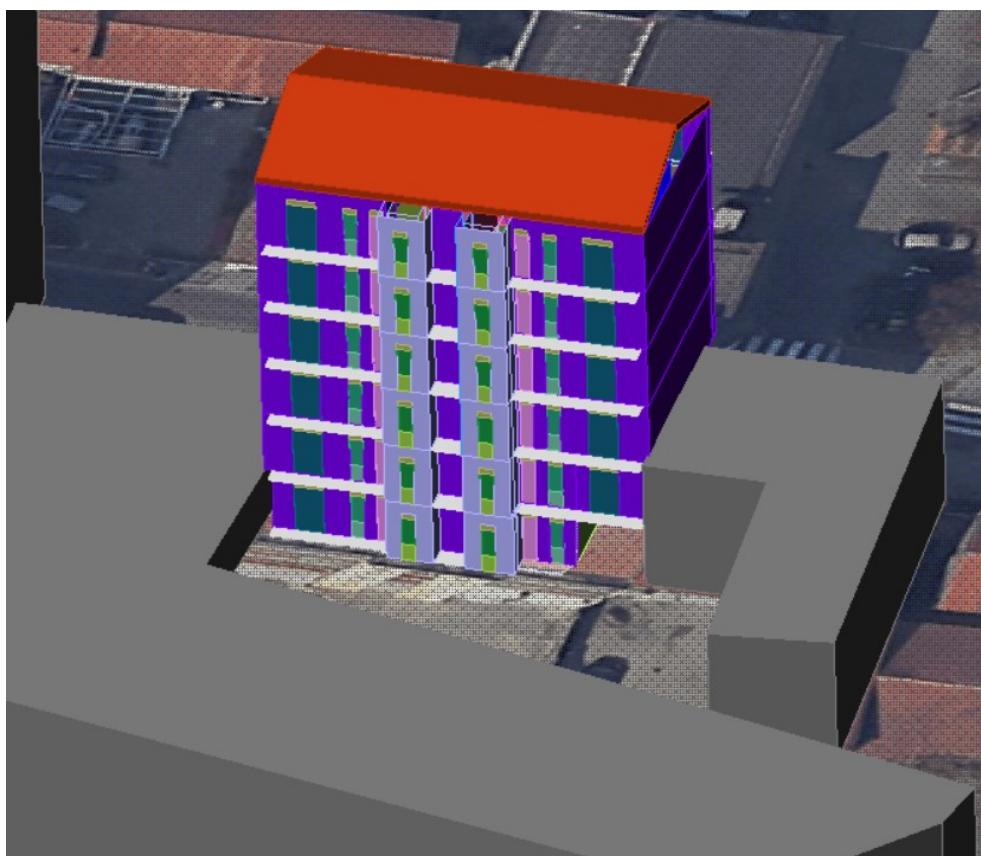


Figura 4-8: Vista 3D a fine modellazione SUD-EST

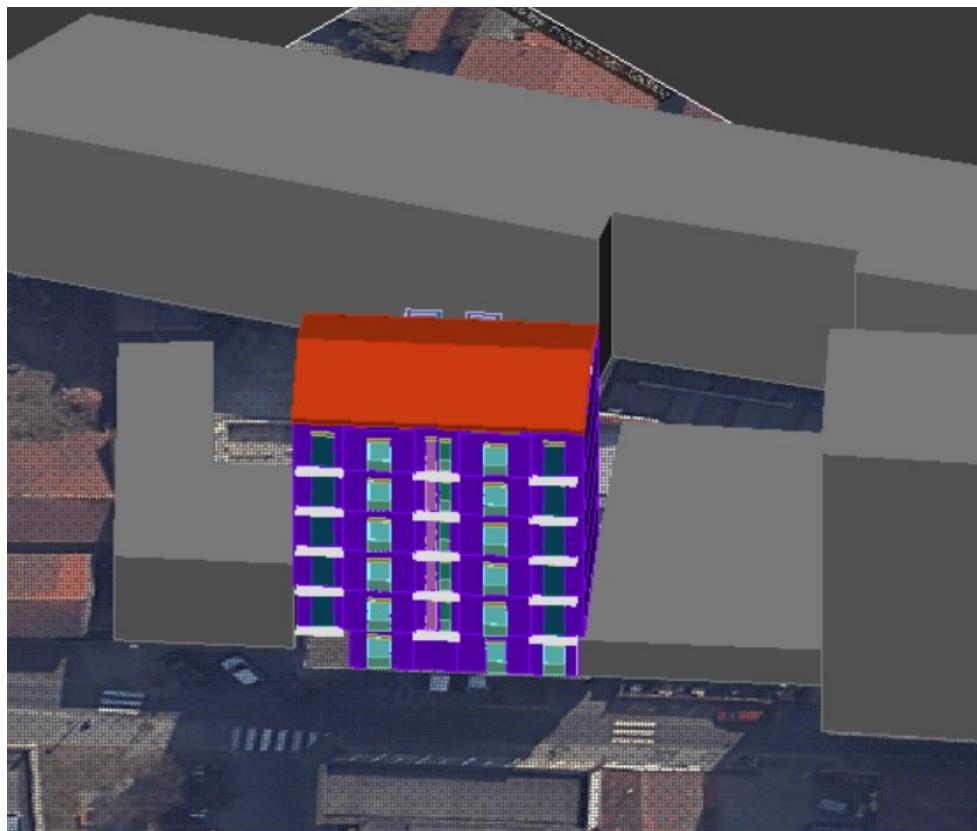


Figura 4-9: Vista 3D a fine modellazione NORD-OVEST

Completata la fase di modellazione grafica dell'edificio, è stato possibile procedere, sempre all'interno della sezione “Input Grafico”, alla definizione delle zone termiche e dei locali che compongono lo stabile. Tale operazione consente al software di differenziare le diverse aree funzionali dell'edificio in base ai parametri che associamo alla singola zona.

A tal fine, ogni appartamento è stato considerato come una singola zona climatica, alla quale è stata attribuita la corrispondente categoria d'uso secondo quanto previsto dal D.P.R. 412/93. Considerando tutte e 17 le unità immobiliari presenti adibite ad uso residenziale, ciascuna di esse è stata classificata come “E1 (1): edifici adibiti a residenza o assimilabili, quali abitazioni civili e rurali, collegi, conventi, case di pena e caserme, con occupazione continuativa, a carattere ordinario.”³²

³² 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 ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10.

4.2.2. Scelta critica in funzione del LCA

Al fine di valutare anche l'impatto ambientale degli interventi fin ora descritti, è stata condotta un'analisi LCA sui materiali selezionati.

In questo contesto, l'EPD risulta la certificazione di maggior rilevanza e trasparenza in quanto, riporta al suo interno un'analisi del ciclo di vita espressa attraverso dati sistematici e comparabili.

L'unità funzionale considerata in questo studio è un metro cubo [m^3] di materiale isolante avente una vita utile stimata pari a 50 anni mentre, i confini del sistema adottano l'approccio *dalla culla alla bara* ed includono le fasi di produzione, installazione, utilizzo e manutenzione, oltre alla gestione degli elementi a fine vita. In aggiunta è stato considerato il Modulo D, non sempre presente nelle dichiarazioni ambientali di prodotto, il quale identifica i possibili benefici ambientali derivanti dal riutilizzo, dal recupero e dal riciclo dei materiali a fine vita. Come previsto dalla norma UNI EN15804³³, tale modulo, potrà assumere valori negativi che indicano il beneficio ambientale degli impatti evitati. Per questo motivo i valori derivanti verranno scorporati dal totale delle emissioni.

La Figura 4-10 mostra uno schema complessivo del sistema descrivendo i processi inclusi.

³³ UNI EN 15804:2021 - Sostenibilità delle costruzioni - Dichiarazioni ambientali di prodotto - Regole quadro di sviluppo per categoria di prodotto.

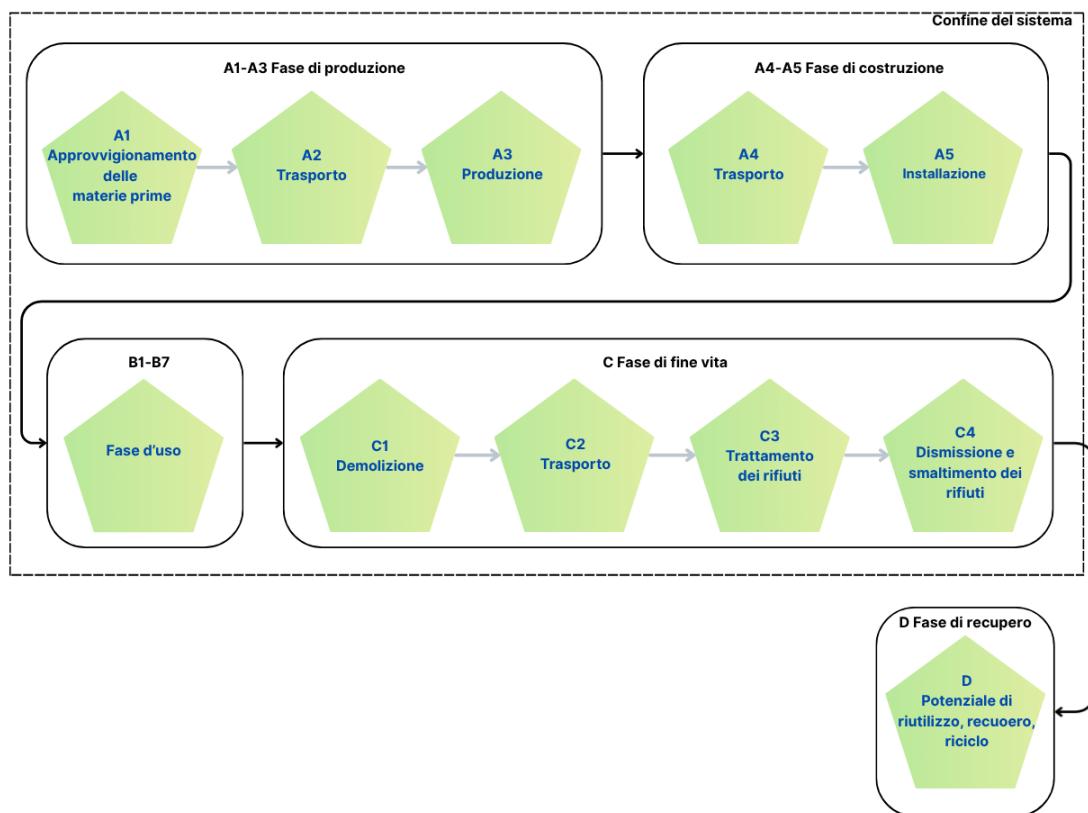


Figura 4-10: Confini del sistema per materiali isolanti tramite approccio "dalla culla alla bara"

Il sistema prodotto “*Materiale isolante*” considera ininfluente il contributo ambientale prodotto dalle fasi di installazione (A5) e di utilizzo (B1-B7). Poiché la posa non richiede l’ausilio di tecniche particolarmente complesse o di materiali ad elevato impatto, si reputano trascurabili i carichi ambientali da essa generati.

La fase di utilizzo, presenta notevoli variabilità strettamente legate al sito di installazione e al livello di manutenzione applicato. Essendo ogni materiale comparabile in termini di degrado nel tempo, verrà trascurato il contributo delle fasi B1-B7 che contribuiscono in egual modo al bilancio complessivo e quindi, in una comparazione, non influenzano il risultato.

In questa trattazione sono state raccolte e analizzate le certificazioni ambientali dei prodotti selezionati Tabella 4-6, provenienti sia direttamente dai siti ufficiali dei produttori, sia da Program Operator nazionali come EPD Italy, Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) o enti assimilabili.

Gli enti appena citati, si occupano della gestione, della verifica e della certificazione delle dichiarazioni ambientali, garantendone la conformità alle normative vigenti (UNI EN ISO 14025, UNI EN ISO 14040 e, più nello specifico per i prodotti da costruzione, la UNI EN 15804).

Materiale	N° REGISTRAZIONE	Marchio	Stabilimento produttivo	Distanza dal sito [km]
EPS	EPDITALYY0014	Isolconfor	Pordenone	460
Lana di roccia	EPD-IES-0012653	Rookwool	Croazia	750
Poliuretano	EPD-STF-20220150-CBC2	Stifferite	Padova	360
Resina fenolica	EPDITALY0321	O.Diena	Pavia	150
Canapa	EPD INTERNATIONAL	Ekolution	Repubblica Ceca	1085

Tabella 4-6: EPD selezionati

Prendendo in considerazione il “*Global Warming Potential*” o “*Potenziale di Riscaldamento Globale*” (GWP), rappresentante l’indicatore di maggior rilievo all’interno degli EPD, sono state eseguite delle considerazioni in termini di emissioni di CO₂ prodotta durante ogni fase del ciclo di vita di ogni materiale.

Materiale	A1-A3	C1	C2	C3	C4	D	Unità di Rif.
EPS	52,900	0,000	0,087	59,190	0,000	-32,130	1 m ³
Lana di roccia	2,420	0,000	0,007	0,000	0,033	-0,176	0,033 m ³
Poliuretano	11,800	0,094	0,025	8,820	0,064	-4,190	0,12 m ³
Resina fenolica	18,030	0,000	0,013	0,000	0,041	0,000	0,1 m ³
Canapa	-6,810	0,000	0,013	7,080	0,170	2,570	0,1 m ³

Tabella 4-7: Potenziale di riscaldamento globale GWP_{tot} [kgCO₂]

La prima fase dell’analisi consiste nel raggruppare i dati provenienti da ogni EPD in un unico gruppo di lavoro Tabella 4-7 dal quale, si riscontra immediatamente una discrepanza tra le varie unità di riferimento utilizzate nei singoli documenti.

Al fine di rendere i dati confrontabili, si è provveduto alla loro conversione nell'unità di riferimento principale ovvero, il metro cubo (m^3). Tale unità comune ci ha permesso di rappresentare in modo grafico gli impatti ambientali, in termini di CO_2 , dei vari prodotti.

Materiale	A1-A3	C1	C2	C3	C4	D	Unità di Rif.
EPS	52,900	0,000	0,087	59,190	0,000	-32,130	1 m^3
Lana di roccia	73,333	0,000	0,219	0,000	1,009	-5,333	1 m^3
Poliuretano	98,333	0,783	0,208	73,500	0,531	-34,917	1 m^3
Resina fenolica	180,300	0,000	0,126	0,000	0,406	0,000	1 m^3
Canapa	-68,100	0,000	0,125	70,800	1,700	25,700	1 m^3

Tabella 4-8: Potenziale di riscaldamento globale per m^3 di prodotto GWP_{tot} [$kgCO_2$]

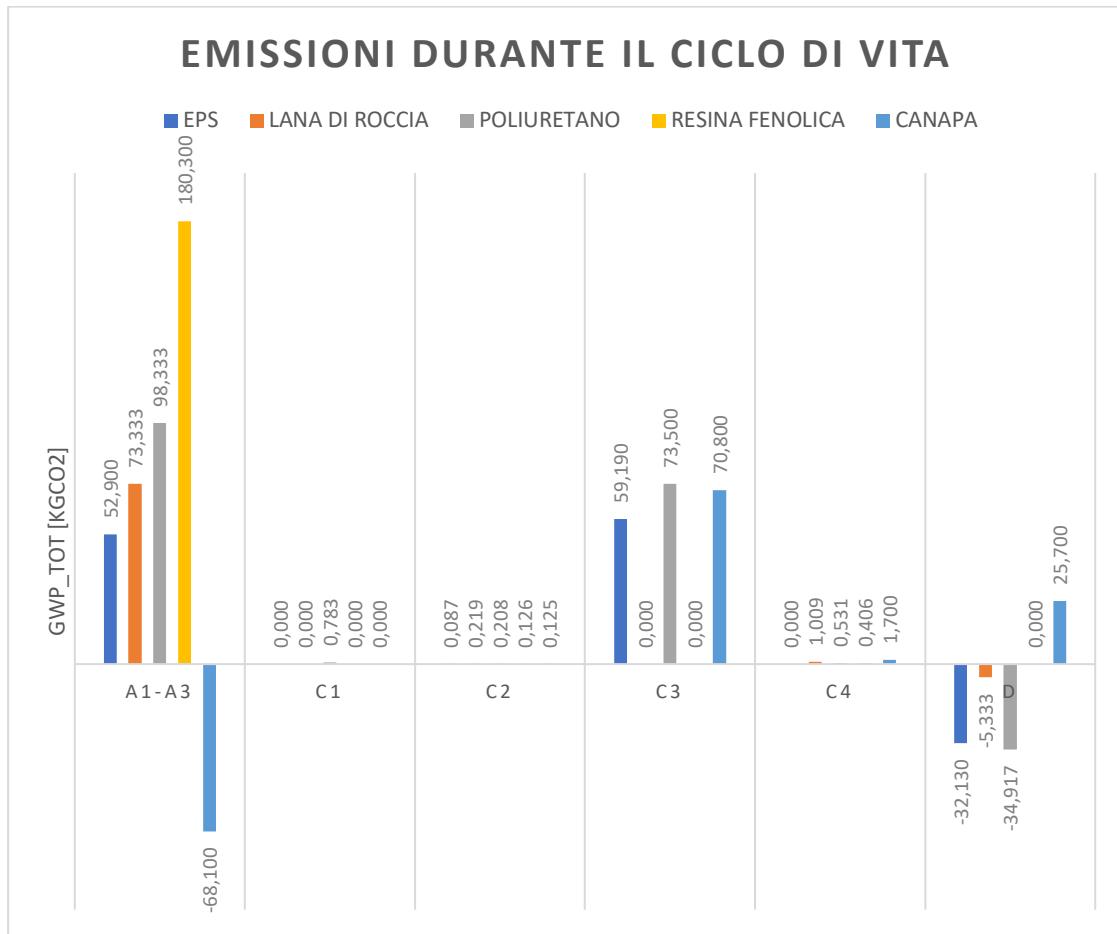


Figura 4-11: Emissioni per singola fase

Un elemento da non trascurare durante un'analisi del ciclo di vita è rappresentato dalla distanza di trasporto rispetto al sito di produzione. Questo elemento, all'interno delle dichiarazioni ambientali di prodotto, viene spesso utilizzato attraverso un valore forfettario pari a 50 km che tuttavia, non rispecchia la realtà del caso. Essendo una variabile importante nell'analisi delle emissioni e occorre che sia definita, sia in termini di distanza che di emissioni ad essa imputabili, prima di avere un quadro completo.

Nella presente trattazione, i siti di produzione presi in esame coincidono, per semplicità, con quelli riportati negli EPD. Le distanze ricavate, Tabella 4-6, risultano così inconfondibili e si prestano bene a raggiungere lo scopo. Tuttavia, non si esclude la presenza nel territorio di siti produttivi più prossimi all'edificio ed appartenenti a differenti marchi con analoghe prestazioni.



Figura 4-12: Posizione dei siti produttivi rispetto al sito di installazione

Il mezzo di trasporto preso in esame per questo studio è stato un autocarro con portata compresa tra le 14 e le 20 tonnellate, con motorizzazione Diesel Euro 6, ed in grado di trasportare tra i 40 e 80 m³ di materiale.

Per la stima delle emissioni prodotte da un autocarro Euro 6 è stata presa in considerazione la banca dati messa a disposizione dall’Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca ambientale³⁴ (ISPRA). Nello specifico è stata utilizzata la serie storica (dal 1990 al 2023) di emissioni, in Italia, prodotte da tutte le categorie di veicoli in funzione dei dati di percorrenza disponibili. Sono state escluse dalla trattazione ISPRA tutte le componenti di usura come gli pneumatici, i ferodi e l’asfalto.

Per contestualizzare maggiormente le emissioni all’attuale periodo storico, sono stati presi in considerazione solo i dati appartenenti alle serie 2021-2022-2023 per tutti i veicoli classificati come EURO 6 ed alimentati a gasolio e le percorrenze a loro associabili nei medesimi periodi:

2021		2022		2023	
[km]	[tCO ₂]	[km]	[tCO ₂]	[km]	[tCO ₂]
469 612 769	247 797,4	551 978 177	291.231,9	532 101 405	280 714,8
368 361 556	194 370,9	588 925 538	310 725,9	737 818 011	389 242,4

Tabella 4-9: Dati ISPRA - Emissioni dei trasporti



Figura 4-13: Serie ISPRA - Emissioni dei trasporti

³⁴ <https://emissioni.sina.isprambiente.it/inventario-nazionale/> Inventario Nazionale “Dati di Trasporto Stradale 1990-2023”.

Esprimendo le emissioni in kg di CO₂ e normalizzandole in funzione dell'unità di distanza definita (km), si ricava un valore pari a **0,528 kgCO₂/km**.

Utilizzando un dato medio per il volume di carico pari a 60 m³ per il mezzo considerato, il fattore di emissione appena definito ed i volumi in gioco, sono stati ricavati i valori presenti in Tabella 4-10.

Materiale	Volume [m ³]	Distanza da sito [km]	Volume di carico [m ³]	N° Mezzi	Emissioni Totali [kgCO ₂]	Emissioni Totali A4 [kgCO ₂ /m ³]
EPS	169,02	458	60	3	725,47	4,29
Lana di roccia	197,19	757		3	1199,09	6,08
Poliuretano	140,85	360		2	380,16	2,70
Resina fenolica	112,68	148		2	156,29	1,39
Canapa	253,53	1085		4	2291,52	9,04

Tabella 4-10: Emissioni in fase A4

La componente appena ottenuta va ad inserirsi tra le colonne A1-A3 e C1 della Tabella 4-8 ed insieme alle altre fasi del ciclo di vita contribuisce a produrre un totale di emissioni pari ai valori riportati in Tabella 4-11.

Materiale	Spess. [cm]	Emissioni [kgCO ₂ /m ³]	Emissioni TOT [kgCO ₂]	Incidenza fase A4 [%]
EPS	12	84,339	14255,033	5%
Lana di roccia	14	75,309	14850,193	8%
Poliuretano	10	141,137	19879,199	2%
Resina fenolica	8	182,219	20532,438	1%
Canapa	18	39,263	9954,464	23%

Tabella 4-11: Emissioni totali materiali isolanti

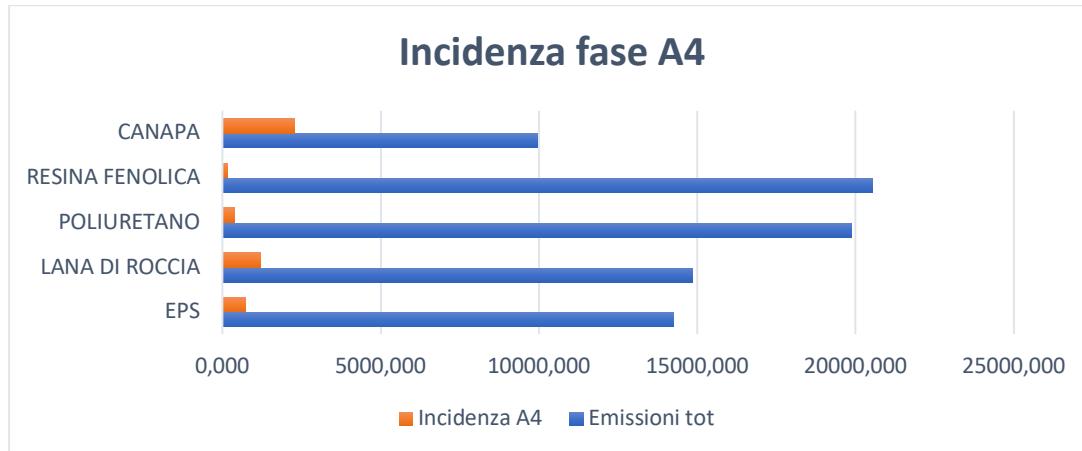


Figura 4-14: Incidenza fase A4

In conclusione, è possibile affermare che ogni prodotto analizzato si presta ad assolvere il compito per il quale è stato selezionato, presentando tuttavia variazioni significative in termini di dimensioni ed emissioni lungo tutto il ciclo di vita.

La canapa, pur identificandosi come il materiale più sostenibile tra quelli descritti, presenta prestazioni termiche non eccezionali, che ne comportano un aumento notevole degli spessori necessari a garantire gli obiettivi di progetto. Tali dimensioni, comportano notevoli complicazioni di installazione a causa del volume da movimentare in spazi ristretti come i ponteggi, inoltre, risultano di difficile applicazione in contesti esistenti a causa della riduzione di area disponibile, sulle superfici orizzontali esterne come balconi e terrazzi.

La Figura 4-11 evidenzia come la fase di produzione (A1-A3) dei pannelli in canapa sia caratterizzata da un assorbimento di CO₂, al contrario della fase di trattamento dei rifiuti (C3) che comporta l'emissione di CO₂ in quantità quasi equiparabile, definendo un bilancio tra tali fasi prossimo allo zero.

Risulta evidente come il bilancio emissivo complessivo del prodotto sia fortemente guidato dalle fasi di trasporto (A4) e di riciclo (D), le quali ne rendono favorevole l'installazione in località in cui sia possibile abbattere le distanze tra sito di installazione e sito di produzione, nonché in zone climatiche meno restrittive, in termini di isolamento termico, che ne permettano l'installazione in spessore inferiore.

Nel complesso, i pannelli in EPS e in lana di roccia risultano più equilibrati per il contesto di installazione, mantenendo spessori contenuti ed emissioni inferiori rispetto ai restanti prodotti analizzati.

CONSIDERAZIONI SULLA MOBILITA' ELETTRICA

Nel 2025 si potrebbe opinare il non utilizzo di tecnologie di trasporto elettrico, tuttavia, tale tipologia di veicoli è stata esclusa dalla trattazione in quanto la definizione delle loro emissioni risulta avere non poche variabili. Ad es. l'aleatorietà delle emissioni durante il processo di produzione e smaltimento/riciclo. In secondo luogo, l'impatto ambientali di tali veicoli varierebbe sensibilmente in funzione del contesto territoriale in cui vengono ricaricati.

Il mix energetico nazionale riportato in Figura 4-15, purtroppo si basa ancora molto su elementi non rinnovabili e ad alto impatto ambientale. Non essendo ancora stati pubblicati dati in merito al 2024, è stato analizzato il database ISPRA³⁵ relativo all'anno 2023 individuando un contributo delle fonti rinnovabili ancora al disotto del 50%. A queste informazioni si aggiunge un'evidente disomogeneità territoriale in termini di produzione di energia elettrica rinnovabile: regioni come la Valle d'Aosta, risalutano quasi esclusivamente *green*³⁶, mentre regioni come la Calabria, fanno ancora fatica a produrre energia rinnovabile e fanno affidamento su tecnologie termiche tradizionali³⁷ Figura 4-16.

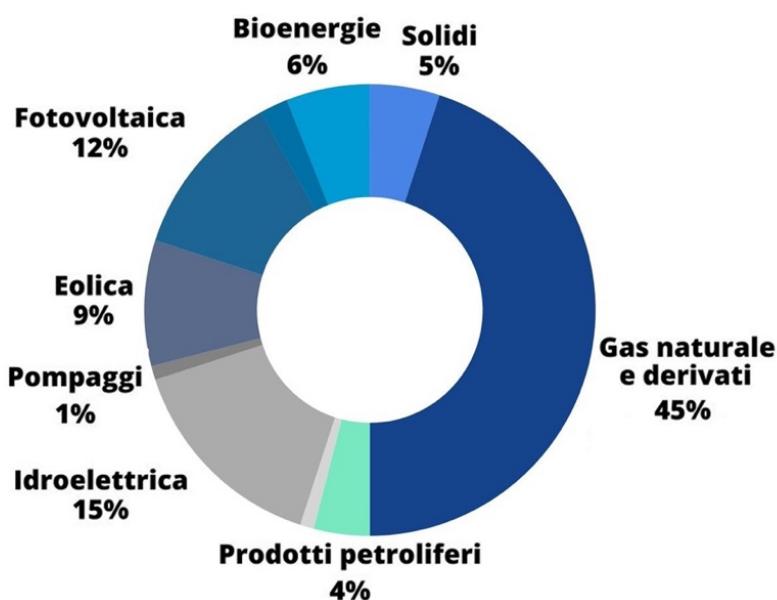


Figura 4-15: Mix energetico nazionale per la produzione di energia elettrica 2023

³⁵ <https://emissioni.sina.isprambiente.it/inventario-nazionale/> Inventario Nazionale “Fattori di emissione per la produzione ed il consumo di energia elettrica in Italia (1000-2023)”.

³⁶ Bilanci Energetici Regionali Valle d'Aosta – Allegato 1.

³⁷ Linee di Indirizzo per l'aggiornamento del Piano Energetico Ambientale regionale, oggi Piano Regionale Integrato Energia e Clima (PRIEC) della Regione Calabria.

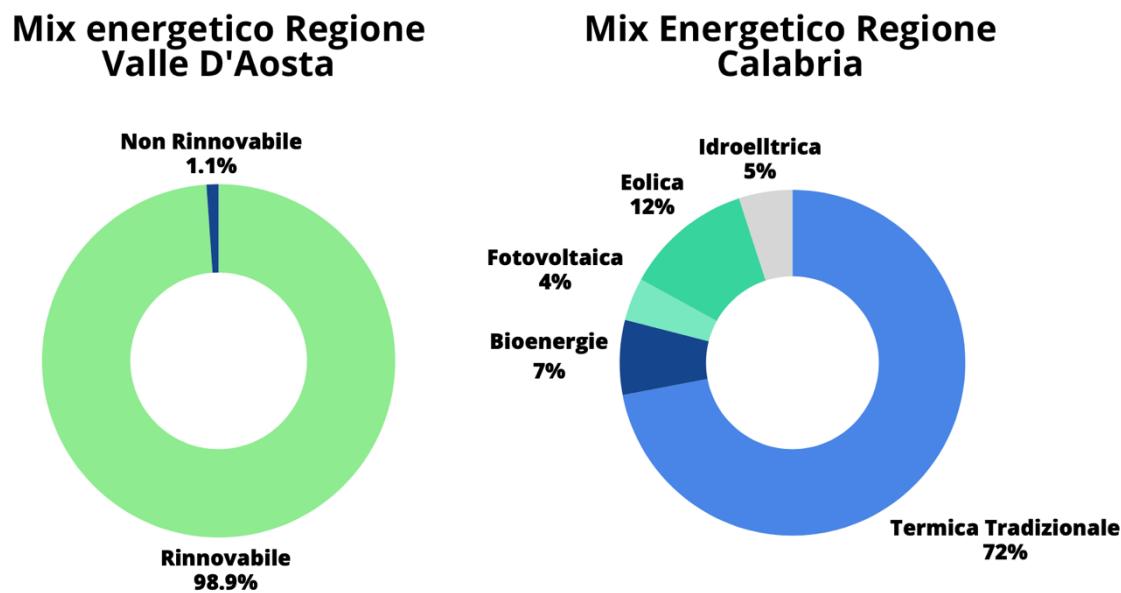


Figura 4-16: Mix Energetico Regioni Valle D'Aosta e Calabria

Tralasciando questo ultimo aspetto e avendo come riferimento il mix energetico nazionale, risulta evidente che le emissioni di un veicolo elettrico non posso essere considerate nulle ma, dai dati ISPRA riferiti al 2023, è possibile definire un fattore di emissione medio nell'intorno di 300 g di CO₂ per kWh erogato.

Considerando un veicolo elettrico di dimensioni e di portate analoghe all'autocarro precedentemente descritto, si può stimare un assorbimento medio del veicolo pari a 1,2 kWh/km che, applicato alle distanze in esame definisce i valori di emissioni riportati in Tabella 4-12.

Materiale	Emissioni [kgCO ₂ /m ³] Veic. Gasolio	Emissioni [kgCO ₂ /m ³] Veic. Elettrico
EPS	4,29	2,93
Lana di roccia	6,08	4,15
Poliuretano	2,70	1,84
Resina fenolica	1,39	0,95
Canapa	9,04	6,16

Tabella 4-12: Emissioni in categoria A4 Veicolo elettrico

Risulta evidente che, anche utilizzando un mezzo alimentato ad energia elettrica, non si avrebbe un guadagno sensibile in termini di emissioni nell'intero ciclo di vita. Tale risultato, insieme alle sue variabilità precedentemente descritte, hanno portato all'esclusione di questa tipologia di veicoli dalla presente analisi.

4.2.3. Ventilazione meccanica controllata

Prima di procedere alla progettazione dell’impianto di climatizzazione invernale ed estivo, è stato ritenuto opportuno soffermarsi sul concetto di comfort di un ambiente confinato. Tale concetto, come descritto dalla norma UNI EN 16798 (paragrafo 3.3), risulta essere, *Una condizione mentale di espressione della soddisfazione nei confronti dell’ambiente* e risultante dall’interazione tra fattori ambientali, termici, acustici, visivi e di qualità dell’aria.

Il caso studio di questa trattazione è rappresentato da un edificio residenziale esistente, per il quale si vuole garantire un livello di comfort in linea con il tipo di ambiente. Secondo la Tabella 3-3 questo si traduce in un IEQ (Indoor Environmental) in **categoria III** ovvero, un comfort ritenuto “Moderato” dall’utente finale.

Per raggiungere tale scopo, si è scelto di utilizzare il Metodo 3 descritto nel paragrafo 3.3 di questo documento. Questo metodo definisce dei tassi di ventilazione minimi da garantire per il raggiungimento della categoria selezionata.

Il metodo utilizza una formula binomia che tiene in considerazione sia gli apporti di inquinanti provenienti dagli occupanti sia delle emissioni prodotte dai composti organici e dagli arredi dell’abitazione tramite dei valori minimi riportati in Tabella 4-13.

$$q_{tot} = n * Q_p + A_R * Q_b$$

Categoria	Q_p [l/s * persona]	Q_b [l/s mq]
I	10	2
II	7	1,4
III	4	0,8
IV	2,5	0,6

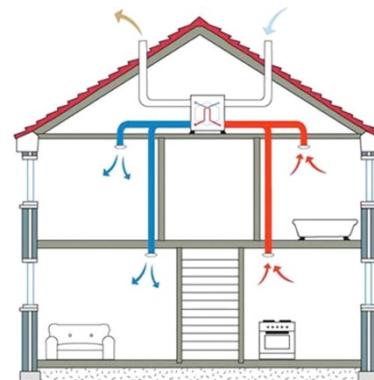
Tabella 4-13: Tassi di ventilazione minimi Metodo 3

Per il calcolo delle portate d'aria necessarie per singolo ambiente è stato opportuno suddividere ogni appartamento in quattro tipologie di zone di ventilazione:

- **Zona di immissione:** Ambiente in cui si ha solo presenza di bocchette di immissione. Zona associata ad ambienti nobili con permanenza di persone come le camere e i soggiorni.
- **Zona di estrazione:** Ambiente in cui si ha solo presenza di bocchette di estrazione. Zona associata ad ambienti con presenza di aria esausta come cucine e bagni.
- **Zone di transito:** ambiente privo di bocchette di ventilazione in quanto rappresentati da ambienti in cui non vi è permanenza di persone come corridoi e disimpegni.
- **Zone non ventilate:** Aree escluse dal calcolo a causa dell'assenza di persone come i ripostigli.

CAMERA	Immissione
SOGGIORNO	Immissione
CUCINA	Estrazione
BAGNO	Estrazione
RIPOSTIGLIO	-
DISIMPEGNO	Transito

Tabella 4-14: Divisione ambienti di ventilazione



Nei casi in cui gli ambienti cucina e soggiorno coincidono è stata associata una zona mista comprendente sia bocchette di immissione che di estrazione.

È importante evidenziare come la normativa preveda di utilizzare i tassi di ventilazione riportati in Tabella 4-13 solo agli ambienti nobili, caratterizzati dall'immissione di aria pulita, lasciano ai restanti ambienti il compito di estrarre l'aria viziata ed il bilanciamento delle portate.

Per gli ambienti di cucina e bagno si è deciso di garantire dei tassi di ventilazione minimi pari rispettivamente a 2 volumi/h e 6 volumi/h in modo da garantire un ricambio d'aria in grado di eliminare odori, umidità ed inquinanti in un lasso di tempo molto breve.

PARAMETRI E RISULTATI DI CALCOLO

APPARTAMENTO TIPO 1 (LATO OVEST)								
ZONA	AREA [m²]	VOL. [m³]	N° per.	Q_p [l/s per]	Q_b [l/s m²]	Q_{tot} [l/s]	Q_{tot} [m³/h]	Q_{tot} [vol/h]
Camera 1	18,66	55,98	2	4	0,8	22,93	82,54	1,47
Camera 2	11,80	35,40	1	4	0,8	13,44	48,38	1,37
Soggiorno	11,98	35,95	3	4	0,8	21,59	77,71	2,16
Cucina	7,99	23,96	-	-	-	13,31	47,93	2,00
Bagno	8,96	26,88	-	-	-	44,8	161,28	6,00
Ripostiglio	2,29	6,87	-	-	-	-	-	-
Disimpegno	7,01	21,03	-	-	-	-	-	-

APPARTAMENTO TIPO 2 (LATO NORD)								
ZONA	AREA [m²]	VOL. [m³]	N° per.	Q_p [l/s per]	Q_b [l/s m²]	Q_{tot} [l/s]	Q_{tot} [m³/h]	Q_{tot} [vol/h]
Camera	19,74	59,22	2	4	0,8	23,79	85,65	1,45
Soggiorno	11,05	33,16	2	4	0,8	16,84	60,63	1,83
Cucina	7,37	22,10	-	-	-	12,28	44,21	2,00
Bagno	5,37	16,11	-	-	-	26,85	96,66	6,00
Ripostiglio	2,25	6,75	-	-	-	-	-	-
Disimpegno	10,26	30,78	-	-	-	-	-	-

APPARTAMENTO TIPO 3 (LATO NORD)								
ZONA	AREA [m²]	VOL. [m³]	N° per.	Q_p [l/s per]	Q_b [l/s m²]	Q_{tot} [l/s]	Q_{tot} [m³/h]	Q_{tot} [vol/h]
Camera 1	18,83	56,49	2	4	0,8	23,06	83,03	1,47
Camera 2	15,76	47,28	1	4	0,8	16,61	59,79	1,26
Soggiorno	9,23	27,68	3	4	0,8	19,38	69,78	2,52
Cucina	6,15	18,46	-	-	-	25,63	92,28	5,00
Bagno	5,68	17,04	-	-	-	28,4	102,24	6,00
Ripostiglio	3,55	10,65	-	-	-	-	-	-
Disimpegno	10,02	30,06	-	-	-	-	-	-

APPARTAMENTO TERRA (LATO OVEST)								
ZONA	AREA [m ²]	VOL. [m ³]	N° per.	Q _p [l/s per]	Q _b [l/s m ²]	Q _{tot} [l/s]	Q _{tot} [m ³ /h]	Q _{tot} [vol/h]
Camera 1	19,27	57,81	2	4	0,8	23,42	84,30	1,46
Camera 2	19,44	58,32	2	4	0,8	23,55	84,79	1,45
Soggiorno	15,09	45,27	4	4	0,8	28,07	101,06	2,23
Cucina	15,09	45,27	-	-	-	37,73	135,81	3,00
Bagno	5,67	17,01	-	-	-	28,35	102,06	6,00
Ripostiglio	2,85	8,55	-	-	-	-	-	-
Disimpegno	11,08	33,24	-	-	-	-	-	-

APPARTAMENTO TERRA (LATO EST)								
ZONA	AREA [m ²]	VOL. [m ³]	N° per.	Q _p [l/s per]	Q _b [l/s m ²]	Q _{tot} [l/s]	Q _{tot} [m ³ /h]	Q _{tot} [vol/h]
Camera	17,19	51,57	2	4	0,8	21,75	78,31	1,52
Soggiorno	9,23	27,70	2	4	0,8	15,39	55,39	2,00
Cucina	6,16	18,47	-	-	-	10,26	36,94	2,00
Bagno	5,23	15,69	-	-	-	26,15	94,14	6,00
Disimpegno	8,66	25,98	-	-	-	-	-	-

PARAMETRI DI PROGETTO

APPARTAMENTO TIPO 1 (LATO OVEST)		
ZONA	Q_{tot} [mc/h]	Q_{tot}[vol/h]
Camera 1	85,00	4,56
Camera 2	50,00	4,24
Soggiorno	80,00	6,68
Cucina	48,00	6,01
Bagno	162,00	6,03

	Q_{tot} [mc/h]	DELTA
Immissione	215,00	2%
Estrazione	210,00	

APPARTAMENTO TIPO 2 (LATO NORD)		
ZONA	Q_{tot} [mc/h]	Q_{tot}[vol/h]
Camera	86,00	1,45
Soggiorno	61,00	1,84
Cucina	45,00	2,04
Bagno	97,00	6,02

	Q_{tot} [mc/h]	DELTA
Immissione	147,00	3%
Estrazione	142,00	

APPARTAMENTO TIPO 3 (LATO EST)		
ZONA	Q_{tot} [mc/h]	Q_{tot}[vol/h]
Camera 1	83,00	1,47
Camera 2	60,00	1,27
Soggiorno	70,00	2,53
Cucina	93,00	5,04
Bagno	103,00	6,04

	Q_{tot} [mc/h]	DELTA
Immissione	213,00	8%
Estrazione	196,00	

APPARTAMENTO TERRA (LATO OVEST)		
ZONA	Q_{tot} [mc/h]	Q_{tot}[vol/h]
Camera 1	85,00	1,47
Camera 2	85,00	1,46
Soggiorno	102,00	2,25
Cucina	136,00	3,00
Bagno	103,00	6,06

	Q_{tot} [mc/h]	DELTA
Immissione	272,00	12%
Estrazione	239,00	

APPARTAMENTO TERRA (LATO EST)		
ZONA	Q_{tot} [mc/h]	Q_{tot}[vol/h]
Camera	79,00	1,53
Soggiorno	56,00	2,02
Cucina	37,00	2,00
Bagno	95,00	6,05

	Q_{tot} [mc/h]	DELTA
Immissione	135,00	2%
Estrazione	132,00	

La modellazione di una VMC all'interno del software Edilclima prevede l'inserimento, all'interno della sezione "impianti", di un impianto di ventilazione meccanica controllata autonomo per singolo appartamento (Figura 4-17). In essa, non viene richiesto l'inserimento di una macchina specifica ma solo dei parametri di portate d'aria e di assorbimenti elettrici.

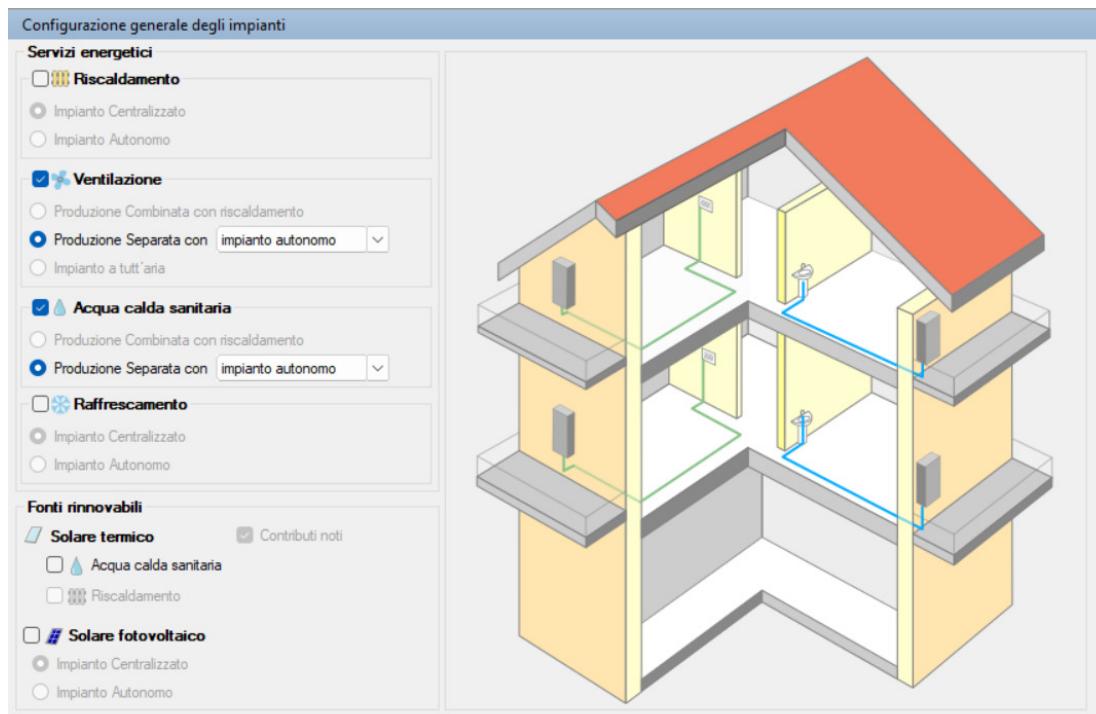


Figura 4-17: Impianto di ventilazione

Nei calcoli precedentemente esposti sono state evidenziate le portate d'aria necessarie per garantire il comfort previsto per la categoria III dell'IEQ. Tali valori, rappresentano i valori di progetto inseriti in fase di modellazione e con i quali è stata ricercata una macchina per poterne individuare gli assorbimenti ai vari regimi di funzionamento.

Le VMC oltre a garantire i ricambi d'aria di progetto integrano al loro interno un recuperatore di calore avente il compito di ridurre le dispersioni termiche associate alla ventilazione. Le tecnologie di recuperato attualmente in commercio sono di tipo:

- Termodinamico, ovvero in grado di attivare un ciclo termodinamico per aumentare notevolmente il proprio rendimento a fronte di un assorbimento elettrico non trascurabile.
- A flussi incrociati, ovvero in grado di far entrare in contatto i flussi entranti ed uscenti favorendo uno scambio termico tra di essi con rendimenti prossimi all'80% e mantenendo un assorbimento contenuto.

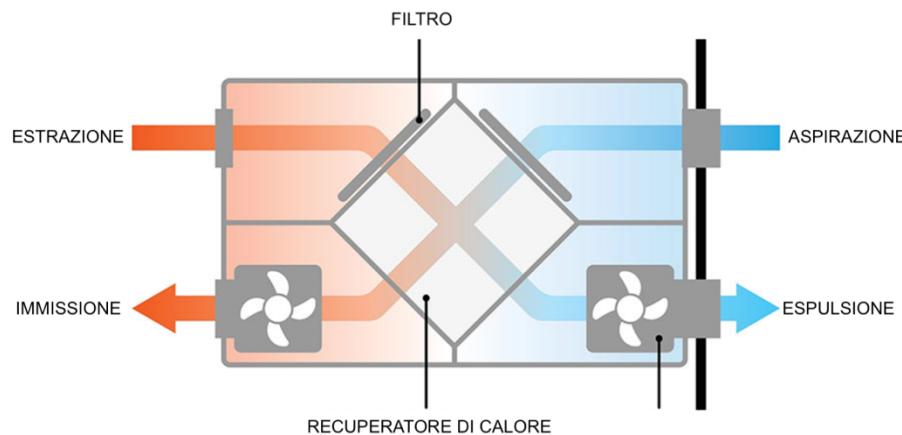


Figura 4-18: VMC con recuperatore di calore a flussi incrociati

Portata [m ³ /h]	Pressione [Pa]	Potenza [W]
200	75	56
250	120	106
250	150	113
250	200	151
300	100	133
300	150	146
300	200	153

Tabella 4-15: Assorbimenti VMC con scambiatore a flussi incrociati

Potenza dispersa per ventilazione [W]			
Appartamento	Pre-intervento	VMC a flussi incrociati	VMC termodinamica
PIANO TERRA TIPO 1	1427	242	0
PIANO TERRA TIPO 2	864	141	0
PIANO 1 TIPO 1	1296	228	0
PIANO 1 TIPO 2	972	158	0
PIANO 1 TIPO 3	1150	193	0
PIANO 2 TIPO 1	1296	228	0
PIANO 2 TIPO 2	972	158	0
PIANO 2 TIPO 3	1146	192	0
PIANO 3 TIPO 1	1297	228	0
PIANO 3 TIPO 2	972	158	0
PIANO 3 TIPO 3	1146	192	0
PIANO 4 TIPO 1	1296	228	0
PIANO 4 TIPO 2	972	158	0
PIANO 4 TIPO 3	1145	192	0
PIANO 5 TIPO 1	1296	228	0
PIANO 5 TIPO 2	972	158	0
PIANO 5 TIPO 3	1145	192	0
TOTALE	19364	3274	0

Tabella 4-16: Potenza termica dispersa per ventilazione

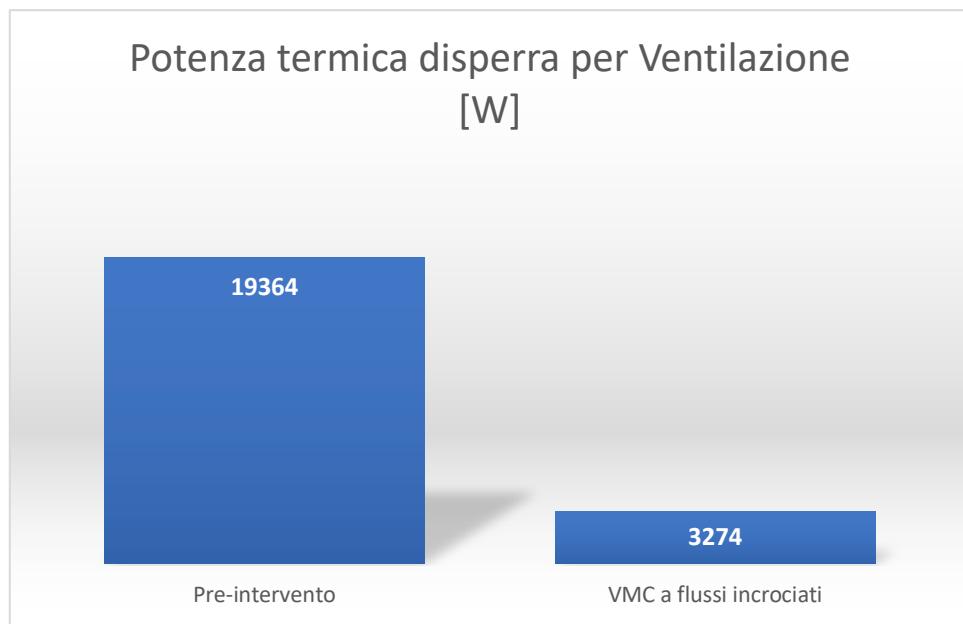


Figura 4-19: Potenza dispersa per ventilazione

4.2.4. Climatizzazione invernale ed estiva

Dopo aver concluso la modellazione energetica dell'involturo, indifferentemente dal tipo di sistema a cappotto scelto, si è analizzato un nuovo impianto di climatizzazione finalizzato all'eliminazione dei combustibili fossili e che potesse garantire il maggior comfort possibile.

Oltre agli adempimenti normativi, che si esprime prevalentemente in termini di prestazioni per il riscaldamento invernale, questa tesi ha voluto mettere al primo posto il benessere degli occupanti volendo garantire anche un adeguato raffrescamento durante le stagioni calde e un controllo sulla qualità dell'aria.

In tale contesto, il dimensionamento delle macchine è stato guidato dai fabbisogni estivi. I requisiti normativi sono passati in secondo piano rispetto alla climatizzazione nella bella stagione ma saranno comunque verificati prima di confermare la scelta progettuale.

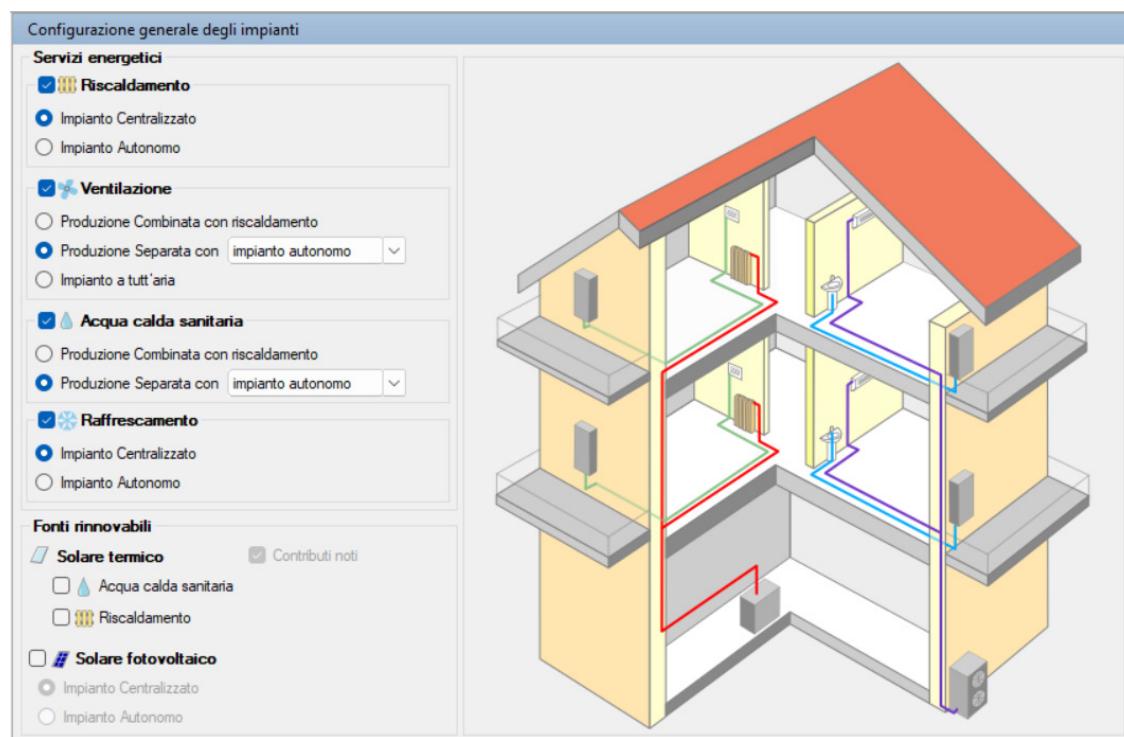


Figura 4-20: Impianto di climatizzazione

DEFINIZIONE DELLE POTENZE ESTIVE

Il Software edilclima, sempre all'interno del modulo EC700 sezione “Risultati Fabbricato”, riassume i fabbisogni dell'edificio sia in termini invernali che estivi, mettendo in evidenza tutte le tipologie di apporti, sia favorevoli che sfavorevoli.

La finestra “potenza estiva” rappresenta la linea guida da seguire per un corretto dimensionamento dell'impianto. Da un primo sguardo, Tabella 4-17, emerge un fabbisogno energetico prossimo ai 100 kW termici definiti nel giorno di massimo carico dell'edificio ovvero, il 5 agosto ore 19:00. Questo valore risulta talmente elevato da essere difficilmente compatibile con le macchine termiche riservate al mondo residenziale che, inoltre, comporterebbero consumi elettrici significativi.

Carichi termici nell'ora di massimo carico dell'edificio Ante intervento							
Appartamento	Irrag.	Trasm.	Vent.	Interni	Sensibile globale	Latente globale	Globale
	Q _{Irr} [W]	Q _{Tr} [W]	Q _v [W]	Q _c [W]	Q _{gl,sen} [W]	Q _{gl,lat} [W]	Q _{gl} [W]
PIANO TERRA	154	3001	1437	3316	6320	1592	7912
PIANO TERRA	82	1647	755	1618	3310	791	4102
PIANO 1 TIPO 1	155	2478	1116	2619	5118	1251	6369
PIANO 1 TIPO 2	158	2254	911	2005	4364	964	5329
PIANO 1 TIPO 3	160	2517	1125	2466	5057	1210	6268
PIANO 2 TIPO 1	159	2478	1116	2619	5122	1251	6375
PIANO 2 TIPO 2	176	2306	911	1747	4252	889	5140
PIANO 2 TIPO 3	164	2394	1118	2695	5097	1275	6371
PIANO 3 TIPO 1	166	2479	1116	2620	5130	1251	6381
PIANO 3 TIPO 2	178	2306	911	1747	4253	889	5142
PIANO 3 TIPO 3	168	2394	1119	2566	5010	1237	6246
PIANO 4 TIPO 1	169	2480	1116	2619	5134	1251	6384
PIANO 4 TIPO 2	180	2304	911	1721	4235	882	5116
PIANO 4 TIPO 3	170	2397	1118	2652	5077	1262	6339
PIANO 5 TIPO 1	215	1875	1116	2621	4576	1251	5828
PIANO 5 TIPO 2	197	1890	911	1747	3856	889	4746
PIANO 5 TIPO 3	217	1786	1118	2652	4513	1262	5771
TOTALE	2868	38986	17925	40030	80424	19397	99819

Tabella 4-17: Carichi termici in raffrescamento Pre-Intervento

Al fine di ottenere una rappresentazione più realistica e dettagliata dell’edificio, è stato necessario affinare ulteriormente il modello energetico, attraverso l’inserimento di:

- Opportuni sistemi per la schermatura solare delle superfici vetrate esposte a SUD, attraverso dei tendaggi che permettono di ridurre gli apporti solari;
- Una caratterizzazione dettagliata dei profili di occupazione per singolo appartamento in modo da identificare il più realisticamente possibile i carichi variabili, dovuti ad agenti interni, durante il corso delle giornate. Non avendo dati in merito, l’edificio è stato suddiviso, il più equamente possibile, tra nuclei familiari composti principalmente da pensionati e nuclei familiari composti da lavoratori. I primi tendono ad avere una permanenza stabile all’interno dell’immobile ed incideranno molto sui carichi interni mentre, i secondi tendono a stanziare in orario serale e tenderanno a ridurre i fabbisogni complessivi.
- Un rendimento del recuperatore di calore, associato alla zona, pari a quello della VMC selezionata nel precedente capitolo (4.2.3) e corrispondente all’81 %. In questo modo si va a limitare il carico termico disperso per ventilazione, elemento dipendente dalle caratteristiche del fabbricato.

L’inserimento di questo rendimento sul software edilclima risulta non intuitivo ed iterativo in quanto, non essendo direttamente collegato alla macchina installata, sarà opportuno provvedere alla modifica di tale valore nelle singole zone ogni qual volta si voglia modificare la VMC.

Carichi termici nell'ora di massimo carico dell'edificio								
Appartamento	Irrag.	Trasm.	Vent.	Interni	eff. Dinam.	Sensibile globale	Latente globale	Globale
	Q _{Irr} [W]	Q _{Fr} [W]	Q _v [W]	Q _c [W]	Altri eff. [W]	Q _{gl,sen} [W]	Q _{gl,lat} [W]	Q _{gl} [W]
PIANO TERRA	0	-46	2124	1891	-349	1279	2339	3618
PIANO TERRA	0	-28	1054	895	-153	614	1153	1767
PIANO 1 TIPO 1	0	4	1689	1682	-186	1400	1789	3190
PIANO 1 TIPO 2	0	62	1142	0	31	148	1088	1236
PIANO 1 TIPO 3	0	14	1674	1372	-103	1136	1823	2958
PIANO 2 TIPO 1	0	-5	1691	1773	-216	1469	1776	3244
PIANO 2 TIPO 2	0	-37	1182	1342	-195	1041	1251	2293
PIANO 2 TIPO 3	0	32	1677	1363	-74	1178	1823	3001
PIANO 3 TIPO 1	0	22	1681	1385	-93	1164	1830	2994
PIANO 3 TIPO 2	0	-37	1182	1342	-195	1041	1251	2293
PIANO 3 TIPO 3	0	29	1677	1364	-74	1176	1823	2998
PIANO 4 TIPO 1	0	19	1681	1384	-92	1162	1405	2567
PIANO 4 TIPO 2	0	-37	1182	1342	-195	1041	1676	2717
PIANO 4 TIPO 3	0	28	1677	1363	-73	1175	1823	2997
PIANO 5 TIPO 1	0	36	1676	1384	-168	1103	1824	2927
PIANO 5 TIPO 2	0	0	1175	1342	-304	969	1244	2213
PIANO 5 TIPO 3	0	42	1673	1363	-143	1120	1817	2936
TOTALE	0	98	25837	22587	-2582	18216	27735	45951

Tabella 4-18: Carichi termici in raffrescamento nell'ora di massimo carico post-intervento

L'analisi appena condotta ha dimostrato come un progressivo approfondimento del modello comporti una notevole diminuzione delle potenze termiche previste per il soddisfacimento dei fabbisogni complessivi. Nel caso in esame, si è giunti ad una riduzione di oltre il 50%.

DEFINIZIONE DEL SISTEMA DI EMISSIONE

La realizzazione di un impianto bimodale, ovvero in grado di operare sia in riscaldamento che in raffrescamento, richiede in primo luogo la definizione di un sistema di emissione adeguato allo scopo e che risulti il più possibile compatibile con la rete di distribuzione preesistente.

L'edificio oggetto di studio, in condizioni pre-intervento risulta caratterizzato da un sistema di emissione a radiatori tradizionali, i quali non risultano idonei alla climatizzazione estiva e richiedono temperature di mandata elevate, tra i 50 e gli 80 °C. Il sistema che maggiormente rispecchiava le caratteristiche richieste è risultato quello a ventilconvettori, i quali possono operare in entrambi i regimi e richiedono temperature di mandata intermedie, tra i 40 e i 45 °C in riscaldamento Figura 4-22 e tra i 7 e i 10 °C in raffrescamento Figura 4-22.

L'adozione di questa soluzione permette di minimizzare gli interventi sulla rete di distribuzione esistente che dovrà essere solo coibentata e adeguata al funzionamento in estivo. Tale adeguamento risulta facilitato dalle lavorazioni sulle facciate in quanto sarà possibile accedere alle colonne montanti dall'esterno dell'edificio limitando i lavori edili nelle singole abitazioni.

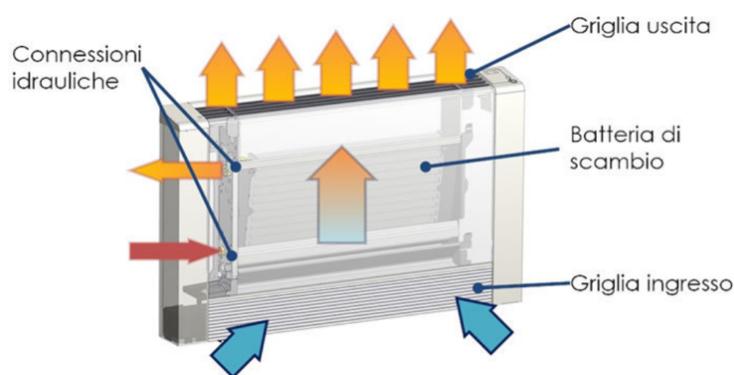


Figura 4-21: Funzionamento estivo Ventilconvettore

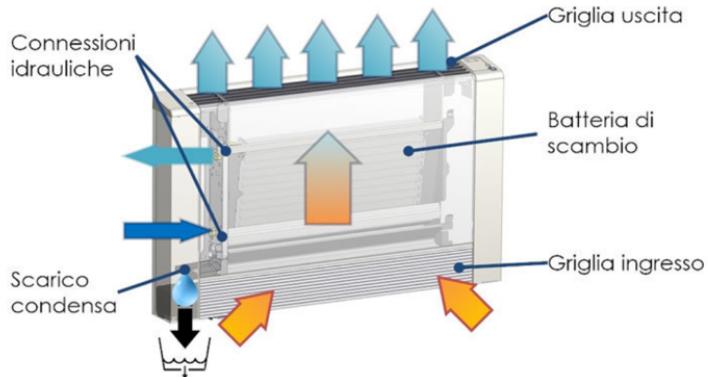


Figura 4-22: Funzionamento invernale Ventilconvettore

Un sistema di emissione con ventilconvettori comporta inevitabilmente un assorbimento elettrico necessario al motore del ventilatore e alla gestione delle centraline di ogni unità. Tale assorbimento è funzione delle caratteristiche tecniche della macchina selezionata e del numero installato.

Per garantire un comfort omogeneo in tutto l'appartamento, in ambito residenziale, si prevede generalmente l'installazione di un'unità per ciascun locale principale ed una per i bagni, anche se l'uso estivo è ritenuto improbabile.

Nel presente caso studio, la stima degli assorbimenti è stata condotta assumendo un ventilconvettore di riferimento aventi le caratteristiche riportate in Tabella 4-19. In funzione delle potenze frigorifere erogabili, sono state scelte taglie e regimi di funzionamento differenti definendo quindi il numero ottimale di unità e l'assorbimento ad esse imputabili per singolo appartamento.

Raffrescamento con acqua ingresso a 7°C uscita a 12°C			
Regime di funzionamento	Minimo	Medio	Massimo
Potenza frigorifera [kW]	0,74	1,24	1,61
Assorbimento elettrico [W]	6	11	19

Tabella 4-19: Dati tecnici ventilconvettori in raffrescamento

Riscaldamento con acqua ingresso a 45°C uscita a 40°C			
Regime di funzionamento	Minimo	Medio	Massimo
Potenza Termica[kW]	0,8	1,4	1,88
Assorbimento elettrico [w]	6	11	19

Tabella 4-20: Dati tecnici ventilconvettori in riscaldamento

Al fine di garantire il più alto livello di comfort possibile, si è ipotizzato di non impiegare il regime massimo di funzionamento in modo da contenere i livelli sonori emessi dalle apparecchiature.

Nella Tabella 4-21 sono riportati i risultati ottenuti in termini di assorbimenti elettrici. Essi risultano particolarmente bassi rispetto al passato grazie all'introduzione dei nuovi motori brushless che, sfruttando la tecnologia dei rotori a magneti permanenti³⁸, eliminano le componenti in contatto diretto con l'albero rotante diminuendo notevolmente la rumorosità, gli attriti e, conseguentemente, gli assorbimenti elettrici.

Appartamento	n° unità regime minimo	n° unità regime medio	Pot. frigorifera [W]	Ass. Elettrico [W]
PIANO TERRA 1	2	2	3960	34
PIANO TERRA 2	3	-	2220	18
PIANO 1 TIPO 1	3	1	3460	29
PIANO 1 TIPO 2	3	-	2220	18
PIANO 1 TIPO 3	4	-	2960	24
PIANO 2 TIPO 1	3	1	3460	29
PIANO 2 TIPO 2	3	-	2220	18
PIANO 2 TIPO 3	4	-	2960	24
PIANO 3 TIPO 1	3	1	3460	29
PIANO 3 TIPO 2	3	-	2220	18
PIANO 3 TIPO 3	4	-	2960	24
PIANO 4 TIPO 1	3	1	3460	29
PIANO 4 TIPO 2	3	-	2220	18
PIANO 4 TIPO 3	4	-	2960	24
PIANO 5 TIPO 1	3	1	3460	29
PIANO 5 TIPO 2	3	-	2220	18
PIANO 5 TIPO 3	4	-	2960	24

Tabella 4-21: Assorbimenti elettrici del sistema di emissione

³⁸ www.Wikipedia.org – “I magneti permanenti sono posizionati sul rotore e sono realizzati con materiali che danno un'inerzia rotorica molto bassa, il che consente un controllo preciso sia in velocità a regime sia in accelerazione”.

DEFINIZIONE DEL GENERATORE

I risultati ottenuti in Tabella 4-18 definiscono i fabbisogni termici dell’edificio durante l’esercizio in raffrescamento. Al fine di soddisfare tali richieste, si è previsto l’impiego di una pompa di calore reversibile che, operando a temperature medio-basse, risulta perfettamente compatibile con il sistema di emissione appena individuato.

Non essendo la macchina termica la protagonista della trattazione, la sua selezione è stata condotta all’interno dell’archivio edilclima, ricercando la potenza frigorifera richiesta (maggiore di 46 kW) fra quelle disponibili.

Come risultato di tale ricerca, si è optato per l’installazione di due Pompe di Calore aria-acqua, ognuna avente una potenza frigorifera di 26,6 kW ed un indice di prestazione energetica (EER) variabile tra 2,32 e 5,11. Proprio questa variabilità di EER (Tabella 4-22) permette l’ottimizzazione degli assorbimenti nelle ore e nelle stagioni di minor carico.

$$EER = \frac{\text{Potenza frigorifera erogata [kW]}}{\text{Potenza elettrica assorbita [kW]}}$$

Fattore di carico Fk	100%	75%	50%	25%
EER	2,32	3,2	4,07	5,11

Tabella 4-22: Prestazioni pompa di calore in raffrescamento

Una volta definita l’unità di climatizzazione invernale, si è condotta una verifica di congruenza prestazionale anche per l’esercizio in riscaldamento. L’edificio, nella stagione invernale, necessita di un fabbisogno termico pari a circa 40 kW il quale, risulta ampliamente soddisfatto dalle pompe di calore selezionate aventi le caratteristiche in riscaldamento, per singola macchina, riportate in Tabella 4-23 e in Tabella 4-24.

T_{est}	T_{acqua prodotta}		
	35	45	55
-7	18,10	17,70	17,20
2	23,9	23,00	21,70
7	29,40	28,20	26,60
12	32,60	31,20	29,20

Tabella 4-23: Potenza utile in riscaldamento Pu [kW]

T_{est}	T_{acqua prodotta}		
	35	45	55
-7	2,27	1,87	1,51
2	2,93	2,37	1,85
7	3,56	2,88	2,25
12	3,91	3,15	2,45

Tabella 4-24: Coefficiente di prestazione COP

La Figura 4-23 riporta la ripartizione dei carichi tra i generatori per il raggiungimento dei fabbisogni durante tutti i mesi dell'anno. Analizzando il grafico, si può osservare come la seconda macchina entri in esercizio solo nei mesi più freddi a causa della temperatura inferiore della sorgente fredda. In tale condizione, le prestazioni della singola macchina scendono secondo la Tabella 4-23.

È opportuno evidenziare la non perfetta rappresentatività della Figura 4-23 in quanto, non riproduce in maniera realistica il comportamento dei generatori. Le unità selezionate, come ormai la maggior parte di quelle commercializzate, sono dotate di tecnologia inverter che permette la modulazione in potenza in funzione delle reali condizioni di carico. Pertanto, il funzionamento delle due pompe di calore sarà molto più equilibrato e mirato ad ottenere la maggior efficienza possibile.

Risulta evidente, tuttavia, come l'utilizzo in riscaldamento delle due macchine selezionate risulti un abbondante sovradimensionamento dell'impianto. Tale condizione non pregiudica né i consumi energetici né le emissioni dell'edificio e pertanto risulta perfettamente in linea con gli obiettivi della trattazione.

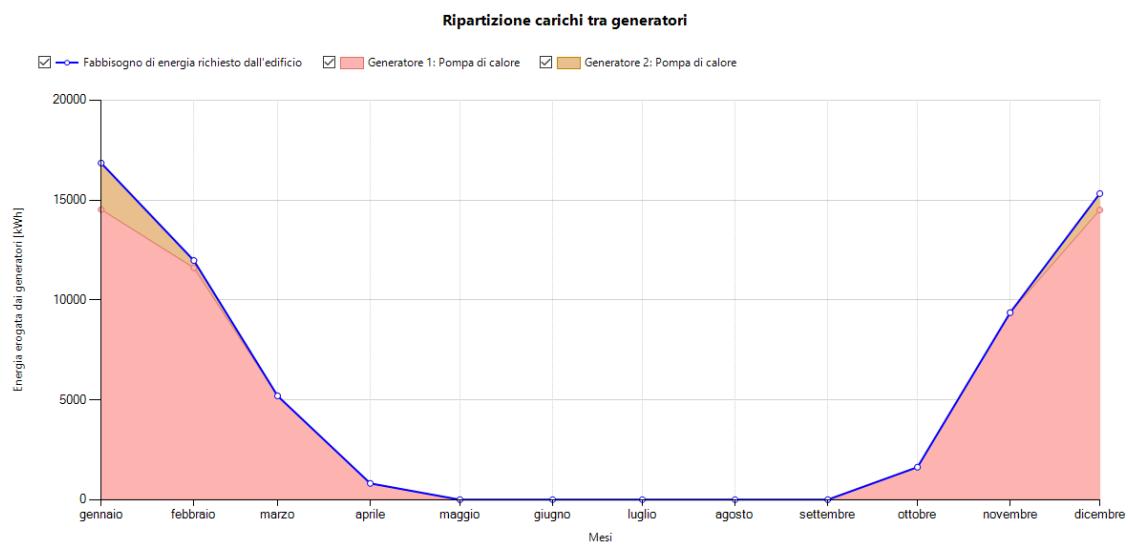


Figura 4-23: Ripartizione dei carichi tra generatori

4.2.5. Impianto fotovoltaico

Come ultimo aspetto da trattare, si è ritenuto opportuno introdurre il concetto di autoproduzione energetica attraverso l'installazione di un impianto fotovoltaico sul tetto dell'edificio oggetto di studio. Tale intervento ha l'obbiettivo di ridurre le richieste energetiche sulla rete nazionale e contestualmente le emissioni ad essa associate, e a fornire un risparmio economico per gli utenti finali.

Per verificare la fattibilità dell'intervento si è in primo luogo, analizzata la tipologia di copertura dell'immobile, che si presenta come una classica copertura a falde inclinate per un angolo di circa 25° ed aventi superficie pari a circa 135 m² per falda. Successivamente, è stato individuato un pannello fotovoltaico di riferimento caratterizzato da un'area di circa 2 m² e una potenza di 450 W (Tabella 4-25).

Incrociando i due dati dimensionali, si stima la possibile installazione di circa 60 pannelli per falda, corrispondenti ad una potenza di picco pari a circa 27 kW sempre per singola falda.

POTENZA [W]	LARGHEZZA [m]	LUNGHEZZA [m]	AREA [m ²]
450,00	1,13	1,72	1,95

Tabella 4-25: Dati modulo fotovoltaico di riferimento

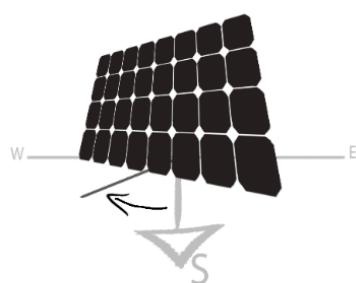
Al fine del raggiungimento degli obiettivi di questa trattazione, non è stato necessario scendere nel dettaglio della progettazione dell'impianto fotovoltaico ma ci si è limitati all'inserimento dei dati di producibilità richiesti dal software di calcolo. Tale producibilità è stata ricavata sfruttando il Sistema Informativo Geografico Fotovoltaico (PVGIS – *Photovoltaic Geographical Information System*)³⁹ sviluppato dalla Commissione Europea ed in grado di fornire informazioni sull'irradiazione solare e sulle prestazioni degli impianti fotovoltaici in qualsiasi località del globo, ad eccezione dei poli.

³⁹ www.commission.europa.eu - https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en

Inserendo nell'applicativo i dati della località, della potenza installati, dell'inclinazione dei moduli rispetto all'orizzontale e rispetto al sud (Azimut), esso restituisce i dati riportati in Tabella 4-26.

MESE	FALDA N-O		FALDA S-E	
	AZIMUT	ENERGIA PRODOTTA [kWh]	AZIMUT	ENERGIA PRODOTTA [kWh]
Gennaio	135°	480,6	-45°	1733,4
Febbraio		874,8		1989,9
Marzo		1771,2		2851,2
Aprile		2421,9		3156,3
Maggio		3096,9		3534,3
Giugno		3391,2		3717,9
Luglio		3545,1		4017,6
Agosto		2918,7		3645
Settembre		2003,4		2867,4
Ottobre		1155,6		2081,7
Novembre		550,8		1509,3
Dicembre		378		1498,5
TOTALI		22588,2		32602,5

Tabella 4-26: Producibilità mensile da PVGIS



Azimut inteso positivo se la perpendicolare al pannello è orientata verso OVEST.

Come si evince dalla Tabella 4-26 la produzione dell'esposizione NORD-OVEST risulta nettamente inferiore rispetto alla falda complementare. Pertanto, a livello di costi-benefici, va preferita l'installazione di soli 27 kW applicabili sulla falda SUD-OVEST.

Al fine di considerare gli apporti di energia autoprodotta nel modello energetico, una volta determinata la producibilità tramite PVGIS, sarà sufficiente inserire tali dati all'interno della scheda “impianto fotovoltaico” del software EC700. Nella medesima schermata e anche possibile indicare i servizi che sfrutteranno l'energia prodotta dall'impianto. Nel caso in esame verranno inseriti tutti i servizi comuni agli alloggi quali, climatizzazione invernale, estiva e ventilazione meccanica controllata.

La Tabella 4-27 riporta evidenzia il sostegno che l'impianto fotovoltaico apporta al bilancio energetico dell'edificio.

	Prodotta	Usata per il riscaldamento	Usata per il raffrescamento	Usata per la ventilazione	Surplus immesso in rete
Mese	$Q_{el,prod,fv}$ [kWh]	$Q_{el,used,H}$ [kWh]	$Q_{el,used,C}$ [kWh]	$Q_{el,used,V}$ [kWh]	$Q_{el,surplus}$ [kWh]
Gennaio	1733	1536	0	197	0
Febbraio	1990	1691	0	298	0
Marzo	2851	1623	0	840	389
Aprile	3156	261	622	812	1460
Maggio	3534	0	1754	840	940
Giugno	3718	0	2620	812	285
Luglio	4018	0	3098	840	80
Agosto	3645	0	2809	836	0
Settembre	2867	0	1743	812	312
Ottobre	2082	496	543	840	203
Novembre	1509	1164	0	345	0
Dicembre	1499	1304	0	195	0
Totale	32602	8075	13189	7667	3669

Tabella 4-27: Distribuzione dell'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico

5

Discussione dei Risultati



L'analisi fin ora condotta ha permesso di definire una metodologia sistematica per la riqualificazione energetica del patrimonio immobiliare nazionale, attraverso un approccio integrato che possa considerare componenti edilizie, tecnologiche e che risulti in grado di fornire il massimo comfort all'utente finale.

La modellazione energetica condotta mediante il software Edilclima ha permesso di valutare gli aspetti cumulativi dei vari interventi proposti, restituendo un indice di prestazione energetica in piena Classe A4 (Figura 5-1). Tale risultato, se paragonato alla condizione iniziale in Classe F (Figura 4-1), sembra definire l'efficacia della metodologia proposta.

Tuttavia, la sola classe energetica non è sufficiente a garantire la sostenibilità dell'edificio sul lungo periodo. In questo capitolo si esaminerà nel dettaglio l'efficacia dei singoli interventi e le conseguenze che essi apportano.

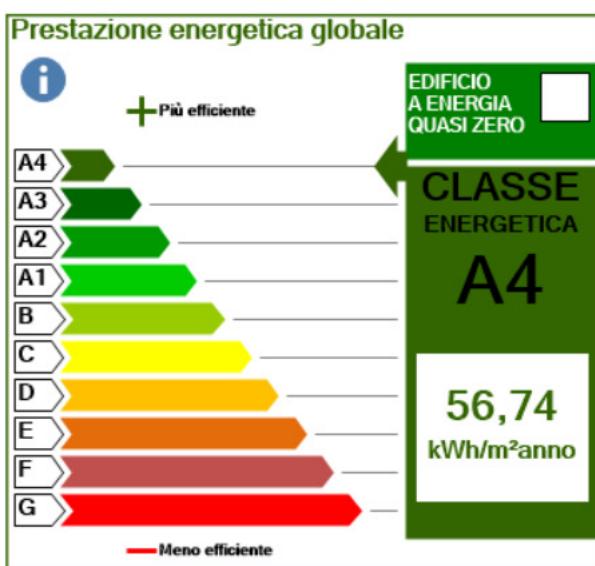


Figura 5-1: Classe energetica Post-intervento

La valutazione comparativa degli scenari trattati nei capitoli precedenti è stata eseguita utilizzando come parametri di riferimento i fabbisogni di energia primaria e le emissioni di CO₂ associati ai singoli interventi ed escludendo la componente di acqua calda sanitaria in quanto, considerato come impianto individuale (autonomo) e quindi al di fuori della portata di un intervento sulle parti tecnologiche comuni.

L’energia primaria viene definita dal D.M 26 giugno 2015¹¹ come l’energia complessivamente necessaria per soddisfare i fabbisogni energetici di un edificio, non solo in termini di consumi legati al solo vettore energetico all’interno del sistema “edificio”, ma anche in termini di energia dispersa o richiesta lungo l’intera catena di approvvigionamento: produzione, trasformazione, trasporto, distribuzione e utilizzo.

Il concetto di energia primaria nasce quindi al fine di rendere confrontabili sistemi di riscaldamento basati su combustibili fossili, nei quali l’energia termica viene interamente prodotta e utilizzata/dispersa all’interno del sistema “edificio”, con sistemi ad esempio alimentati ad energia elettrica, i quali, per produrre energia termica, utilizzano un’energia non interamente prodotta all’interno del sistema in esame e caratterizzata da una emissione “spuria” in ambiente non trascurabile.

In una pompa di calore (pdc) possono essere distinti due contributi energetici:

- Energia elettrica: Autoprodotta in sito o prelevata dalla rete pubblica.
- Energia termica: Legata allo scambio di calore con l’esterno (sorgente fredda). Tale quota non è presente nel caso di generatori di tipo fossile in quanto il calore viene prodotto interamente dal processo di combustione.

La valutazione delle prestazioni energetiche nel caso di un impianto di riscaldamento con caldaia tradizionale, avviene utilizzando il solo sistema “edificio” come superficie di controllo, in quanto l’energia primaria deriva esclusivamente dal combustibile utilizzato. L’utilizzo di un’apparecchiatura elettrica come la pdc, rende necessario espandere i confini del sistema (superficie di controllo) anche alla catena energetica che la alimenta.

Considerando che l’energia in ingresso alla pompa di calore può derivare da un mix energetico avente differente natura, è stato necessario definire un “generatore virtuale” rappresentante l’insieme dei processi di generazione e trasporto che in media intervengono su scala italiana, combinando i relativi rendimenti, al quale estendere il perimetro di confronto.

L'energia prodotta da tale generatore viene affiancata da una serie di coefficienti che ne differenziano le componenti rinnovabili da quelle non rinnovabili e che vengono riportati nel D.M 26 giugno 2015 – Allegato 1.

- **Energia primaria rinnovabile $f_{p,ren}$:** identificato dal rapporto tra la quota di energia primaria rinnovabile ed il totale dell'energia fornita al sistema.
- **Energia primaria non rinnovabile $f_{p,nren}$:** identificato dal rapporto tra la quota di energia primaria rinnovabile ed il totale dell'energia fornita al sistema.
- **Energia primaria totale $f_{p,tot}$:** Nel caso di energia elettrica, tenente conto del rendimento medio di generazione e delle perdite medie di trasmissione nel sistema elettrico nazionale ed è la sommatoria dei precedenti fattori.

Vettore Energetico	$F_{p,nren}$	$F_{p,ren}$	$F_{p,tot}$
Gas naturale	1,05	0	1,05
GPL	1,05	0	1,05
Gasolio e Olio combustibile	1,07	0	1,07
Carbone	1,10	0	1,10
Biomasse solide	0,20	0,80	1
Biomasse liquide e gassose	0,40	0,60	1
Energia elettrica da rete	1,95	0,47	2,42
Teleriscaldamento	1,5	0	1,5
Rifiuti solidi urbani	0,2	0,2	0,4
Teleraffrescamento	0,5	0	0,5
Energia termica da collettori solari	0	1	1
Energia elettrica prodotta da fotovoltaico, mini-eolico-mini-idraulico	0	1	1
Energia termica dall'ambiente esterno – Free cooling	0	1	1
Energia termica dall'ambiente esterno – PDC	0	1	1

Tabella 5-1: Fattori di conversione in energia primaria⁴⁰

Tra i fattori riportati in Tabella 5-1, quelli inerenti all'energia elettrica sono soggetti ad aggiornamenti in funzione dei dati forniti dal GSE ogni due anni.

⁴⁰ Tabella 1 – Allegato 1 D.M 26 giugno 2015.

5.1. Il ruolo dell'involucro

La condizione ante-intervento (Figura 5-2), caratterizzata da un involucro poco performante e da una caldaia tradizionale, identifica un importante fabbisogno di energia primaria, interamente derivante da componenti non rinnovabili. L'applicazione del solo intervento di isolamento termico dell'involucro (Figura 5-3) permette una sensibile riduzione dei fabbisogni energetici che tuttavia, continuano ad utilizzare come vettore energetico il gas metano.

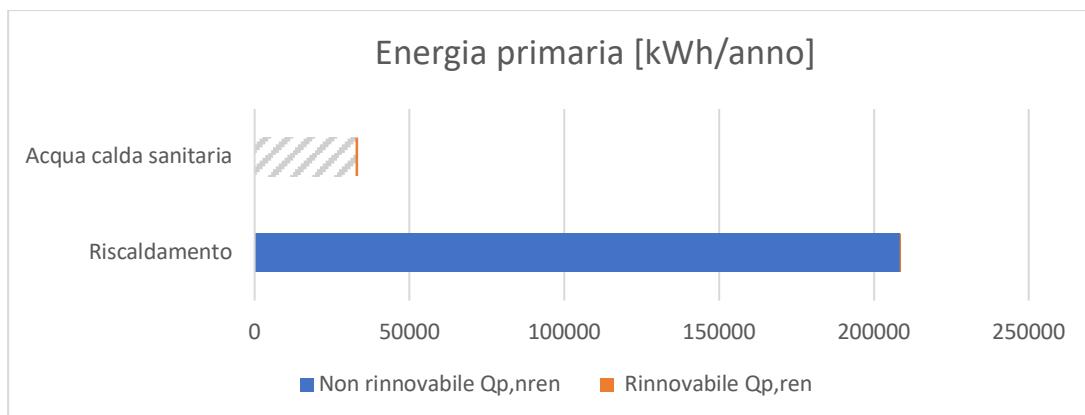


Figura 5-2: Fabbisogni di energia primaria Pre-intervento

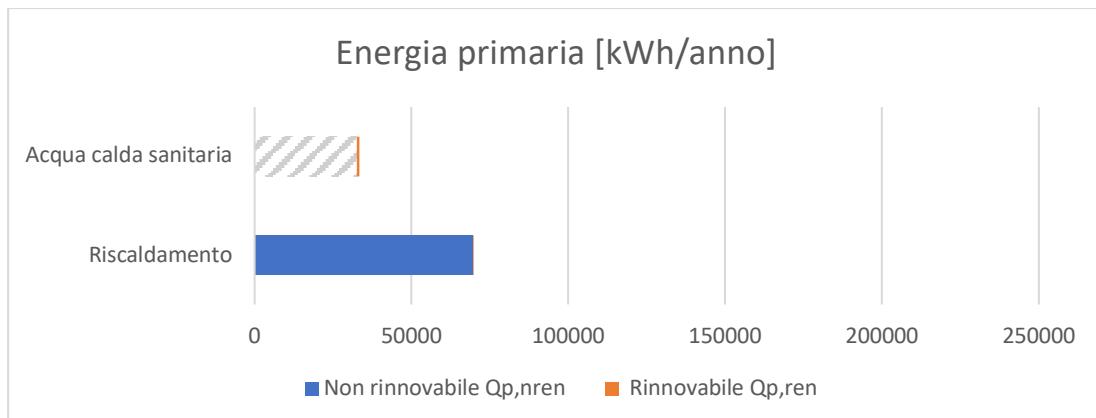


Figura 5-3: Fabbisogni di energia primaria con il solo intervento di isolamento termico

L'introduzione di un generatore di calore alimentato ad energia elettrica in una condizione non isolata (Figura 5-4), non apporta benefici né in termini di fabbisogni energetici né in termini ambientali (Figura 5-6) in quanto, l'energia elettrica necessaria ad alimentare la pompa di calore deriva da un mix energetico a base di combustibili fossili.

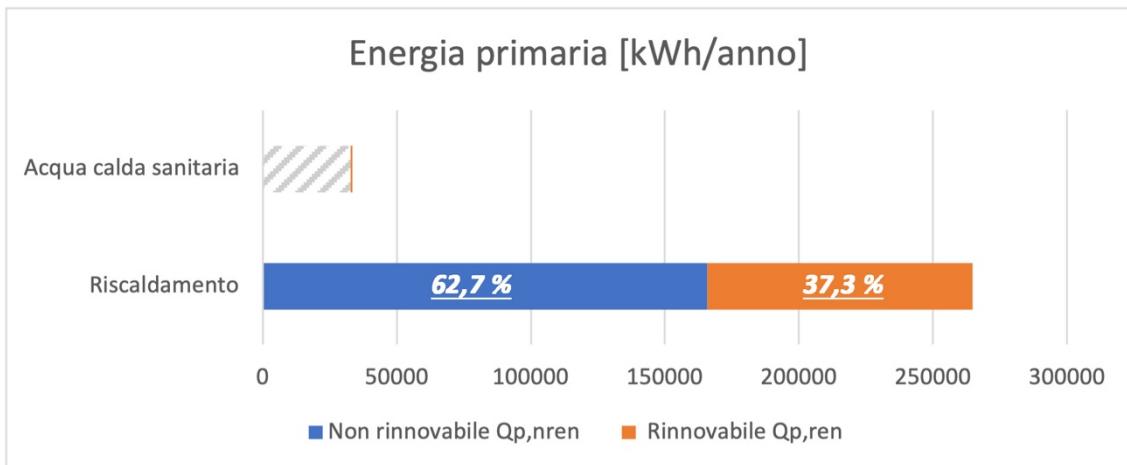


Figura 5-4:Fabbisogni di energia primaria con il solo intervento di sostituzione del generatore di calore

Dalla Figura 5-5 e dalla Figura 5-6 risulta evidente come l'incremento delle prestazioni termiche dell'involucro permetta una riduzione significativa delle dispersioni termiche verso l'esterno, con una conseguente riduzione del fabbisogno energetico necessario per raggiungere le condizioni di progetto. Tale intervento determina un abbattimento dei fabbisogni energetici pari al 66 % ed una contemporanea riduzione delle emissioni del 63%, confermandosi l'intervento più significativo tra quelli proposti nella trattazione.

Nell'ottica del *Green deal* Europeo, l'utilizzo di generatori di calore alimentati ad energia fossile non risulta essere una scelta sostenibile nel lungo periodo. Pertanto, l'introduzione delle pompe di calore risulta essere la scelta più appropriata per il raggiungimento degli obiettivi.

Questo tipo di macchine, per sprigionare la potenza termica richiesta dall'edificio, necessitano di un apporto notevole di energia elettrica. In assenza di interventi sull'involucro, i carichi termici necessari alla climatizzazione dello stabile risultano talmente elevati da rendere l'utilizzo di una pompa di calore, una soluzione antieconomica e anti-climatica, risultando inappropriata già nella prima fase di analisi.

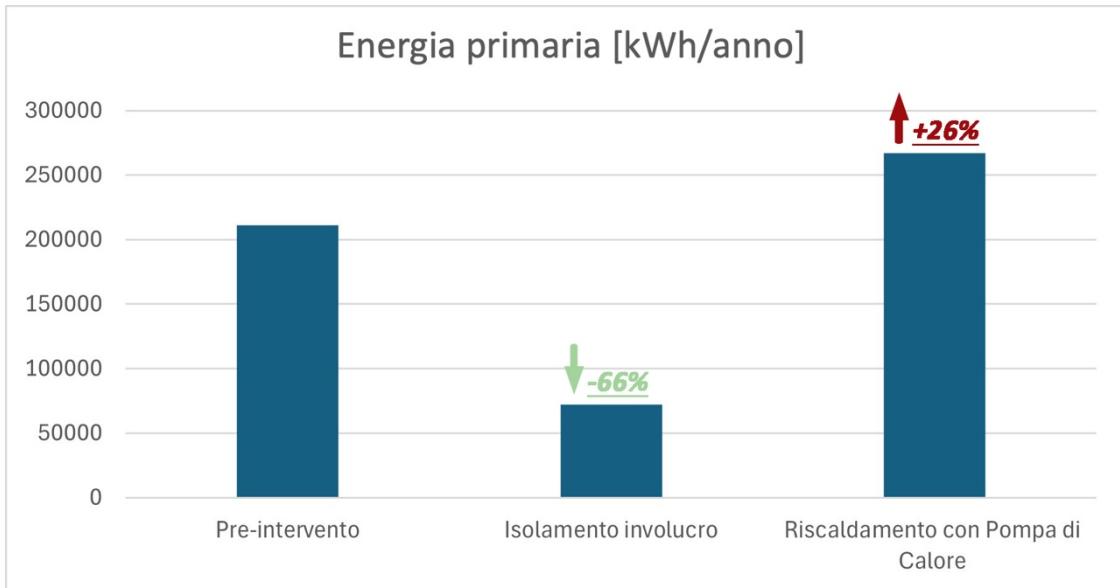


Figura 5-5: Confronto fabbisogni di energia primaria - Interventi principali

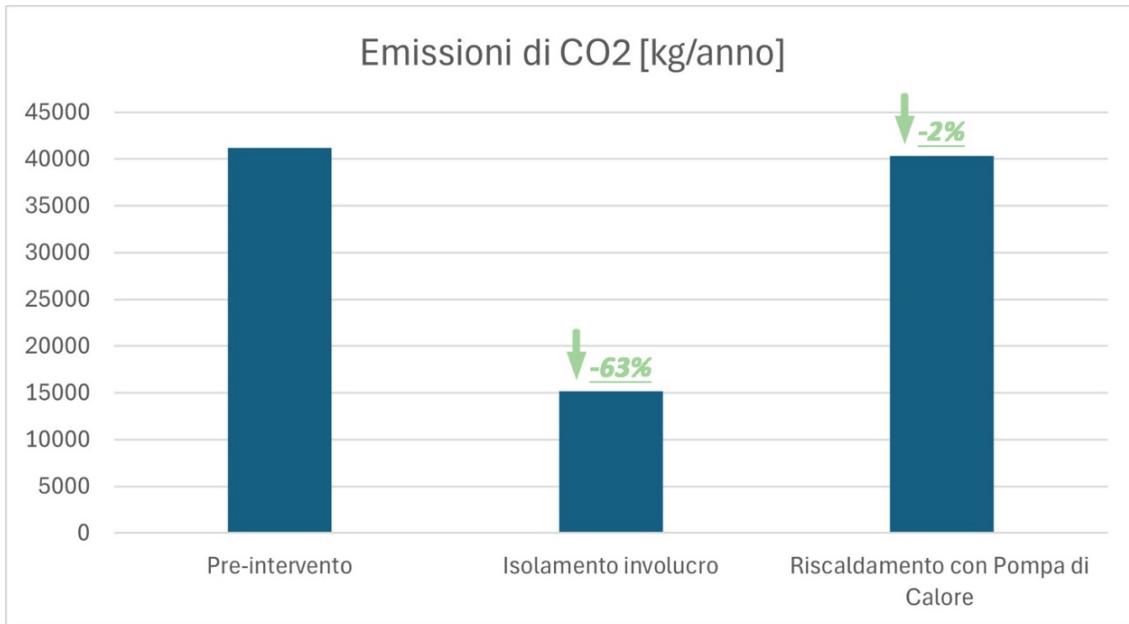


Figura 5-6: Confronto emissioni di CO₂ - Interventi principali

5.2. Il ruolo del sistema impiantistico in rapporto all'edificio

Una volta stabilito che la riduzione dei carichi termici da parte dell'involucro sia un intervento imprescindibile, è possibile concentrare l'attenzione sulle scelte tecnologiche in grado di offrire un adeguato livello comfort all'utente finale e, contestualmente, verificare i riscontri energetici e climatici delle singole implementazioni.

In tale prospettiva, risulta importante adottare la relazione sistematica tra involucro ed impianto al fine di raggiungere le massime prestazioni energetiche possibili. L'isolamento dell'involucro avrà il compito di abbattere i carichi termici richiesti dall'edificio mentre l'implementazione di un generatore alimentato ad energia rinnovabile permetterà la rinuncia definitiva al vettore energetico fossile (Figura 5-7).

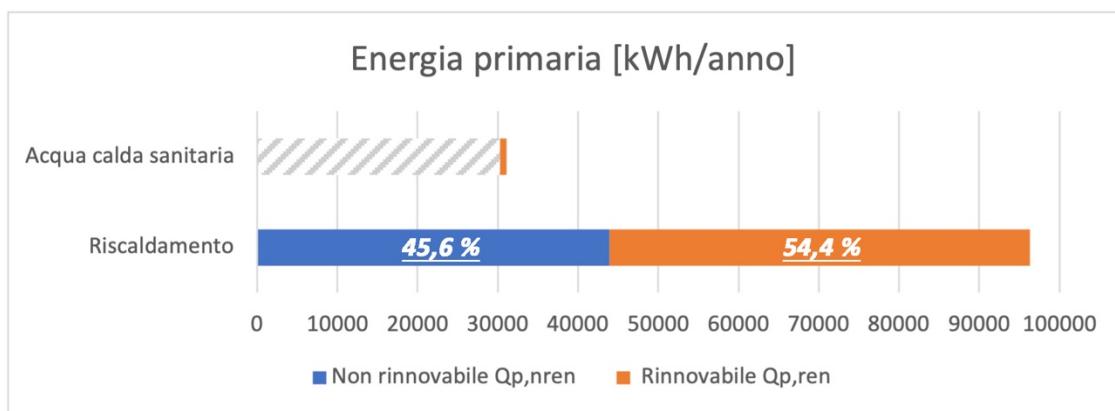


Figura 5-7:Fabbisogni di energia primaria a seguito di isolamento involucro e installazione pdc.

Per quanto riguarda la componente ambientale, si osserva una notevole diminuzione delle emissioni di CO₂ con un contributo diviso secondo quanto illustrato in Figura 5-8. Si mantiene comunque una quota parte di emissioni non compensate pari al 27% che identifica il limite di questa trattazione per ciò che concerne involucro ed impianto.

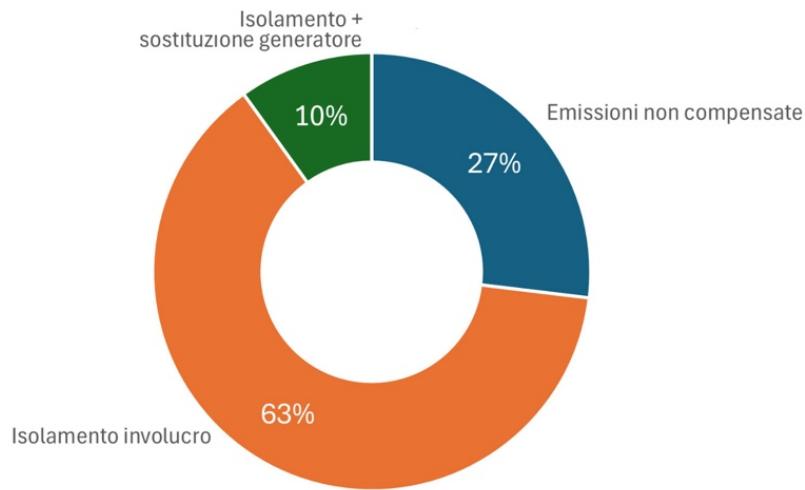


Figura 5-8: Suddivisione emissioni CO_2

I risultati appena conseguiti convenzionalmente il traguardo finale di un efficientamento energetico, in quanto volti al rispetto della normativa e all’ottimizzazione delle emissioni e dei fabbisogni necessari durante il servizio di riscaldamento invernale. Tuttavia, questa tesi si è spinta oltre gli obiettivi prestazionali comuni, introducendo il concetto di comfort offerto all’utente finale ed associato ai servizi di climatizzazione estiva (benessere termoigometrico) e di ventilazione meccanica controllata (qualità dell’aria).

I riscontri energetici derivanti dall’introduzione di tali servizi sono riportati in Tabella 5-2 e rappresentati graficamente in Figura 5-9, da essi è possibile osservare nuovamente un aumento dei fabbisogni, dovuti all’introduzione dei vari servizi, che tuttavia, si mantengono in misura pari al almeno il 30 % inferiori rispetto alle condizioni pre-intervento.

Servizio	Non rinnovabile	Rinnovabile	Totale
	$Q_{p,nren}$ [kWh/anno]	$Q_{p,ren}$ [kWh/anno]	$Q_{p,tot}$ [kWh/anno]
Riscaldamento	42070	50208	92278
Acqua calda sanitaria	30305	752	31057
Raffrescamento	25744	6205	31949
Ventilazione	19275	4646	23921
Globale	117394	61811	179205

Tabella 5-2: Fabbisogni di energia primaria – Implementazione dei servizi

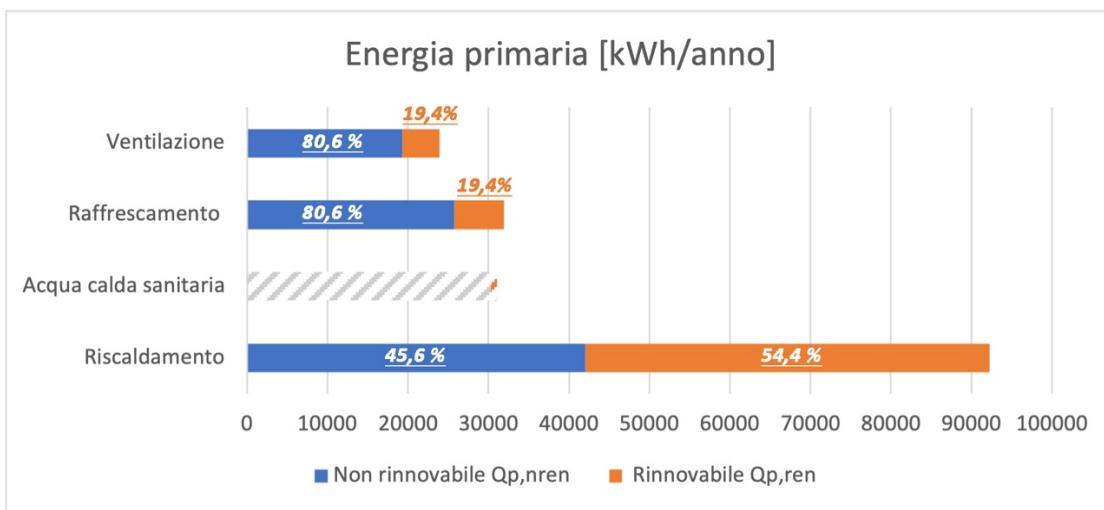


Figura 5-9:Fabbisogni di energia primaria - Implementazione dei servizi

La condizione riportata in Figura 5-9 identifica un comportamento energivoro dello stabile non in linea con l'obiettivo di edificio ad energia quasi zero. In questa fase la componente auto produttiva svolge un ruolo fondamentale andando ad abbattere nuovamente i fabbisogni energetici, in percentuale prossima al 30% (Figura 5-10) e, contestualmente, le emissioni del sistema di circa il 60% (Figura 5-12).

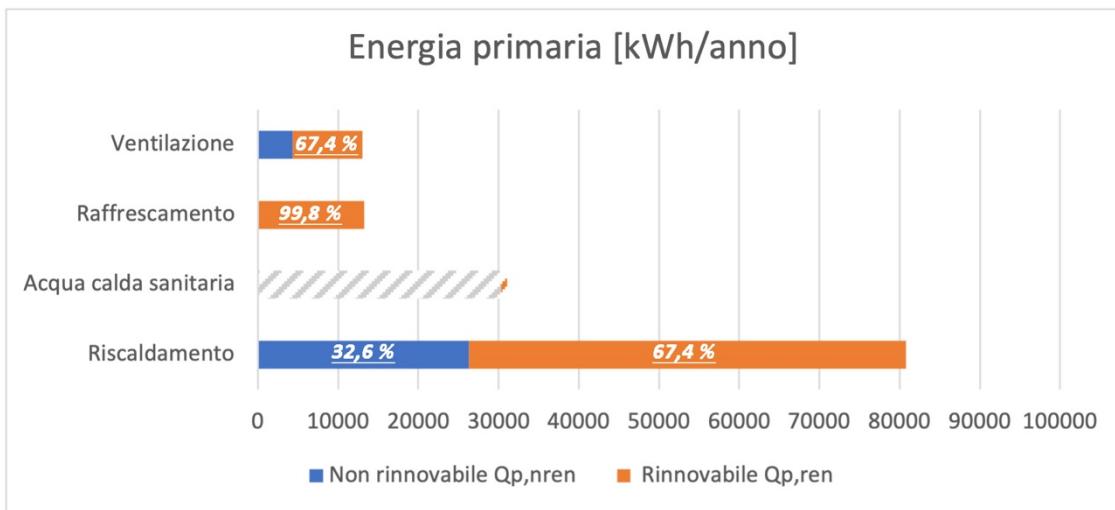


Figura 5-10:Fabbisogni di energia primaria dopo l'installazione dell'impianto fotovoltaico

Nei grafici riportati nel seguito vengono riepilogati i benefici ottenuti dai singoli interventi, in termini percentuali, rispetto alla condizione ante-intervento. La rappresentazione permette di identificare le incidenze di ogni singola scelta progettuale in termini di fabbisogni di energia primaria e di emissioni inquinanti.

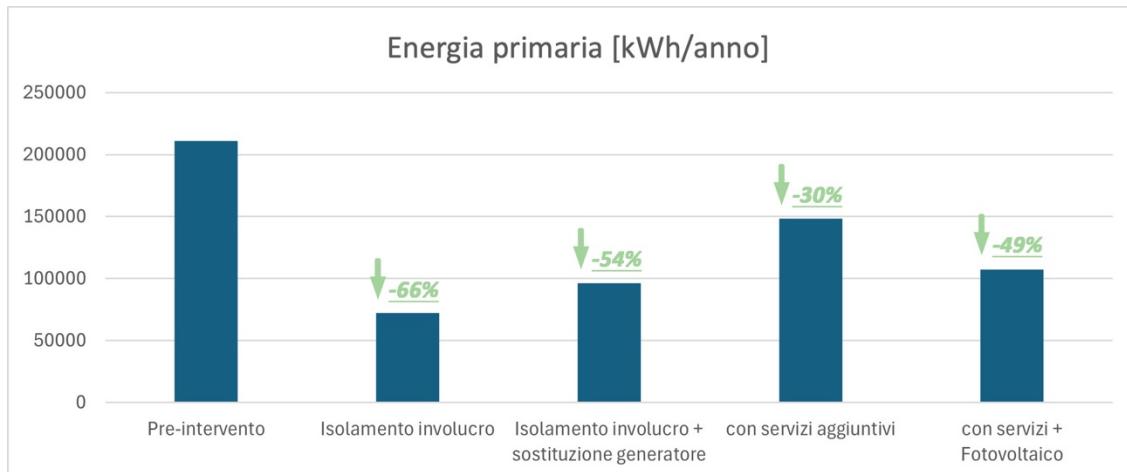


Figura 5-11: Fabbisogni di energia primaria – Confronto interventi

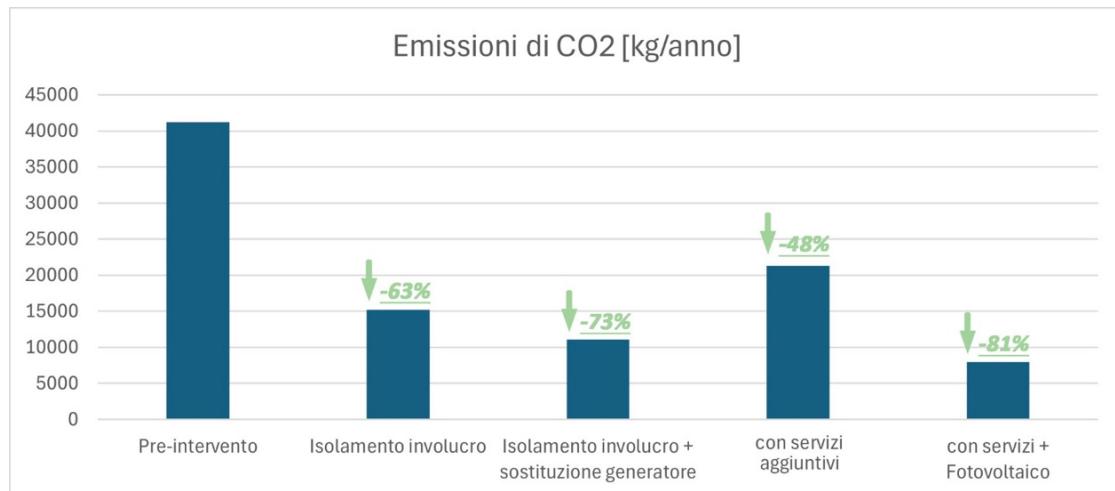


Figura 5-12: Emissioni CO₂ – Confronto interventi

Nel caso in cui sia presente una pompa di calore, è opportuno evidenziare come una quota di fabbisogni pari, nel caso in esame, a circa 40 000 kWh/anno, sia funzione dell’energia scambiata con l’ambiente esterno durante il ciclo termodinamico e considerata totalmente rinnovabile.

Sebbene questo contributo permetta di confrontare i risultati con quelli prodotti in un analogo modello avente generatore fossile, non permette una restituzione immediata nel caso in cui si voglia condurre un'analisi in termini di consumi.

In Tabella 5-3 e in Figura 5-13 vengono raggruppati i consumi annui dell'edificio, nelle condizioni precedentemente descritte, permettendo un rapido riscontro economico degli interventi (ad es. se moltiplicati per il costo dell'energia).

Scenario	Consumi elettrici [kWh/anno]
Isolamento involucro + sostituzione generatore	24 108
Con servizi Aggiuntivi	46 262
Con servizi + Fotovoltaico	17 321

Tabella 5-3: Consumi elettrici dei vari scenari

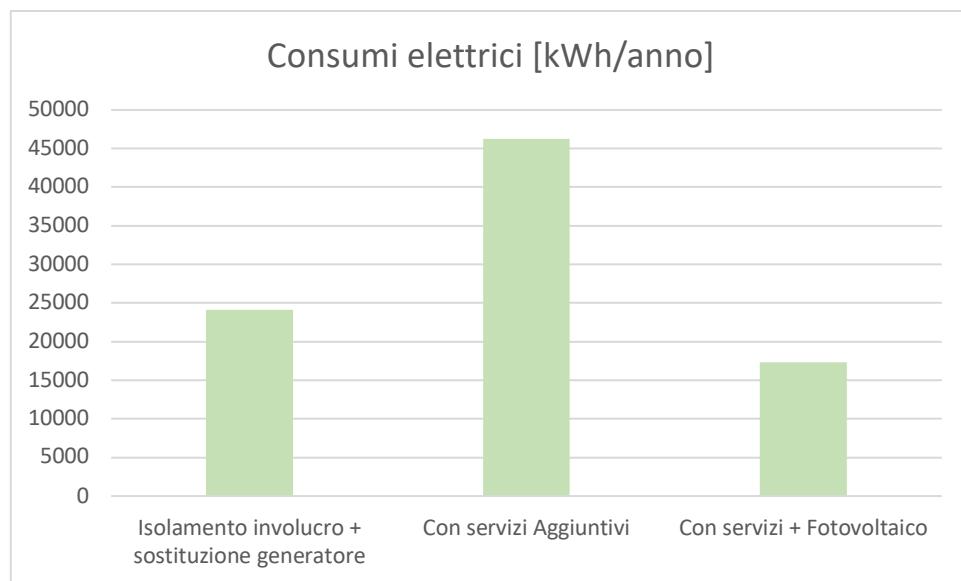


Figura 5-13: Consumi elettrici dei vari scenari

5.3. Considerazioni finali

Soffermandosi ad analizzare la Figura 5-11 e la Figura 5-12, emerge con chiarezza come il livello di emissioni inquinanti risulti funzione sia dei fabbisogni che del sistema impiantistico utilizzato. Anche un generatore di calore alimentato a combustibili fossili, se associato ad un involucro altamente performante, sarebbe in grado di ridurre le proprie emissioni rispetto alla condizione di partenza.

Sebbene nell’immaginario collettivo le macchine termiche alimentate ad energia elettrica vengano percepite come “green”, tale condizione non risulta sempre corretta. L’effettiva sostenibilità del sistema di generazione, a prescindere dalle componenti al suo interno, è subordinata alla qualità del mix energetico utilizzato per alimentarlo che, nel contesto italiano, risulta ancora fortemente influenzato dai combustibili fossili.

A dimostrazione di ciò, la Figura 5-12 evidenzia come l’installazione di una pompa di calore in un involucro già performante, determini una riduzione delle emissioni, ma con impatti marginali (prossimi al 10%) rispetto alla condizione solo termo-isolata, proprio a causa della componente non rinnovabile dell’energia elettrica utilizzata.

La riduzione delle dispersioni termiche prodotta dall’intervento di isolamento termico a cappotto, si conferma essere la componente a maggior impatto, sia in termini di fabbisogni energetici sia in termini di contenimento delle emissioni, pertanto, dovrebbe essere l’obiettivo di una riqualificazione nazionale.

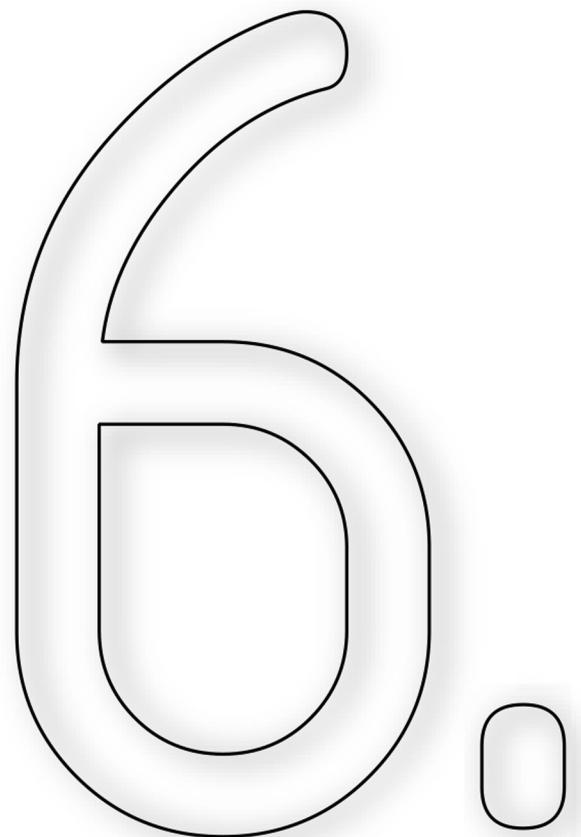
In egual modo, la progressiva dismissione dei vettori energetici fossili in un ambiente residenziale può essere giustificata solo se accompagnata da sistemi di autoproduzione dell’energia e/o dall’introduzione di servizi impiantistici in grado di migliorare il benessere abitativo, come la ventilazione meccanica controllata e la climatizzazione estiva.

Un approccio di questo tipo, se ampliato all'intero patrimonio edilizio nazionale, comporterebbe una diminuzione dei fabbisogni energetici, una riduzione del carico richiesto alla rete elettrica pubblica e, contestualmente, contribuirebbe al riallineamento del mix energetico italiano verso le fonti rinnovabili. In questo modo, è lo stesso mix energetico nazionale a ridurre le emissioni in quanto operante ad una scala ben più ampia rispetto al singolo edificio.

In conclusione, è possibile affermare che gli edifici ad energia quasi zero (nZEB), rappresentino indubbiamente un traguardo olistico per il percorso di ottimizzazione energetica. La loro attuale complessità tecnico-economica ne limita la diffusione su larga scala andando ad incidere solo marginalmente sul bilancio emissivo complessivo.

Una transizione ecologica realmente efficace dovrebbe puntare ad aumentare il livello prestazionale del patrimonio edilizio esistente, andando ad abbattere in primo luogo le richieste energetiche dovute all'involucro ed inoltre, scegliere consapevolmente materiali a basso impatto ambientale, come quelli descritti al capitolo 4.2.2, che nel caso in oggetto sono identificati dai pannelli in EPS e in lana di roccia.

Parallelamente, l'evoluzione del mix energetico dovrà progressivamente aumentare la quota parte rinnovabile, in modo da rendere sostenibile la conversione completa degli attuali sistemi impiantistici in sistemi alimentati a sola energia elettrica naturale. L'abbandonando definitivo del vettore energetico fossile sarà possibile solo dopo che l'intero sistema energetico nazionale, rappresentato da produttori ed utilizzatori, si sia riconfigurato adeguatamente per permettere continuità prestazionale alle nuove scelte tecnologiche.



Bibliografia
e
Sitografia

- [1] UNI/TS 11300 – “*Prestazione energetiche degli edifici*”
- [2] La consistenza del parco immobiliare nazionale - *F. Caffari, N. Calabrese, G. Murano, P. Signoretti ENEA - Dipartimento Unità Efficienza Energetica, Laboratorio Efficienza Energetica negli Edifici e Sviluppo Urbano*
- [3] SIAPE ENEA - <https://siape.enea.it/caratteristiche-immobili>
- [4] Legge n°373 del 30 Marzo 1976 – *Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici.*
- [5] Legge n°10 del 9 Gennaio 1991 - *Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia.*
- [6] Decreto Legislativo n°192 del 19 Agosto 2025 - (*Attuazione della direttiva (UE) 2018/844, che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, della direttiva 2010/31/UE, sulla prestazione energetica nell'edilizia, e della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia*)
- [7] LEGGE 3 agosto 2013, n. 90 - *Conversione, con modificazioni, del decreto-legge 4 giugno 2013, n.63 Disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia per la definizione delle procedure d'infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché altre disposizioni in materia di coesione sociale*
- [8] MIMIT -Decreto interministeriale 26 giugno 2015 - *Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*

Bibliografia e Sitografia

- [9] Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192 *Attuazione della direttiva (UE) 2018/844, che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, della direttiva 2010/31/UE, sulla prestazione energetica nell'edilizia, e della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia.*
- [10] UNI EN 12828:2013 - *Impianti di riscaldamento negli edifici - Progettazione dei sistemi di riscaldamento ad acqua.*
- [11] D.M. 26/06/2015, il Decreto Requisiti Minimi recante “*Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*”.
- [12] UNI EN 14511-1:2022 - *Condizionatori, refrigeratori di liquido e pompe di calore con compressore elettrico per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti e refrigeratori per cicli di processo con compressore elettrico.*
- [13] Direttiva Europea 2010/31/UE, 19 maggio 2010, del Parlamento Europeo e del Consiglio, *sulla prestazione energetica nell'edilizia.*
- [14] UNI EN 15251:2008 – *Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica.*
- [15] UNI EN 16798-1:2019 – *Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica - Modulo M1-6.*
- [16] Perceived Indoor Environment and Occupants 'Comfort in European "Modern" Office Buildings: The OFFICAIR Study - *Ioannis A. Sakellaris, Dikaia E. Saraga, Corinne Mandin, Célina Roda, Serena Fossati, Yvonne de Kluizenaar, Paolo Carrer, Sani Dimitroulopoulou, Victor G. Mihucz, Tamás Szigeti, Otto Hänninen, Eduardo de Oliveira Fernandes, John G. Bartzis and Philomena M. Bluyssen.*

- [17] Sito web Ministero della Salute - <https://www.salute.gov.it/new/it/tema/qualita-dellaria/qualita-dellaria-indoor/>
- [18] Immagine proveniente da - www.consiimpianti.it
- [19] Tabella B6 – *Norma UNI EN 16798-1:2019 APPENDICE B.*
- [20] Tabella B7 – *Norma UNI EN 16798-1:2019 APPENDICE B.*
- [21] Jinming Lei, Beijia Huang, Ying Huang (2020). “*Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making*”.
- [22] www.ollum.it
- [23] UNI EN ISO 14040:2021 – “*Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Principi e quadro di riferimento*”.
- [24] UNI EN ISO 14044:2021 – “*Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Requisiti e linee guida*”.
- [25] UNI EN ISO 14020 – “*Dichiarazioni e programmi ambientali per i prodotti – Principi e requisiti generali*”.
- [26] UNI EN ISO 14021:2021 – “*Etichette e dichiarazioni ambientali- Asserzioni ambientali auto-dichiarate (etichettatura ambientale Tipo II)*”.
- [27] UNI EN ISO 14024:2018 – “*Etichette e dichiarazioni ambientali – Etichettatura ambientale Tipo I – Principi e procedure*”.
- [28] UNI EN ISO 14025 del 2010 – “*Etichette e dichiarazioni ambientali Tipo III principi e procedure*”.
- [29] UNI EN ISO 14026:2018 – “*Etichette e dichiarazioni ambientali – Principi, requisiti e linee guida per la comunicazione dell’impronta ambientale*”.
- [30] <https://www.edilclima.it>

- [31] Elenco prezzi aggiornato all'anno di riferimento redatto e pubblicato dalla tipografia del Genio Civile.
- [32] 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 ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10.*
- [33] UNI EN 15804:2021 - *Sostenibilità delle costruzioni - Dichiarazioni ambientali di prodotto - Regole quadro di sviluppo per categoria di prodotto.*
- [34] <https://emissioni.sina.isprambiente.it/inventario-nazionale/> - Inventario Nazionale “*Dati di Trasporto Stradale 1990-2023*”.
- [35] <https://emissioni.sina.isprambiente.it/inventario-nazionale/> - Inventario Nazionale “*Fattori di emissione per la produzione ed il consumo di energia elettrica in Italia (1000-2023)*”.
- [36] Bilanci Energetici Regionali Valle d'Aosta – Allegato 1.
- [37] *Linee di Indirizzo per l'aggiornamento del Piano Energetico Ambientale regionale, oggi Piano Regionale Integrato Energia e Clima (PRIEC) della Regione Calabria.*
- [38] www.Wikipedia.org – “*I magneti permanenti sono posizionati sul rotore e sono realizzati con materiali che danno un'inerzia rotorica molto bassa, il che consente un controllo preciso sia in velocità a regime sia in accelerazione*”.
- [39] www.commission.europa.eu - https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en
- [40] Tabella 1 – Allegato 1 D.M 26 giugno 2015 “*fattori di conversione in energia primaria*”.