



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare

Sessione di Laurea: Luglio 2024

Tesi di Laurea Magistrale

**La cost-optimal analysis quale strumento decisionale per il
retrofit energetico di un condominio in Nord Italia**

Relatore:

Prof. Stefano Paolo Corgnati

Candidata:

Maria Bergonzoni

Correlatrice:

Prof. Cristina Becchio

Anno accademico 2023/2024

ABSTRACT

A livello europeo, uno dei settori chiave nel contrasto al cambiamento climatico risulta quello dell'edilizia, in quanto responsabile del 40% del consumo globale di energia dell'Unione e del 36% delle emissioni nocive: migliorare l'efficienza energetica del parco edilizio europeo è quindi essenziale per muoversi verso un futuro sostenibile. In tale processo risulta fondamentale integrare la sfera energetico-ambientale con quella economica, in modo tale da garantire soluzioni energeticamente efficienti e al contempo finanziariamente accessibili.

Il presente elaborato si focalizza sulla riqualificazione energetica di un condominio situato in Nord Italia: viene analizzata in fase di progettazione preliminare la fattibilità tecnico-economica di differenti soluzioni di efficientamento, utilizzando come strumento decisionale la cost-optimal analysis. Tale metodologia, introdotta a livello europeo dalla Direttiva 2010/31/CE, consente di valutare differenti soluzioni di retrofit energetico tenendo in considerazione sia la variabile energetica che quella economica, e di individuare quale alternativa progettuale minimizza i costi sostenuti durante il ciclo di vita economico dell'edificio, comprendenti non solo quelli di investimento iniziale, ma anche di gestione, manutenzione ed eventuale smaltimento.

In merito all'edificio condominiale oggetto di analisi, a seguito di un'accurata valutazione sono state definite 12 differenti alternative progettuali da esaminare, ottenute combinando in maniera opportuna 4 soluzioni di riqualificazione dell'involucro edilizio e 6 soluzioni di retrofit relative agli impianti tecnici e all'introduzione di sistemi a fonte rinnovabile.

La performance energetica dei 12 pacchetti progettuali è stata valutata mediante il software di simulazione EC700 di Edilclima Programmi, ed è espressa in termini di fabbisogno di energia primaria specifico annuo [kWh/m²·anno], mentre la performance economica, espressa in termini di costo globale [€/m²], viene stimata per ogni scenario di intervento secondo la norma europea UNI EN 15459:2007.

Le prestazioni energetiche ed economiche così ottenute relative ai diversi pacchetti di intervento analizzati sono messe a confronto in un opportuno grafico di cost-optimal, che riporta sull'asse delle ascisse la variabile energetica e su quello delle ordinate la variabile economica. È possibile così individuare la soluzione progettuale che ottimizza la performance energetica dell'edificio in funzione dei costi, che potrà essere utilizzata come linea guida nelle fasi successive di sviluppo del progetto e nella definizione delle opere da realizzare. Infine, la stabilità dei risultati ottenuti è stata verificata mediante la conduzione di alcune analisi di sensitività.

1	INTRODUZIONE.....	5
2	QUADRO LEGISLATIVO DI RIFERIMENTO EUROPEO E NAZIONALE IN MATERIA DI EFFICIENZA ENERGETICA IN EDILIZIA	8
2.1	DIRETTIVE EUROPEE.....	8
2.1.1	EPBD I: la Direttiva 2002/91/CE	8
2.1.2.	EPBD II “recast”: la Direttiva 2010/31/UE.....	9
2.1.3	EPBD III: la Direttiva UE 2018/844	10
2.1.4	EPBD IV: la Direttiva UE 2024/1275, detta Direttiva “case green”	10
2.2	LEGISLAZIONE NAZIONALE	13
2.2.1.	Legge 373/76 e Legge 10/91	13
2.2.2	Decreto Legislativo 192/2005.....	13
2.2.3	Legge 90/2013 e successivi Decreti Attuativi.....	13
3	LA METODOLOGIA DI COST-OPTIMAL	16
3.1	INQUADRAMENTO GENERALE E FINALITÀ	16
3.2	FASI DELLA METODOLOGIA E APPLICAZIONE AL CASO STUDIO	18
3.2.1.	Definizione degli edifici di riferimento.....	18
3.2.2.	Scelta degli interventi di efficienza energetica	19
3.2.3.	Valutazione della performance energetica.....	20
3.2.4.	Analisi finanziaria secondo il metodo del costo globale	21
3.2.5.	Determinazione del livello ottimale in funzione dei costi.....	26
4	STRUMENTI DI MODELLAZIONE E ANALISI ENERGETICA	27
4.1	METODOLOGIA DI CALCOLO	27
4.2	TIPOLOGIA DI VALUTAZIONE: ASSET RATING E TAILORED RATING	33
4.3	SOFTWARE DI MODELLAZIONE	34
4.4	VERIFICHE DI LEGGE.....	37
5	IL CASO STUDIO	44
5.2	CARATTERISTICHE FUNZIONALI E DISTRIBUTIVE DELL’EDIFICIO.....	49
5.3	INVOLUCRO EDILIZIO.....	58
5.4	IMPIANTI TECNICI.....	61
5.4.1	Impianto di climatizzazione invernale.....	61
5.4.2	Impianti di climatizzazione estiva	66
5.4.3	Impianti di produzione di acqua calda sanitaria	67
5.4.4	Impianto di ventilazione meccanica controllata	67
5.5	MODELLAZIONE E ANALISI ENERGETICA DELL’EDIFICIO ALLO STATO DI FATTO	68
5.5.1.	Costruzione del modello energetico dell’edificio tramite EC700.....	68
5.5.2	Validazione del modello energetico di tipologia A3 con i consumi reali dell’edificio ..	75
5.5.3	Analisi dei risultati energetici ottenuti.....	77
6	INTERVENTI DI RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA RELATIVI ALL’INVOLUCRO EDILIZIO	84

6.1	CASISTICHE ANALIZZATE	84
6.2	CASISTICHE SELEZIONATE	98
7	INTERVENTI DI RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA RELATIVI AGLI IMPIANTI TECNICI E ALL'UTILIZZO DI FONTI RINNOVABILI.....	99
7.1	SOLUZIONE 1.....	101
7.2	SOLUZIONE 2.....	103
7.3	SOLUZIONE 3.....	109
7.4	SOLUZIONE 4.....	114
7.5	SOLUZIONE 5.....	116
7.6	SOLUZIONE 6.....	118
8	DEFINIZIONE DEI PACCHETTI PROGETTUALI E ANALISI DELLA PERFORMANCE ENERGETICA....	122
8.1	MATRICE DEGLI INTERVENTI	122
8.2	PERFORMANCE ENERGETICA DEI DIVERSI PACCHETTI PROGETTUALI	124
9	CALCOLO DEL COSTO GLOBALE	135
9.1	COSTI DI INVESTIMENTO INIZIALE.....	136
9.2	COSTI DI ESERCIZIO	155
9.3	COSTI DI MANUTENZIONE E SOSTITUZIONE	159
9.4	VALORE RESIDUO	163
9.5	COSTO GLOBALE DEI PACCHETTI PROGETTUALI ANALIZZATI.....	166
10	COST-OPTIMAL ANALYSIS	167
10.1	GRAFICO DI COST-OPTIMAL.....	167
10.2	ANALISI DI SENSITIVITA'	170
10.2.1	Variazione del tasso di sconto reale	170
10.2.2	Riduzione del periodo di calcolo	171
10.2.3	Introduzione degli incentivi fiscali	172
11	CONCLUSIONI	176
12	BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	178
	Allegato I.....	181

1 INTRODUZIONE

L'urgenza di individuare strategie efficaci di contrasto al cambiamento climatico è, ormai da diversi anni, al centro dell'attenzione mondiale ed europea.

Con l'entrata in vigore il 29 luglio 2021 della Normativa Europea sul Clima (Regolamento UE 2021/1119) [1] l'obiettivo previsto dal Green Deal europeo di raggiungere la neutralità climatica in UE entro il 2050 è diventato un obbligo giuridico. Per il conseguimento di tale traguardo viene introdotto uno step intermedio vincolante, che prevede entro il 2030 la riduzione nei paesi dell'Unione delle emissioni nette di gas a effetto serra di almeno il 55% rispetto ai livelli del 1990, tramite una serie di iniziative indicate nel pacchetto di proposte "fit for 55%" [12].

Nel contrasto al cambiamento climatico, uno dei settori chiave è quello dell'edilizia, in quanto responsabile di una considerevole quota di impatto ambientale: l'UE attribuisce infatti a quest'ultimo il 40% del consumo globale di energia dell'Unione [3] e il 36% delle emissioni nocive[4]; è chiaro, quindi, che il raggiungimento di un'elevata prestazione energetica del parco edilizio europeo risulta fondamentale a livello comunitario per muoversi verso la direzione di un futuro sostenibile [24].

Per raggiungere tale obiettivo, l'Unione europea ha sviluppato a livello legislativo una serie di Direttive, dette EPBD, ovvero Energy Performance Buildings Directive, relative all'efficienza energetica degli edifici: EPBD 2002/91/CE [2], EPBD 2010/31/UE [3], EPBD 2018/844 [4].

L'8 maggio 2024 il Parlamento europeo ha approvato la nuova EPBD 2024/1275, detta anche Direttiva "case green", che entrerà in vigore il 28 maggio, la quale prevede misure ancora più stringenti in merito all'efficientamento energetico degli edifici, mirando al raggiungimento di un parco edilizio dell'Unione decarbonizzato al 2050.

In tale processo, risulta di fondamentale importanza l'interazione tra sfera energetico-ambientale ed economica, in modo che le scelte effettuate per il miglioramento della performance energetica degli edifici risultino efficaci anche in termini di costi che ne derivano.

Il concetto di ottimizzazione del livello di prestazione energetica di un edificio in funzione dei costi viene introdotto per la prima volta a livello comunitario dalla EPBD 2010/31/CE, attraverso la definizione del cost-optimal level, ovvero *livello di prestazione energetica che comporta il costo più basso durante il ciclo di vita economico stimato di un edificio, determinato tenendo conto dei costi di investimento legati all'energia, dei costi di manutenzione e di funzionamento e degli eventuali costi di smaltimento presenti*.

Il Regolamento Delegato (UE) n.244/2013 della Commissione [5] e i successivi Orientamenti [6], promulgati ad integrazione della EPBD 2010/31/UE, definiscono in maniera sistematica la metodologia di cost-optimal, che costituisce la procedura per individuare, tra differenti

soluzioni progettuali applicabili a un edificio, quella che minimizza i costi sostenuti durante il suo ciclo di vita economico.

La metodologia prevede in primis l'elaborazione di una serie di alternative progettuali da applicare all'edificio, combinazioni di soluzioni relative all'involucro edilizio, agli impianti tecnici e all'utilizzo di fonti rinnovabili, e successivamente l'analisi di queste ultime sia in termini di fabbisogno energetico che in termini economici, in modo tale da individuare quella che consente di ottenere il miglior livello di prestazione energetica in funzione dei costi (cost-optimal level).

Nella presente tesi la metodologia di cost-optimal viene applicata ad un caso studio reale, corrispondente ad un condominio esistente situato nel centro della città di Torino, ed è utilizzata come strumento decisionale per valutare, in fase di progettazione preliminare, le migliori strategie di intervento attuabili per la riqualificazione energetica dello stesso, che costituiranno le linee guida nello sviluppo delle successive fasi progettuali e nella definizione delle opere da realizzare.

Nella realtà italiana, la riqualificazione del patrimonio edilizio residenziale esistente risulta ad oggi un tema di particolare interesse: secondo dati ISTAT, sul territorio nazionale sono presenti 14.515.785 edifici residenziali [11], dei quali circa il 90-95% energeticamente inefficienti, in quanto edificati prima dell'entrata in vigore della Legge n. 373 del 1976, che introduce per la prima volta nella legislazione nazionale il tema del contenimento dei consumi energetici negli edifici [10].

Per quanto riguarda gli edifici condominiali, sono presenti sul territorio nazionale circa 1.2 milioni di condomini, di cui un 70% in classe energetica F e G e un 64% costruiti prima del 1971 [10]. È chiara quindi la potenzialità di risparmio energetico ottenibile offerta da un parco edilizio di questo tipo, che può essere concretizzata mediante interventi mirati di riqualificazione energetica.

Nel presente elaborato, dopo aver illustrato la legislazione di riferimento europea e nazionale in tema di efficienza energetica degli edifici, la metodologia di cost-optimal adottata e gli strumenti di modellazione e analisi utilizzati, viene sviluppato il caso studio, articolato nelle seguenti fasi:

1. analisi dell'edificio condominiale oggetto di studio allo stato attuale: definizione delle sue caratteristiche geometriche, funzionali, costruttive e impiantistiche, realizzazione del modello energetico tramite il software EC700 di EDILCLIMA Programmi e determinazione del fabbisogno di energia primaria dello stesso allo stato di fatto, espresso in $[kWh/m^2 \cdot anno]$, in conformità con la Serie UNI/TS 11300;
2. definizione di differenti combinazioni di interventi di efficienza energetica da applicare all'edificio, che coinvolgono l'involucro edilizio, gli impianti tecnici e l'utilizzo di fonti rinnovabili;

3. calcolo del fabbisogno di energia primaria delle diverse varianti progettuali analizzate, in conformità con la Serie UNI/TS 11300, mediante la realizzazione di modelli energetici dell'edificio tramite il software EC700 di EDILCLIMA Programmi;
4. calcolo del costo globale [€/m²] per le diverse combinazioni di interventi previste al punto 2, in conformità con la procedura descritta nella normativa EN 15459:2007;
5. rappresentazione delle alternative progettuali nel grafico di cost-optimal, che riporta sull'asse delle ordinate (y) il costo globale [€/m²] e sull'asse delle ascisse (x) il fabbisogno annuo di energia primaria [kWh/m²·anno], e individuazione della/e soluzioni progettuali che consentono di ottimizzare la performance energetico-economica dell'edificio;
6. analisi di sensitività per valutare la stabilità dei risultati ottenuti.

2 QUADRO LEGISLATIVO DI RIFERIMENTO EUROPEO E NAZIONALE IN MATERIA DI EFFICIENZA ENERGETICA IN EDILIZIA

In questo capitolo si vuole presentare il quadro legislativo comunitario e nazionale di riferimento in tema di efficienza energetica in edilizia, che costituisce il contesto all'interno del quale è stato sviluppato il caso studio della presente tesi.

2.1 DIRETTIVE EUROPEE

L'Unione europea ha affrontato il tema dell'efficienza energetica in edilizia tramite lo sviluppo, a partire dal 2002, di una serie di leggi comunitarie che stabiliscono obblighi e requisiti prestazionali degli edifici, agevolano la loro certificazione energetica e promuovono l'utilizzo di fonti rinnovabili [17]. Queste vengono opportunamente illustrate nei paragrafi successivi.

2.1.1 EPBD I: la Direttiva 2002/91/CE

La Direttiva 2002/91/CE [2] costituisce il recepimento a livello europeo del Protocollo di Kyoto del 1997¹, ed è la prima della serie di Direttive emanate a livello comunitario in tema di efficienza energetica in edilizia [17]. Questa riguarda sia il settore residenziale che quello terziario (uffici, edifici pubblici ecc.) [13], e introduce quattro elementi principali:

- una metodologia comune per il calcolo del rendimento energetico degli edifici, che tiene conto dei consumi relativi ai servizi di riscaldamento, raffrescamento, produzione di acqua calda sanitaria, ventilazione e illuminazione [17];
- l'applicazione di requisiti minimi sul rendimento energetico di edifici di nuova costruzione e di edifici esistenti sottoposti a ristrutturazioni importanti [17];
- un sistema di certificazione energetica degli edifici esistenti e di nuova costruzione [17];
- l'ispezione periodica delle caldaie e degli impianti centralizzati di condizionamento e la valutazione degli impianti di riscaldamento dotati di caldaie installate da oltre 15 anni [17].

Tale Direttiva viene recepita a livello nazionale dal Decreto Legislativo 192/2005.

¹ Primo accordo internazionale che stabilisce l'impegno vincolante degli Stati che vi hanno aderito a ridurre le emissioni di alcuni gas ad effetto serra, responsabili del riscaldamento globale.

2.1.2. EPBD II “recast”: la Direttiva 2010/31/UE

La Direttiva 2010/31/UE, che prende il nome di EPBD recast, nasce dalla rifusione della Direttiva 2002/91/CE. Quest’ultima mette in evidenza l’importanza ricoperta dal settore dell’edilizia nella lotta al cambiamento climatico ed esprime la necessità di attuare politiche di riduzione dei consumi energetici degli edifici e di utilizzo di fonti rinnovabili in sostituzione a quelle fossili. Tale Direttiva prevede:

- il miglioramento della prestazione energetica degli edifici dell’Unione, tenendo conto delle condizioni climatiche esterne, delle prescrizioni relative alle condizioni ambientali interne e dell’efficacia sotto il profilo dei costi [14];
- la definizione di una metodologia per il calcolo della prestazione energetica annuale degli edifici, che tenga conto non solo delle loro caratteristiche termiche, ma anche di altri fattori, quali ad esempio il tipo di impianto di riscaldamento e condizionamento presente, l’utilizzo di energia da fonti rinnovabili, gli eventuali sistemi di ombreggiamento installati, la qualità dell’aria interna, l’illuminazione naturale etc.[3];
- l’obbligo da parte degli Stati Membri di istituire a livello nazionale requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e degli elementi edilizi, da rivedersi ogni 5 anni, che devono focalizzarsi sugli edifici, i loro componenti e l’energia utilizzata per il riscaldamento, il raffrescamento, la produzione di acqua calda sanitaria, la ventilazione, l’illuminazione e altri sistemi tecnici per scopi edili. Tali requisiti dovranno essere rispettati sia da edifici di nuova costruzione che da edifici esistenti oggetto di ristrutturazione [14];
- l’obbligo di utilizzo da parte degli Stati Membri di un sistema di certificazione delle prestazioni energetiche degli edifici, che fornisca informazioni sulla classificazione energetica degli stessi e includa raccomandazioni per interventi di efficientamento economicamente convenienti [14].

La Direttiva 2010/31/UE introduce per la prima volta i concetti di *edificio a energia quasi zero* (nZEB - nearly zero energy building) e di *livello ottimale in funzione dei costi* (*cost-optimal level*).

Gli edifici nZEB sono definiti come *edifici ad altissima prestazione energetica, in cui il fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo è coperto in misura significativa da energia da fonti rinnovabili, prodotta in situ* [3]. La EPBD recast ne promuove l’aumento stabilendo che entro il 31 dicembre 2020 gli edifici di nuova costruzione dovranno obbligatoriamente essere a energia quasi zero, mentre per quelli pubblici la data è anticipata al 31 dicembre 2018 [3].

Il *cost-optimal level* viene definito, invece, come il *livello di prestazione energetica che comporta il costo più basso durante il ciclo di vita economico stimato di un edificio, determinato tenendo conto dei costi di investimento legati all’energia, dei costi di manutenzione e di funzionamento e degli eventuali costi di smaltimento presenti* [3]. Con la promulgazione del

Regolamento delegato (UE) n.244/2012 della Commissione del 16 gennaio 2012 [5] e dei Successivi Orientamenti [6], che integrano la Direttiva 2010/31/UE, viene definito il quadro metodologico comparativo per il calcolo dei livelli ottimali di prestazione energetica in funzione dei costi (cost-optimal methodology), che deve essere utilizzato da parte degli Stati Membri nella definizione dei requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici a livello nazionale.

La Direttiva EPBD recast viene recepita a livello nazionale dalla Legge 90/2013, che modifica e attua il Decreto Legge n. 63/2013 e il Decreto Legislativo 192/2005.

2.1.3 EPBD III: la Direttiva UE 2018/844

La Direttiva UE 2018/844 [4], parte del Clean Energy Package², modifica la Direttiva 2010/31/UE sull'efficienza energetica degli edifici, con lo scopo principale di accelerare il processo di ristrutturazione economica degli edifici esistenti e di promuovere l'utilizzo di tecnologie intelligenti [14].

Tale Direttiva impone ai Paesi dell'Unione di sviluppare strategie di ristrutturazione a lungo termine per consentire il rinnovamento degli edifici residenziali e non, con l'obiettivo di ottenere un parco edilizio ad alta efficienza energetica e decarbonizzato al 2050. Le strategie vanno definite in una tabella di marcia con indicatori di progresso misurabili, in vista dell'obiettivo a lungo termine dell'Unione per il 2050, e devono includere anche tappe indicative intermedie per il 2030 e il 2040 [14].

la Direttiva incoraggia inoltre l'utilizzo negli edifici di tecnologie intelligenti di automazione e controllo, sostiene la mobilità elettrica richiedendo l'installazione di infrastrutture di ricarica negli edifici ed amplia l'ambito dell'attuale regime di ispezione dei sistemi di riscaldamento e di condizionamento dell'aria, includendo sistemi combinati (con ventilazione) e tenendo conto delle prestazioni dei sistemi in condizioni operative tipiche [14].

La Direttiva 2018/844 viene recepita a livello nazionale dal Decreto Legislativo 48/2020, che apporta modifiche al Decreto Legislativo 192/2005.

2.1.4 EPBD IV: la Direttiva UE 2024/1275, detta Direttiva “case green”

La Direttiva “case green” fa parte delle 12 iniziative proposte dall'Unione europea nel pacchetto “Fit for 55%”, adottato nel luglio 2021 e riguardante la revisione delle politiche energetiche e climatiche dell'Unione per consentire una riduzione delle emissioni nocive del 55% invece che del 40% al 2030 [12]. Tale Direttiva è stata approvata l'8 maggio 2024 dal

² Pacchetto Energia Pulita, adottato il 30 novembre 2016, stabilisce le misure legislative che devono essere adottate a livello europeo per il raggiungimento degli obiettivi al 2030 in materia di clima ed energia.

Parlamento europeo, ed entrerà in vigore il 28 maggio. Gli stati Membri avranno poi a disposizione due anni per recepirne i contenuti [15].

L'obiettivo principale della Direttiva è quello di favorire l'aumento del tasso di riqualificazione energetica degli edifici in Europa, così da ridurre i consumi e le emissioni del settore edilizio entro il 2030, in modo da raggiungere l'obiettivo di un parco edilizio completamente decarbonizzato al 2050 [15], attraverso i seguenti passi:

- gli Stati Membri devono implementare un nuovo piano nazionale di riqualificazione energetica degli edifici residenziali e non, e ogni paese può decidere in autonomia su quali tipologie di edifici concentrarsi maggiormente [15];
- le misure adottate dagli Stati Membri devono garantire che almeno il 55% della riduzione del consumo medio di energia primaria sia ottenuto tramite la ristrutturazione degli edifici caratterizzati prestazioni energetiche peggiori [15];
- deve essere prevista dagli Stati Membri una riduzione del consumo medio di energia primaria utilizzata degli edifici residenziali del 16% entro il 2030 e del 20-22% entro il 2035 [15];
- deve essere prevista dagli Stati Membri la ristrutturazione degli edifici non residenziali con prestazioni energetiche inferiori del 16% entro il 2030, e del 26% entro il 2033 [15].;
- a partire dal 2030 gli edifici di nuova costruzione dovranno essere a emissioni zero, mentre per quelli pubblici la scadenza è anticipata al 2028 [15];
- gli Stati Membri devono garantire che gli edifici di nuova costruzione siano in grado di ospitare impianti fotovoltaici o solari termici sui tetti, la cui installazione diventerà norma per i nuovi edifici. Per gli edifici pubblici e non residenziali esistenti, l'installazione dell'energia solare dovrà avvenire gradualmente, a partire dal 2027, laddove ciò sia tecnicamente, economicamente e funzionalmente fattibile. Tali disposizioni entreranno in vigore in momenti diversi a seconda della tipologia e delle dimensioni dell'edificio in esame [15];
- gli Stati Membri devono formulare misure specifiche per facilitare l'eliminazione graduale dei combustibili fossili nel settore del riscaldamento e del raffreddamento, con l'obiettivo di eliminare definitivamente le caldaie alimentate da tali combustibili entro il 2040. A partire dal 1° gennaio 2025, dovranno essere sospesi i sussidi per l'installazione di caldaie autonome alimentate da combustibili fossili [15].

Sono previste dalla Direttiva misure di sostegno e finanziamento volte ad incentivare le ristrutturazioni, che dovranno essere disponibili anche per i cittadini in condizioni più vulnerabili, al fine di combattere la povertà energetica [16].

Al momento la Direttiva “case green” non prevede sanzioni per coloro che non adeguano i loro immobili ai nuovi standard entro i tempi stabiliti, né limitazioni alla vendita o all’affitto delle abitazioni in mancanza di bollino verde UE. Sarà compito dei singoli governi nazionali decidere quali sanzioni applicare [15].

2.2 LEGISLAZIONE NAZIONALE

Vengono illustrate di seguito le tappe più significative dell'evoluzione normativa italiana in tema di efficienza energetica degli edifici.

2.2.1. Legge 373/76 e Legge 10/91

La Legge 373/76 - *Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici*, costituisce la prima legge italiana in tema di risparmio energetico degli edifici [17].

Quest'ultima è suddivisa in tre parti: la prima riguarda gli impianti termici, la seconda l'isolamento termico degli edifici e la terza le sanzioni per la mancata osservanza della legge stessa. Questa introduce per la prima volta in Italia l'obbligo di calcolare le dispersioni termiche degli edifici e di prevedere il loro contenimento entro un valore massimo prestabilito, mediante l'isolamento dell'involucro [17].

Viene abrogata il 9 gennaio 1991 dalla Legge 10/91, attuativa del Piano Energetico Nazionale [17], che costituisce un punto focale a livello italiano in tema di risparmio energetico in edilizia, ponendo le basi per la creazione di una procedura standard di verifica dei consumi energetici degli edifici e introducendo il concetto di certificazione energetica degli stessi [17]. È la prima legge che regola le modalità di progettazione e gestione del sistema edificio-impianto [17]. La sua attuazione è regolamentata tramite il DPR 412/93, che introduce il concetto di Gradi-Giorno (GG) e la suddivisione del territorio nazionale in 6 fasce climatiche (A-F) in funzione dei GG e indipendentemente dalla ubicazione geografica, e il successivo DPR 551/99 [17].

2.2.2 Decreto Legislativo 192/2005

Il Decreto Legislativo n. 192 del 19 agosto 2005 attua a livello nazionale la Direttiva europea 2002/91/CE (EPBD I) e apporta delle modifiche alla Legge 10/91, rendendo ancora più rigida la stesura della relazione tecnica prevista da quest'ultima. Il D.Lgs n. 192/2005 stabilisce i criteri e le modalità per il miglioramento della prestazione energetica degli edifici a livello nazionale, favorisce l'utilizzo di fonti rinnovabili, la diversificazione delle energie utilizzate a servizio degli edifici e definisce i requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici esistenti e di nuova costruzione [17]. Tale Decreto viene successivamente modificato e integrato con il Decreto Legislativo 311/2006 [17].

2.2.3 Legge 90/2013 e successivi Decreti Attuativi

In Italia tra il 2013 e il 2015 si verificano una serie di importanti cambiamenti che portano alla definizione della legislazione vigente in tema di efficienza energetica degli edifici.

Il 3 agosto 2013 viene emanata la Legge n. 90/2013, che costituisce il recepimento della Direttiva europea 2010/31/UE (EPBD recast) [17]. Tale Legge apporta importanti aggiunte e modifiche al DLgs 192/2005, definite in maniera più dettagliata nei successivi Decreti Attuativi (Decreti Interministeriali del 26 giugno 2015) [17]. La Legge 90/2013 introduce a livello nazionale il concetto di edificio a energia quasi zero (nZEB) e fissa i nuovi criteri per l'aggiornamento e la programmazione degli standard prestazionali degli edifici (in termini sia di involucro opaco, che impianti tecnici che di utilizzo di fonti rinnovabili), con lo scopo di raggiungere gli obiettivi fissati a livello comunitario in materia di efficienza energetica degli stessi [17].

La Legge definisce i criteri e le modalità per:

- migliorare le prestazioni energetiche degli edifici [17];
- favorire lo sviluppo e l'integrazione di fonti rinnovabili [17];
- determinare i criteri generali per la certificazione della prestazione energetica degli edifici e per il trasferimento delle relative informazioni in sede di compravendita e locazione [17];
- effettuare ispezioni periodiche degli impianti di climatizzazione invernale ed estiva al fine di ridurre il consumo energetico e le emissioni di CO₂ [17];
- favorire la diversificazione dei vettori energetici utilizzati a servizio degli edifici [17];
- conseguire gli obiettivi nazionali in materia energetica e ambientale [17];
- promuovere l'uso razionale dell'energia [17].

la Legge 90/2013 introduce inoltre a livello nazionale l'Attestato di Prestazione Energetica (APE), che sostituisce il precedente Attestato di Certificazione Energetica (ACE), andando a riprenderne i temi principali e aggiungendone altri, come ad esempio il tener conto nel calcolo del fabbisogno energetico dell'edificio non solo dei servizi di climatizzazione invernale, estiva e di produzione di acqua calda sanitaria, ma anche di quelli di ventilazione, illuminazione (per edifici non residenziali), e trasporto (per edifici non residenziali) [17].

Il 26 giugno 2015 viene emanata una serie di tre Decreti interministeriali, attuativi della Legge 90/2013, che completano il quadro normativo nazionale in materia di efficienza energetica in edilizia, definendo le metodologie per il calcolo della prestazione energetica degli edifici, i requisiti prestazionali minimi degli stessi e le modalità per l'elaborazione delle relazioni tecniche di progetto e per la redazione degli attestati di prestazione energetica (APE). In particolare, si ha:

- il Decreto interministeriale 26 giugno 2015 - *Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*, detto DM Requisiti Minimi;

- il Decreto interministeriale 26 giugno 2015 – *Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici*, detto DM Linee Guida APE;
- il Decreto interministeriale 26 giugno 2015 – *Schemi e modalità di riferimento per la compilazione della relazione tecnica di progetto ai fini dell'applicazione delle prescrizioni e dei requisiti minimi di prestazione energetica negli edifici*, detto DM Relazione Tecnica di progetto.

Il DM requisiti minimi definisce le nuove modalità di calcolo della prestazione energetica degli edifici e le prescrizioni, i requisiti e le verifiche che devono essere effettuate in funzione delle tipologie di intervento previste all'Allegati I del Decreto stesso: nuova costruzione, demolizione e ricostruzione, ampliamento e sopraelevazione, ristrutturazione importante di I e II livello e riqualificazione energetica [7].

Il DM Requisiti Minimi stabilisce inoltre che il calcolo della prestazione energetica degli edifici deve essere eseguito in conformità alla normativa tecnica UNI e CTI vigente in materia, e può essere realizzato mediante l'utilizzo di software commerciali i cui valori risultanti si discostino al massimo del 5% rispetto a quelli ottenuti mediante l'applicazione delle normative sopracitate [7].

Il DM Linee Guida APE definisce le nuove linee guida nazionali per la redazione dell'attestato di prestazione energetica degli edifici. Quest'ultimo, che deve essere redatto obbligatoriamente da un tecnico abilitato in forma di certificato, assegna all'edificio una classe di prestazione energetica, compresa tra la A4 (edifici ad elevata efficienza) e la G (edifici a scarsa efficienza energetica), fornisce ulteriori informazioni, sotto forma di indici, dell'efficienza energetica dell'immobile e riporta le proposte di intervento più significative ed economicamente convenienti per il miglioramento della prestazione energetica dello stesso [8]. L'APE ha una validità temporale massima di 10 anni a partire dal suo rilascio e deve essere aggiornato ad ogni intervento di ristrutturazione o riqualificazione degli elementi edilizi e/o degli impianti tecnici tali da modificarne la classe energetica. La sua redazione risulta obbligatoria per le nuove costruzioni e per quelle in vendita o affitto, e deve essere allegato ai contratti di compravendita o locazione dell'edificio/unità immobiliare [8].

Il DM Relazione Tecnica di progetto definisce, invece, gli schemi-tipo della relazione tecnica prevista dalla Legge 10/91, in funzione delle tipologie di intervento previste all'Allegato I del DM Requisiti Minimi, andando così ad aggiornare il DLgs 192/2005 [17].

3 LA METODOLOGIA DI COST-OPTIMAL

Nel presente capitolo viene descritta in maniera dettagliata la metodologia di cost-optimal ed i diversi step di cui si compone. Questa costituisce la metodologia utilizzata nel caso studio della presente tesi per valutare differenti alternative di interventi di retrofit energetico, ed individuare quella/e più convenienti non solo in termini di prestazione energetica ottenibile, ma anche in termini di riduzione dei costi durante il ciclo di vita economico stimato dell'edificio.

3.1 INQUADRAMENTO GENERALE E FINALITÀ

La metodologia di cost-optimal si sviluppa nel contesto europeo descritto al capitolo precedente in cui, nell'ambito edilizio, risulta sempre più importante l'interazione tra la sfera energetico-ambientale e quella economica, con l'obiettivo di effettuare scelte di progettazione e ristrutturazione degli edifici esistenti che risultino al contempo sostenibili da un punto di vista energetico ed economico.

Come già detto al paragrafo 2.1.2., il concetto di cost-optimal level viene introdotto per la prima volta nella Direttiva 2010/31/CE, ed è definito come *il livello di prestazione energetica che comporta il costo più basso durante il ciclo di vita economico stimato dell'edificio, determinato tenendo conto dei costi di investimento legati all'energia, dei costi di manutenzione e di funzionamento (compresi i costi e i risparmi energetici, la tipologia edilizia interessata e gli utili derivanti dalla produzione di energia), e degli eventuali costi di smaltimento* [3].

La EPBD recast stabilisce che gli Stati Membri utilizzino la metodologia di cost-optimal nella definizione dei requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e dei componenti edilizi a livello nazionale, in modo da determinare i livelli di prestazione ottimali che consentono di minimizzare i costi associati [3].

L'obiettivo dell'Unione è quello di fornire agli Stati Membri uno strumento comune con cui poter valutare, tanto per edifici esistenti quanto per nuove costruzioni, la sostenibilità energetico-economica di soluzioni progettuali volte al risparmio energetico durante l'intero ciclo di vita stimato dell'edificio [3].

Il 16 gennaio 2012 la Commissione Europea rilascia il Regolamento Delegato n. 244 [5] in cui definisce in maniera dettagliata le diverse fasi che caratterizzano la metodologia di cost-optimal, a cui seguono ulteriori specifiche procedurali nei successivi Orientamenti [6], pubblicati il 19 aprile 2012. Il primo step della metodologia consiste nella definizione da parte degli Stati Membri di opportuni edifici di riferimento (sia residenziali che del terziario, sia esistenti che di nuova costruzione), che risultino rappresentativi del parco edilizio nazionale per destinazione d'uso e condizioni climatiche.

Si procede poi alla definizione di una serie di alternative progettuali volte al risparmio energetico da applicare agli edifici di riferimento, che consistono in combinazioni di interventi differenti che interessano l'involucro edilizio, gli impianti tecnici e l'utilizzo di fonti rinnovabili. Tali "pacchetti di interventi", al fine di ottenere un'analisi delle varianti progettuali che risulti robusta, non devono essere in numero inferiore a 10. Per limitare il numero di calcoli necessari, tali "pacchetti di misure" possono essere organizzati in una opportuna matrice, in modo tale da scartare soluzioni in cui sono presenti tecnologie che si escludono a vicenda.

Si passa poi alla valutazione energetico-economica delle varianti progettuali considerate: per ognuna di esse si calcola la prestazione energetica raggiunta dall'edificio di riferimento in esame a seguito della loro applicazione, espressa in termini di fabbisogno di energia primaria annuo [$\text{kWh/m}^2\cdot\text{anno}$], e il costo globale sostenuto durante il ciclo di vita economico dell'edificio [€/m^2], formato dal costo dell'investimento iniziale, dai costi di gestione, dagli eventuali costi di smaltimento e, nel caso di calcolo macroeconomico, anche da quello relativo alle emissioni di gas serra.

Una volta effettuati questi calcoli, si vanno a confrontare le prestazioni energetiche ed economiche ottenute nelle diverse configurazioni al fine di individuare quella caratterizzata dal livello ottimale in funzione dei costi. Per fare ciò le combinazioni di interventi analizzate vengono rappresentate in un opportuno grafico di cost-optimal, che riporta in ascissa il fabbisogno di energia primaria [$\text{kWh/m}^2\cdot\text{anno}$] e in ordinata il costo globale [€/m^2].

Le alternative progettuali considerate vanno a identificare nel grafico una curva di costo specifica (corrispondente al bordo inferiore dell'area identificata dai punti costituiti dalle differenti varianti), il cui punto di minimo individua il cost-optimal level (livello ottimale in funzione dei costi), contenuto all'interno del cost-optimal range (fascia ottimale in funzione dei costi), che corrisponde all'alternativa progettuale che consente di massimizzare al contempo la variabile energetica e quella economica.

Segue infine un'ultima fase, ovvero l'analisi di sensitività, che comporta la variazione di alcuni parametri utilizzati nell'analisi (tasso di sconto, prezzi dei vettori energetici, periodo di calcolo etc.) al fine di valutare la stabilità, e quindi la robustezza, dei risultati ottenuti.

Al di là delle applicazioni normative, lo sviluppo della metodologia di cost-optimal costituisce un potente strumento per l'analisi e la valutazione dell'impatto di differenti strategie di intervento di efficienza energetica su edifici di nuova costruzione o esistenti.

La cost-optimal analysis consente di individuare il compromesso tra obiettivi energetico-ambientali ed economici, diventando quindi una risorsa fondamentale nella definizione di strategie e politiche nel settore edile e nell'ottimizzazione della progettazione/ristrutturazione edilizia [24].

3.2 FASI DELLA METODOLOGIA E APPLICAZIONE AL CASO STUDIO

La metodologia di cost-optimal, così come definita all'Allegato III della EPBD recast [3] e nel Regolamento Delegato n. 244/2012 [5] e successivi Orientamenti [6], è un'analisi multi-step che si compone delle seguenti fasi:

1. definizione degli edifici di riferimento
2. scelta delle misure di efficienza energetica
3. valutazione della performance energetica
4. calcolo del costo globale
5. determinazione del livello ottimale in funzione dei costi

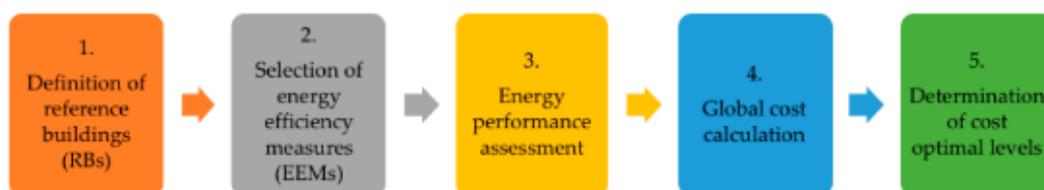


Figura 1 - Step della metodologia di cost-optimal [22]

3.2.1. Definizione degli edifici di riferimento

Il primo step della metodologia consiste nella definizione da parte degli Stati Membri di opportuni edifici di riferimento che risultino rappresentativi del parco edilizio nazionale per funzionalità e condizioni climatiche.

Questi devono essere definiti sia per edifici esistenti che di nuova costruzione, e per le categorie edilizie riportate all'Allegato I della Direttiva 2010/31/UE, che comprendono edifici residenziali (abitazioni monofamiliari e condomini) e del terziario (uffici ed altre sottocategorie quali scuole, ospedali, alberghi e ristoranti, impianti sportivi, edifici commerciali ed altri edifici che impiegano energia). La scelta degli edifici di riferimento può ricadere tanto su fabbricati reali quanto "virtuali" (ovvero archetipi) [6].

In entrambi i casi, gli edifici scelti devono risultare rappresentativi dei principali parametri caratteristici delle categorie edilizie considerate, quali ad esempio le dimensioni, la geometria, l'epoca di costruzione, le condizioni climatiche, la struttura d'involucro e il corrispondente valore di trasmittanza, i servizi tecnici e i vettori energetici con il rispettivo consumo della quota di energia [6].

Nella presente tesi la metodologia di cost-optimal viene applicata ad un edificio residenziale esistente, corrispondente ad un condominio situato nel centro della città di Torino, ed è utilizzata come strumento decisionale per valutare, in fase preliminare, le migliori

combinazioni di interventi di riqualificazione energetica, in grado di minimizzare i costi durante il ciclo di vita dell'edificio e comportando al contempo l'ottenimento di un apprezzabile valore di prestazione energetica, che costituiranno la strategia progettuale da seguire nelle fasi di lavoro successive.

3.2.2. Scelta degli interventi di efficienza energetica

La fase successiva della metodologia consiste nella scelta delle misure di efficienza energetica da applicare agli edifici di riferimento (nella loro interezza oppure ad una porzione di essi).

Gli interventi considerati devono comprendere alternative progettuali che riguardano l'involucro edilizio, i sistemi tecnici a servizio dell'edificio e l'integrazione di fonti energetiche rinnovabili, che possono influire quindi sul fabbisogno di energia primaria dell'edificio stesso [6].

Al fine di considerare l'interazione tra differenti misure, e l'effetto positivo che tali sinergie hanno in termini di costi e prestazioni energetiche (e.g.: l'isolamento dell'involucro edilizio incide sulla potenza e le dimensioni dei sistemi impiantistici), gli Orientamenti che accompagnano il Regolamento Delegato raccomandano di combinare gli interventi considerati in opportuni "pacchetti di misure", che costituiscono le varianti progettuali da applicare all'edificio di riferimento, la cui efficacia viene valutata nelle successive analisi energetico-economiche.

Quanti più pacchetti di interventi sono valutati, comprendenti tanto tecnologie di comprovata efficacia quanto innovative, tanto più accurata sarà l'individuazione della miglior soluzione in termini di efficienza energetica in funzione dei costi. Per garantire un'analisi robusta, il numero di pacchetti di misure considerato non deve essere inferiore a 10 (escluso l'edificio di riferimento) [6].

Per limitare i calcoli necessari, gli Orientamenti che accompagnano il Regolamento Delegato suggeriscono di organizzare le combinazioni di interventi in una opportuna matrice (detta "matrice degli interventi"), così da poter scartare in partenza le soluzioni tecnologiche che si escludono a vicenda (e.g.: utilizzo di una pompa di calore per il riscaldamento in combinazione con una caldaia ad elevata efficienza).

Per quanto riguarda l'applicazione della metodologia di cost-optimal al caso studio, vengono applicate all'edificio condominiale analizzato differenti combinazioni di misure riguardanti l'involucro edilizio (opaco e trasparente), i sistemi tecnici a servizio dell'edificio (riscaldamento, raffrescamento, produzione di acqua calda sanitaria e ventilazione meccanica) e l'integrazione di fonti rinnovabili (fotovoltaico). Gli interventi presi in considerazione e opportunamente combinati riguardano sia le parti comuni che le parti esclusive del condominio, e risultano conformi ai requisiti prestazionali cogenti a livello nazionale (DM 26 giugno 2015 - Requisiti Minimi) in tema di efficienza energetica.

3.2.3. Valutazione della performance energetica

Una volta definito l'edificio di riferimento e le varianti progettuali da applicare, si passa all'analisi energetico economica dei pacchetti di misure individuati.

Per quanto riguarda le valutazioni energetiche, l'obiettivo è determinare il consumo annuo dell'edificio espresso in termini di energia primaria, che include quella utilizzata per il riscaldamento, il raffrescamento, la ventilazione, l'acqua calda sanitaria e l'illuminazione [6].

Gli Orientamenti che accompagnano il Regolamento Delegato raccomandano di eseguire il calcolo della prestazione energetica secondo le modalità riportate di seguito:

1. calcolo del fabbisogno netto di energia termica. Questo viene calcolato in inverno come dispersione di energia termica per trasmissione attraverso l'involucro e per ventilazione meno i guadagni interni (da apparecchiature, sistemi di illuminazione e occupazione) e i guadagni «naturali» di energia (riscaldamento solare passivo);
2. sottrazione dell'energia termica da sorgenti rinnovabili generata e utilizzata in situ (ad esempio da collettori solari);
3. calcolo del consumo di energia per ciascun uso finale (riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria, ventilazione e illuminazione) e per ciascun vettore energetico (elettricità, combustibili), tenendo conto dell'efficienza dei sistemi di produzione, distribuzione, emissione e controllo;
4. sottrazione dell'energia elettrica da sorgenti rinnovabili generata e utilizzata in situ (ad esempio da pannelli fotovoltaici);
5. calcolo dell'energia fornita all'edificio per ciascun vettore energetico come somma dei consumi energetici non coperti da fonti rinnovabili;
6. calcolo dell'energia primaria associata all'energia fornita, utilizzando i fattori nazionali di conversione;
7. calcolo dell'energia primaria associata con l'energia esportata verso il mercato (ad esempio generata da sorgenti rinnovabili o da cogeneratori in situ);
8. calcolo dell'energia primaria netta come differenza tra quella associata all'energia fornita e quella associata all'energia esportata.

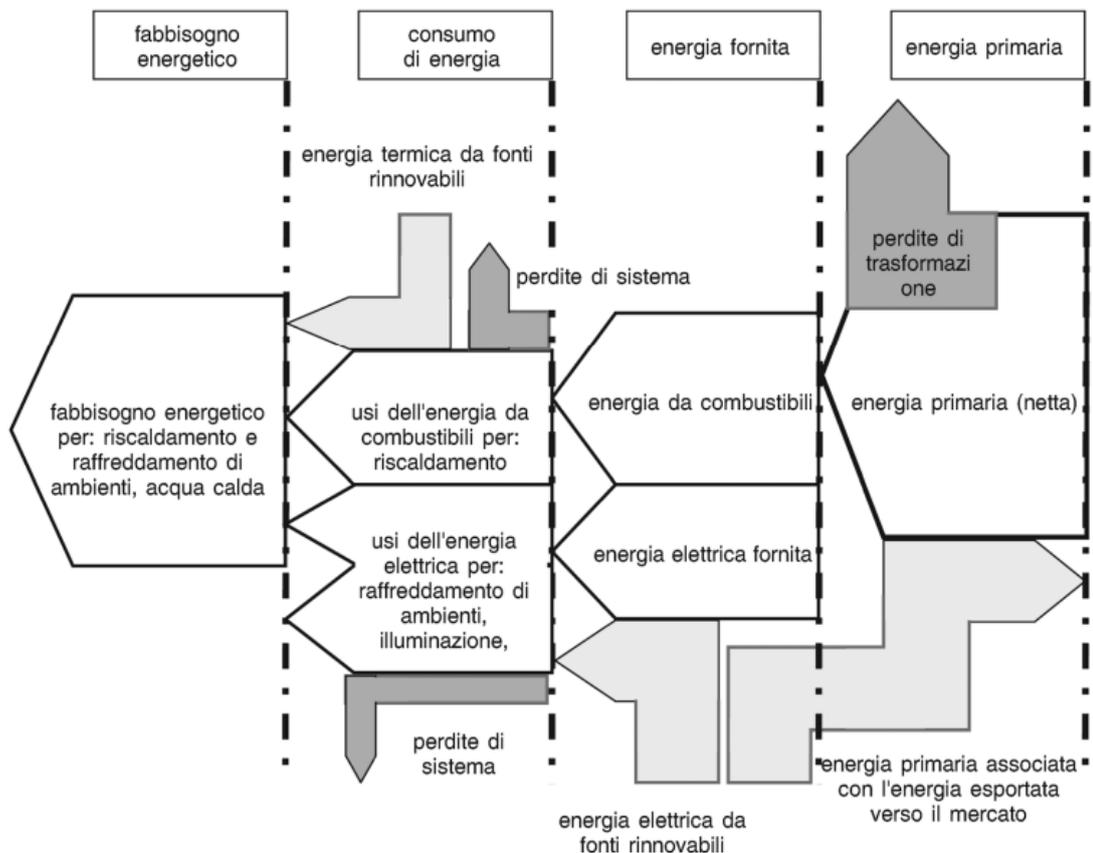


Figura 2 - Rappresentazione schematica del sistema di calcolo del fabbisogno di energia primaria [6]

In merito al caso studio analizzato nella presente tesi, il calcolo del fabbisogno di energia primaria allo stato attuale e nelle diverse varianti progettuali analizzate viene realizzato in conformità con le Specifiche Tecniche UNI/TS 11300, mediante la realizzazione e simulazione di modelli energetici dell'edificio attraverso il software EC700 prodotto da EDILCLIMA Programmi.

3.2.4. Analisi finanziaria secondo il metodo del costo globale

Per quanto riguarda l'analisi economica, il Regolamento Delegato n. 244/2012 prevede che i calcoli siano effettuati in accordo con la Norma UNI EN 15459 [32], che fornisce una metodologia per la valutazione della performance economica degli interventi di efficientamento energetico degli edifici.

Tale normativa distingue tra due metodi di calcolo: il costo globale (global cost) e la rendita finanziaria (annuality cost). Il Regolamento Delegato prevede l'utilizzo della prima metodologia di calcolo, dove il costo globale dell'edificio è valutato in termini di Valore Attuale Netto (VAN).

Il VAN risulta spesso utilizzato nella conduzione di analisi finanziarie relative a progetti a medio/lungo termine; quest'ultimo consente di definire il valore attuale di una serie di flussi

di cassa attesi in un periodo di tempo stabilito, non solo sommandoli contabilmente, ma attualizzandoli sulla base del tasso di rendimento (detto anche tasso di attualizzazione) [18].

La valutazione economica condotta tramite il metodo del costo globale prende in considerazione non solo i costi iniziali di investimento, ma anche la somma di quelli annuali (energetici, di manutenzione e di esercizio), il valore residuo delle misure di efficienza energetica considerate (nel caso in cui la vita utile ecceda il periodo di calcolo) e gli eventuali costi di smaltimento, tutti riferiti all'anno di inizio [6]. L'obiettivo è quello di condurre un'analisi relativa all'intero ciclo di vita economica dell'edificio, e non solo alla fase iniziale di investimento capitale.

Per la definizione da parte degli Stati Membri dei requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici, il Regolamento Delegato prevede la realizzazione di due valutazioni economiche distinte: una relativa alla prospettiva finanziaria, ovvero quella dell'investitore privato che desidera costruire/ristrutturare un edificio, e l'altra relativa alla prospettiva macroeconomica, di respiro più ampio, che considera invece il punto di vista dello Stato Membro; tali valutazioni potrebbero portare a risultati differenti in termini di livello di prestazione ottimale in funzione dei costi per uno stesso edificio di riferimento, per questo il Regolamento Delegato prescrive agli Stati Membri di effettuare entrambe le valutazioni, scegliendo in un secondo momento quella da adottare [18].

In particolare, nella prospettiva finanziaria vengono considerati i costi così come visti dal cittadino, comprensivi di IVA, accise e tasse in generale. In merito agli incentivi e alle sovvenzioni applicabili, vista la rapidità con cui possono variare, il Regolamento lascia libera scelta agli Stati Membri di includerli o meno nel calcolo. Vengono invece esclusi completamente i costi di aggiuntivi attribuibili alle emissioni di CO₂ (esternalità) [18].

Al contrario, la prospettiva macroeconomica si distingue dalla precedente in quanto trascura nel calcolo tasse e incentivi, mentre tiene in considerazione le esternalità, in termini di costi delle emissioni di CO₂. Tale prospettiva è di respiro più ampio rispetto alla precedente, tiene conto del bene pubblico e rispecchia il punto di vista non tanto dell'investitore privato ma dello Stato [18].

Di seguito si riporta una tabella che rappresenta le assunzioni che differenziano i due approcci.

Parameter	Financial Perspective	Macroeconomic Perspective
Interest rate	Real interest rate	Societal interest rate
Subsidies and incentives	Included	Excluded
Taxes	Included	Excluded
Cost of emissions	Excluded	Included

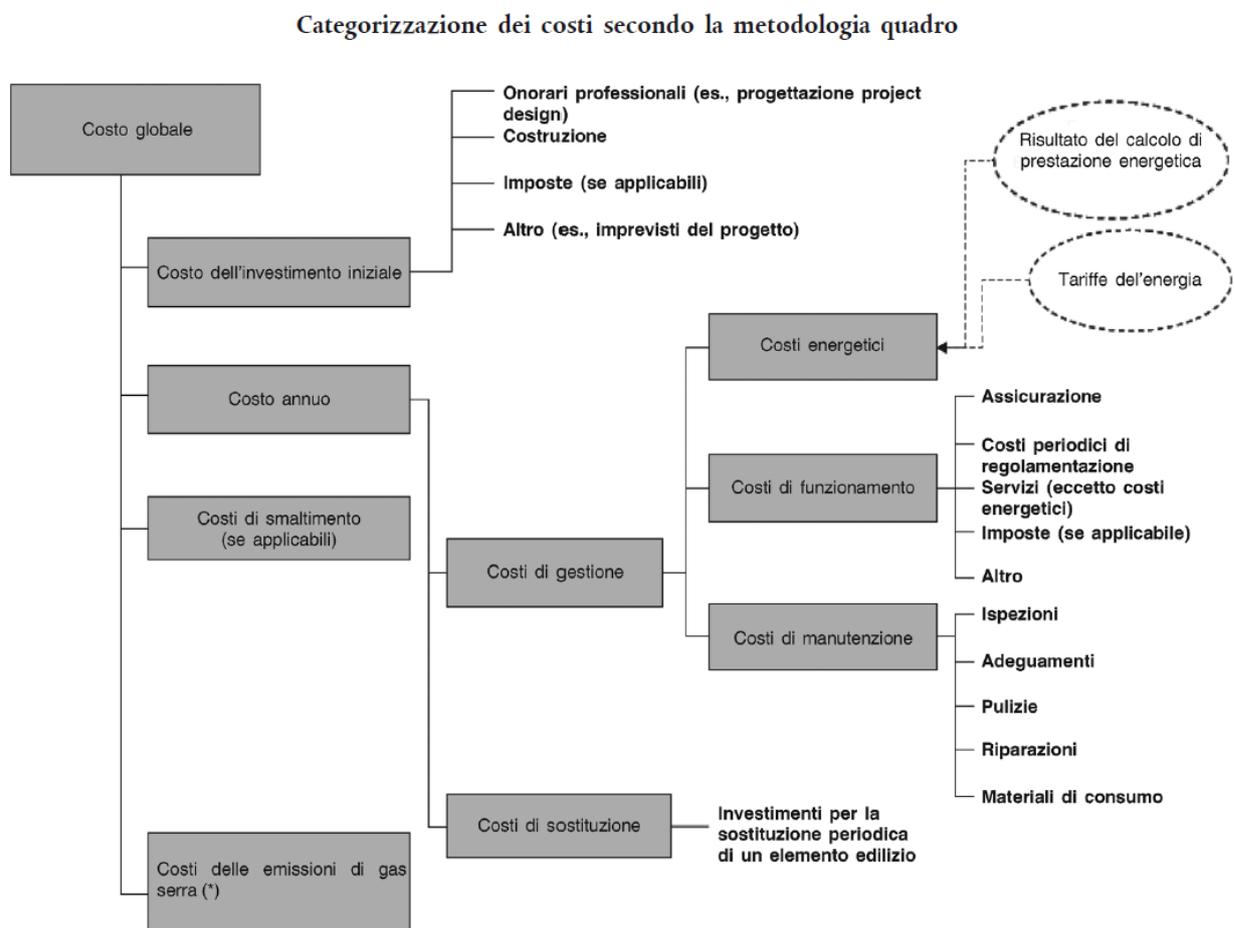
Figura 3 - Differenti assunzioni relative alla prospettiva finanziaria e macroeconomica [22]

Per quanto riguarda l'applicazione della metodologia al caso studio, si è utilizzato nel calcolo del costo globale l'approccio finanziario, che tiene quindi conto della prospettiva dell'investitore.

3.2.4.1. Calcolo del costo globale

Negli Orientamenti che accompagnano il Regolamento Delegato n. 244/2012 vengono specificate le categorie fondamentali di costo da considerare nell'analisi, in linea con quanto indicato nella norma UNI EN 15459, ovvero i costi dell'investimento iniziale, i costi di gestione, compresi quelli energetici, periodici e di sostituzione, gli eventuali costi di smaltimento e, nell'approccio macroeconomico, i costi delle emissioni di gas serra [5].

Tale categorizzazione è rappresentata in maniera schematica in Figura 4.



(*) **Esclusivamente per il calcolo a livello macroeconomico**

Figura 4 - Categorizzazione dei costi secondo UNI EN 15459 [6]

Nel Regolamento Delegato viene riportata la formula da utilizzare per il calcolo del costo globale, conforme a quella indicata nel documento UNI EN 15459:

$$C_G(\tau) = C_I + \sum_j \left[\sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) \cdot R_d(i)) - V_{f,\tau}(j) \right]$$

Dove:

- τ = periodo di calcolo
- $C_G(\tau)$ = costo globale, riferito all'anno iniziale τ_0 , nell'arco del periodo di calcolo
- C_I = costo iniziale dell'investimento per la misura o l'insieme di misure j
- $C_{a,i}(j)$ = costo annuale, durante l'anno i, per la misura o l'insieme di misure j
comprende i costi di esercizio, ovvero quelli relativi ai consumi energetici che si verificano nella fase di esercizio del sistema edificio - impianto, quelli di manutenzione e quelli di sostituzione
- $R_d(i)$ = fattore di attualizzazione all'anno i, che consente di riferire i costi futuri all'anno di inizio τ_0 . Si calcola come:

$$R_d(p) = \left(\frac{1}{1 + \frac{r}{100}} \right)^p$$

dove:

- p = numero di anni a partire dal periodo iniziale
- r = tasso di sconto reale (l'inflazione è esclusa)
- $V_{f,\tau}(j)$ = valore residuo della misura o dell'insieme di misure j alla fine del periodo di calcolo, attualizzato all'anno di inizio τ_0

Nel caso di approccio macroeconomico, viene inserita la voce di costo $C_{c,i}(j)$, che rappresenta il costo delle emissioni di carbonio per l'intervento o l'insieme di interventi j, durante l'anno i.

3.2.4.2. Periodo di calcolo e valore residuo

Per quanto riguarda il periodo di calcolo τ , questo viene definito in funzione della destinazione d'uso dell'edificio di riferimento analizzato. In particolare, per gli edifici residenziali è fissato a 30 anni, mentre per gli edifici ad uso uffici a 20 [5].

Nel caso in cui un elemento edilizio presenti un ciclo di vita superiore al periodo di calcolo (e.g.: facciata dell'edificio) è necessario valutare il suo valore residuo, ipotizzandone un deprezzamento lineare del tempo. Questo deve essere poi attualizzato all'anno di inizio τ_0 [6].

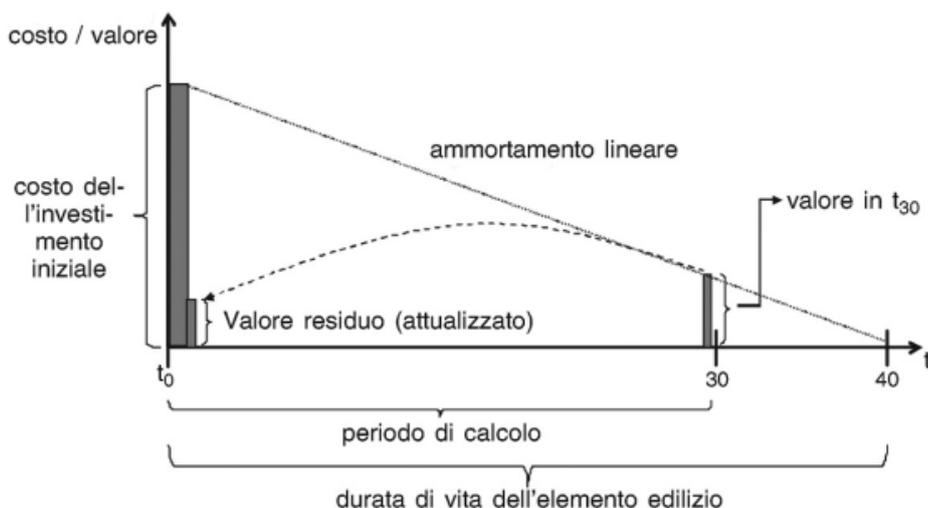


Figura 5 - Calcolo del valore residuo di un elemento edilizio con ciclo di vita più lungo del periodo di calcolo [6]

È possibile anche che alcuni elementi di un edificio abbiano una vita utile inferiore al periodo di calcolo (e.g.: caldaia). Questi dovranno essere quindi sostituiti almeno una volta nell'arco temporale considerato. A seguito della sostituzione, inizia un nuovo periodo di ammortamento, rispetto al quale si calcola il valore residuo dell'elemento in esame [6].

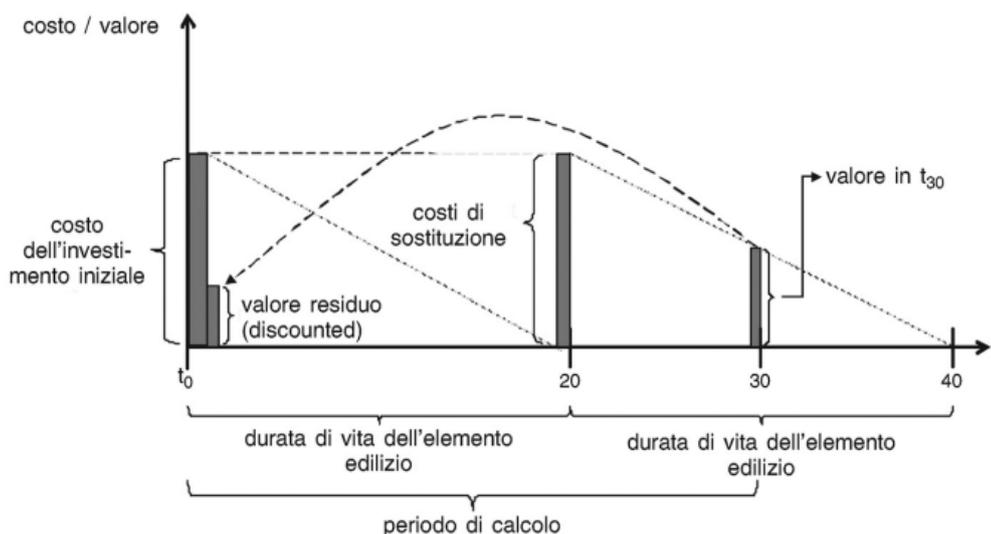


Figura 6 - Calcolo del valore residuo di un elemento edilizio con ciclo di vita più breve del periodo di calcolo [6]

Il Regolamento Delegato consente anche di tener conto del progresso tecnologico relativo alla maggior diffusione di una data tecnologia, riducendo il costo di sostituzione di un dato elemento rispetto a quello iniziale. È possibile in ogni caso non avvalersi di tale possibilità [6].

3.2.4.3. Analisi di sensitività

Per garantire la robustezza dei risultati ottenuti, il Regolamento Delegato prescrive agli Stati Membri di effettuare opportune analisi di sensitività, ovvero variazioni di alcuni parametri fondamentali il cui andamento può influire in maniera determinante sul risultato finale, quali

ad esempio il prezzo dei vettori energetici considerati, il tasso di attualizzazione, la durata del periodo di calcolo etc.[6].

In merito al caso studio analizzato nella presente tesi, si sono effettuate tre analisi di sensitività differenti: una relativa al tasso di attualizzazione, una alla durata del periodo di calcolo e una all'introduzione degli incentivi fiscali disponibili a livello nazionale.

3.2.5. Determinazione del livello ottimale in funzione dei costi

Una volta effettuate le valutazioni energetico-finanziarie per tutti i pacchetti di interventi presi in considerazione nell'analisi, è necessario metterli in relazione tra di loro, per poterli confrontare in maniera opportuna.

Ciò avviene mediante la realizzazione di un grafico, detto di cost-optimal, dove sull'asse delle ascisse è rappresentata l'energia primaria, espressa in $[kWh/m^2 \cdot anno]$, mentre sull'asse delle ordinate il costo globale, espresso in $[€/m^2]$. Tutti i pacchetti di misure precedentemente analizzati vengono riportati come punti in tale grafico, e vanno ad individuare una curva di costo specifica, denominata cost curve [6]. La variante progettuale che individua il livello ottimale di prestazione energetica in funzione dei costi è rappresentata dal punto inferiore della cost curve, e si trova all'interno del cost-optimal range [6].

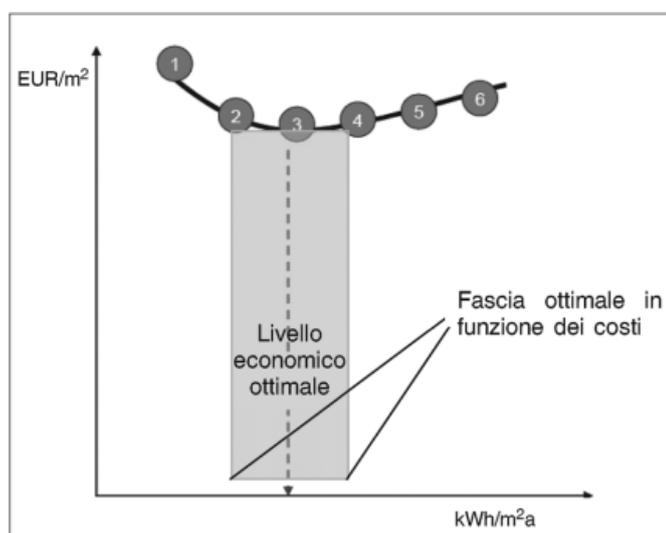


Figura 7 - Grafico di cost-optimal [6]

Nel caso in cui più pacchetti di interventi siano caratterizzati dagli stessi costi globali (o molto simili), la definizione del livello ottimale in funzione dei costi ricade su quello caratterizzato dal minor consumo di energia primaria [6].

4 STRUMENTI DI MODELLAZIONE E ANALISI ENERGETICA

Nel seguente capitolo vengono approfondite le metodologie di calcolo, le tipologie di analisi e il software di modellazione adottati nella valutazione della performance energetica dell'edificio che costituisce il caso studio della presente tesi, sia allo stato attuale che a quello di progetto, per tutti i diversi tipi di pacchetti di interventi considerati.

Vengono inoltre riportate le prescrizioni e le verifiche da rispettare, stabilite a livello nazionale dal Decreto Ministeriale 26 giugno 2015 – Requisiti Minimi per le tipologie di intervento che interessano l'edificio oggetto di studio.

4.1 METODOLOGIA DI CALCOLO

Il fabbisogno annuo di energia primaria dell'edificio, espresso in [kWh/m²·anno], viene calcolato, sia nella condizione di riferimento pre-intervento che nelle diverse varianti progettuali, in conformità con la Specifica Tecnica UNI/TS 11300, che fornisce una metodologia di calcolo univoca per la determinazione delle prestazioni energetiche degli edifici. Questa risulta a sua volta suddivisa in sei parti:

- UNI/TS 11300-1 - *Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale* [26];
- UNI/TS 11300-2 - *Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali* [27];
- UNI/TS 11300-3 - *Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva* [28];
- UNI/TS 11300-4 - *Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria* [29];
- UNI/TS 11300-5 - *Calcolo dell'energia primaria e dalla quota di energia da fonti rinnovabili* [30];
- UNI/TS 11300-6 - *Determinazione del fabbisogno di energia per ascensori e scale mobili* [31];

Nella valutazione della performance energetica dell'edificio, la Serie UNI/TS 11300 tiene conto dei seguenti servizi energetici: climatizzazione invernale ed estiva, produzione di acqua calda sanitaria, ventilazione meccanica, illuminazione e trasporto di persone (gli ultimi due solo nel caso di edificio a destinazione d'uso non residenziale).

La normativa stabilisce un metodo di tipo semi-stazionario per il calcolo del fabbisogno di energia termica utile³ per la climatizzazione invernale ed estiva, che utilizza il mese come intervallo di calcolo. Tale metodologia si basa sul bilancio tra dispersioni termiche (per trasmissione attraverso l'involucro edilizio e per ventilazione) e apporti gratuiti (solari e interni, dovuti a occupanti, apparecchiature e illuminazione) durante le stagioni di riscaldamento e raffrescamento. Per tener conto degli effetti dinamici di sfasamento temporale tra dispersioni e guadagni, dovuti all'inerzia termica dell'edificio, viene introdotto nel bilancio un opportuno coefficiente moltiplicativo degli apporti gratuiti (fattore di utilizzazione).

In particolare, le equazioni utilizzate per i bilanci termici invernale ed estivo, mese per mese e per le diverse zone termiche⁴ di cui si compone l'edificio, sono le seguenti:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \cdot Q_{gn} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - \eta_{H,gn} \cdot (Q_{int} + Q_{sol,w}) \text{ [kWh]}$$

$$Q_{C,nd} = Q_{gn} - \eta_{C,ls} \cdot Q_{C,ht} = (Q_{int} + Q_{sol,w}) \cdot \eta_{C,ls} \cdot (Q_{C,tr} + Q_{C,ve}) \text{ [kWh]}$$

Dove:

- Q_{nd} = fabbisogno netto di energia termica per il riscaldamento (H) o per il raffrescamento (C) [kWh]
- Q_{ht} = scambio di energia termica totale (per trasmissione e ventilazione) nel caso di riscaldamento (H) o di raffrescamento (C) [kWh]
- Q_{gn} = apporti totali di energia termica [kWh]
- $\eta_{H,gn}$ = fattore di utilizzazione degli apporti di energia termica
- $\eta_{C,ls}$ = fattore di utilizzazione delle dispersioni di energia termica
- Q_{tr} = scambio di energia termica per trasmissione attraverso i componenti opachi e trasparenti di involucro edilizio, nel caso di riscaldamento (H) o di raffrescamento (C) [kWh]
- Q_{ve} = scambio di energia termica per ventilazione nel caso di riscaldamento (H) o di raffrescamento (C) [kWh]
- Q_{int} = apporti di energia termica dovuti alle sorgenti interne (occupanti, apparecchi illuminanti, dispositivi elettronici etc.) [kWh]

³ Quantità di calore che deve essere fornita o sottratta da un ambiente climatizzato per mantenere le condizioni di temperatura interna desiderate durante un dato periodo di tempo, al netto dell'efficienza energetica dei sistemi di produzione, distribuzione, regolazione ed ammissione dell'energia termica o frigorifera.

⁴ Definite nella UNI/TS 11300-1 come *porzioni di edificio climatizzate ad una determinata temperatura e con identiche modalità di regolazione*.

- $Q_{sol,w}$ = apporti di energia termica dovuti alla radiazione solare incidente sui componenti vetrati [kWh]

I dati climatici esterni utilizzati nel calcolo sono valori medi mensili, e fanno riferimento alla località in cui è ubicato l'edificio d'interesse. I dati climatici convenzionali sono contenuti nella norma UNI EN 10349.

La UNI/TS 11300-1 definisce in maniera puntuale come effettuare il calcolo dei diversi termini che compongono i bilanci termici sopra riportati, e fornisce i dati di input e le condizioni al contorno necessari al calcolo.

Per quanto riguarda il servizio di produzione di acqua calda sanitaria, la formulazione del fabbisogno di energia termica utile richiesto, calcolato su base mensile per l'intero anno, viene indicata nella UNI/TS 11300-2, e risulta:

$$Q_w = \rho_w \cdot c_w \cdot \sum V_{w,i} \cdot (\theta_{er,i} - \theta_0) \cdot G \text{ [kWh]}$$

Dove:

- ρ_w = massa volumica dell'acqua, pari a 1000 [kg/m³]
- c_w = calore specifico dell'acqua, pari a $1.162 \cdot 10^{-3}$ [kWh/(kg·K)]
- $V_{w,i}$ = volume di acqua giornaliero per l'i-esima attività o servizio richiesto [m³/giorno], calcolata in maniera differente a seconda della destinazione d'uso dell'edificio
- $\theta_{er,i}$ = temperatura di erogazione dell'acqua per l'i-esima attività o servizio richiesto [°C]
- θ_0 = temperatura dell'acqua fredda in ingresso [°C]
- G = numero di giorni del periodo di calcolo considerato

A partire dai fabbisogni di energia termica utile sopra riportati, è possibile ricavare i fabbisogni di energia termica in ingresso ai generatori andando a sommare le perdite relative ai sottosistemi impiantistici presenti⁵ e a sottrarre gli eventuali recuperi termici, secondo la metodologia riportata nelle UNI/TS 11300-2 e 3: qui viene definito in maniera puntuale come calcolare le perdite e i recuperi termici degli impianti di climatizzazione invernale ed estiva e di produzione di acqua calda sanitaria, definendo anche i valori dei rendimenti relativi ai sottosistemi di cui si compongono.

A partire dal fabbisogno di energia termica in ingresso al generatore, tenendo anche in considerazione gli eventuali consumi elettrici degli ausiliari impiantistici presenti, è infine

⁵ Per gli impianti di climatizzazione invernale ed estiva, i sottosistemi considerati dalla UNI/TS 11300 sono quelli di regolazione, emissione, distribuzione, accumulo e generazione; per gli impianti di produzione di acqua calda sanitaria i sottosistemi sono invece quelli di erogazione, distribuzione, accumulo e generazione.

possibile ricavare il fabbisogno di energia primaria dei singoli servizi energetici, utilizzando i fattori f_p di conversione dei diversi vettori energetici utilizzati, definiti a livello nazionale dal DM 26 giugno 2015 – Requisiti Minimi, e riportati in Figura 8.

Vettore energetico	$f_{P,nren}$	$f_{P,ren}$	$f_{P,tot}$
Gas naturale ⁽¹⁾	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 ⁽²⁾	0,20	0,80	1,00
Biomasse liquide e gassose ⁽²⁾	0,40	0,60	1,00
Energia elettrica da rete ⁽³⁾	1,95	0,47	2,42
Teleriscaldamento ⁽⁴⁾	1,5	0	1,5
Rifiuti solidi urbani	0,2	0,2	0,4
Teleraffrescamento ⁽⁴⁾	0,5	0	0,5
Energia termica da collettori solari ⁽⁵⁾	0	1,00	1,00
Energia elettrica prodotta da fotovoltaico, mini-eolico e mini-idraulico ⁽⁵⁾	0	1,00	1,00
Energia termica dall'ambiente esterno – free cooling ⁽⁵⁾	0	1,00	1,00
Energia termica dall'ambiente esterno – pompa di calore ⁽⁵⁾	0	1,00	1,00
⁽¹⁾ I valori saranno aggiornati ogni due anni sulla base dei dati forniti da GSE. ⁽²⁾ Come definite dall'allegato X del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152. ⁽³⁾ I valori saranno aggiornati ogni due anni sulla base dei dati forniti da GSE. ⁽⁴⁾ Fattore assunto in assenza di valori dichiarati dal fornitore e asseverati da parte terza, conformemente al quanto previsto al paragrafo 3.2. ⁽⁵⁾ Valori convenzionali funzionali al sistema di calcolo.			

Figura 8 - Fattori di conversione f_p dei vettori energetici in energia primaria [7]

Il fabbisogno di energia primaria viene espresso in termini di energia primaria non rinnovabile (nren), rinnovabile (ren) e totale (somma dei primi due), a cui corrispondono differenti fattori di conversione f_p .

La normativa, come detto, illustra in maniera approfondita anche come determinare il fabbisogno di energia primaria dei servizi di illuminazione e trasporto di persone, considerati nel caso in cui l'edificio analizzato presenti una destinazione d'uso non residenziale.

Il fabbisogno di energia primaria globale annuale dell'edificio viene definito nella UNI/TS 11300-5 come la somma dei fabbisogni di energia primaria relativi a tutti i servizi energetici considerati (come detto in precedenza, quelli presi in considerazione dalla norma sono la climatizzazione invernale ed estiva, la produzione di acqua calda sanitaria, la ventilazione meccanica, l'illuminazione e il trasporto di persone solo nel caso di destinazione d'uso non residenziale):

$$E_{P,gl} = E_{P,H} + E_{P,C} + E_{P,W} + E_{P,V} + E_{P,L} + E_{P,T} \text{ [kWh]}$$

Dove:

- $E_{P,gl}$ = fabbisogno di energia primaria globale [kWh]
- $E_{P,H}$ = fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale [kWh]
- $E_{P,C}$ = fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione estiva [kWh]
- $E_{P,W}$ = fabbisogno di energia primaria per la produzione di acqua calda sanitaria [kWh]
- $E_{P,V}$ = fabbisogno di energia primaria per la ventilazione [kWh]
- $E_{P,L}$ = fabbisogno di energia primaria per l'illuminazione [kWh]
- $E_{P,T}$ = fabbisogno di energia primaria per il trasporto [kWh]

Il fabbisogno di energia primaria globale viene espresso in termini di energia primaria rinnovabile, non rinnovabile e totale, somma dei primi due ($E_{P,gl,tot} = E_{P,gl,nren} + E_{P,gl,ren}$).

Il fabbisogno di energia primaria dei singoli servizi energetici viene definito, sempre nella UNI/TS 11300-5, come la differenza tra l'energia esportata e quella consegnata da ciascun vettore energetico, ed è dato dall'espressione:

$$E_{P,k} = \sum(Q_{del,k,i} \cdot f_{p,del,i}) - \sum(Q_{exp,k,i} \cdot f_{p,exp,i}) \text{ [kWh]}$$

Dove:

- $E_{P,k}$ = fabbisogno di energia primaria relativa al k-esimo servizio energetico [kWh]
- $Q_{del,k,i}$ = energia fornita dal -iesimo vettore energetico al k-esimo servizio energetico [kWh]
- $Q_{exp,k,i}$ = energia esportata dal -iesimo vettore energetico associato k-esimo servizio energetico [kWh]
- $f_{p,del,i}$ = fattore di conversione dell'-iesimo vettore energetico (energia fornita)
- $f_{p,exp,i}$ = fattore di conversione dell'-iesimo vettore energetico (energia esportata)

Dividendo il fabbisogno annuale di energia primaria globale e dei singoli servizi energetici per la superficie utile riscaldata e/o raffrescata dell'edificio [m^2], si ottengono gli indici di prestazione energetica del fabbricato e dei singoli servizi energetici, espressi in termini di energia primaria totale e non rinnovabile. In particolare, si ha:

$$\begin{aligned} EP_{tot} &= \frac{E_{p,gl,tot}}{A} \text{ [kWh/m}^2\text{]} & EP_{nren} &= \frac{E_{p,gl,nren}}{A} \text{ [kWh/m}^2\text{]} \\ EP_{k,tot} &= \frac{E_{p,k,tot}}{A} \text{ [kWh/m}^2\text{]} & EP_{k,nren} &= \frac{E_{p,k,nren}}{A} \text{ [kWh/m}^2\text{]} \end{aligned}$$

Dove:

- EP_{tot} = indice di prestazione energetica globale totale [kWh/m²]
- EP_{nren} = indice di prestazione energetica globale non rinnovabile [kWh/m²]
- $EP_{k,tot}$ = indice di prestazione energetica totale relativo al singolo servizio energetico k [kWh/m²]
- $EP_{k,nren}$ = indice di prestazione energetica non rinnovabile relativo al singolo servizio energetico k [kWh/m²]
- $E_{p,gl,tot}$ = fabbisogno globale di energia primaria totale dell'edificio [kWh]
- $E_{p,gl,nren}$ = fabbisogno globale di energia primaria non rinnovabile dell'edificio [kWh]
- $E_{p,k,tot}$ = fabbisogno di energia primaria totale relativo al singolo servizio energetico k [kWh]
- $E_{p,k,nren}$ = fabbisogno di energia primaria non rinnovabile relativo al singolo servizio energetico k [kWh]
- A = superficie utile riscaldata e/o raffrescata dell'edificio [m²]

Nell'analisi di cost-optimal, verrà utilizzato l' $EP_{gl,tot}$ [kWh/m²] come indicatore di prestazione energetica dell'edificio da confrontare con il costo globale [€/m²].

L' $EP_{gl,nren}$ risulta, invece, l'indice di prestazione energetica da utilizzare nella definizione della classe energetica dell'edificio, secondo quanto indicato nel DM 26 giugno 2015 – Linee Guida APE.

4.2 TIPOLOGIA DI VALUTAZIONE: ASSET RATING E TAILORED RATING

La Serie UNI/TS 11300 prevede tre modalità diverse di valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici, utilizzate in applicazioni differenti. Tali tipologie e le loro possibili finalità sono indicate nei prospetti 2 e 3 della UNI/TS 11300-1, e vengono riportate di seguito.

	Dati in ingresso			Scopo della valutazione
	Uso	Clima	Edificio	
A1 di progetto (Design Rating)	Standard	Standard	Progetto	Permesso di costruire, Certificazione o Qualificazione energetica del progetto
A2 Standard (Asset Rating)	Standard	Standard	Reale	Certificazione o Qualificazione energetica
A3 Adattata all'utenza (Tailored Rating)	In funzione dello scopo		Reale	Ottimizzazione, validazione, diagnosi e programmazione di interventi di riqualificazione energetica

Tabella 1 - Tipologie di valutazione della prestazione energetica degli edifici [26]

In particolare, si ha che le valutazioni di tipo A1 (Design Rating) e A2 (Asset Rating) consentono di determinare un valore di fabbisogno energetico “convenzionale” dell’edificio, basandosi sull’adozione di dati di input standard (forniti dalla normativa). Una valutazione di questo tipo risulta utile per confrontare la performance energetica di edifici differenti, indipendentemente dalle loro condizioni reali di utilizzo, ed è quella impiegata per la certificazione energetica degli edifici e per le verifiche di legge. Al contrario, la valutazione di tipo A3 (Tailored Rating) viene utilizzata nel caso di diagnosi energetica dell’edificio, e si basa sull’adozione di parametri di input il più possibile effettivi, rappresentativi delle reali condizioni di utilizzo dell’edificio.

Per quanto riguarda il caso studio analizzato nella presente tesi, è stata adottata una valutazione di tipo A3 (Tailored Rating) per la determinazione del fabbisogno di energia primaria specifico annuo $EP_{gl,tot}$ dell’edificio [kWh/m²-anno], che costituisce il parametro energetico da confrontare con quello economico nella metodologia di cost-optimal: in questo modo è possibile, infatti, stimare quale sia l’effettivo risparmio energetico ottenibile nei diversi scenari post-intervento previsti, in modo tale da individuare correttamente la soluzione progettuale di ottimo in funzione dei costi.

La valutazione di tipo A2 (Asset Rating) è invece stata adottata per determinare la classe energetica convenzionale dell’edificio in condizioni pre e post-intervento, e per verificare che gli interventi di riqualificazione previsti nelle varie casistiche rispettino i requisiti cogenti fissati a livello nazionale dal Decreto Ministeriale 26 giugno 2015 – Requisiti Minimi.

4.3 SOFTWARE DI MODELLAZIONE

La modellazione energetica dell'edificio è realizzata mediante l'utilizzo del software commerciale EC700 di EDILCLIMA Programmi⁶, che consente di calcolare le prestazioni energetiche degli edifici in conformità con la serie UNI/TS 11300.

Il modulo EC700, che costituisce il motore di calcolo base del programma, può essere integrato con diversi moduli correlati, quali ad esempio quello per la verifica dei requisiti minimi di legge, quello per la redazione dell'attestato di prestazione energetica dell'edificio o quello per la verifica degli incentivi fiscali disponibili, in modo tale che il software possa essere utilizzato per tutte le attività connesse ai calcoli progettuali ed energetici dell'edificio.

Prima di iniziare la modellazione, è necessario indicare la tipologia di valutazione energetica di interesse (A1, A2 o A3), la destinazione d'uso dell'edificio analizzato secondo DPR 412/93 e l'ubicazione geografica dello stesso, in modo che il software associ in maniera automatica alla località inserita i dati climatici secondo UNI 10349.

Attraverso il tool input grafico di cui è dotato, il programma consente di realizzare un modello energetico 3D dell'edificio; questo viene costruito andando a disegnare il fabbricato in pianta, tramite una modellazione ad oggetti, a partire da uno sfondo costituito dalle piante architettoniche dell'edificio, importabili all'interno del programma in formato DWG o DXF.

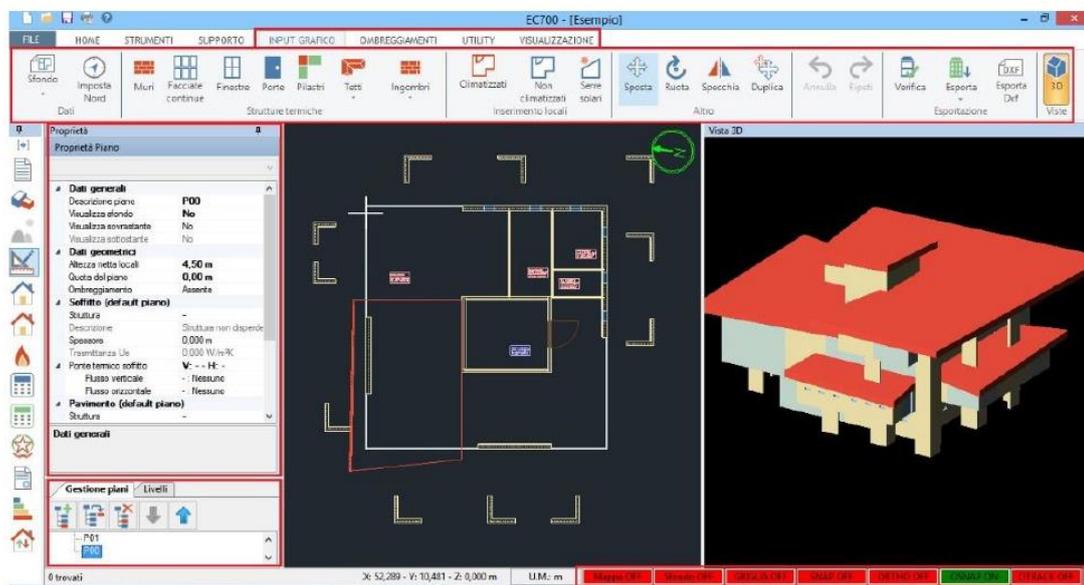


Figura 9 - Esempio di modello 3D dell'edificio costruito tramite input grafico [35]

Prima di tutto è necessario però modellare all'interno del software i diversi componenti di involucro opaco e trasparente, e configurare i ponti termici che lo caratterizzano.

⁶ Software House che si dedica anche allo sviluppo di programmi commerciali per la progettazione termotecnica-impiantistica.

Per i componenti opachi, suddivisi dal programma in muri verticali, solai e pavimenti orizzontali, oltre a definirne la stratigrafia e alcune caratteristiche generali, è necessario specificare la tipologia a cui appartengono: (T) se separano un locale climatizzato dall'esterno, (U) se dividono un locale climatizzato da uno non climatizzato, etc.

Per i componenti finestrati, invece, i dati di input richiesti dal programma sono le dimensioni del serramento, le caratteristiche del vetro, del telaio e delle schermature solari. È possibile anche associare direttamente ad ogni serramento il ponte termico parete-telaio, il cassonetto e/o il sottofinestra che lo caratterizzano.

Per quanto riguarda la configurazione dei ponti termici, è possibile procedere in due modi: o studiarli attraverso un software esterno di calcolo agli elementi finiti, inserendo manualmente o importando (nel caso di utilizzo del software Mold Simulator o IRIS) in EC700 i risultati ottenuti in termini di trasmittanza termica lineica e verifica del rischio di formazione muffe, oppure modellarli utilizzando l'abaco precalcolato EC709, che raccoglie al suo interno circa 250 differenti casistiche tipologiche a cui attingere, e che costituisce un modulo aggiuntivo implementato all'interno del programma.

Per quanto riguarda lo sviluppo del caso studio nella presente tesi, nel modello pre-intervento si è scelto di configurare i ponti termici utilizzando l'abaco EC709, mentre nei modelli post-intervento questi sono stati analizzati in maniera più precisa, ricorrendo all'utilizzo del software di modellazione agli elementi finiti IRIS, sviluppato da TEP S.r.l. e distribuito da ANIT. Questo, oltre a calcolare il valore di trasmittanza termica lineica del ponte termico considerato, restituisce in forma grafica la distribuzione di temperatura, il flusso termico e le curve isoterme per il rischio di formazione muffa. In questo modo i risultati ottenuti sono più puntuali e attendibili.

Una volta creati i componenti di involucro all'interno del programma, è possibile realizzare da input grafico il modello 3D dell'edificio analizzato, posizionando i diversi componenti lungo le planimetrie importate, e associando a questi ultimi i corrispondenti ponti termici.

Il programma risulta anche in grado di calcolare in maniera automatica gli ombreggiamenti relativi ai diversi componenti, a partire dalla rappresentazione grafica degli ingombri degli oggetti verticali, orizzontali e degli ostacoli esterni all'edificio (edifici vicini, alberi etc.), e in funzione dell'orientamento geografico associato ad ogni componente.

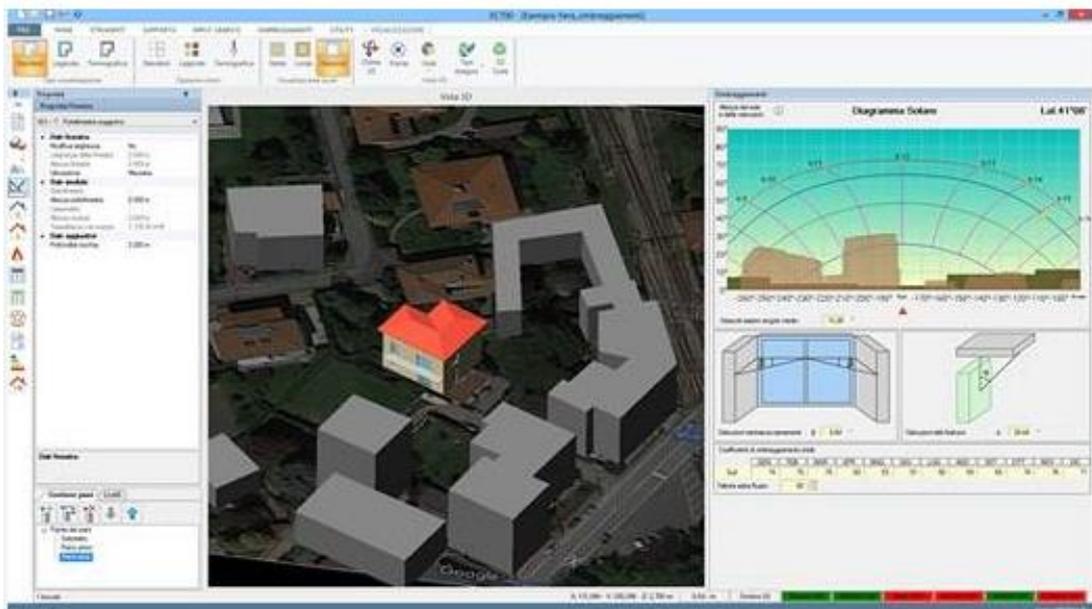


Figura 10 - Esempio di modello 3D dell'edificio con rappresentazione grafica degli ostacoli limitrofi [35]

Una volta terminata la modellazione della struttura del fabbricato, si procede con l'assegnazione delle diverse zone termiche e dei rispettivi locali climatizzati (in riscaldamento e/o in raffrescamento); per ogni locale sono richiesti dal programma alcuni dati di input, quali ad esempio la temperatura interna di set-point (invernale e/o estiva), la tipologia di ventilazione presente e il rispettivo valore di portata d'aria di ricambio richiesta.

Terminato anche questo passaggio, si procede infine alla definizione delle tipologie di impianti tecnici presenti a servizio dell'edificio (climatizzazione invernale ed estiva, produzione di acqua calda sanitaria, ventilazione meccanica), e delle loro caratteristiche attraverso l'inserimento di opportuni dati di input richiesti dal programma. È possibile modellare anche eventuali impianti a fonti rinnovabili, se presenti, quali solare fotovoltaico e termico, associandoli poi ad uno o a più servizi energetici relativi all'edificio.

Gli output energetici prodotti dal programma sono contenuti nelle maschere "Risultati fabbricato" e "Risultati energia primaria", e sono riportati per l'edificio nel suo complesso e per le singole zone termiche di cui questo si compone.

Il software fornisce in output, oltre ai fabbisogni di energia termica utile per il riscaldamento e il raffrescamento dell'edificio, i consumi dei vettori energetici, i fabbisogni di energia primaria relativi ai vari servizi energetici e gli indici di prestazione energetica secondo UNI TS 11300, anche la potenza termica invernale, necessaria per il dimensionamento degli impianti di riscaldamento, calcolata secondo UN EN 12831.

Tramite il software di modellazione è possibile, inoltre, calcolare la potenza estiva richiesta dal fabbricato, utilizzando o il metodo semi-stazionario Carrier-Pizzetti o quello dinamico orario indicato nella UNI EN ISO 52016-1.

4.4 VERIFICHE DI LEGGE

Come già illustrato al paragrafo 2.2.3., il DM 26 giugno 2015 – Requisiti Minimi stabilisce, a livello nazionale, i requisiti minimi di efficienza energetica che devono essere rispettati dagli edifici e le conseguenti verifiche da eseguirsi su alcuni parametri, in funzione della tipologia di intervento a cui questi sono sottoposti e della categoria a cui appartengono, secondo DPR 412/93.

All'Allegato I del decreto [7] vengono definite le tipologie di intervento possibili, riportate di seguito:

1. nuova costruzione: edificio il cui titolo abilitativo è stato richiesto dopo l'entrata in vigore del decreto (1° ottobre 2015);
2. demolizione e ricostruzione;
3. ampliamento e sopra elevazione: si considera ampliamento di edifici esistenti la realizzazione di nuovi volumi edilizi, connessi funzionalmente al volume preesistente o costituenti una nuova unità immobiliare, caratterizzati da un volume lordo climatizzato superiore al 15% di quello esistente o comunque superiore a 500 m²;
4. ristrutturazione importante: insieme di interventi che interessano almeno il 25% della superficie disperdente lorda complessiva dell'edificio (vero esterno o locali non climatizzati), comprensivi sia degli elementi opachi che trasparenti di involucro edilizio; si suddividono a loro volta in:
 - a. ristrutturazione importante di I livello: insieme di interventi che interessano almeno il 50% della superficie disperdente lorda dell'edificio e che comportano il completo rifacimento dell'impianto termico per la climatizzazione invernale e/o estiva;
 - b. ristrutturazione importante di II livello: insieme di interventi che interessano almeno il 25% della superficie disperdente lorda dell'edificio e che possono interessare l'impianto termico per la climatizzazione invernale e/o estiva.
5. riqualificazione energetica: insieme di interventi non riconducibili ai casi precedenti che hanno, comunque, un impatto sulla prestazione energetica dell'edificio.

Questi coinvolgono una superficie disperdente lorda dell'edificio inferiore o uguale al 25% e/o consistono nella nuova installazione/ristrutturazione di un impianto termico dell'edificio o in altri interventi parziali, compresa la sostituzione del generatore.

Per le tipologie di intervento 1, 2, 3 e 4a, i requisiti di prestazione energetica si applicano all'intero edificio (o, nel caso di ampliamento, alla nuova porzione dello stesso). Per ristrutturazioni importanti di I livello (caso 4a), i requisiti si riferiscono alle prestazioni energetiche relative al/ai servizi interessati.

Per le tipologie di intervento 4b e 5, i requisiti di prestazione energetica richiesti si applicano, invece, ai soli componenti edilizi e impianti oggetto di intervento, e si riferiscono alle loro relative caratteristiche termo-fisiche o di efficienza; solo per le ristrutturazioni importanti di II livello (caso 4b), è richiesta anche la verifica di un ulteriore parametro relativo alle prestazioni dell'involucro edilizio: il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione (H'_T), determinato per l'intera parete comprensiva di tutti i componenti su cui si è intervenuti.

Ci sono inoltre alcune prescrizioni, indicate all'articolo 2 comma 2.3 dell'Allegato I del decreto, che risultano comuni a tutte le tipologie di intervento sopra indicate.

In merito al caso studio in esame, i pacchetti di interventi di riqualificazione analizzati ricadono nelle tipologie 4b e 5, risultando quindi o ristrutturazioni importanti di secondo livello o riqualificazioni energetiche. Si riportano di seguito le verifiche e prescrizioni che è necessario rispettare nelle casistiche di interesse.⁷

	Verifiche e prescrizioni da rispettare	Tipologia di intervento
I N V O L U C R O E D I L I Z I O	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $U_{\text{strutture opache verticali}} \leq \text{valori limite [W/m}^2\text{K]}$ ▪ $U_{\text{coperture}} \leq \text{valori limite [W/m}^2\text{K]}$ ▪ $U_{\text{pavimenti}} \leq \text{valori limite [W/m}^2\text{K]}$ ▪ $U_{\text{chiusure tecniche trasp. o opache}} \leq \text{valori limite [W/m}^2\text{K]}$ <p>U = trasmittanza termica del componente di involucro edilizio</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ristrutturazione importante di II livello ▪ Riqualificazione energetica
	<p>In conformità con la normativa tecnica vigente (UNI EN ISO 13788), nel caso di intervento che riguardi strutture opache delimitanti il volume climatizzato verso l'esterno, verifica:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ dell'assenza di rischio di formazione muffe (sia per la sezione corrente che per il ponte termico) ▪ dell'assenza di condensazioni interstiziali 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ristrutturazione importante di II livello ▪ Riqualificazione energetica
	<p>Per le chiusure tecniche trasparenti delimitanti il volume climatizzato verso l'esterno, con orientamento da EST a OVEST, passando per il SUD:</p> $g_{\text{gl+sh}} \leq 0,35$ <p>$g_{\text{gl+sh}}$: fattore di trasmissione solare totale della componente finestrata, quando la schermatura solare è utilizzata (definizione secondo UNI/TS 11300-1)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ristrutturazione importante di II livello ▪ Riqualificazione energetica
	<p>Per le strutture di copertura degli edifici, verifica dell'efficacia, in termini di rapporto costi-benefici, dell'utilizzo di:</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ristrutturazione importante di II livello ▪ Riqualificazione energetica

⁷ Nell'elaborazione della tabella si è fatto riferimento alla guida ANIT: Requisiti Minimi e Certificazione Energetica degli Edifici – 16 giugno 2022.

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ materiali ad elevata riflettanza solare per le coperture (cool roof), assumendo per questi ultimi un valore di riflettanza solare non inferiore a: <ul style="list-style-type: none"> ○ 0,65 nel caso di coperture piane ○ 0,30 nel caso di copertura a falde ▪ tecnologie di climatizzazione passiva (e.g. ventilazione, coperture a verde) 	
	Altezze minime dei locali di abitazione secondo comma 1 e 2 del DM 5/7/75, derogabili fino a un massimo di 10 cm nel caso di installazione di impianti termici dotati di pannelli radianti a soffitto o di isolamento dall'interno	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ristrutturazione importante di II livello ▪ Riqualficazione energetica
	$H'_T < H'_{T,limite} [W/m^2K]$ <p>H'_T: coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione, per unità di superficie disperdente</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ristrutturazione importante di II livello
I M P I A N T I T E C N I C I	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $\eta_H > \eta_{H,limite}$ ▪ $\eta_w > \eta_{w,limite}$ ▪ $\eta_c > \eta_{c,limite}$ <p>η_H: efficienza media stagionale dell'impianto di climatizzazione invernale</p> <p>η_w: efficienza media stagionale dell'impianto di produzione di ACS</p> <p>η_c: efficienza media stagionale dell'impianto di climatizzazione estiva (compreso l'eventuale controllo dell'umidità)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ristrutturazione importante di II livello ▪ Riqualficazione energetica
	<p>Installazione di sistemi per la regolazione automatica della temperatura ambiente nei singoli locali o nelle singole zone termiche:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ in caso di riqualificazione energetica dell'involucro edilizio delimitante il volume climatizzato verso l'esterno o verso locali non climatizzati, in edifici dotati di impianto termico centralizzato, assistiti da compensazione climatica ▪ nel caso di nuova installazione/ ristrutturazione di impianti di climatizzazione invernale in edifici esistenti, o di sostituzione dei generatori di calore, compresi gli impianti a sistemi ibridi, assistiti da compensazione climatica ▪ nel caso di nuova installazione/ristrutturazione di impianti di climatizzazione estiva in edifici esistenti, o di sostituzione delle macchine frigorifere dei generatori 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ristrutturazione importante di II livello ▪ Riqualficazione energetica
	<p>Contabilizzazione diretta/indiretta del calore:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ nel caso di nuova installazione/ristrutturazione di impianti di climatizzazione invernale in edifici esistenti, o di sostituzione dei generatori di calore, compresi gli impianti a sistemi ibridi, obbligo, nel caso di impianti a servizio di più unità immobiliari, di installazione di un sistema di contabilizzazione diretta o indiretta del calore, 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ristrutturazione importante di II livello ▪ Riqualficazione energetica

<p>che permetta la ripartizione dei consumi per singola unità immobiliare</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ nel caso di nuova installazione/ristrutturazione di impianti di climatizzazione estiva in edifici esistenti, o di sostituzione delle macchine frigorifere dei generatori, obbligo di installazione, ove tecnicamente possibile, di un sistema di contabilizzazione diretta o indiretta del calore, che permetta la ripartizione dei consumi per singola unità immobiliare 	
<p>In caso di nuova installazione, sostituzione o riqualificazione di impianti di ventilazione, i nuovi apparecchi devono rispettare i requisiti minimi definiti dai regolamenti comunitari emanati ai sensi delle Direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE. I nuovi apparecchi devono avere almeno le stesse caratteristiche tecnico funzionali di quelli sostituiti e permettere il rispetto dei requisiti normativi d'impianto previsti dalle norme UNI e CEI vigenti</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ristrutturazione importante di II livello ▪ Riqualificazione energetica
<p>Trattamento dell'acqua di impianto:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ obbligo di trattamento di condizionamento chimico in relazione alla qualità dell'acqua utilizzata negli impianti per la climatizzazione invernale, con o senza produzione di ACS ▪ obbligo di trattamento di addolcimento dell'acqua di impianto per impianti di potenza termica del focolare > 100 kW e in presenza di acqua di alimentazione con durezza totale > 15 °f <p>Acqua calda sanitaria:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ obbligo di installazione di un contatore del volume di acqua calda sanitaria prodotta e di un contatore del volume di acqua di reintegro per l'impianto di riscaldamento, nel caso di nuova installazione di impianti termici per la climatizzazione invernale aventi potenza termica nominale del generatore > 35 kW 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ristrutturazione importante di II livello ▪ Riqualificazione energetica
<p>Nel caso di installazione di impianti di microgenerazione: $PES \geq 0$ PES: indice di risparmio di energia primaria; esprime il rendimento energetico delle unità di produzione</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ristrutturazione importante di II livello ▪ Riqualificazione energetica
<p>Nel caso di ristrutturazione o di nuova installazione di impianti termici di potenza nominale del generatore ≥ 100 kW, compreso il distacco dall'impianto centralizzato anche di un solo utente/condomino, necessaria la redazione di una diagnosi energetica dell'edificio e dell'impianto che metta a confronto le diverse soluzioni impiantistiche compatibili e la loro efficacia sotto il profilo dei costi complessivi (investimento, esercizio e manutenzione)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ristrutturazione importante di II livello ▪ Riqualificazione energetica

Tabella 2 - Verifiche e prescrizioni da rispettare nel caso di interventi di ristrutturazione importante di II livello o di riqualificazione energetica [9]

I valori di trasmittanza termica limite (U_{limite}) delle strutture opache verticali, orizzontali e trasparenti, che devono essere rispettati dai componenti di involucro oggetto di intervento, sono indicati nell'Appendice B del DM Requisiti Minimi, e dipendono dalla zona climatica in cui è situato l'edificio. Tali valori risultano comprensivi dei ponti termici presenti all'interno delle strutture interessate da lavori, e di metà di quelli al perimetro della superficie oggetto di riqualificazione.

Nel caso di strutture che separano l'ambiente climatizzato da ambienti non climatizzati, i valori limite di trasmittanza devono essere ridotti tramite un opportuno fattore di correzione dello scambio termico tra ambiente climatizzato e non climatizzato, come indicato nella norma UNI TS 11300-1 in forma tabellare. Nel caso di strutture rivolte verso il terreno, i valori limite devono essere rispettati dalla trasmittanza equivalente della struttura, calcolata secondo UNI EN ISO 13370, che tiene conto dell'effetto del terreno.

TABELLA 1 (Appendice B) Trasmittanza termica U massima delle strutture opache verticali , verso l'esterno soggette a riqualificazione		
Zona climatica	U_{limite} [W/m ² K]	
	Dal 1° ottobre 2015	Dal 1° gennaio 2021
A-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 2 (Appendice B) Trasmittanza termica U massima delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura , verso l'esterno soggette a riqualificazione		
Zona climatica	U_{limite} [W/m ² K]	
	Dal 1° ottobre 2015	Dal 1° gennaio 2021
A-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 3 (Appendice B) Trasmittanza termica U massima delle strutture opache orizzontali di pavimento , verso l'esterno soggette a riqualificazione		
Zona climatica	U_{limite} [W/m ² K]	
	Dal 1° ottobre 2015	Dal 1° gennaio 2021
A-B	0,48	0,42
C	0,42	0,38
D	0,36	0,32
E	0,31	0,29
F	0,30	0,28

TABELLA 4 (Appendice B) Trasmittanza termica U massima delle chiusure tecniche trasparenti e opache e dei cassonetti comprensivi degli infissi, verso l'esterno e verso ambienti non climatiz. soggette a riqualificazione		
Zona climatica	U_{limite} [W/m ² K]	
	Dal 1° ottobre 2015	Dal 1° gennaio 2021
A-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

Figura 11 - Valori di trasmittanza termica limite delle strutture opache verticali, orizzontali e delle chiusure trasparenti [9]

La verifica della trasmittanza termica va condotta per tutte le strutture della stessa tipologia (opache verticali, orizzontali o inclinate di copertura, orizzontali di pavimento), indipendentemente dall'orientamento, dallo spessore e dalla stratigrafia delle diverse porzioni.

Il coefficiente medio globale di scambio termico H_{τ} viene definito, sempre all'appendice B del decreto, secondo la formula:

$$H'_T = \frac{H_{tr,adj}}{\sum_k A_k} \quad [W/m^2K]$$

- $H_{tr,adj}$ = coefficiente globale di scambio termico per trasmissione dell'involucro, calcolato secondo UNI TS 11300-1 [W/K]
- A_k = superficie del k-esimo componente (opaco o trasparente) costituente l'involucro [m²]

Questo, nel caso di ristrutturazione importante di II livello, deve risultare inferiore al valore limite indicato all'Appendice B del decreto, in funzione della zona climatica dove è situato l'edificio.

N. riga	TIPOLOGIA DI INTERVENTO	Zona climatica				
		A e B	C	D	E	F
4	Ampliamenti e Ristrutturazioni importanti di secondo livello per tutte le tipologie edilizie	0,73	0,70	0,68	0,65	0,62

Figura 12 - Valori limite del coefficiente H'_T nel caso di ristrutturazioni importanti di II livello [9]

La verifica del coefficiente H'_T va effettuata a livello di singola unità immobiliare, per tutta la superficie di uguale orientamento interessata completamente o per una porzione da lavori⁸.

Ai fini della verifica è necessario considerare sia le parti opache sia quelle trasparenti costituenti l'involucro dell'elemento oggetto di intervento, solo se entrambe sono di proprietà dello stesso soggetto giuridico; in caso contrario, la verifica deve essere eseguita solo sulla parte oggetto di intervento.

Per quanto riguarda, infine, le verifiche relative alle prestazioni degli impianti tecnici, all'appendice A del decreto sono indicati i valori limite dei rendimenti medi stagionali dei sottosistemi di utilizzazione (emissione/erogazione, regolazione, distribuzione, accumulo) e generazione relativi agli impianti di climatizzazione invernale, estiva e produzione di acqua calda sanitaria.

TABELLA 7 (Appendice A)			
Efficienze medie η_u dei sottosistemi di utilizzazione dell'edificio di riferimento per i servizi di H, C, W			
Efficienza dei sottosistemi di utilizzazione η_u	H	C	W
Distribuzione idronica	0,81	0,81	0,70
Distribuzione aeraulica	0,83	0,83	-
Distribuzione mista	0,82	0,82	-

Figura 13 - Efficienze medie stagionali dei sottosistemi di utilizzazione [9]

⁸ Ad esempio, nel caso di strutture verticali si considera oggetto di verifica l'intera facciata, nel caso di coperture orizzontali o inclinate, l'intera falda o porzione del tetto.

TABELLA 8 (Appendice A)				
Efficienze medie η_{gn} dei sottosistemi di generazione dell'edificio di riferimento per la produzione di energia termica per i servizi di H, C, W e per la produzione di energia elettrica in situ.				
Sottosistemi di generazione:	Produzione di energ. termica			Produzione di energia elettrica in situ
	H	C	W	
Generatore a combustibile liquido	0,82	-	0,80	-
Generatore a combustibile gassoso	0,95	-	0,85	-
Generatore a combustibile solido	0,72	-	0,70	-
Generatore a biomassa solida	0,72	-	0,65	-
Generatore a biomassa liquida	0,82	-	0,75	-
Pompa di calore a compressione di vapore con motore elettrico	3,00	(*)	2,50	-
Macchina frigorifera a compressione di vapore a motore elettrico	-	2,50	-	-
Pompa di calore ad assorbimento	1,20	(*)	1,10	-
Macchina frigorifera a fiamma indiretta	-	$0,60 \times \eta_{gn}$ (**)	-	-
Macchina frigorifera a fiamma diretta	-	0,60	-	-
Pompa di calore a compressione di vapore a motore endotermico	1,15	-	1,05	-
Cogeneratore	0,60	-	0,60	0,20
Riscaldamento con resistenza elettrica	1,00	-	-	-
Teleriscaldamento	0,97	-	-	-
Teleraffrescamento	-	0,97	-	-
Solare termico	0,3	-	0,3	-
Solare fotovoltaico	-	-	-	0,1
Mini eolico e mini idroelettrico	-	-	-	(**)
<p>Nota: Per i combustibili tutti i dati fanno riferimento al potere calorifico inferiore (*) Per pompe di calore che prevedono la funzione di raffrescamento si considera lo stesso valore delle macchine frigorifere della stessa tipologia (**) Si assume l'efficienza media del sistema installato nell'edificio reale</p>				

Figura 14 - Efficienze medie stagionali dei sistemi di generazione [9]

In merito al caso studio analizzato nella presente tesi, per tutti i pacchetti di interventi di riqualificazione previsti, le verifiche di legge richieste dal DM 26 giugno 2015 – Requisiti Minimi sopra riportate sono state eseguite tramite l'utilizzo del modulo EC701 di EDILCLIMA Programmi, che a seconda della tipologia di intervento considerata, elabora tali verifiche automaticamente.

5 IL CASO STUDIO

Il presente capitolo è dedicato alla descrizione e all'analisi energetica dell'edificio condominiale esistente oggetto di studio, e risulta suddiviso in due parti principali. Nella prima parte viene presentato il caso studio: l'edificio viene descritto in maniera approfondita nelle sue caratteristiche generali, geometriche, termofisiche di involucro e impiantistiche attuali, determinate tramite documentazione tecnica disponibile e opportuni sopralluoghi effettuati negli ambienti comuni, in alcune unità immobiliari rappresentative dell'edificio e nella centrale termica condominiale.

La seconda parte del capitolo è invece dedicata alla descrizione del processo di modellazione energetica dell'edificio allo stato di fatto tramite il software EC700, e all'analisi critica dei risultati ottenuti dalla simulazione energetica dello stesso.

5.1 UBICAZIONE E DATI GENERALI

L'edificio oggetto di studio è un complesso condominiale sito al numero 32 di via Vela, nella città di Torino. Quest'ultimo risulta un fabbricato angolare unico (angolo via Vela – via Colli), collocato in un quartiere residenziale ad elevata densità insediativa (Figura 15).

Da un punto di vista climatico, la città di Torino si colloca, secondo la classificazione prevista dal DPR 412/93, in zona climatica E, caratterizzata da un valore convenzionale di gradi-giorno (GG) pari a 2643 e da un periodo di riscaldamento convenzionale di 183 giorni, dal 15 ottobre al 15 aprile.

Per quanto riguarda l'epoca di costruzione, l'edificio è risalente alla prima metà degli anni Sessanta. Il complesso edilizio ha però subito nel corso del tempo diverse modifiche rispetto al progetto architettonico originale, sia in termini di distribuzione interna degli ambienti (spostamento di alcuni locali da una unità immobiliare ad un'altra e accorpamento di due o più unità immobiliari) che di destinazione d'uso delle unità immobiliari presenti.



Figura 15 - Vista satellitare del complesso edilizio in esame - rielaborazione personale da Google Earth



Figura 16 - Vista aerea del complesso edilizio in esame - rielaborazione personale da Google Earth

Il condominio si sviluppa su otto piani fuori terra (comprensivi del piano sottotetto), due piani interrati e un basso fabbricato caratterizzato da un unico piano fuori terra, prospiciente via Colli (porzione di edificio cerchiata in bianco nella prima immagine di Figura 18).

L'edificio si compone di 29 unità immobiliari (U.I.), le cui destinazioni d'uso e informazioni rilevanti sono riportate in Tabella 3.

Piani	numero U.I. e destinazioni d'uso	Informazioni rilevanti
Piano terra	8 U.I. a destinazione d'uso residenziale	6 delle 8 U.I. sono loft realizzati nel 2021 dalla riqualificazione di ex locali commerciali
	1 U.I. a destinazione d'uso commerciale	L'unità immobiliare risulta attualmente inutilizzata
	1 U.I. a destinazione d'uso ambulatoriale (studio dentistico)	Lo studio dentistico è stato realizzato nel 2021 dalla riqualificazione di ex locali commerciali e si sviluppa nel basso fabbricato
P1 – P6	19 U.I. a destinazione d'uso residenziale	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Le U.I. presenti hanno subito nel tempo modifiche nella distribuzione degli ambienti interni, sia in termini di spostamento di alcuni locali da una unità immobiliare ad un'altra che di accorpamento di due o più unità immobiliari in una unica ▪ 1 delle 19 U.I. (P.5) risulta attualmente inutilizzata

Tabella 3 - Unità immobiliari: destinazioni d'uso e informazioni rilevanti

In epoca successiva a quella di costruzione del fabbricato, nel piano sottotetto sono state ricavate due mansarde; queste ultime, non allacciate all'impianto termico centralizzato ma dotate di sistemi di riscaldamento autonomi, non sono oggetto di studio della presente tesi.

Al primo piano interrato, che risulta non climatizzato, sono situati dei locali magazzino ed il garage condominiale, mentre al secondo piano interrato, anch'esso non climatizzato, si trovano i locali tecnici e le cantine ad uso privato dei condomini.

L'accesso all'edificio avviene mediante due ingressi:

- ingresso principale (indicato con freccia rossa in Figura 17): lato via Vela, consente l'accesso a quasi tutte le unità immobiliari di cui si compone l'edificio tramite un androne condominiale (non climatizzato) e due vani scala (non climatizzati), dotati ognuno di due ascensori;
- ingresso secondario (indicato con freccia verde in Figura 17): lato via Colli, consente l'accesso allo studio dentistico e ad uno dei sei loft presenti a piano terra tramite un disimpegno comune (non climatizzato).

L'unità immobiliare a piano terreno a destinazione d'uso commerciale è dotata di un proprio accesso diretto lato strada, su via Vela (indicato con freccia blu in Figura 17).



Figura 17 - Accessi al condominio lato via Vela (a sinistra) e via Colli (a destra)

Da un punto di vista geometrico, il complesso edilizio non presenta una morfologia compatta: il corpo fabbrica principale risulta arretrato rispetto agli ambienti a piano terreno prospicienti via Vela, e gli ultimi due piani (quinto e sesto) risultano ulteriormente arretrati rispetto al corpo fabbrica principale. Tale struttura comporta la formazione di una serie di ampi terrazzi in corrispondenza di alloggi siti al primo, al quinto e al sesto piano, che fungono da copertura piana per i locali sottostanti, rappresentati mediante linea bianca tratteggiata e riempimento bianco in Figura 18 (seconda immagine).



Figura 18 - Viste assonometriche del complesso edilizio in esame - rielaborazione personale da Google Earth

L'edificio risulta inoltre caratterizzato da una serie di balconi e logge (Figura 19), che si sviluppano lungo le facciate prospicienti via Vela e l'interno cortile (balconi), e in corrispondenza delle pareti verticali che si affacciano verso l'edificio adiacente, su via Colli (logge).

L'unica superficie verticale continua, dove non si riscontra la presenza né di balconi né di logge, risulta prospiciente via Colli, e si sviluppa dal piano terreno al quarto piano (Figura 18, quarta immagine).



Figura 19 - Balconi continui su via Vela e prospicienti l'interno cortile, logge verso l'edificio adiacente su via Colli– immagini da rilievo fotografico dell'edificio

5.2 CARATTERISTICHE FUNZIONALI E DISTRIBUTIVE DELL'EDIFICIO

Si riportano di seguito le planimetrie relative all'edificio in esame, nelle quali vengono indicate le unità immobiliari attualmente presenti, caratterizzate in pianta da un opportuno codice identificativo, e gli ambienti distributivi comuni (androne, vani scala).

Come già anticipato al paragrafo precedente, la distribuzione degli ambienti interni all'edificio nelle diverse unità immobiliari ha subito nel tempo alcune modifiche rispetto a quanto previsto nel progetto architettonico originale; ciò ha comportato una conseguente variazione del numero di unità immobiliari presenti e della loro superficie in pianta.

Le modifiche distributive apportate sono note grazie ad opportuna documentazione resa disponibile dalla società Onleco S.r.l., quale le piante architettoniche dei loft e dello studio dentistico realizzati nel 2021 a piano terreno e la rappresentazione grafica su Autocad delle attuali distribuzioni interne degli alloggi presenti dal primo al sesto piano, realizzata a seguito di sopralluoghi effettuati nell'anno 2017 negli alloggi stessi.

A fronte di tali variazioni, per avere a disposizione le planimetrie del complesso edilizio allo stato attuale, fondamentali per la corretta realizzazione del modello energetico dell'edificio, è stato necessario rielaborare tramite Autocad le piante originali dell'edificio, fornite dall'amministratore condominiale.

Le principali caratteristiche geometriche delle unità immobiliari sono riassunte di seguito in Tabella 4, insieme alle rispettive destinazioni d'uso previste da DPR 412/93, secondo cui:

- o la destinazione d'uso E.1 (1) comprende le "abitazioni adibite a residenza con carattere continuativo";
- o la destinazione d'uso E.2 comprende gli "edifici adibiti a uffici e assimilabili: pubblici o privati";
- o la destinazione d'uso E.5 comprende gli "edifici adibiti ad attività commerciali e assimilabili".

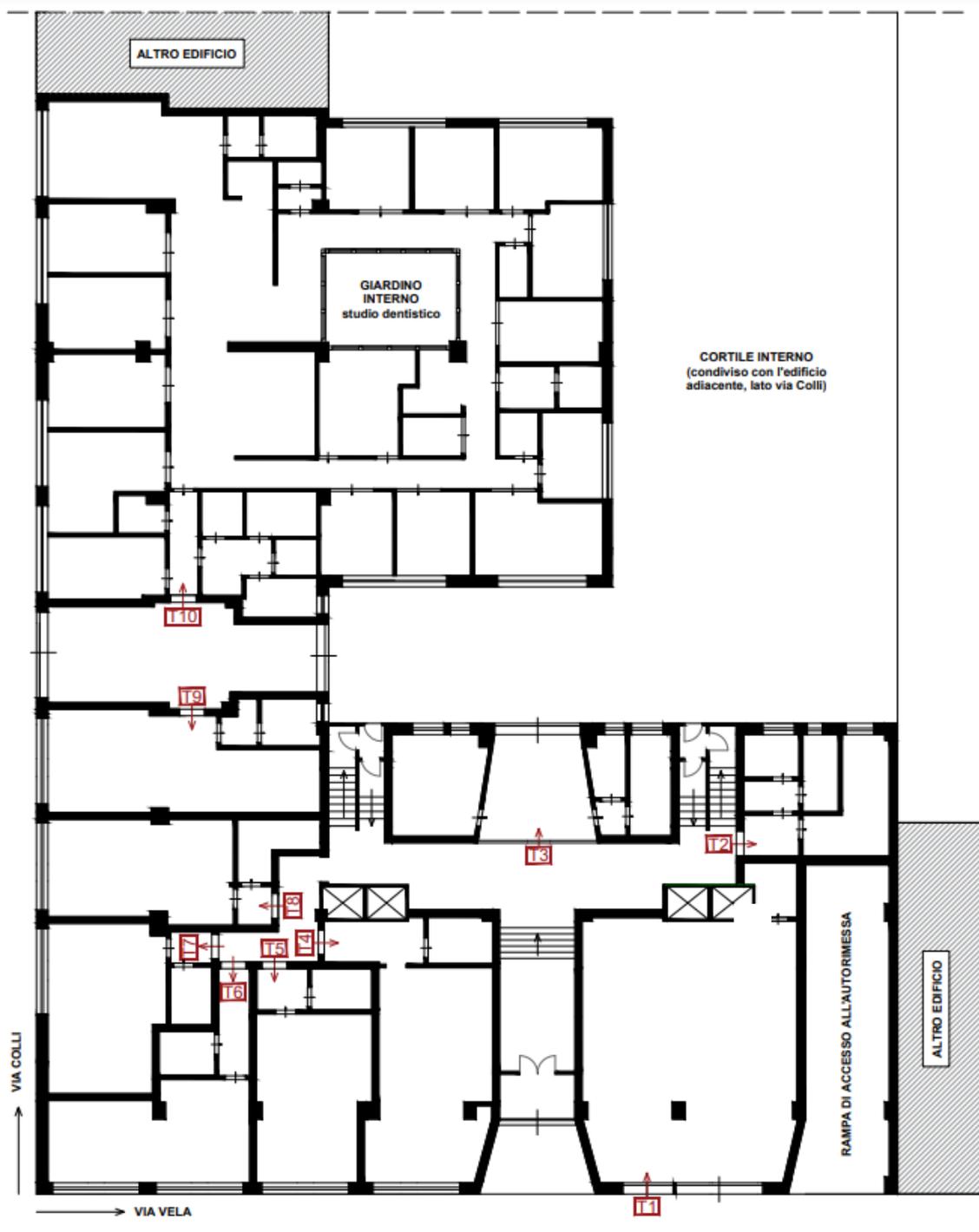


Figura 20 - Pianta fuori scala del piano terreno con indicazione delle unità immobiliari presenti

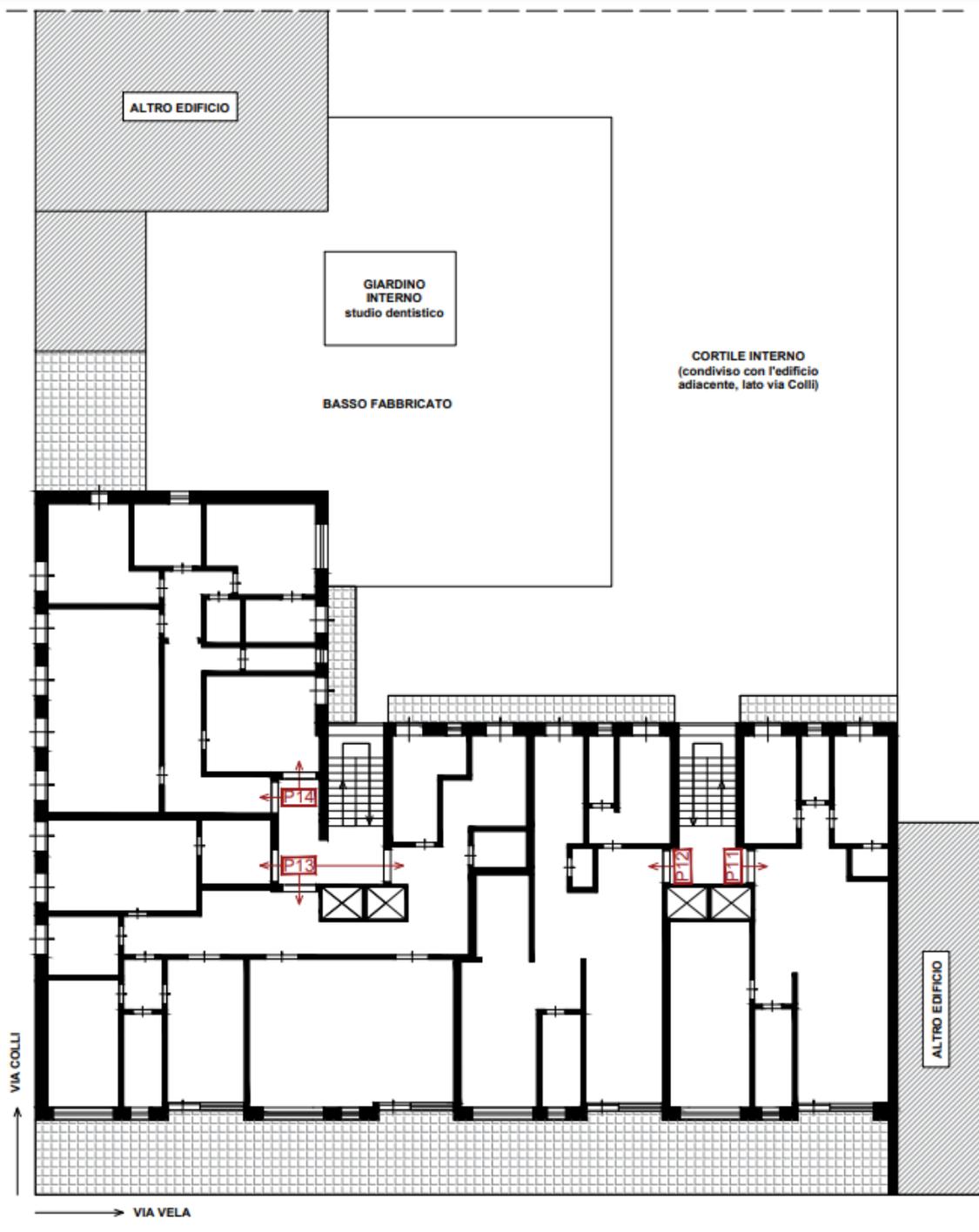


Figura 21 - Pianta fuori scala del primo piano con indicazione delle unità immobiliari presenti

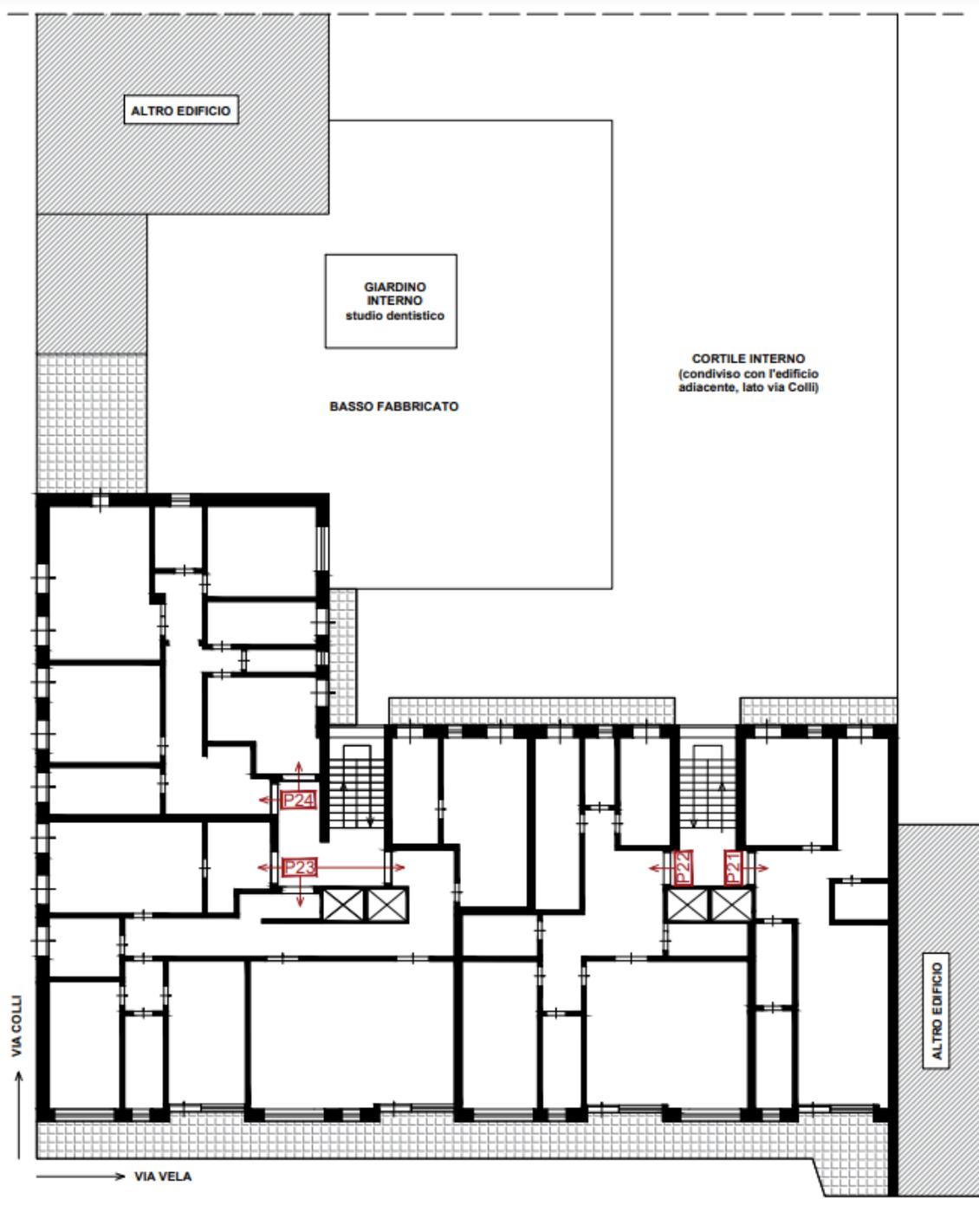


Figura 22 - Pianta fuori scala del secondo piano con indicazione delle unità immobiliari presenti

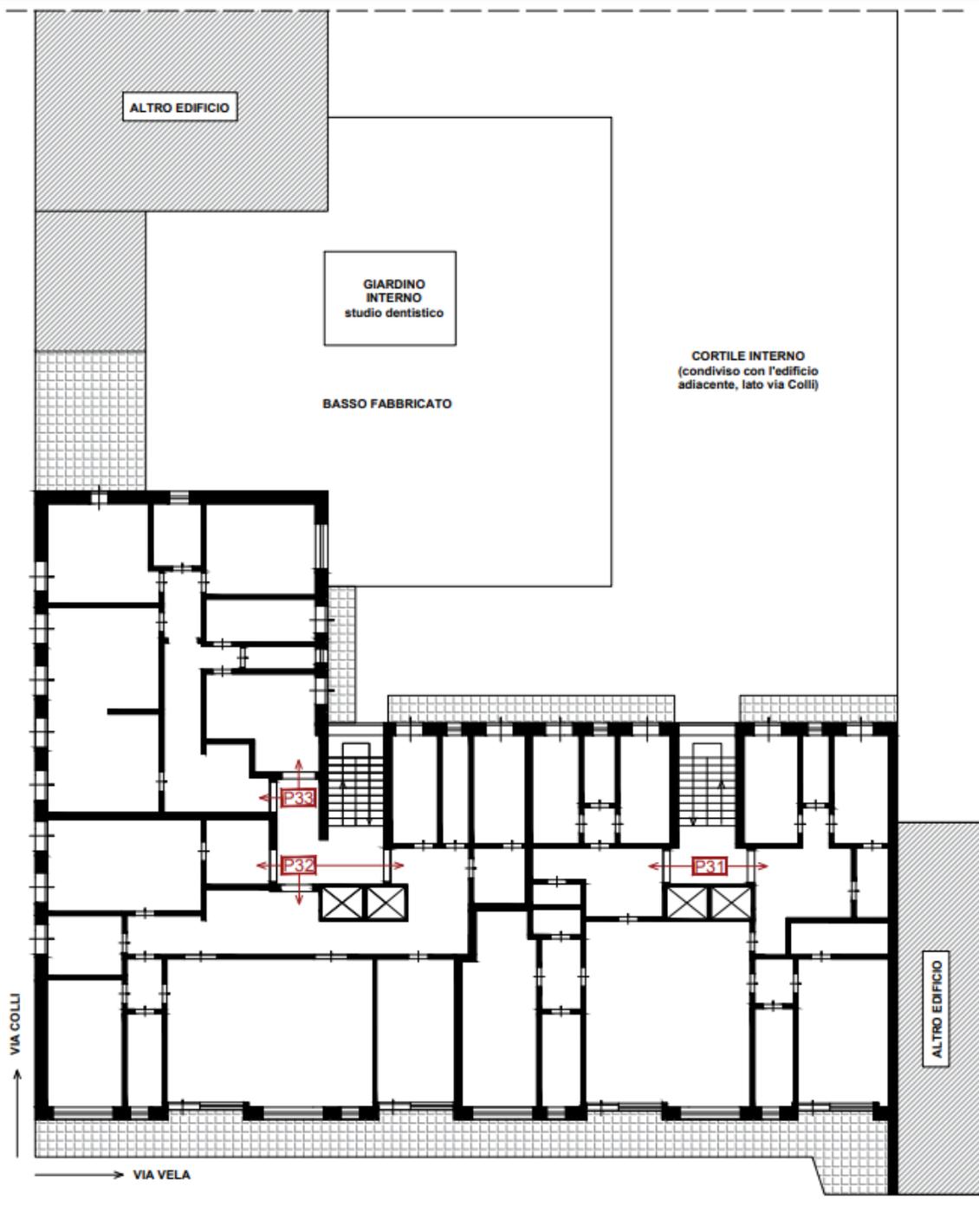


Figura 23 - Pianta fuori scala del terzo piano con indicazione delle unità immobiliari presenti

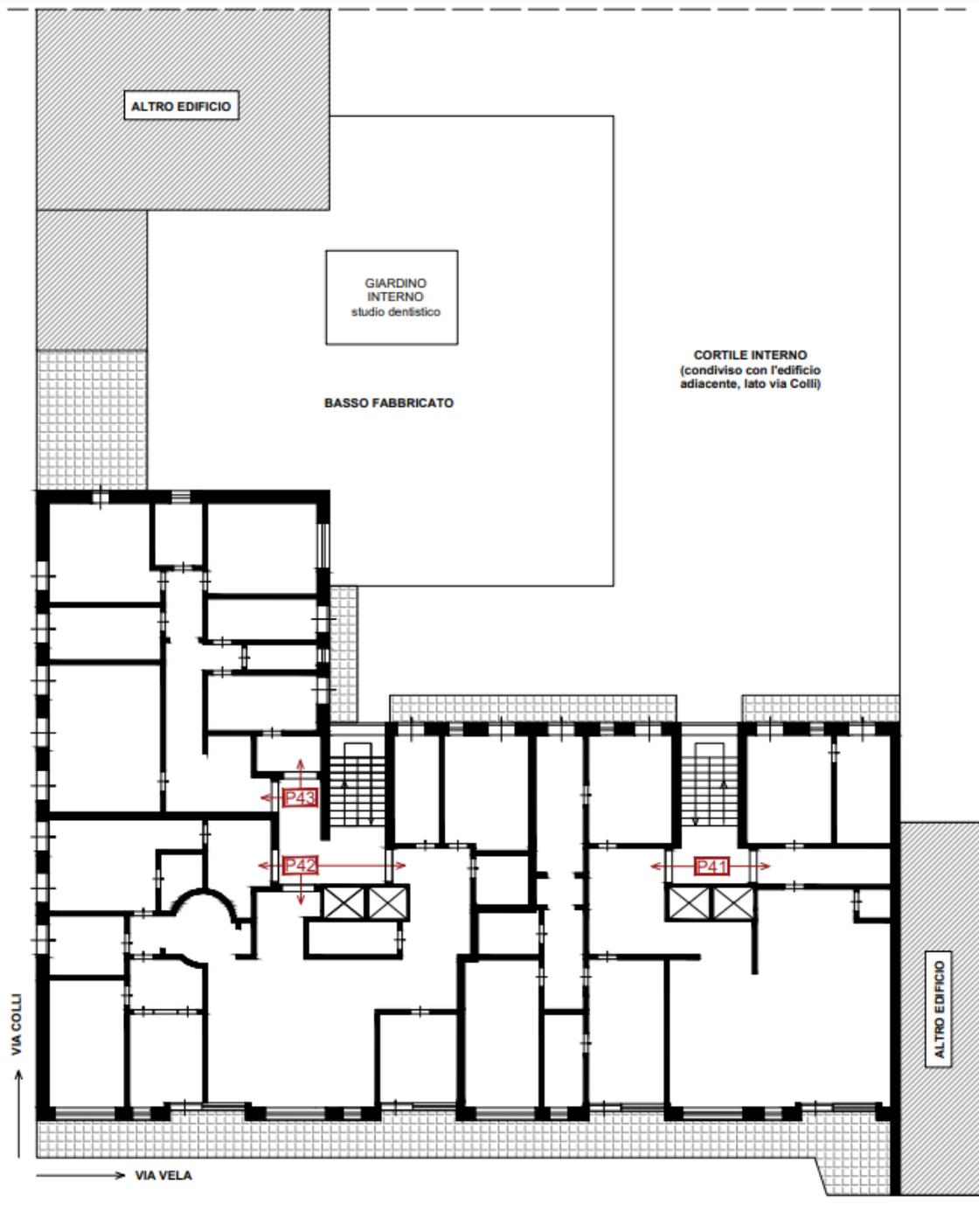


Figura 24 - Pianta fuori scala del quarto piano con indicazione delle unità immobiliari presenti

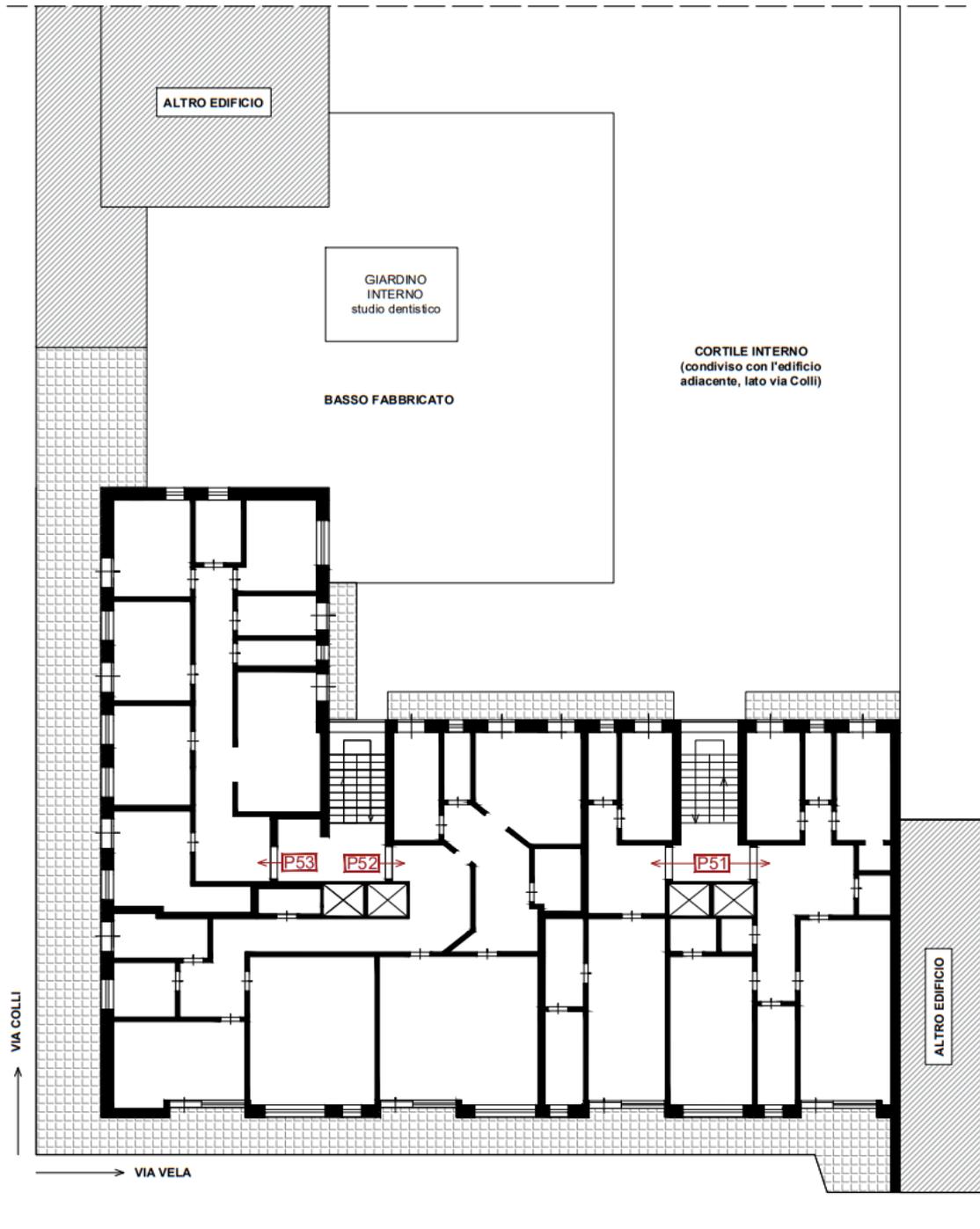


Figura 25 - Pianta fuori scala del quinto piano con indicazione delle unità immobiliari presenti

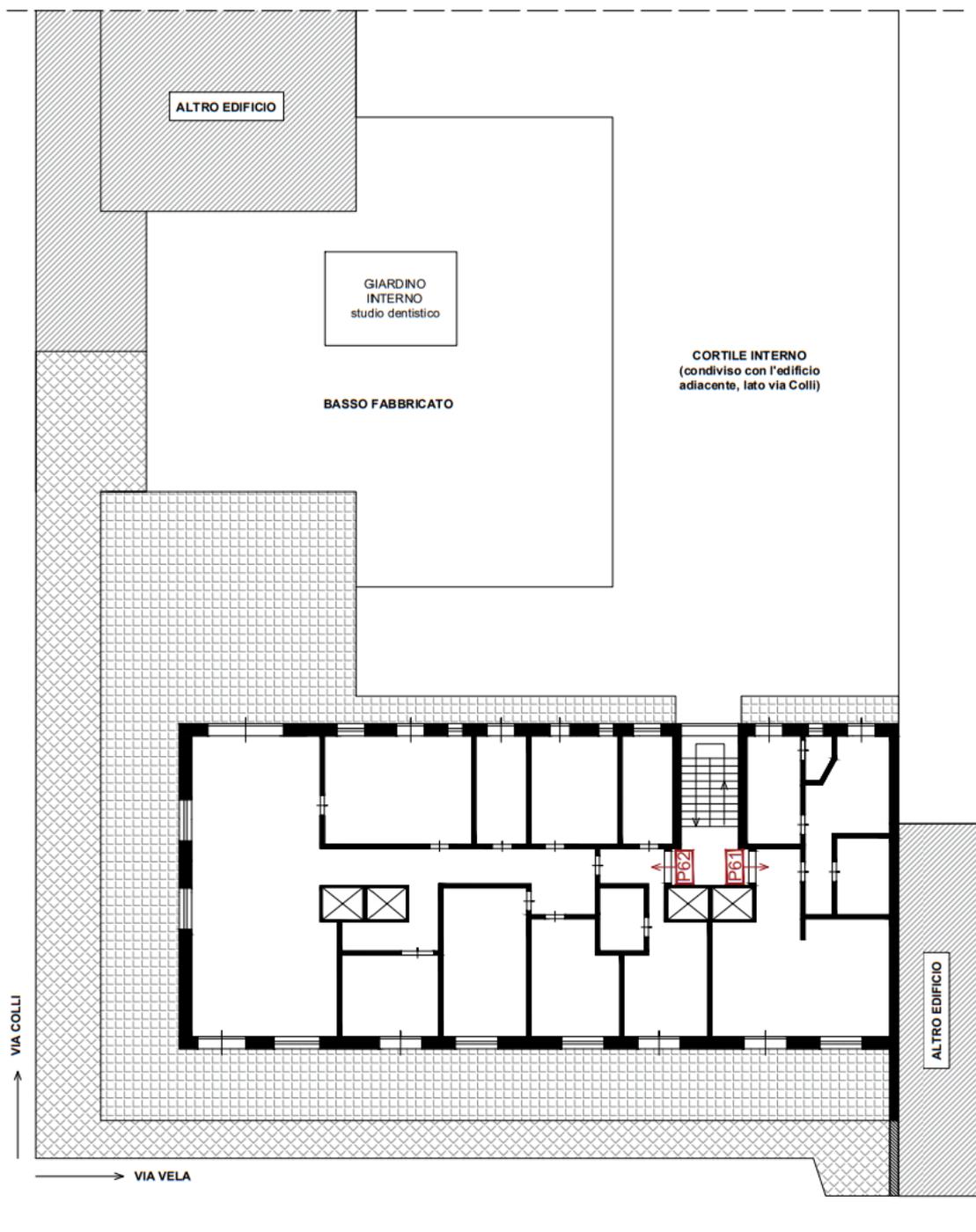


Figura 26 - Pianta fuori scala del sesto piano con indicazione delle unità immobiliari presenti

U.I.	Piano	Destinazione d'uso (DPR 412/93)	Superficie in pianta netta [m ²]	Volume netto [m ³]	S/V [m ⁻¹]
T1	T	E.5	92.2	341	0.69
T2		E.1 (1)	26.7	80	0.85
T3		E.1 (1)	45.2	136	0.87
T4		E.1 (1)	51.3	190	0.71
T5		E.1 (1)	37.8	140	0.47
T6		E.1 (1)	40	148	0.64
T7		E.1 (1)	36.4	134	0.43
T8		E.1 (1)	38.8	144	0.55
T9		E.1 (1)	45.3	167	0.67
T10		E.2	363.7	1159	0.63
P11	P1	E.1 (1)	103.7	311	0.35
P12		E.1 (1)	103	309	0.32
P13		E.1 (1)	194.5	584	0.28
P14		E.1 (1)	129	387	0.36
P21	P2	E.1 (1)	80.8	242	0.27
P22		E.1 (1)	125.9	378	0.21
P23		E.1 (1)	194.4	583	0.25
P24		E.1 (1)	129	387	0.27
P31	P3	E.1 (1)	203.7	611	0.24
P32		E.1 (1)	199.4	598	0.24
P33		E.1 (1)	129	387	0.27
P41	P4	E.1 (1)	205.3	616	0.24
P42		E.1 (1)	197.8	593	0.29
P43		E.1 (1)	129	387	0.34
P51	P5	E.1 (1)	167.1	501	0.35
P52		E.1 (1)	181.6	545	0.34
P53		E.1 (1)	125.5	376	0.53
P61	P6	E.1 (1)	74	233	0.5
P62		E.1 (1)	230.3	726	0.42

Tabella 4 - Dati geometrici delle unità immobiliari e rispettive destinazioni d'uso secondo DPR 412/93

5.3 INVOLUCRO EDILIZIO

Le caratteristiche dimensionali e termofisiche dei componenti d'involucro edilizio opaco e trasparente sono state ottenute tramite fonti differenti, quali:

- piante e sezioni originali del complesso edilizio, fornite dall'amministratore condominiale;
- sopralluoghi effettuati nelle parti comuni dell'edificio, nelle zone esterne di pertinenza (cortile condominiale) e in alcune unità immobiliari precedentemente selezionate in quanto rappresentative, nel loro insieme, delle caratteristiche geometriche dell'edificio;
- documentazione tecnica fornita dalla società Onleco S.r.l., relativa ai loft e allo studio dentistico realizzati al piano terreno nell'anno 2021, comprendente piante, sezioni e prospetti architettonici, schede tecniche dei nuovi infissi installati e relazioni tecniche di calcolo ex Legge 10/91.

L'involucro edilizio delimitante il volume riscaldato dell'edificio (verso esterno e verso ambienti non climatizzati) presenta una superficie disperdente di 5957.37 m², costituita per circa il 65% da strutture edilizie opache e per il 35% da chiusure trasparenti, ed un rapporto di forma S/V pari 0,40 m⁻¹.

La tipologia edilizia risulta essere propria dell'epoca di costruzione (prima metà degli anni Sessanta), con struttura portante in cemento armato e tamponamenti perimetrali in laterizio forato con interposizione di intercapedine d'aria.

I principali elementi di involucro di cui si compone il fabbricato sono riassunti di seguito:

- tamponamenti perimetrali in laterizio forato con cassa vuota, rivestiti internamente in intonaco ed esternamente in materiale lapideo (a piano terreno, lato strada), in intonaco (lato interno cortile, dal piano terreno al sesto piano e nel basso fabbricato⁹) o in klinker (lato strada, dal primo al sesto piano).

In corrispondenza dei serramenti, le pareti verticali sopra descritte presentano delle porzioni di muratura di spessore ridotto (sottofinestra caratterizzati dall'assenza di intercapedine d'aria);

⁹ Le pareti verticali del basso fabbricato, lato interno cortile, sono dotate di contro parete in cartongesso isolata tramite pannelli in polistirolo di spessore pari a 2.5 cm.

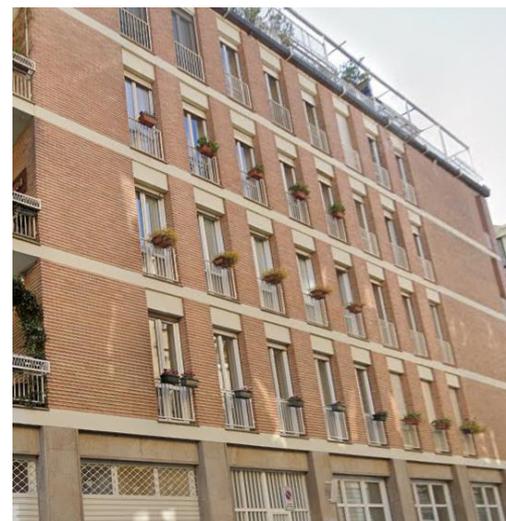


Figura 27 – muratura esterna con rivestimento in materiale lapideo, intonaco e klincker - immagini da rilievo fotografico dell'edificio

- solai interpiano costituiti da soletta in laterocemento, comprensivi anche dei solai che separano le unità immobiliari site al piano terreno dagli ambienti non riscaldati al primo piano interrato (autorimessa condominiale e locali magazzino¹⁰) e dalla rampa di accesso all'autorimessa, e quelli di separazione delle unità site al sesto piano dalle mansarde nel sottotetto;
- terrazzi costituiti da soletta in laterocemento, rifiniti esternamente mediante piastrellatura;
- solaio di copertura del basso fabbricato costituito da soletta in laterocemento, rifinito esternamente mediante uno strato di impermeabilizzazione in bitume (Figura 28);

¹⁰ Il solaio che separa le unità immobiliari a piano terreno dai locali magazzino non riscaldati a piano seminterrato risulta coibentato all'intradosso mediante lastre in polistirene di spessore pari a 2.5 cm. Il pavimento del basso fabbricato presenta un ulteriore isolamento ad estradosso, realizzato nel 2021 con l'introduzione di un nuovo impianto emissivo radiante a pavimento, e consiste in un pannello preformato in polietilene espanso sinterizzato (EPS) di spessore pari a 5 cm.

- copertura a falde in legno, con rivestimento esterno di tegole in laterizio ¹¹ (Figura 28). Quest'ultima risulta dotata di una serie di abbaini di dimensioni differenti, che si affacciano su altrettante terrazze "a tasca";

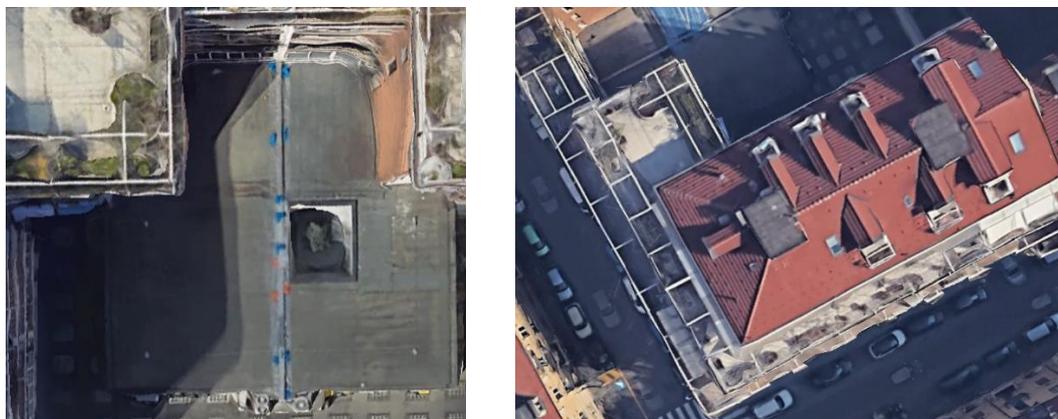


Figura 28 – Copertura piana del basso fabbricato e copertura a falde – immagini da Google Earth

- serramenti in parte risalenti all'epoca di costruzione del fabbricato, caratterizzati da telaio in legno e vetro singolo, ed in buona parte sostituiti nel corso degli anni con nuovi elementi caratterizzati da telai in PVC o in legno e vetro camera, che costituiscono circa il 50% delle chiusure trasparenti di cui si compone il fabbricato.

I componenti finestrati presenti sono anche dotati di chiusure avvolgibili in legno o in plastica, con l'eccezione di quelli a piano terreno lato strada, dotati di serrande metalliche tipo negozio, e quelli relativi al basso fabbricato lato interno cortile, dove risultano assenti.

¹¹ La copertura a falde risulta coibentata internamente tramite pannelli in lana di vetro di spessore pari a 10 cm.

5.4 IMPIANTI TECNICI

Vengono descritti di seguito gli impianti tecnici a servizio del complesso edilizio oggetto di studio allo stato di fatto. Le caratteristiche e i dati tecnici relativi a questi ultimi sono stati ottenuti tramite fonti differenti, quali:

- sopralluoghi effettuati nella centrale termica condominiale e in alcune unità immobiliari precedentemente selezionate;
- progetti meccanici ed elettrici di riqualificazione della centrale termica condominiale effettuata nell'anno 2021, resi disponibili dalla società Onleco S.r.l.;
- capitolato opere relativo agli interventi di riqualificazione della centrale termica, resi disponibili dalla società Onleco S.r.l.;
- dichiarazione di conformità dell'impianto di riscaldamento condominiale, resa disponibile dalla società Onleco S.r.l.;
- progetti meccanici dei nuovi impianti di regolazione, distribuzione ed emissione del calore realizzati nei loft e nello studio dentistico a piano terreno nell'anno 2021, resi disponibili dalla società Onleco S.r.l.;
- progetti meccanici dei nuovi impianti di climatizzazione estiva e ventilazione meccanica controllata realizzati nello studio dentistico nell'anno 2021, resi disponibili dalla società Onleco S.r.l.

5.4.1 Impianto di climatizzazione invernale

L'edificio è dotato di un impianto di climatizzazione invernale di tipo centralizzato, in cui la produzione di energia termica avviene mediante uno scambiatore di calore a piastre di potenza termica nominale pari a 350 kW, collegato alla rete di teleriscaldamento cittadina.

Tutte le unità immobiliari presenti sono servite da tale impianto, a meno delle due mansarde abitate ricavate nel sottotetto, dotate di impianti di riscaldamento autonomi (caldaia a gas e pompa di calore aria-aria), che risultano escluse dalla trattazione.

Nell'anno 2021 l'impianto di riscaldamento sopra detto è stato oggetto di diversi interventi, quali:

- la riqualificazione della centrale termica condominiale, che ha comportato:
 - il rifacimento del sistema di distribuzione in centrale termica e il collegamento di nuove linee;
 - la coibentazione di tutte le tubazioni presenti in centrale termica con spessori conformi all'allegato B del DPR 412/93;
 - la realizzazione di nuova collettistica e opere meccaniche;

- l'introduzione di nuove elettropompe di circolazione del fluido termovettore;
- la fornitura e posa in opera di un sistema di trattamento acqua (filtraggio, conteggio, addolcimento, introduzione automatica di prodotti protettivi);
- la realizzazione di un nuovo sistema di scarico per la centrale termica e il suo collegamento al sistema fognario;
- Il rifacimento dell'impianto elettrico ed opere connesse;
- la realizzazione di un nuovo sistema di monitoraggio delle temperature interne in locali campione;
- la realizzazione di un nuovo sistema di regolazione in centrale termica, comprensivo di sistema di telegestione web based;



Figura 29 - Centrale termica condominiale riqualificata nel 2021 - immagine da sopralluogo

- la realizzazione di un nuovo sistema emissivo a radiatori nei loft a piano terreno, collegato alla centrale termica mediante una coppia di tubazioni dedicate opportunamente coibentate;
- la realizzazione di un nuovo sistema emissivo a pannelli radianti a pavimento nello studio dentistico a piano terreno, collegato alla centrale termica condominiale mediante una linea idraulica dedicata opportunamente coibentata.

Allo stato attuale, a seguito degli interventi di riqualificazione impiantistica sopra citati, il generatore di calore centralizzato alimenta tre circuiti distinti, di cui uno esistente e due di nuova

realizzazione, che si diramano a partire dal collettore generale sito in centrale termica. In particolare, si ha:

- un circuito esistente a servizio dei pannelli radianti a soffitto risalenti all'epoca di costruzione dell'edificio, costituiti da tubazioni in ferro annegate nel getto strutturale dei solai interpiano, in prossimità dell'intradosso.

Tali terminali sono presenti in tutte le unità immobiliari, a meno dei 6 loft e dello studio dentistico a piano terreno, dove, come detto, sono stati introdotti nel 2021 nuovi sistemi di emissione dedicati.

La rete di distribuzione, risalente anch'essa all'epoca di costruzione del fabbricato, è del tipo a colonne montanti e risulta priva di alcun tipo di coibentazione.

Le colonne di distribuzione sono poi collegate a dei collettori di zona, localizzati in cavedi tecnici all'interno delle unità immobiliari servite, da cui si diramano i singoli circuiti dei pannelli radianti a soffitto.

La circolazione del fluido termovettore nella rete è garantita da una coppia di circolatori elettronici a giri variabili di nuova installazione (uno dei quali risulta di backup) localizzati in centrale termica;

È inoltre presente su tale circuito una valvola miscelatrice a tre vie per la regolazione della temperatura di mandata del fluido ai pannelli.

- Un circuito di nuova realizzazione a servizio del sistema emissivo radiante a pavimento, installato nel 2021 nello studio dentistico a piano terreno. Le serpentine radianti presenti nei diversi locali fanno capo a dei collettori di zona, a loro volta idraulicamente connessi al locale tecnico ad uso privato sito nell'unità immobiliare in esame, dove si trova il gruppo di regolazione dedicato, completo di circolatore elettronico a giri variabili.

A monte di quest'ultimo è presente un compensatore idraulico, che separa la porzione del circuito sopra descritta dalla linea idraulica dedicata di collegamento alla centrale termica condominiale, realizzata nel 2021 e opportunamente coibentata, corrente in parte in un cavedio tecnico esistente ed in parte a vista nel soffitto dell'autorimessa condominiale. La movimentazione del fluido termovettore in tale tratto è garantita da un circolatore elettronico dedicato a giri variabili di nuova installazione, sito in centrale termica.

- Un circuito di nuova realizzazione a servizio dei radiatori installati nel 2021 nei 6 loft a piano terreno. Tale rete di distribuzione è del tipo orizzontale a zone: i terminali di emissione complessivamente presenti in ogni alloggio fanno capo a un collettore di zona; tutti i collettori sono poi idraulicamente riuniti in un unico "master", collegato alla centrale termica condominiale mediante una coppia di tubazioni dedicate di

nuova realizzazione, opportunamente coibentate, che si diramano a partire da un cavedio esistente fino alla centrale termica. La movimentazione del fluido termovettore viene garantita da un circolatore elettronico dedicato a giri variabili di nuova installazione, sito in centrale termica.

Per quanto riguarda la regolazione dell'impianto di riscaldamento in esame, si ha che:

- il circuito a pannelli radianti a soffitto esistente viene gestito attraverso il nuovo sistema di regolazione installato in centrale termica nel 2021. Quest'ultimo regola la temperatura di mandata ai pannelli radianti agendo sulla valvola a tre vie miscelatrice in centrale termica, attraverso un segnale elettrico di 0 - 10 V. La regolazione di tale grandezza fisica non viene però realizzata solo in funzione del dato di temperatura esterna, basandosi su una curva climatica opportunamente settata, ma anche in funzione del valor medio delle temperature interne all'edificio, rilevate in alcuni alloggi scelti in quanto caratteristici del comportamento termodinamico del fabbricato, attraverso opportune sonde wireless.

In particolare, il sistema di regolazione corregge il valore di temperatura di mandata al circuito, calcolato in base alla curva climatica, in funzione dello scarto tra la temperatura interna richiesta (liberamente impostabile) e quella effettiva, data dalla media delle temperature interne rilevate dalle sonde wireless e acquisite dal sistema di regolazione stesso.

Quando tutte le temperature interne agli alloggi dotati di sonda soddisfano il set-point impostato, il gruppo di pompaggio del circuito pannelli radianti a soffitto si ferma, per ripartire quando questo non viene soddisfatto anche solo da una delle temperature interne rilevate.

In questo modo, la regolazione effettuata risulta più evoluta rispetto ad una compensazione climatica "tradizionale", in quanto influenzata non solo dalle condizioni climatiche esterne, ma anche da quelle ambientali interne all'edificio, e può essere considerata climatica e di zona (dove le zone sono gli alloggi in cui viene rilevata la temperatura interna).

- Il circuito a pannelli radianti a pavimento di nuova realizzazione presenta una regolazione di tipo climatico e per singolo ambiente. La regolazione è effettuata mediante una centralina climatica dotata di sonda esterna, installata nel locale tecnico ad uso privato dello studio dentistico, che modula la temperatura di mandata ai pannelli radianti agendo su una valvola tre vie miscelatrice dedicata, e gestisce la programmazione, del tipo a fasce orarie settimanali, del funzionamento della pompa di circolazione sita nel locale tecnico ad uso privato. A livello di singolo ambiente, l'apertura dei circuiti radianti è gestita da cronotermostati ambiente che agiscono sulle testine elettromeccaniche delle diverse serpentine, poste sui collettori di zona.

Il consenso all'avvio del circolatore primario installato in centrale termica è gestito dalla centralina di regolazione condominiale, tramite un contatto pulito derivato dallo studio dentistico, che viene acquisito dal controllore generale in centrale termica.

- Il circuito a radiatori di nuova realizzazione presenta una regolazione per singolo ambiente, effettuata tramite valvole termostatiche installate sui singoli terminali emissivi.

Il consenso all'avvio del circolatore installato in centrale termica è gestito dalla centralina di regolazione condominiale, tramite un contatto pulito derivato dai loft (che convoglia i segnali di input in uscita dai cronotermostati installati nei singoli alloggi), che viene acquisito dal controllore generale in centrale termica.

A seguito della riqualificazione della centrale termica nel 2021, ognuno dei tre circuiti sopra descritti è stato anche dotato di un contatore di calore dedicato per la quantificazione della quota consumi [kWh], in aggiunta a quello generale presente a monte dello scambiatore di calore a piastre (lato teleriscaldamento).

Il sistema di regolazione in centrale termica di nuova installazione risulta inoltre comprensivo di un sistema di telegestione dell'impianto web based, che consente sia la gestione dell'impianto da remoto, sia il monitoraggio dei consumi relativi ai tre circuiti sopra descritti.

È importante infine sottolineare che il condominio oggetto di analisi non presenta un sistema di termoregolazione e contabilizzazione individuale dei consumi a livello di singola unità immobiliare¹², in quanto risulta inapplicabile a causa delle caratteristiche del sistema di erogazione del calore principalmente presente all'interno dell'edificio: le serpentine radianti annegate nei solai interpiano. Attualmente, infatti, posizionare dei contabilizzatori diretti di calore sui collettori da cui si diramano i singoli circuiti radianti a soffitto non consente di quantificare l'energia effettivamente erogata all'interno delle singole unità immobiliari, in quanto:

- alcune serpentine tendono a servire più ambienti contemporaneamente, in alcuni casi relativi alla stessa unità immobiliare e in altri addirittura ad unità immobiliari differenti;
- le tubazioni di mandata e di ritorno delle serpentine non sempre fanno capo allo stesso collettore: mentre le mandate tendono ad essere localizzate all'interno dei collettori, le tubazioni di ritorno risultano a volte connettersi alle colonne montanti in punti differenti;
- la mancanza di isolamento dei solai fa sì che non si possa parlare strettamente di pavimenti o soffitti radianti. La struttura infatti è a tutti gli effetti un solaio radiante che emette calore sia all'estradosso che all'intradosso. Il calore emesso attraverso

¹² Obbligatoria in caso di impianti termici centralizzati, secondo quanto indicato nel DLgs 102/2014 e ribadito dal DM 26 giugno 2015.

le serpentine pertanto compete alla climatizzazione di più unità immobiliari contemporaneamente.

Tale sistema di emissione del calore risulta inoltre vetusto (realizzato nella prima metà degli anni Sessanta), comporta elevati costi di manutenzione in caso di rottura delle serpentine, essendo queste integrate nel getto strutturale dei solai, ed è causa di un'inefficienza energetica non indifferente, che si verifica in corrispondenza delle porzioni di solaio che si affacciano verso i terrazzi afferenti ai piani arretrati superiori: la mancanza di isolamento termico, infatti, fa sì che parte del calore emesso dal solaio radiante venga disperso verso l'ambiente esterno e non utilizzato per la climatizzazione dell'alloggio in esame.

5.4.2 Impianti di climatizzazione estiva

La climatizzazione estiva è realizzata solo in alcune unità immobiliari (circa il 40% di quelle complessivamente presenti), tramite impianti autonomi costituiti da pompe di calore aria-aria, di marche e potenze frigorifere differenti a seconda dell'alloggio in esame (sistemi di raffrescamento mono o multisplit).

Le unità esterne sono installate sui balconi prospicienti l'interno cortile, mentre i terminali ad espansione diretta, quali ventilconvettori a parete, sono siti all'interno delle unità immobiliari, presenti in numero variabile a seconda dell'alloggio considerato. La regolazione avviene a livello di singolo ambiente, ed è di tipo ON-OFF.



Figura 30 - Esempi di unità esterna e interna degli impianti di raffrescamento autonomi – immagini da sopralluogo

Per quanto riguarda lo studio dentistico a piano terreno, l'impianto di climatizzazione estiva, realizzato nel 2021, consiste in un sistema VRF¹³ in cui i terminali ad espansione diretta connessi all'unità esterna sono costituiti in parte da cassette a 4 vie ed in parte da ventilconvettori canalizzati da controsoffitto. La regolazione avviene a livello di singolo ambiente, ed è di tipo ON-OFF. L'impianto è inoltre dotato di un controllore centralizzato web server per la gestione e il monitoraggio dei consumi.

¹³ Sistema di climatizzazione ad espansione diretta che, attraverso un fluido refrigerante, trasporta energia termica o frigorifera da unità esterna alle unità terminali presenti nei vari ambienti.

5.4.3 Impianti di produzione di acqua calda sanitaria

L'acqua calda sanitaria viene prodotta in maniera autonoma nelle diverse unità immobiliari, in parte attraverso caldaie a gas metano (alcune per la produzione istantanea ed altre dotate di accumulo), installate sui balconi prospicienti l'interno cortile, ed in parte attraverso bollitori elettrici ad accumulo, siti all'interno dei servizi igienici relativi alle unità immobiliari servite.



Figura 31 - Esempi di caldaie a gas metano per la produzione autonoma di ACS - immagini da sopralluogo

5.4.4 Impianto di ventilazione meccanica controllata

Nello studio dentistico a piano terreno è stato realizzato nel 2021 un impianto autonomo di ventilazione meccanica controllata, dotato di recuperatore di calore sensibile a flussi incrociati di efficienza pari all'80%.

I diffusori di mandata e di ripresa dell'aria presenti nei diversi ambienti risultano di tipo quadrato a schermo piatto regolabile e sono dotati di serranda di taratura. Questi sono connessi alle canalizzazioni di mandata e di ripresa dell'aria, correnti nel controsoffitto dello studio dentistico, attraverso opportuni condotti flessibili in PVC. Il ricambio d'aria nei servizi igienici avviene mediante un estrattore canalizzato dedicato a funzionamento continuo.

In tutte le altre unità immobiliari la ventilazione è di tipo naturale.

5.5 MODELLAZIONE E ANALISI ENERGETICA DELL'EDIFICIO ALLO STATO DI FATTO

In questo paragrafo è descritto il processo di modellazione energetica dell'edificio allo stato di fatto, realizzato tramite il software EC700, e ne sono analizzati criticamente i risultati energetici ottenuti.

Come indicato al paragrafo 4.2, vengono realizzati due tipi differenti di modelli energetici dell'edificio: uno in condizioni adattate all'utenza (valutazione A3, Tailored Rating) e uno in condizioni standard (valutazione A2, Asset Rating). Il primo modello è utilizzato per analizzare il comportamento energetico dell'edificio in condizioni effettive e definirne il consumo di energia primaria specifico annuo [$\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{anno})$], mentre il secondo per determinare la sua classe energetica convenzionale. Sono indicati di seguito i differenti parametri di input inseriti nelle due tipologie di valutazione energetica.

Per quanto riguarda la valutazione di tipo A3, viene riportato il processo di validazione del modello energetico coi consumi reali derivanti da bollette, rese disponibili dall'amministratore condominiale e dai singoli condomini.

Si procede poi ad analizzare criticamente i risultati ottenuti dalla modellazione energetica dell'edificio, a definirne il consumo di energia primaria specifico annuo e a determinarne la classe energetica attuale.

5.5.1. Costruzione del modello energetico dell'edificio tramite EC700

Nel modello energetico adattato all'utenza alcuni dati di input richiesti dal programma sono stati modificati rispetto a quelli standard, in modo tale da simulare il comportamento dell'edificio in condizioni reali. In Tabella 5 sono indicati i differenti dati di input adottati nelle due tipologie di simulazione.

Per tutti gli altri parametri richiesti in ingresso dal programma e non indicati di seguito il valore assunto nelle due valutazioni A2 e A3 è lo stesso, pari a quello standard (e.g.: temperatura interna agli ambienti nel periodo di riscaldamento invernale pari a 20°C , temperatura interna agli ambienti nel periodo di raffrescamento estivo pari a 26°C).

	Valutazione A2 Standard	Valutazione A3 adattata all'utenza
Accensione e spegnimento dell'impianto di riscaldamento	funzionamento continuativo (senza attenuazione o spegnimento) secondo UNI TS 11300-1	<p><u>alloggi presenti da PT a P6, (compresi i 6 loft) e locale commerciale¹⁴ a piano terreno:</u></p> <p>funzionamento continuativo (senza attenuazione o spegnimento)</p> <p><u>studio dentistico a piano terreno:</u> funzionamento intermittente</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ accensione: 6:00 – 18:00 da lunedì a venerdì ▪ spegnimento: 18:00 – 6:00 da lunedì a venerdì e durante il fine settimana (sabato e domenica)
Portate d'aria di ventilazione	<p><u>unità immobiliari a destinazione d'uso residenziale:</u></p> <p>numero di ricambi d'aria secondo UNI TS 11300-1, pari a 0.3 vol/h</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>unità immobiliari attualmente utilizzate a destinazione d'uso residenziale:</u> numero di ricambi d'aria secondo UNI TS 11300-1, pari a 0.3 vol/h ▪ <u>unità immobiliare attualmente non utilizzata a destinazione d'uso residenziale (U.I. P52):</u> numero di ricambi d'aria nullo
	<p><u>unità immobiliari a destinazione d'uso non residenziale (locale commerciale e studio dentistico a piano terreno):</u></p> <p>portate d'aria di ricambio da UNI 10339, secondo UNI TS 11300-1</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>locale commerciale a piano terreno attualmente sfritto:</u> portate d'aria di ricambio nulle ▪ <u>studio dentistico a piano terreno:</u> portate d'aria di ricambio da progetto
Fabbisogno giornaliero di ACS	valori convenzionali secondo UNI TS 11300-2	valori reali ricavati da bollettazione

Tabella 5 - Dati di input al modello energetico nel caso di valutazione standard (A2) e adattata all'utenza (A3)

¹⁴ Il locale commerciale a piano terreno presenta come terminali emissivi le serpentine radianti a soffitto originarie dell'edificio; queste, nonostante l'unità immobiliare risulti al momento inutilizzata, non sono state escluse dall'impianto di riscaldamento tramite opportune valvole di intercettazione e, di conseguenza, tale unità immobiliare risulta comunque riscaldata. Lo stesso discorso è estendibile all'alloggio sfritto P52.

5.5.1.1 Definizione delle strutture disperdenti opache e trasparenti

Come indicato al paragrafo 4.3, il punto di partenza della modellazione energetica dell'edificio consiste nella configurazione all'interno del software delle strutture disperdenti opache e trasparenti.

Per quanto riguarda le strutture opache, è necessario ricostruire all'interno del programma le stratigrafie che le caratterizzano, e indicarne la tipologia (e.g.: struttura disperdente verso l'esterno: tipo T, verso il terreno: tipo G, verso locali non climatizzati: tipo U etc.).

Nel caso di strutture disperdenti verso locali non climatizzati bisogna anche indicare il coefficiente di riduzione della temperatura $b_{tr,u}$, in modo da tener conto del differente gradiente termico tra locale climatizzato e non climatizzato rispetto all'esterno. Il software consente di definire tale coefficiente o in maniera tabellare, facendo riferimento ai valori riportati al prospetto 5 della UNI TS 11300-1 (in funzione delle caratteristiche dell'ambiente non riscaldato), oppure tramite calcolo analitico, derivato dalla modellazione del locale non climatizzato considerato.

Nel caso studio in esame, si ha che:

- i $b_{tr,u}$ associati alle strutture confinanti con gli ingressi di accesso al condominio, i due vani scala e i vani chiusi non riscaldati presenti nel sottotetto mansardato¹⁵ sono stati calcolati analiticamente, tramite la modellazione dei locali non climatizzati sopra indicati;
- i $b_{tr,u}$ associati alle strutture di pavimento confinanti con i locali magazzino e l'autorimessa a piano seminterrato sono stati definiti in maniera tabellare, utilizzando i valori indicati al prospetto 5 della UNI TS 11300-1.

Per quanto riguarda, invece, i componenti finestrati, questi sono stati modellati a partire dalla loro geometria e dimensioni e dalle caratteristiche termofisiche del vetro, del telaio e delle eventuali schermature solari presenti. Nei casi in cui si avevano a disposizione dati noti (e.g. da certificazione) delle caratteristiche termiche relative agli infissi, si è proceduto inserendo direttamente la trasmittanza termica complessiva del serramento $U_{w,tot}$. Il software ha consentito inoltre di associare ad ogni infisso il corrispondente ponte termico parete-telaio, cassonetto e/o sottofinestra, modellati precedentemente.

I ponti termici sono stati configurati, come già detto al paragrafo 4.3, attraverso l'abaco EC709.

All'Allegati I si riportano le principali caratteristiche dei componenti d'involucro edilizio opaco e trasparente delimitanti il volume riscaldato dell'edificio oggetto di studio.

¹⁵ Le unità immobiliari site nel sottotetto, nonostante non siano incluse nell'analisi energetica dell'edificio in quanto non allacciate all'impianto di climatizzazione centralizzato, sono state comunque modellate all'interno del software in termini di struttura.

Per quanto riguarda le strutture opache, ne vengono indicate le stratigrafie (corredate dalle rappresentazioni grafiche delle strutture), le caratteristiche termiche e dimensionali di ogni strato di cui si compongono e le trasmittanze termiche complessive.

In merito agli elementi trasparenti di involucro, questi vengono suddivisi in base alle loro dimensioni caratteristiche in differenti tipologie, di cui si riportano la posizione in pianta, il numero di elementi originali e sostituiti e le rispettive trasmittanze termiche $U_{w,tot}$.

5.5.1.2 Modellazione della struttura dell'edificio mediante input grafico e definizione delle zone climatizzate

Una volta definite le strutture disperdenti opache e trasparenti, si è costruito il modello energetico dell'edificio tramite input grafico, posizionando i vari componenti di involucro lungo le planimetrie importate in EC700 in formato DWG, e associandogli i corrispondenti ponti termici.

Si sono inoltre rappresentati graficamente gli ingombri dei setti verticali, dei balconi, delle logge e degli edifici vicini, che costituiscono le ostruzioni di cui il programma deve tenere conto per il calcolo automatico degli ombreggiamenti.

Si è poi passati all'assegnazione delle diverse zone climatizzate dell'edificio. Nel caso in esame, ogni zona termica corrisponde ad una singola unità immobiliare, che può risultare o solo riscaldata, o riscaldata e raffrescata nel caso in cui sia dotata di un impianto autonomo di climatizzazione estiva.

Si riportano In Figura 32 il risultato 3D della modellazione, e in Tabella 6 i dati geometrici afferenti alla porzione climatizzata dell'edificio oggetto di analisi.

Parametro geometrico	valore
Superficie in pianta netta [m ²]	3680.2
Superficie in pianta lorda [m ²]	4184.7
Superficie disperdente lorda [m ²]	5957.4
Volume netto [m ³]	11394.1
Volume lordo [m ³]	14953.8
Rapporto di forma S/V [m ⁻¹]	0.40

Tabella 6 - Dati geometrici afferenti alla porzione climatizzata del complesso edilizio



Figura 32 - Risultato grafico 3D della modellazione

5.5.1.3 Definizione degli impianti tecnici a servizio dell'edificio

L'ultimo step della modellazione energetica dell'edificio risulta la definizione degli impianti tecnici a servizio del fabbricato e delle loro caratteristiche all'interno del programma.

Per quanto riguarda l'impianto di riscaldamento, una volta indicato se è centralizzato o autonomo, il programma richiede l'inserimento di una serie di dati di input relativi ai sottosistemi di generazione, accumulo, distribuzione ed emissione di cui si compone, in modo tale da poterne definire i rendimenti in conformità con la UNI TS 11300-2.

Nel caso in esame, l'impianto risulta centralizzato e la generazione del calore avviene attraverso uno scambiatore di teleriscaldamento.

I principali dati di input richiesti dal programma, relativi al sistema di generazione, sono la potenza utile nominale dello scambiatore (350 kW da targa), il locale di installazione (centrale termica), la temperatura media del fluido (90° - rete ad acqua surriscaldata) e i fattori di conversione in energia primaria rinnovabile e non rinnovabile (dichiarati dal fornitore -IREN e pari a 0.021 ($f_{p,ren}$) e 0.0884 ($f_{p,nren}$)). Il rendimento di generazione, calcolato rispetto all'energia utile ($\eta_{H,gen,ut} = \frac{Q_{gen,out}}{Q_{gen,in}}$), risulta pari a 0.985.

L'impianto non è dotato di alcun sistema di accumulo, che quindi non è stato necessario modellare all'interno del software.

Grazie alla possibilità offerta da EC700 di caratterizzare più circuiti differenti serviti dallo stesso generatore centralizzato, sono stati creati all'interno del programma i tre circuiti relativi al caso studio in esame: circuito pannelli radianti a soffitto, pavimento e radiatori.

Ad ognuno di essi sono state poi associate le zone termiche servite ed è stato definito il regime di funzionamento dell'impianto (continuativo, con spegnimento, attenuato).

I rendimenti dei sottosistemi di distribuzione, emissione e regolazione relativi ai tre circuiti, calcolati dal software in funzione delle loro caratteristiche in conformità con la UNI TS 11300-2, sono riportati in Tabella 7.

	Circuito pannelli radianti a soffitto	Circuito pannelli radianti a pavimento	Circuito radiatori
$\eta_{H,em}$ rendimento di emissione	0.95	0.97	0.944
$\eta_{H,rg}$ rendimento di regolazione	0.95	0.96	0.95
$\eta_{H,du}$ rendimento di distribuzione	0.983	0.969	0.945

Tabella 7 - Rendimenti dei sottosistemi di emissione, regolazione e distribuzione dei tre circuiti relativi all'edificio oggetto di studio, calcolati secondo 11300/2

Sono state inoltre inserite le caratteristiche degli ausiliari elettrici (pompe di circolazione), a servizio dei tre circuiti: ne è stato indicato il regime di funzionamento (velocità variabile) e la potenza elettrica nominale assorbita (ricavata dai dati di targa).

Per quanto riguarda la produzione di acqua calda sanitaria, questa è realizzata nell'edificio in esame tramite impianti autonomi, installati nelle singole unità immobiliari.

Per ogni impianto autonomo, il software ha richiesto come dati in ingresso la tipologia di generatore utilizzato e la sua potenza utile nominale, in modo da associargli il rendimento $\eta_{w,gn}$ secondo UNI/TS 11300-2¹⁶, le caratteristiche del sistema di distribuzione, in modo da associargli il rendimento $\eta_{w,du}$ secondo UNI/TS 11300-2, e il fabbisogno giornaliero di acqua calda sanitaria V'_{w} [l/giorno], nei diversi mesi dell'anno. Tale valore nella valutazione A2 standard è pari a quello indicato nella UNI/TS 11300-2 in funzione della destinazione d'uso

¹⁶ Nel caso in esame i generatori presenti sono di 3 tipologie a seconda dell'alloggio considerato: bollitore elettrico ad accumulo, generatore a gas di tipo istantaneo (Tipo C senza fiamma pilota) e generatore a gas ad accumulo (Tipo C senza fiamma pilota). I rendimenti medi stagionali indicati nella UNI/TS 11300-2 sono rispettivamente pari a 0.75, 0.80 e 0.75.

dell'unità immobiliare, mentre nella valutazione A3 è stato modificato in funzione delle effettive condizioni di utilizzo dell'edificio.

Anche il raffrescamento viene realizzato tramite impianti autonomi, e risulta presente solamente in alcune unità immobiliari.

Per la caratterizzazione dei singoli impianti di raffrescamento all'interno del software, vengono richiesti in input da EC700 la tipologia di generatore utilizzata (pompa di calore elettrica aria-aria) e le sue prestazioni dichiarate (potenza frigorifera nominale ed EER, che corrisponde al rendimento di generazione $\eta_{c,gn}$ calcolato rispetto all'energia utile), la tipologia di terminali di emissione presenti (terminali ad espansione diretta), gli eventuali fabbisogni elettrici associati e il tipo di regolazione adottato (ON-OFF per singolo ambiente); il software associa a questi ultimi in maniera automatica i rendimenti di emissione e regolazione η_e e η_{rg} secondo UNI/TS 11300-3 (nel caso in esame, pari rispettivamente a 0.97 e 0.94).

È stato infine modellato all'interno del programma l'impianto di ventilazione meccanica controllata a servizio dello studio dentistico; ne è stata indicata la tipologia (impianto di ventilazione meccanica bilanciata), la presenza del recuperatore di calore e la sua efficienza nominale (80% da progetto d'impianto disponibile), le ore di funzionamento giornaliero (8 ore) e le potenze elettriche dei ventilatori presenti nei tratti di ripresa e di mandata (ricavati dal progetto d'impianto disponibile). Le portate d'aria di immissione ed estrazione nei diversi locali sono state inserite in precedenza nella fase di definizione delle zone e dei locali climatizzati. Nella valutazione A2 standard sono state utilizzate le portate di ricambio da UNI 10339, mentre nella valutazione A3 sono state inserite quelle reali da progetto.

5.5.2 Validazione del modello energetico di tipologia A3 con i consumi reali dell'edificio

Prima di procedere nell'analisi è necessario validare l'attendibilità del modello energetico di tipologia A3 costruito, andando a verificare che i consumi forniti in output da quest'ultimo (detti operativi) si discostino al massimo del 5%¹⁷ rispetto a quelli reali da bollettazione disponibili. Se lo scostamento risulta al di sotto di tale valore, significa che il modello realizzato simula correttamente il comportamento energetico dell'edificio reale.

Per quanto riguarda la climatizzazione invernale, le stagioni di riscaldamento considerate nel processo di validazione sono quelle 2021-22 e 2022-23, ovvero le due stagioni successive agli interventi di riqualificazione dell'impianto di riscaldamento condominiale, che costituiscono una baseline di consumo coerente in termini di condizioni al contorno (stesse caratteristiche dell'impianto termico e modalità di utilizzo dello stesso). I consumi mensili reali relativi alle suddette stagioni si sono ottenuti dalle bollette fornite dall'amministratore condominiale.

Nella validazione del modello, il consumo a calcolo viene confrontato con la media dei consumi reali relativi alle due stagioni di riferimento.

Per poter effettuare un corretto confronto tra i consumi storici dell'edificio e quelli operativi stimati dal modello, i consumi di energia termica reali sono stati normalizzati rispetto ai Gradi-Giorno effettivi registrati nella città di Torino dalla stazione meteorologica più vicina al condominio analizzato (stazione *via della Consolata* dell'Arpa Piemonte), così da neutralizzare l'effetto della variabile climatica sui consumi. Si riportano di seguito in Tabella 8 i consumi reali normalizzati rispetto al clima e il consumo operativo da modello energetico dell'edificio.

Stagione di riscaldamento	Consumo annuo di energia termica [MWh _t /anno]	Gradi-Giorno [GG]	Consumo annuo di energia termica normalizzato ¹⁸ [MWh _t /(anno·GG)]	Note
2021-2022	302.92	2155	371.5	Consumo reale
2022-2023	260.14	1886	364.57	Consumo reale
Convenzionale	379.18	2643	-	Consumo operativo

Tabella 8 - Consumi energetici reali normalizzati rispetto al clima nelle stagioni termiche di interesse e consumo energetico operativo

¹⁷ Valore indicato nella normativa UNI/TR 11775:2020, che fornisce le linee guida da utilizzare per la redazione delle diagnosi energetiche degli edifici.

¹⁸ Valore ottenuto dividendo il consumo reale di energia termica per i Gradi-Giorno reali relativi alla stagione di riscaldamento corrispondente e moltiplicandolo per i Gradi-Giorno convenzionali della città di Torino (secondo UNI 10349).

La baseline di consumo, data dalla media dei consumi reali normalizzati nelle due stagioni termiche di riferimento, è pari a 368.03 MWh_t. Lo scostamento percentuale ottenuto rispetto al consumo operativo stimato dal modello è dato dall'espressione:

$$\frac{C_{\text{operativo}} - C_{\text{baseline}}}{C_{\text{operativo}}} = \frac{379.18 - 368.03}{379.18} = 3\%$$

Essendo questo inferiore al 5%, il modello energetico risulta validato per quanto riguarda la climatizzazione invernale.

Per la produzione di acqua calda sanitaria, realizzata nel condominio con sistemi di generazione autonomi, non essendo possibile avere a disposizione i consumi reali relativi ad ogni singola unità immobiliare, si è proceduti alla calibrazione del modello energetico secondo la logica riportata di seguito.

L'effettivo fabbisogno giornaliero $V'_{w, \text{reale}}$ di ACS [l/giorno] relativo alle unità immobiliari che compongono l'edificio è stato stimato a partire dai consumi reali di gas metano¹⁹ di alcuni alloggi campione, ricavati dalle bollette relative all'anno solare 2022 fornite dai condomini. Noti anche la superficie utile [m²] e il numero di persone che abitano tali alloggi, si è ricavato:

- il fabbisogno giornaliero di ACS effettivo per persona $V'_{w, \text{reale per pers}}$ [l/(giorno·pers)] per gli alloggi campione, dato dall'espressione:

$$V'_{w, \text{reale per pers}} = \frac{C_{\text{reale}} \cdot V'_{w, \text{standard da 11300/2}}}{C_{\text{standard da 11300/2}}} \cdot \frac{1}{n_{\text{pers}}}$$

Dove:

- C_{reale} = consumo reale annuo di gas naturale per la produzione di acqua calda sanitaria [Sm³/anno]
- $V'_{w, \text{standard da 11300/2}}$ = fabbisogno giornaliero standard di acqua calda sanitaria da 11300/2 [l/giorno]
- $C_{\text{standard da 11300/2}}$ = consumo annuale standard di gas naturale per la produzione di acqua calda sanitaria, calcolato tramite il modello energetico dell'edificio, considerando come fabbisogno giornaliero V'_{w} quello standard da UNI/TS 11300-2 [Sm³/anno]
- n_{pers} = numero di persone che abitano nell'unità immobiliare campione considerata

¹⁹ In tali alloggi la produzione autonoma di acqua calda sanitaria è realizzata mediante caldaie a gas metano.

- Il fabbisogno giornaliero di ACS per persona medio effettivo dell'edificio $V'_{w, \text{reale medio per pers}}$ [l/(giorno·pers)], dato dalla media dei fabbisogni giornalieri di ACS effettivi per persona degli alloggi campione, calcolati come sopra indicato;
- Il numero medio di persone per unità di superficie $n_{s, \text{medio}}$ [pers/m²] dell'edificio, dato dalla media del numero di persone per unità di superficie che abitano negli alloggi campione.

Moltiplicando l' $n_{s, \text{medio}}$ per la superficie utile degli alloggi non campione presenti nell'edificio, si è stimato il numero di persone che vi abitano.

Il fabbisogno giornaliero reale di ACS $V'_{w, \text{reale}}$ [l/giorno] per le varie unità immobiliari non campione si è stimato moltiplicando il numero di persone sopra indicato per il $V'_{w, \text{reale medio per pers}}$ dell'edificio.

Si riportano di seguito in Tabella 9, per le diverse unità immobiliari, i fabbisogni di acqua calda sanitaria [l/giorno] effettivi, stimati come sopra indicato.

Per le unità immobiliari attualmente non utilizzate il fabbisogno di ACS è stato posto uguale a zero. Per quanto riguarda l'ambulatorio dentistico, il ragionamento sopra riportato per la stima del fabbisogno di acqua calda sanitaria non risulta estendibile; per questo motivo, anche nel modello di tipologia A3 si è mantenuto il valore standard di l/giorno indicato nella UNI/TS 11300-2.

Unità immobiliare	V'_w effettivo [l/giorno]	Unità immobiliare	V'_w effettivo [l/giorno]
T1	0	P22	143.00
T2	95.00	P23	190.00
T3	95.00	P24	143.00
T4	48.00	P31	190.00
T5	48.00	P32	190.00
T6	48.00	P33	143.00
T7	48.00	P41	190.00
T8	48.00	P42	190.00
T9	48.00	P43	143.00
T10	73	P51	332.33
P11	95.00	P52	0
P12	95.00	P53	143.00
P13	103.11	P61	36.97
P14	73.42	P62	82.49
P21	95.00		

Tabella 9 - Fabbisogni di ACS [l/giorno] effettivi per le diverse unità immobiliari

5.5.3 Analisi dei risultati energetici ottenuti

Nel presente paragrafo sono analizzati i risultati ottenuti dalla simulazione energetica dell'edificio. Per valutare le prestazioni energetiche dell'involucro edilizio, si sono quantificate

le dispersioni termiche che si verificano attraverso le strutture che lo compongono, individuando così quelle maggiormente disperdenti, su cui verrà focalizzata l'attenzione nella definizione degli interventi di efficientamento.

È stato poi stimato il consumo annuale, espresso in termini di energia primaria, di ciascun vettore energetico e per ogni uso finale di energia dell'edificio. Sono stati successivamente ricavati gli indici di prestazione energetica totali, espressi in [kWh/m²], riferiti ai singoli servizi energetici e all'edificio nel suo complesso (EP_{gl,tot}).

Tramite il modello di tipologia A2 standard, è stata infine determinata la classe energetica convenzionale indicativa dell'edificio allo stato di fatto.

5.5.3.1. Prestazioni energetiche dell'involucro edilizio

Si riportano di seguito in Tabella 10, per le diverse tipologie di strutture disperdenti, la potenza termica dispersa per trasmissione in condizioni invernali di progetto [kW], la superficie disperdente complessiva [m²] e le rispettive incidenze percentuali, rappresentate graficamente in Figura 33 e Figura 34.

Tipologia di struttura	Potenza dispersa [kW]	Incidenza % della potenza dispersa	Superficie disperdente [m ²]	Incidenza % della superficie disperdente
Pareti perimetrali opache	77.7	38%	2115.2	35%
Pareti verso ambienti non riscaldati (ingressi, androne e vani scala)	12	6%	1237	20%
Pavimenti e soffitti verso esterno	29.3	14%	752.3	12%
Pavimenti verso piano interrato non riscaldato	14	7%	1163.6	19%
Serramenti originali con vetro singolo	50.2	25%	366.1	6%
Serramenti originali con vetro camera	20.8	10%	407.5	7%

Tabella 10 - Potenza termica dispersa per trasmissione [kW], superfici disperdenti [m²] e corrispondenti incidenze percentuali relative alle strutture che compongono l'involucro edilizio

INCIDENZA % DELLA POTENZA DISPERSA

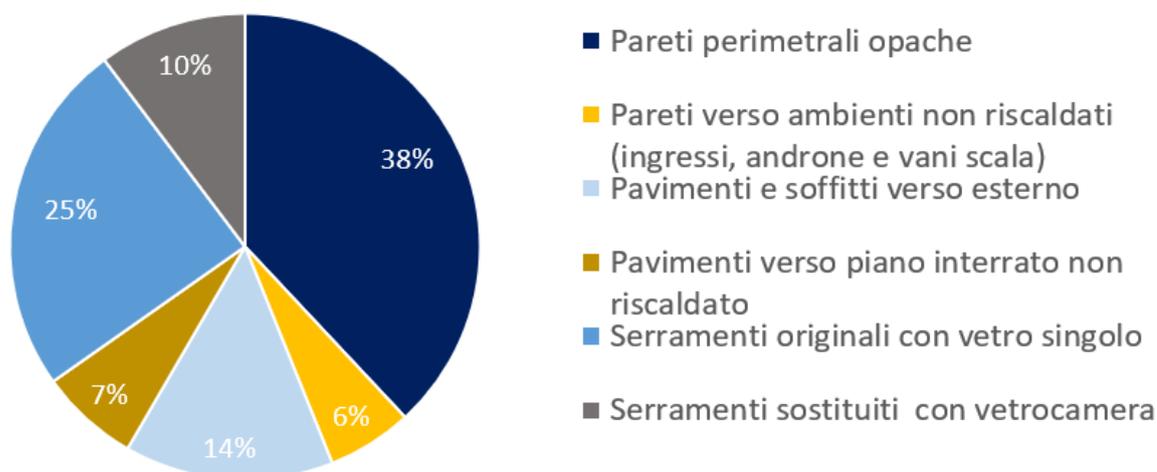


Figura 33 - Incidenza percentuale della potenza dispersa

INCIDENZA % DELLE SUPERFICI DISPERDENTI

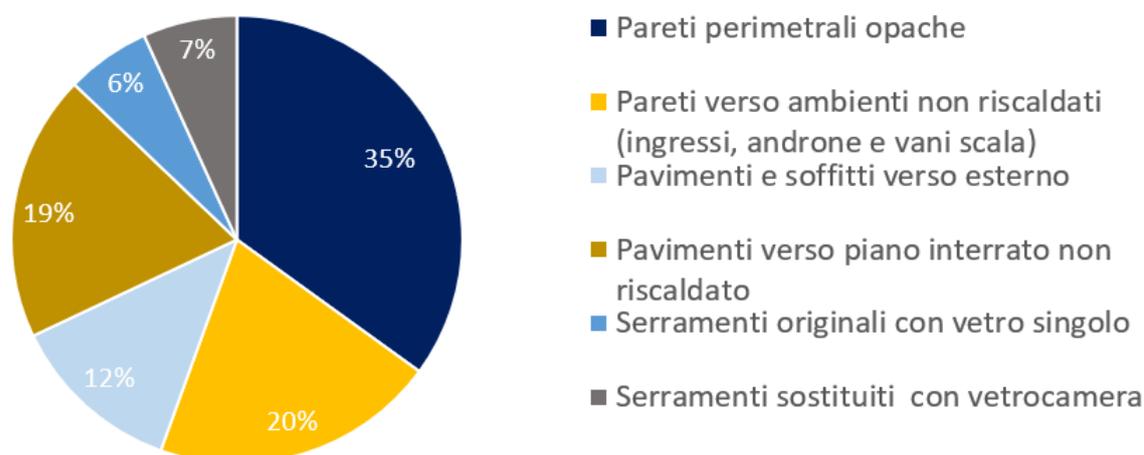


Figura 34 - Incidenza percentuale delle superfici disperdenti

Dall'analisi dei diagrammi sopra riportati si deduce chiaramente che le pareti perimetrali dell'edificio e i serramenti originali in legno e vetro singolo costituiscono gli elementi d'involucro maggiormente disperdenti, responsabili rispettivamente del 38% e del 25% della potenza termica complessivamente dispersa per trasmissione.

Per quanto riguarda le pareti perimetrali del fabbricato, tale valore è giustificato in parte dalla loro notevole incidenza percentuale in termini di superficie disperdente, pari al 35% del totale, e in parte alle ridotte proprietà termoisolanti delle strutture edilizie.

I serramenti originali in legno e vetro singolo costituiscono invece solamente il 6% della superficie disperdente complessiva: il loro marcato contributo alle dispersioni termiche per trasmissione è legato quindi principalmente al loro basso livello prestazionale.

Sono presenti anche ulteriori contributi non trascurabili di dispersione termica attraverso gli elementi di involucro edilizio, come quello relativo ai soffitti e ai pavimenti verso esterno, pari al 14% del totale; tale valore dipende sia dalle ridotte proprietà termoisolanti di tali strutture edilizie, sia dall'incidenza percentuale di queste ultime in termini di superficie, pari al 12%.

5.5.3.2. Fabbisogni di energia primaria e indici di prestazione energetica

Sono riportati in Tabella 11 i consumi annuali dei vettori energetici a servizio del fabbricato, complessivi e suddivisi nei diversi usi finali.

uso finale	vettore energetico		
	Teleriscaldamento [kWh _T /anno]	Energia elettrica [kWh _{EL} /anno]	Gas naturale [Nm ³ /anno]
Riscaldamento	379183	2134	-
Produzione di ACS	-	21680	3031
Raffrescamento	-	10262	-
Ventilazione meccanica	-	2625	-
TOTALE	379183	36701	3031

Tabella 11 - Consumi dei vettori energetici a servizio del fabbricato, complessivi e suddivisi per uso finale

Attraverso l'utilizzo dei fattori di conversione dei vettori energetici in energia primaria totale $f_{p,tot}$, definiti a livello nazionale dal DM 26 giugno 2015 – Requisiti Minimi, è possibile ricavare i fabbisogni di energia primaria totale legati ai singoli vettori energetici a servizio dell'edificio, riportati in Tabella 12 e rappresentati graficamente in Figura 35.

vettore energetico	fabbisogno di energia primaria [MWh/anno]
Teleriscaldamento	343.2
Energia elettrica	88.8
Gas Naturale	31.7

Tabella 12 - fabbisogni relativi ai singoli vettori energetici

FABBISOGNO % DEI DIVERSI VETTORI ENERGETICI

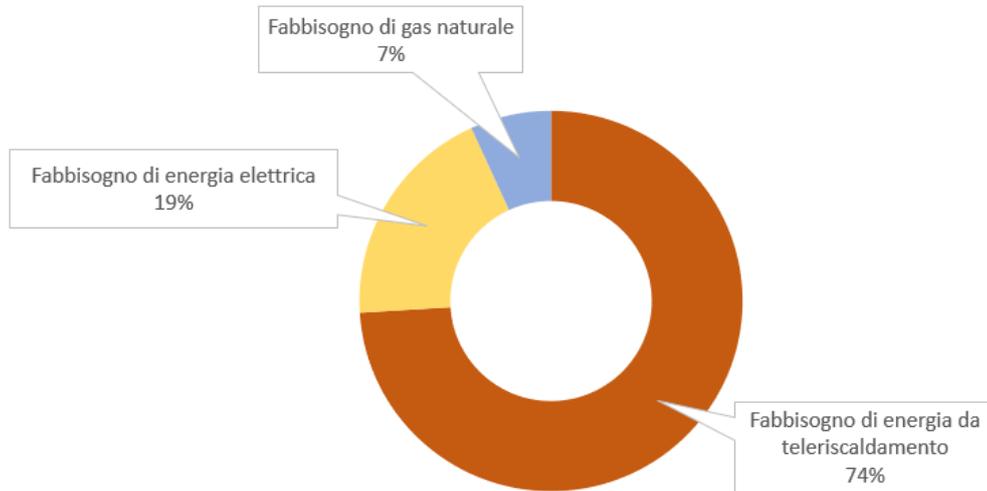


Figura 35 - fabbisogno % relativo ai singoli vettori energetici

Appare chiaro come il consumo di energia primaria connesso al prelievo di energia termica da teleriscaldamento risulti nettamente preponderante rispetto a quelli connessi al prelievo di energia elettrica e alla combustione di gas naturale.

Vengono riportati in Tabella 13 e rappresentati graficamente in Figura 36 i fabbisogni di energia primaria totale riferiti ai singoli servizi energetici dell'edificio, e quello globale dato dalla loro somma.

uso finale	fabbisogno di energia primaria totale [MWh/anno]
Riscaldamento	348.3
Produzione di ACS	84.1
Raffrescamento	24.8
Ventilazione meccanica	6.4
GLOBALE	463.6

Tabella 13 - fabbisogni di energia primaria totale globale e riferiti ai singoli servizi energetici

FABBISOGNO DI ENERGIA PRIMARIA TOTALE PER I VARI USI FINALI [kWh_{EP,TOT}/anno]

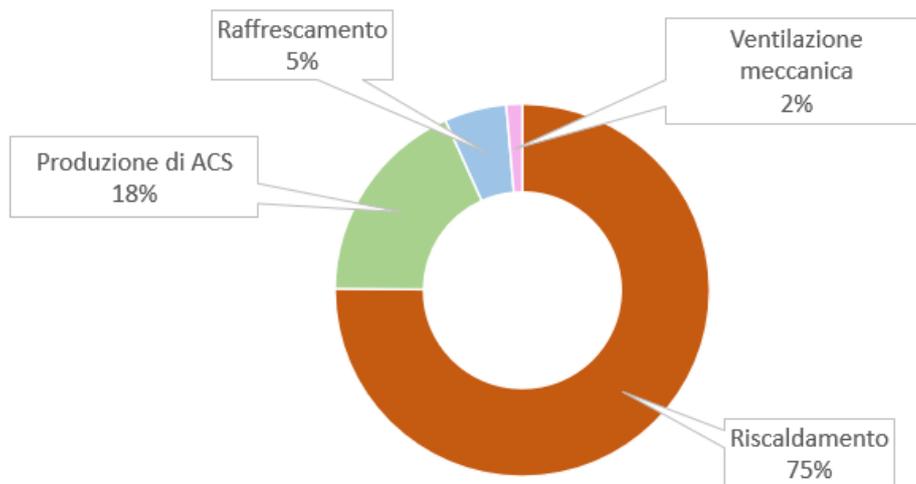


Figura 36 - Fabbisogni % di energia primaria totale relativa ai singoli servizi energetici

Anche in questo caso risulta chiaro come il fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento risulti la componente principale del fabbisogno di energia primaria totale globale dell'edificio.

Si riportano infine in Tabella 14 gli indici di prestazione energetica totali, espressi in [kWh/(m²·anno)], riferiti ai singoli servizi energetici e all'edificio nel suo complesso (EP_{gl,tot}).

uso finale	indice di prestazione energetica totale EP _{tot} [kWh/(m ² ·anno)]
Riscaldamento	94.5
Produzione di ACS	22.7
Raffrescamento	6.8
Ventilazione meccanica	1.7
GLOBALE	126

Tabella 14 - Indici di prestazione energetica totale globale e riferiti ai singoli vettori energetici

Come già messo in evidenza ai paragrafi precedenti, il parametro energetico utilizzato nell'elaborazione del grafico di cost-optimal è l'indice di prestazione energetica globale totale dell'edificio EP_{gl,tot}, in [kWh/(m²·anno)]; il suo valore per il condominio analizzato allo stato di fatto risulta pari a 126 kWh/(m²·anno).

Tale valore è ottenuto in output al modello energetico dell'edificio in Tailored Rating, in cui, come messo in evidenza al paragrafo 5.5.1., sono presenti due unità immobiliari attualmente non utilizzate (T1 – unità a destinazione d'uso commerciale a piano terreno, e P52 – unità a destinazione d'uso residenziale a piano quinto), per le quali si sono considerati i seguenti dati di input al modello:

- portata d'aria di ricambio [m³/h] nulla;

- fabbisogno giornaliero di ACS [l/giorno] nullo;

Nelle valutazioni energetiche post-intervento tali unità immobiliari si sono considerate invece utilizzate, e caratterizzate dai seguenti dati di input:

- portata d'aria di ricambio secondo UNI TS 11300-1:
 - numero di ricambi d'aria pari a 0.3 vol/h per l'alloggio P52 a destinazione d'uso residenziale;
 - portata d'aria di rinnovo da UNI 10339, pari a 169.94 m³/h, per l'unità immobiliare T1 a destinazione d'uso non residenziale;
- fabbisogno giornaliero di ACS [l/giorno]:
 - determinato per l'alloggio P52 secondo quanto indicato al paragrafo 5.5.2., e pari a 143 l/giorno;
 - nullo per l'unità immobiliare T1 a piano terreno: questa, infatti, si è considerata un negozio di vendita al dettaglio senza obbligo di servizi igienici.

Per poter confrontare in maniera opportuna la prestazione energetica dell'edificio allo stato di fatto e nelle diverse soluzioni progettuali analizzate, si è realizzato un ulteriore modello energetico del condominio pre-intervento in Tailored Rating, in cui le unità immobiliari T1 e P52 si sono considerate utilizzate, caratterizzate dai dati di input sopra indicati.

Si riportano in - **Indici di prestazione energetica totale globale** Tabella 15 gli indici di prestazione energetica totali così ottenuti. L' $EP_{gl,tot}$ che verrà confrontato con i valori ottenuti nelle diverse soluzioni progettuali post-intervento risulta pari a 128.9 kWh/(m²·anno).

uso finale	indice di prestazione energetica totale EP_{tot} [kWh/(m ² ·anno)]
Riscaldamento	96.9
Produzione di ACS	23.6
Raffrescamento	6.8
Ventilazione meccanica	1.7
GLOBALE	128.9

Tabella 15 - Indici di prestazione energetica totale globale e riferiti ai singoli vettori energetici

Infine, attraverso il modello energetico di tipologia A2 standard, è stata valutata la classe energetica convenzionale indicativa del condominio allo stato di fatto, che risulta essere in classe C ($EP_{gl,nren} = 145.69$ [kWh/m²·anno]).

6 INTERVENTI DI RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA RELATIVI ALL'INVOLUCRO EDILIZIO

Nel presente capitolo vengono espone ed analizzate dal punto di vista energetico, in termini di riduzione del consumo annuo di energia termica per il riscaldamento [kWh_t/anno], diverse soluzioni progettuali di riqualificazione dell'involucro edilizio opaco e trasparente del condominio oggetto di studio.

Di tutte le casistiche analizzate, ponendosi nell'ottica di un caso studio reale e seguendo un criterio di fattibilità tecnico-economica dell'intervento, se ne sono poi selezionate quattro, che verranno combinate in maniera opportuna con interventi relativi agli impianti tecnici e all'utilizzo di fonti rinnovabili.

6.1 CASISTICHE ANALIZZATE

Nella definizione delle casistiche da analizzare, si sono prima di tutto identificate quattro macrocategorie d'intervento, descritte in dettaglio in Tabella 16, che coinvolgono in maniera differente le diverse porzioni d'involucro edilizio.

MACROCATEGORIA A	MACROCATEGORIA B	MACROCATEGORIA C	MACROCATEGORIA D
SOSTITUZIONE SERRAMENTI	ISOLAMENTO SUPERFICI ORIZZONTALI	ISOLAMENTO SUPERFICI ORIZZONTALI E PARETI VERTICALI	ISOLAMENTO SUPERFICI ORIZZONTALI, PARETI VERTICALI E SOSTITUZIONE SERRAMENTI
<ul style="list-style-type: none"> • <u>sostituzione</u>, nelle singole unità immobiliari, dei <u>serramenti</u> risalenti all'<u>epoca di costruzione del fabbricato</u>, caratterizzati da telaio in legno e 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>coibentazione</u> a <u>intradosso</u> mediante "<u>cappotto termico</u>" dei <u>solai</u> che <u>separano</u> le unità immobiliari a piano terreno dagli <u>ambienti non riscaldati</u> al primo 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>coibentazione</u> delle <u>superfici orizzontali</u> come definito nella <u>macrocategoria B</u> • <u>coibentazione</u> delle <u>pareti verticali</u> in <u>due possibili varianti</u>²²: 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>sostituzione</u> dei <u>serramenti</u> come indicato nella <u>macrocategoria A</u> • <u>coibentazione</u> delle <u>superfici orizzontali</u> come indicato nella <u>macrocategoria B</u>

²² In entrambe le varianti relative all'isolamento termico delle pareti verticali si è considerato di non isolare la porzione di muratura lato strada a piano terreno rivestita in materiale lapideo, in quanto il Regolamento Edilizio della città di Torino, per i primi 3 metri di altezza lato strada, non consente di aumentare di più di 4 cm lo spessore complessivo della parete. Tale vincolo richiederebbe l'utilizzo di un materiale isolante a spessore ridotto ed elevate prestazioni (e.g. pannelli di coibenti additivati con Aerogel) per poter consentire il rispetto della normativa vigente a livello nazionale in materia di efficienza energetica (DM 26 giugno 2015 – Requisiti Minimi), che risulta però eccessivamente costoso.

<p>vetro singolo, con nuovi elementi energeticamente più performanti e caratterizzati da una miglior tenuta all'aria</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>sostituzione</u> degli <u>avvolgibili</u> con nuovi elementi coibentati e <u>isolamento termico</u> dei <u>cassonetti</u> in concomitanza con l'intervento di sostituzione dei serramenti nelle singole unità immobiliari • <u>sostituzione</u>, negli <u>ambienti comuni</u> (<u>vani scala, ingressi</u>), dei <u>serramenti</u>²⁰ risalenti all'epoca di costruzione del fabbricato, caratterizzati da telaio in ferro e vetro singolo, con nuovi elementi energeticamente più performanti e caratterizzati da una maggior tenuta all'aria 	<p>piano interrato (autorimessa condominiale e locali magazzino²¹)</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>coibentazione</u> a <u>intradosso</u> mediante <u>"cappotto termico"</u> delle porzioni di <u>solaio</u> afferenti agli ambienti siti al primo piano confinanti con l'ambiente esterno (<u>verso la rampa di accesso all'autorimessa condominiale</u>) • <u>coibentazione</u> a <u>estradosso</u> mediante <u>"cappotto termico"</u> del <u>solaio piano</u> di <u>copertura</u> del <u>basso fabbricato</u> 	<p>a. <u>unicamente</u> dall'esterno mediante <u>"cappotto termico"</u></p> <p>b. <u>sia</u> dall'esterno mediante <u>"cappotto termico"</u> che in <u>intercapedine muraria</u> tramite <u>insufflaggio</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> • <u>coibentazione</u> delle <u>pareti verticali</u> come indicato nella <u>macrocategoria C</u>
---	--	--	--

Tabella 16 - Macrocategorie di intervento relative all'involucro edilizio

Ciascuna delle quattro macrocategorie sopra descritte presenta sia aspetti positivi che negativi da un punto di vista di fattibilità tecnico-economica e di risparmio energetico ottenibile: gli interventi di tipo A e B risultano meno invasivi per l'utenza, meno costosi e di più rapida

²⁰ Sono comprese sia le finestre sia le portefinestre relative ai due vani scala, che i portoni di accesso all'ingresso di via Colli, lato strada e lato interno cortile.

²¹ Per quanto riguarda il solaio che separa le unità immobiliari del piano terreno dai locali magazzino non riscaldati, è stata aggiunto un nuovo strato di materiale coibente all'intradosso, essendo già presente un isolamento realizzato mediante lastre in polistirene di spessore pari a 2.5 cm.

realizzazione di quelli C e D, che però, prevedendo l'isolamento termico della quasi totalità delle superfici opache del fabbricato, consentono di raggiungere un risparmio energetico maggiore.

Successivamente, così come suggerito dagli Orientamenti che accompagnano il Regolamento Delegato n. 244/2012 [6], sono stati definiti più livelli termici per i diversi componenti di involucro edilizio. In particolare, si sono considerati due livelli di prestazione energetica per i nuovi serramenti da sostituire agli originali, due per l'isolamento termico delle superfici orizzontali di pavimento e copertura e due per quello delle pareti verticali (in entrambe le varianti a e b).

Ponendosi nell'ottica di un caso studio reale, per definire i livelli termici si è tenuto conto di diversi fattori:

- il rispetto delle verifiche di legge e delle prescrizioni cogenti a livello nazionale per gli interventi relativi all'involucro edilizio, stabilite dal DM 26 giugno 2015 – Requisiti Minimi e illustrate in maniera dettagliata al paragrafo 4.4 per le tipologie di intervento d'interesse (riqualificazione energetica per le macrocategorie A e B, che interessano meno del 25% della superficie disperdente lorda dell'edificio, e ristrutturazione importante di II livello per le macrocategorie C e D, che interessano più del 25% della superficie disperdente lorda dell'edificio e che possono interessare l'impianto termico per la climatizzazione invernale e/o estiva);
- l'utilizzo di materiali per l'isolamento termico idonei alle applicazioni d'interesse²³ e realizzati da produttori effettivamente presenti sul mercato, di cui si sono ricercate le schede tecniche rese disponibili in rete;
- l'accesso agli incentivi fiscali disponibili a livello nazionale per gli interventi di riqualificazione energetica degli edifici, illustrati al paragrafo 10.2.3., e il conseguente rispetto di eventuali requisiti di prestazione energetica richiesti più stringenti rispetto a quelli cogenti a livello nazionale.

In particolare, per poter usufruire delle detrazioni fiscali Ecobonus, che risultano ad oggi uno dei principali meccanismi di incentivazione disponibili per gli interventi di efficientamento energetico, risulta necessario rispettare i requisiti minimi previsti all'allegato E dal Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico 6 agosto 2020 [43], relativi alla trasmittanza termica [W/m^2K] degli elementi di involucro opaco e trasparente, in funzione della zona climatica in cui è situato l'edificio. I valori limite di trasmittanza termica sono riportati di seguito in Figura 37, dove si sono evidenziati quelli relativi alla zona climatica E d'interesse. Al contrario di quanto previsto nel DM 26 giugno 2015

²³ A seconda della porzione di involucro opaco oggetto di intervento (parete verticale, pavimento o copertura piana) e della tipologia di isolamento che si vuole realizzare (esterno a "cappotto termico" o insufflaggio dell'intercapedine per le pareti verticali, a intradosso mediante "cappotto termico" per i pavimenti verso esterno o non riscaldato e a estradosso mediante "cappotto termico" per la copertura piana de basso fabbricato) si sono selezionati materiali coibenti specificatamente adatti alle diverse applicazioni di interesse.

– Requisiti Minimi, il calcolo della trasmittanza termica delle strutture opache non include il contributo dei ponti termici.

Tipologia di intervento	Requisiti tecnici di soglia per la tipologia di intervento	
	i. Strutture opache orizzontali: isolamento coperture (calcolo secondo le norme UNI EN ISO 6946)	Zona climatica A
Zona climatica B		$\leq 0,27 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
Zona climatica C		$\leq 0,27 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
Zona climatica D		$\leq 0,22 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
Zona climatica E		$\leq 0,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
Zona climatica F		$\leq 0,19 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
ii. Strutture opache orizzontali: isolamento pavimenti (calcolo secondo le norme UNI EN ISO 6946)	Zona climatica A	$\leq 0,40 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
	Zona climatica B	$\leq 0,40 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
	Zona climatica C	$\leq 0,30 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
	Zona climatica D	$\leq 0,28 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
	Zona climatica E	$\leq 0,25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
	Zona climatica F	$\leq 0,23 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
iii. Strutture opache verticali: isolamento pareti perimetrali (calcolo secondo le norme UNI EN ISO 6946)	Zona climatica A	$\leq 0,38 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
	Zona climatica B	$\leq 0,38 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
	Zona climatica C	$\leq 0,30 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
	Zona climatica D	$\leq 0,26 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
	Zona climatica E	$\leq 0,23 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
	Zona climatica F	$\leq 0,22 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
iv. Sostituzione di finestre comprensive di infissi (calcolo secondo le norme UNI EN ISO 10077-1)	Zona climatica A	$\leq 2,60 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
	Zona climatica B	$\leq 2,60 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
	Zona climatica C	$\leq 1,75 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
	Zona climatica D	$\leq 1,67 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
	Zona climatica E	$\leq 1,30 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
	Zona climatica F	$\leq 1,00 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

Figura 37 - Valori di trasmittanza massimi consentiti per l'accesso alle detrazioni fiscali Ecobonus [43]

A fronte di quanto sopra detto, vengono descritti di seguito in Tabella 17, 18, 19 e 20 i due livelli di prestazione energetica stabiliti per i serramenti, le superfici orizzontali di pavimento e copertura e le pareti verticali.

PORZIONE DI INVOLUCRO EDILIZIO INTERESSATA DALL'INTERVENTO	
SERRAMENTI ORIGINALI	
LIVELLO TERMICO	DESCRIZIONE INTERVENTO
<p>L1</p> <p>vetri doppi</p> <p>$U_w \leq 1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • sostituzione dei serramenti in legno e vetro singolo risalenti all'epoca di costruzione del fabbricato, sia nelle singole unità immobiliari che negli ambienti comuni, con nuovi elementi caratterizzati da una trasmittanza termica $U_w = 1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ • isolamento termico dei cassonetti afferenti ai serramenti sostituiti tramite 2 cm di polistirene espanso estruso (XPS) • sostituzione degli avvolgibili afferenti ai serramenti sostituiti con nuovi elementi in plastica coibentati, caratterizzati da una media permeabilità all'aria ($\Delta R_w = 0.19$)
<p>L2</p> <p>vetri tripli</p> <p>$U_w \leq 0.8 \text{ W/m}^2\text{K}$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • sostituzione dei serramenti in legno e vetro singolo risalenti all'epoca di costruzione del fabbricato, sia nelle singole unità immobiliari che negli ambienti comuni, con nuovi elementi caratterizzati da una trasmittanza termica $U_w = 0.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ • isolamento termico dei cassonetti afferenti ai serramenti sostituiti tramite 3 cm di polistirene espanso estruso (XPS) • sostituzione degli avvolgibili afferenti ai serramenti sostituiti con nuovi elementi in plastica coibentati, caratterizzati da una bassa permeabilità all'aria ($\Delta R_w = 0.22$)

Tabella 17 - Livelli termici previsti per i serramenti e descrizione degli interventi

PORZIONE DI INVOLUCRO EDILIZIO INTERESSATA DALL'INTERVENTO	
SUPERFICI ORIZZONTALI DI PAVIMENTO	
verso esterno, su rampa di accesso all'autorimessa, e verso locali non riscaldati, ovvero locali magazzino e autorimessa	
LIVELLO TERMICO	DESCRIZIONE INTERVENTO
<p>L1</p> <p>trasmissione termica media delle strutture opache orizzontali di pavimento pari o inferiore al valore limite di legge definito nel DM 26 giugno 2015 – Requisiti Minimi</p> <p>$U_{m,pav} \leq 0.29/b_{tr,u}^{24} \text{ W/m}^2\text{K}$</p>	<ul style="list-style-type: none"> coibentazione a intradosso mediante “cappotto termico” delle superfici opache di pavimento che separano le unità immobiliari dai locali magazzino non riscaldati mediante 3 cm di stiferite CLASS SK ($\lambda_d = 0.027 \text{ W/mK}$) coibentazione a intradosso mediante “cappotto termico” delle superfici opache di pavimento che separano le unità immobiliari dall'autorimessa condominiale non riscaldata mediante 4 cm di stiferite CLASS SK ($\lambda_d = 0.027 \text{ W/mK}$) coibentazione a intradosso mediante “cappotto termico” delle superfici opache di pavimento che separano le unità immobiliari dalla rampa di accesso all'autorimessa condominiale mediante 8 cm di stiferite CLASS SK ($\lambda_d = 0.026 \text{ W/mK}$)
<p>L2</p> <p>trasmissione termica delle strutture opache di pavimento pari o inferiore al valore indicato all'allegato E del Decreto 6 agosto 2020 per l'accesso alle detrazioni fiscali Ecobonus²⁵</p> <p>$U_{pav} \leq 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$</p>	<ul style="list-style-type: none"> coibentazione a intradosso mediante “cappotto termico” delle superfici opache di pavimento che separano le unità immobiliari dai locali magazzino non riscaldati mediante 8 cm di stiferite CLASS SK ($\lambda_d = 0.026 \text{ W/mK}$) coibentazione a intradosso mediante “cappotto termico” delle superfici opache di pavimento che separano le unità immobiliari dall'autorimessa condominiale non riscaldata mediante 5 cm di stiferite CLASS SK ($\lambda_d = 0.026 \text{ W/mK}$) coibentazione a intradosso mediante “cappotto termico” delle superfici opache di pavimento che separano le unità immobiliari dalla rampa di accesso all'autorimessa condominiale mediante 10 cm di stiferite CLASS SK ($\lambda_d = 0.025 \text{ W/mK}$)

Tabella 18 - Livelli termici previsti per le superfici orizzontali di pavimento e descrizione degli interventi

²⁴ Nel caso di strutture che separano un ambiente climatizzato da uno non climatizzato, i valori limite di trasmissione termica devono essere ridotti di un opportuno fattore correttivo $b_{tr,u}$. È questo il caso delle porzioni di pavimento che dividono i locali climatizzati a piano terreno dai locali magazzino e dell'autorimessa condominiale non riscaldati a piano seminterrato, caratterizzati da differenti valori di $b_{tr,u}$.

Nel caso studio in esame, la trasmissione termica limite delle superfici orizzontali di pavimento è quindi il risultato di una media pesata sulle superfici disperdenti delle differenti trasmissioni limite ottenute per le porzioni di pavimento che separano gli ambienti climatizzati dall'esterno e dai locali non climatizzati, caratterizzati da un determinato valore di $b_{tr,u}$.

²⁵ Tale valore limite di trasmissione deve essere rispettato da ogni singolo componente dell'involucro edilizio e non risulta comprensivo dei ponti termici presenti all'interno delle strutture d'interesse.

PORZIONE DI INVOLUCRO EDILIZIO INTERESSATA DALL'INTERVENTO	
SUPERFICI ORIZZONTALI DI COPERTURA	
solaio piano di copertura del basso fabbricato	
LIVELLO TERMICO	DESCRIZIONE INTERVENTO
<p>L1</p> <p>trasmissione termica media delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura pari o inferiore al valore limite di legge definito nel DM 26 giugno 2015 – Requisiti Minimi</p> <p>$U_{m,soff} \leq 0.24 \text{ W/m}^2\text{K}$</p>	<ul style="list-style-type: none"> coibentazione a estradosso mediante “cappotto termico” del solaio piano di copertura del basso fabbricato mediante 8 cm di stiferite CLASS GTE ($\lambda_d = 0.022 \text{ W/mK}$)
<p>L2</p> <p>trasmissione termica delle strutture opache di pavimento pari o inferiore al valore indicato all'allegato E del Decreto 6 agosto 2020 per accesso alle detrazioni fiscali Ecobonus</p> <p>$U_{soff} \leq 0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$</p>	<ul style="list-style-type: none"> coibentazione a estradosso mediante “cappotto termico” del solaio piano di copertura del basso fabbricato mediante 10 cm di stiferite CLASS GTE ($\lambda_d = 0.022 \text{ W/mK}$)

Tabella 19 - Livelli termici previsti per le superfici orizzontali di copertura e descrizione degli interventi

PORZIONI DI INVOLUCRO EDILIZIO INTERESSATA DALL'INTERVENTO	
PARETI VERTICALI	
LIVELLO TERMICO	DESCRIZIONE INTERVENTO
L1 trasmittanza termica media delle strutture opache verticali pari o inferiore al valore limite di legge definito nel DM 26 giugno 2015 – Requisiti Minimi $U_{m,pareti} \leq 0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$	VARIANTE a <ul style="list-style-type: none"> coibentazione esterna a “cappotto termico” delle pareti verticali mediante 14 cm di resina fenolica – ISOLMEC ISOFEN ($\lambda_d = 0.019 \text{ W/mK}$) correzione dei ponti termici dei serramenti (spallete e davanzali) mediante pannelli di coibente additivati con aerogel di spessore pari a 2 cm – AEROPAN AMAGEL A2 ($\lambda_d = 0.015 \text{ W/mK}$)
	VARIANTE b <ul style="list-style-type: none"> coibentazione esterna a “cappotto termico” delle pareti verticali mediante 10 cm di stiferite CLASS SK ($\lambda_d = 0.025 \text{ W/mK}$) insufflaggio dell’intercapedine muraria mediante poliuretano a celle chiuse per spruzzo – VR POLIUREA ESPANSO VR-D030 ($\lambda_d = 0.028 \text{ W/mK}$) correzione dei ponti termici dei serramenti (spallete e davanzali) mediante pannelli di coibente additivati con aerogel di spessore pari a 1 cm – AEROPAN AMAGEL A2 ($\lambda_d = 0.015 \text{ W/mK}$)
L2 spessore massimo indicato da produttore nella scheda tecnica dell’isolante scelto	VARIANTE a <ul style="list-style-type: none"> coibentazione esterna a “cappotto termico” delle pareti verticali mediante 18 cm di resina fenolica – ISOLMEC ISOFEN ($\lambda_d = 0.019 \text{ W/mK}$) correzione dei ponti termici dei serramenti (spallete e davanzali) mediante pannelli di coibente additivati con aerogel di spessore pari a 2 cm – AEROPAN AMAGEL A2 ($\lambda_d = 0.015 \text{ W/mK}$)
	VARIANTE b <ul style="list-style-type: none"> coibentazione esterna a “cappotto termico” delle pareti verticali mediante 20 cm di stiferite class SK ($\lambda_d = 0.024 \text{ W/mK}$) insufflaggio dell’intercapedine muraria mediante poliuretano a celle chiuse per spruzzo – VR POLIUREA ESPANSO VR-D030 ($\lambda_d = 0.028 \text{ W/mK}$) correzione dei ponti termici dei serramenti (spallete e davanzali) mediante pannelli di coibente additivati con aerogel di spessore pari a 1 cm – AEROPAN AMAGEL A2 ($\lambda_d = 0.015 \text{ W/mK}$)

Tabella 20 - Livelli termici previsti per le pareti verticali e descrizione degli interventi

Per quanto riguarda l'intervento di sostituzione dei serramenti originali del fabbricato con nuovi elementi più performanti, la trasmittanza limite U_w relativa al primo livello termico L1 è stata scelta pari a $1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ in modo tale che, oltre a rispettare il limite di legge imposto dal

DM 26 giugno 2015 – Requisiti Minimi per la fascia climatica E d'interesse ($U_w \leq 1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$), consenta anche l'accesso alle detrazioni fiscali Ecobonus.

In merito alla tecnologia costruttiva utilizzata per i nuovi elementi finestrati, è possibile raggiungere i livelli termici L1 e L2 sopra indicati mediante l'impiego di elementi trasparenti basso emissivi di tipo vetrocamera (per il livello L1) o triplo vetro (per il livello L2) con gas nobili in intercapedine, e di telai in PVC o in alluminio a taglio termico o ottenuti mediante una combinazione di tali materiali. La scelta definitiva della tipologia costruttiva dei serramenti da impiegare viene rimandata ad una fase successiva della progettazione.

Sempre in merito alla riqualificazione dell'involucro edilizio trasparente, si mette in evidenza che, in questa fase preliminare di definizione degli interventi di retrofit energetico, non è stata considerata l'installazione di nuove schermature solari fisse o mobili (e.g. tende, frangisole etc.), e il rispetto del valore limite del coefficiente di trasmissione solare $g_{gl,sh}$ pari a 0.35, imposto dal DM 26 giugno 2015 – Requisiti Minimi per gli elementi finestrati installati a SUD, EST, OVEST (e orientamenti intermedi), si è considerato soddisfatto mediante le caratteristiche del solo vetro.

Per quanto riguarda la coibentazione delle superfici orizzontali di pavimento, sono previsti diversi spessori di isolante in base all'ambiente con cui la porzione di pavimento oggetto di intervento confina e alla sua stratigrafia allo stato di fatto (vedi Allegato); gli spessori di materiale coibente sono stati scelti in modo che, per il livello di prestazione energetica L1 venga rispettata la trasmittanza termica U_{media} limite di legge, e per il livello di prestazione energetica L2 vengano rispettati i limiti di trasmittanza indicati nel Decreto Ministeriale 6 agosto 2020, che consentono l'accesso alle detrazioni fiscali Ecobonus.

Le soluzioni progettuali previste per l'isolamento termico delle pareti verticali sono state invece più complesse da definire rispetto a quelle relative alle altre porzioni di involucro edilizio prese in esame, principalmente a causa della morfologia caratteristica dell'edificio oggetto di studio: quest'ultimo, infatti, risulta balconato per l'interno sviluppo delle facciate prospicienti via Vela e l'interno cortile, e presenta una serie di logge in corrispondenza della parete verticale affacciata verso l'edificio adiacente, su via Colli; inoltre, la presenza di più piani arretrati rispetto al corpo fabbrica principale comporta la formazione di una serie di ampi terrazzi in corrispondenza degli alloggi siti al primo, al quinto e al sesto piano.

I balconi, le logge e i terrazzi che si sviluppano lungo la quasi totalità delle facciate relative al condominio in esame costituiscono numerose discontinuità che influiscono negativamente sulla prestazione energetica dell'edificio, contribuendo all'aumento delle dispersioni termiche, e rendono più complessa l'individuazione di soluzioni progettuali di isolamento che consentano il rispetto della trasmittanza termica media limite di legge, pari a $0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$ per le strutture opache verticali. Si ha inoltre che, per evitare di ridurre eccessivamente la superficie calpestabile di balconi, logge e terrazzi, compromettendone di conseguenza l'utilizzo da parte

dei condomini, è necessario che lo spessore di materiale coibente installato non risulti troppo elevato.

A fronte di quanto sopra detto, si è proceduti nella definizione delle diverse soluzioni di isolamento delle pareti verticali come segue.

Inizialmente si è considerato di isolare le pareti unicamente dall'esterno mediante "cappotto termico", utilizzando uno spessore di materiale coibente che consentisse di rispettare la trasmittanza termica media limite di legge prevista dal DM 26 giugno 2015 – Requisiti Minimi (variante a, livello termico L1). Tra i diversi materiali presi in considerazione (lana di roccia, polistirene espanso estruso – XPS -, stiferite etc.), si è scelto di utilizzare la resina fenolica, meno comune a livello commerciale ma caratterizzata da prestazioni termiche molto elevate ($\lambda_d = 0.019 \text{ W/mK}$), che rendono possibile il rispetto della trasmittanza termica media limite mediante l'impiego di uno spessore di materiale coibente non eccessivamente elevato (14 cm). Anche se in fase di progettazione preliminare, è stata prevista la correzione dei ponti termici relativi alle spallette e ai davanzali degli elementi finestrati mediante pannelli di materiale coibente additivato con aerogel, di spessore pari a 2 cm.

Successivamente, con l'obiettivo di minimizzare lo spessore di isolante installato dall'esterno "a cappotto", si è valutata una seconda soluzione per la coibentazione delle pareti verticali (variante b, livello L1), che prevede di sfruttare per l'isolamento termico anche l'intercapedine muraria esistente mediante insufflaggio realizzato tramite poliuretano a spruzzo. In questo modo è stato possibile ridurre da 14 a 10 cm lo spessore di isolante esterno, passando inoltre dall'utilizzo della resina fenolica a quello di un materiale meno costo, più diffuso a livello commerciale e meno sensibile ad umidità e bagnamenti, quale la stiferite ($\lambda_d = 0.025 \text{ W/mK}$). Anche in questa variante progettuale è stata prevista la correzione dei ponti termici relativi alle spallette e ai davanzali degli elementi finestrati mediante pannelli di materiale coibente additivato con aerogel, di spessore pari a 1 cm.

In entrambe le varianti a e b, lo spessore di materiale isolante previsto per il livello termico L1 è tale da consentire già anche il rispetto del requisito di trasmittanza richiesto dal Decreto 6 agosto 2020 per l'accesso all'Ecobonus (questo poiché la trasmittanza termica media limite di legge risulta comprensiva anche dei ponti termici presenti all'interno della porzione di involucro oggetto di intervento e di metà di quelli al confine, al contrario di quella necessaria per accedere agli incentivi fiscali, che si riferisce alle singole strutture di involucro edilizio non comprensive dei ponti termici che le caratterizzano).

A fronte di ciò, per entrambe le varianti a e b si è scelto di definire come secondo livello di prestazione energetica L2 l'utilizzo, per l'isolamento dall'esterno "a cappotto termico" delle pareti verticali, dello spessore massimo di materiale coibente indicato dal produttore nella scheda tecnica dell'isolante scelto (a cui nella variante b si aggiunge, come nel livello termico L1, l'insufflaggio dell'intercapedine muraria esistente con poliuretano a spruzzo). Lo spessore

di isolante previsto risulta pari a 18 cm di resina fenolica nella variante progettuale a, e 20 cm di stiferite nella variante b.

Sulla base dei due livelli termici L1 ed L2 previsti per le diverse porzioni di involucro edilizio e delle quattro macrocategorie di intervento A, B, C e D descritte in Tabella 17, si sono individuate una serie di casistiche d'intervento, illustrate di seguito in Tabella 21, dove è riportato anche il consumo annuo di energia termica per il riscaldamento ottenuto, in [kWh_t/anno], e il risparmio energetico raggiungibile rispetto allo stato di fatto.

Soluzione progettuale	Descrizione	Consumo annuo [kWh _t /anno]	Risparmio %
A1	<ul style="list-style-type: none"> • Macrocategoria A • Livello termico L1 per i serramenti 	321593	17.2%
A2	<ul style="list-style-type: none"> • Macrocategoria A • Livello termico L2 per i serramenti 	299960	22.7%
B1	<ul style="list-style-type: none"> • Macrocategoria B • Livello termico L1 per le superfici orizzontali 	362821	6.5%
B2	<ul style="list-style-type: none"> • Macrocategoria B • Livello termico L2 per le superfici orizzontali 	358132	7.7%
C1 - a	<ul style="list-style-type: none"> • Macrocategoria C • Livello termico L1 per le superfici orizzontali e le pareti verticali (variante a) 	273003	29.7%
C2 - a	<ul style="list-style-type: none"> • Macrocategoria C • Livello termico L2 per le superfici orizzontali • Livello termico L1 per le pareti verticali (variante a) 	268049	30.9%
C3 - a	<ul style="list-style-type: none"> • macrocategoria C • Livello termico L2 per le superfici orizzontali e le pareti verticali (variante a) 	266237	31.4%
D1 - a	<ul style="list-style-type: none"> • macrocategoria D • Livello termico L1 per i serramenti, le superfici orizzontali e le pareti verticali (variante a) 	208560	46.3%
D2 - a	<ul style="list-style-type: none"> • macrocategoria D • Livello termico L1 per i serramenti e le pareti verticali (variante a) • Livello termico L2 per le superfici orizzontali 	202383	47.9%
D3 - a	<ul style="list-style-type: none"> • macrocategoria D • Livello termico L2 per i serramenti, le superfici orizzontali e le pareti verticali (variante a) 	186047	52.1%

C1 - b	<ul style="list-style-type: none"> • macrocategoria C • Livello termico L1 per le superfici orizzontali e le pareti verticali (variante b) 	270520	30.3%
C2 - b	<ul style="list-style-type: none"> • macrocategoria C • Livello termico L2 per le superfici orizzontali • Livello termico L1 per le pareti verticali (variante b) 	265614	31.6%
C3 - b	<ul style="list-style-type: none"> • macrocategoria C • Livello termico L2 per le superfici orizzontali e le pareti verticali (variante b) 	261072	32.7%
D1 - b	<ul style="list-style-type: none"> • macrocategoria D • Livello termico L1 per i serramenti, le superfici orizzontali e le pareti verticali (variante b) 	205700	47%
D2 - b	<ul style="list-style-type: none"> • macrocategoria D • Livello termico L1 per i serramenti • Livello termico L2 per le superfici orizzontali e le pareti verticali (variante b) 	200891	48.3%
D3 - b	<ul style="list-style-type: none"> • macrocategoria D • Livello termico L2 per i serramenti, le superfici orizzontali e le pareti verticali (variante b) 	179310	53.3%

Tabella 21 – casistiche di intervento relative all’involucro edilizio opaco e trasparente e risparmio energetico ottenuto, in termini di riduzione del consumo annuo di energia termica per il riscaldamento

Le soluzioni progettuali riportate in Tabella 21 si sono ottenute, come detto, combinando i livelli termici previsti per le diverse strutture edilizie, descritti in Tabella 18, 19,20 e 21 nelle quattro macrocategorie di intervento A, B, C e D, riportate in Tabella 17: per ognuna di esse si sono individuate due diverse soluzioni progettuali, caratterizzate da due livelli differenti di prestazione energetica dell’involucro edilizio, ottenute combinando tra loro rispettivamente gli interventi di livello termico L1 e L2 relativi alle porzioni di involucro opaco e trasparente coinvolte nel processo di riqualificazione.

Per le macrocategorie di intervento C e D è stata inoltre definita una terza soluzione progettuale, in cui il livello di prestazione energetica dei componenti d’involucro è stato scelto in modo tale da risultare il minimo necessario per consentire l’accesso alle detrazioni fiscali Eco-bonus, ovvero il livello termico L1 per i nuovi serramenti e per l’isolamento delle pareti verticali e il livello termico L2 per l’isolamento delle superfici orizzontali di pavimento e copertura. Si è scelto di prevedere anche questa tipologia di soluzione progettuale in quanto permette al contempo di usufruire degli incentivi fiscali disponibili a livello nazionale, che consentono di ridurre i costi di investimento iniziale dell’intervento, e di conservare i vantaggi tecnici ed economici relativi agli interventi di livello termico L1 per la sostituzione dei serramenti e l’isolamento delle pareti verticali, quali un minor costo del materiale isolante e dei nuovi infissi,

una maggior semplicità di installazione del materiale coibente “a cappotto” e una minor riduzione della superficie utile di balconi, logge e terrazzi di cui si compone il condominio.

Sempre in merito alle macrocategorie di intervento C e D, si sono definite due varianti progettuali a e b che fanno riferimento alle due differenti tipologie di isolamento previste per le pareti verticali, descritte in Tabella 20: la variante a prevede la realizzazione di un isolamento termico solo “a cappotto” esterno, mentre la variante b prevede sia l’isolamento “a cappotto” sia l’insufflaggio dell’intercapedine muraria esistente.

Andando poi ad analizzare il risparmio energetico ottenuto nelle diverse casistiche, è stato possibile effettuare alcune considerazioni: in primo luogo, risulta chiaro come le macrocategorie di intervento C e D consentano di ridurre maggiormente i consumi di energia termica per il riscaldamento invernale rispetto a quelle A e B, rispettivamente di circa il 30% (macrocategoria C) e il 50% (macrocategoria D) rispetto al consumo attuale; ciò è dovuto al fatto che tali categorie coinvolgono sia una elevata percentuale della superficie disperdente complessiva del fabbricato, sia interessano i componenti di involucro edilizio maggiormente responsabili delle dispersioni termiche dell’edificio: le pareti verticali e i serramenti originali del condominio (vedi paragrafo 5.5.3.1.).

I risultati ottenuti per la macrocategoria A confermano, invece, come l’installazione di nuovi elementi finestrati in sostituzione a quelli originali in legno e vetro singolo abbia un peso importante sulla prestazione energetica dell’edificio, comportando una riduzione dei consumi termici del condominio di circa il 20% rispetto alla condizione pre-intervento; ciò è dovuto principalmente al basso livello prestazionale che caratterizza tali componenti edilizi.

Per quanto riguarda la macrocategoria di intervento B, invece, il consumo di energia termica per la climatizzazione invernale risulta ridotto di solo il 7% circa; tale risultato è dovuto principalmente a due fattori: in primo luogo, una buona parte della superficie orizzontale di pavimento oggetto di intervento (pavimento verso locali magazzino e verso autorimessa condominiale) presenta già un isolamento termico preesistente, e di conseguenza una prestazione energetica migliore rispetto alle altre porzioni di involucro edilizio, ed in secondo luogo la maggior parte della superficie di pavimento interessata dall’intervento separa ambienti riscaldati da locali non climatizzati presenti al primo piano interrato, caratterizzati da una temperatura superiore rispetto a quella dell’ambiente esterno, e di conseguenza da dispersioni termiche minori.

Andando poi ad analizzare le prestazioni energetiche ottenute per le diverse soluzioni progettuali previste all’interno di ognuna delle quattro macrocategorie di intervento A, B, C e D, si è evinto come i differenti livelli termici L1 ed L2 non influenzano in maniera rilevante il risparmio energetico ottenibile rispetto allo stato di fatto: ad esempio, per quanto riguarda la macrocategoria A, passando dal livello termico L1 (sostituzione dei serramenti originali con nuovi elementi in vetrocamera) al livello termico L2 (sostituzione dei serramenti originali con nuovi

elementi dotati di triplo vetro) si passa da una riduzione dei consumi termici del 17% ad una del 23%, con una differenza pari solo al 6%.

Lo stesso ragionamento risulta valido per le altre macrocategorie di intervento previste: nella macrocategoria B lo scarto tra il livello termico L1 ed L2 è pari a circa all'1%, mentre per le macrocategorie C e D, in entrambe le varianti a e b, tale differenza risulta pari rispettivamente a circa il 3.5% e il 6%.

A fronte delle considerazioni sopra riportate, ponendosi nell'ottica di un intervento reale che deve essere progettato e successivamente realizzato da uno studio tecnico che presenta risorse economiche e di tempo limitate, si sono selezionate, seguendo un criterio di fattibilità tecnico-economica dell'intervento e di risparmio energetico ottenibile, quattro casistiche di riqualificazione energetica dell'involucro edilizio da combinare successivamente in maniera opportuna con gli interventi relativi agli impianti tecnici e all'utilizzo di fonti rinnovabili, che vengono descritti al capitolo successivo.

6.2 CASISTICHE SELEZIONATE

Per ognuna delle quattro macrocategorie di intervento A,B,C, e D descritte in Tabella 17 si è selezionata una soluzione progettuale, corrispondente ad un determinato livello di prestazione energetica raggiunto dell'involucro edilizio, da combinare poi in maniera opportuna con gli interventi relativi agli impianti tecnici e all'utilizzo di fonti rinnovabili, illustrati in maniera approfondita nel capitolo successivo.

Nella scelta si è tenuto conto di diversi fattori: il costo dei materiali impiegati negli interventi di isolamento delle superfici opache e di sostituzione dei serramenti, la possibilità di accedere agli incentivi fiscali attualmente disponibili a livello nazionale, la semplicità di realizzazione dell'isolamento dall'esterno "a cappotto termico" per le pareti verticali (tanto più semplice quanto minore è lo spessore di materiale isolante installato), la minimizzazione della riduzione della superficie utile di balconi, logge e terrazzi conseguente all'intervento di coibentazione "a cappotto" delle pareti verticali e il risparmio di energia termica ottenibile mediante la casistica di intervento presa in esame.

Tenendo conto di tutti i fattori sopra indicati, si riportano di seguito in Tabella 22 le quattro soluzioni progettuali selezionate, a cui nel seguito della trattazione per semplicità ci riferirà solo come casistiche d'intervento A, B, C e D.

Soluzione progettuale	Descrizione	Consumo annuo [kWh _t /anno]	Risparmio %
A1	<ul style="list-style-type: none"> • Macrocategoria A • Livello termico L1 per i serramenti 	321593	17.2%
B2	<ul style="list-style-type: none"> • Macrocategoria B • Livello termico L2 per le superfici orizzontali 	358132	7.7%
C2 - b	<ul style="list-style-type: none"> • macrocategoria C • Livello termico L2 per le superfici orizzontali • Livello termico L1 per le pareti verticali (variante b) 	265614	31.6%
D2 - b	<ul style="list-style-type: none"> • macrocategoria D • Livello termico L1 per i serramenti • Livello termico L2 per le superfici orizzontali e le pareti verticali (variante b) 	200891	48.3%

Tabella 22 - Soluzioni progettuali relative all'involucro edilizio opaco e trasparente selezionate

7 INTERVENTI DI RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA RELATIVI AGLI IMPIANTI TECNICI E ALL'UTILIZZO DI FONTI RINNOVABILI

Nel presente capitolo vengono illustrate le diverse soluzioni progettuali relative alla riqualificazione degli impianti tecnici a servizio dell'edificio e all'installazione di sistemi a fonte rinnovabile. Si sono definite ed analizzate sei diverse alternative progettuali, che si differenziano per quanto riguarda i sistemi tecnici coinvolti, il grado di invasività degli interventi previsti e il costo di investimento che ne consegue.

Le prime due soluzioni progettuali, che riguardano unicamente i sistemi autonomi di produzione di acqua calda sanitaria e di raffrescamento presenti all'interno dei singoli alloggi, sono poco invasive per l'utenza e meno costose rispetto alle altre quattro, che risultano, invece, molto più complesse da un punto di vista realizzativo e prevedono interventi sempre più invasivi per le unità immobiliari coinvolte; al contempo, però, queste ultime risultano più complete rispetto alle prime due casistiche, consentendo presumibilmente di raggiungere prestazioni energetiche dell'edificio migliori.

Si riassumono di seguito in Tabella 23 le sei soluzioni progettuali previste, ordinate per grado di invasività e complessità di realizzazione crescenti; queste ultime vengono poi descritte in maniera approfondita nei paragrafi successivi.

SOLUZIONE PROGETTUALE	INTERVENTI PREVISTI
SOLUZIONE 1	<ul style="list-style-type: none"> • sostituzione, nelle singole unità immobiliari, dei sistemi autonomi di produzione di acqua calda sanitaria attualmente presenti con scaldacqua in pompa di calore
SOLUZIONE 2	<ul style="list-style-type: none"> • interventi previsti nella soluzione 1 • installazione di sistemi di raffrescamento autonomi ad espansione diretta (mono o multisplit) per il comfort estivo nelle unità immobiliari in cui non sono già presenti
SOLUZIONE 3	<ul style="list-style-type: none"> • interventi previsti nella soluzione 2 • riqualificazione dell'impianto termico centralizzato per la climatizzazione invernale e dei suoi sottosistemi: <ul style="list-style-type: none"> ○ installazione, nelle singole unità immobiliari, di un nuovo sistema emissivo radiante a soffitto e realizzazione, in alcuni alloggi a piano terreno, al quarto e al quinto piano, di un opportuno isolamento termico lato interno delle porzioni di solaio che si affacciano verso le terrazze site al piano superiore (verso l'ambiente esterno) ○ installazione, nelle singole unità immobiliari, di sistemi di termoregolazione e contabilizzazione diretta del calore

	<ul style="list-style-type: none"> ○ realizzazione di nuove linee di distribuzione del fluido termovettore alle unità immobiliari ○ installazione di una nuova pompa di calore centralizzata per la climatizzazione invernale ad integrazione dello scambiatore di teleriscaldamento attualmente presente (funzionamento alternato dei due sistemi di generazione del calore, considerando in fase preliminare una temperatura di cut-off della pompa di calore pari a 0 °C)
SOLUZIONE 4	<ul style="list-style-type: none"> ● interventi previsti nella soluzione 3 ● installazione di un impianto fotovoltaico in copertura per l'alimentazione dei servizi energetici comuni
SOLUZIONE 5	<ul style="list-style-type: none"> ● interventi previsti nella soluzione 4 ● realizzazione di un impianto di produzione di acqua calda sanitaria centralizzato: <ul style="list-style-type: none"> ○ realizzazione di nuove linee di distribuzione dell'acqua calda sanitaria alle unità immobiliari e di una rete di ricircolo ○ installazione, nelle singole unità immobiliari, di sistemi di contabilizzazione dei consumi di ACS ○ produzione centralizzata di acqua calda sanitaria sia tramite lo scambiatore di teleriscaldamento attualmente presente in centrale termica, sia attraverso la nuova pompa di calore, utilizzata anche per il riscaldamento invernale, di cui alla soluzione 3
SOLUZIONE 6	<ul style="list-style-type: none"> ● interventi previsti nella soluzione 5 ● realizzazione di un impianto di raffrescamento estivo centralizzato: <ul style="list-style-type: none"> ○ terminali emissivi consistenti nei nuovi pannelli radianti a controsoffitto installati nelle singole unità immobiliari e utilizzati anche per il riscaldamento invernale, di cui alla soluzione 3 ○ installazione, nelle singole unità immobiliari, di opportuni sistemi di deumidificazione dell'aria ambiente ○ distribuzione del fluido termovettore attraverso le nuove linee di distribuzione, utilizzate anche per la climatizzazione invernale, di cui alla soluzione 3 ○ produzione dell'acqua refrigerata tramite la nuova pompa di calore centralizzata, utilizzata anche per il riscaldamento invernale e la produzione di acqua calda sanitaria, di cui alla soluzione 3 ● installazione, nelle singole unità immobiliari, di sistemi di ventilazione meccanica controllata con recupero del calore

Tabella 23 – Soluzioni progettuali relative alla riqualificazione degli impianti tecnici e all'installazione di sistemi a fonte rinnovabile

7.1 SOLUZIONE 1

La prima soluzione progettuale consiste nella sostituzione, a livello di singole unità immobiliari, dei sistemi autonomi di produzione di acqua calda sanitaria attualmente installati (in parte caldaie a gas metano ed in parte bollitori elettrici ad accumulo) con scaldacqua in pompa di calore, che sfruttano l'energia termica dell'aria esterna per riscaldare l'acqua sanitaria ad una temperatura tipicamente di 55 – 60 °C, e successivamente la stoccano in un opportuno serbatoio di accumulo, in modo tale che risulti sempre disponibile. L'installazione di tali sistemi consente di ottenere un risparmio energetico e una riduzione delle emissioni nocive, mantenendo al contempo autonoma la produzione di acqua sanitaria nelle varie unità immobiliari.

Si riportano di seguito in Figura 38, a titolo di esempio, le immagini di due scaldacqua in pompa di calore, che, a seconda della dimensione dell'accumulo che li caratterizza, possono essere installati a parete (sinistra) o a basamento (destra).



Figura 38 - Esempi di scaldacqua in pompa di calore a parete (sinistra) o a basamento (destra) – FONTE: Vaillant

L'intervento non prevede la sostituzione dei sistemi di produzione di ACS attualmente presenti nei sei loft (U.I. T4-T9) e nello studio dentistico (U.I. T10) a piano terreno (boiler elettrici ad accumulo), che sono stati installati nuovi nell'anno 2021. Allo stesso modo, nel locale commerciale a piano terra (U.I. T1), considerato un negozio di vendita al dettaglio senza obbligo di servizi igienici, come illustrato al paragrafo 5.5.3.2., non è prevista l'installazione di alcun sistema di produzione di acqua calda sanitaria.

Per valutare il risparmio energetico ottenibile attraverso l'intervento sopra descritto, in questa fase di progettazione preliminare si è ipotizzato di installare nelle varie unità immobiliari gli scaldacqua in pompa di calore Vaillant, modello aroSTOR VWL B 200/5 o 270/5, le cui caratteristiche prestazionali (COP, potenza utile etc.), utilizzate all'interno dei modelli energetici dell'edificio post-intervento, si sono ricavate dalle schede tecniche messe a disposizione in rete dal produttore. Negli alloggi di dimensioni più ridotte, in cui si ipotizza la presenza di un

solo servizio igienico (U.I. T2, T3, P21, P61), si è scelto di installare il modello aroSTOR VWL B 200/5, considerando sufficiente un accumulo di acqua pari a 200 l, mentre nelle altre unità immobiliari, caratterizzate da una maggiore superficie utile e in cui si ipotizza la presenza di due servizi igienici, si è prevista l'installazione del modello aroSOTR VWL B 270/5, dotato di un accumulo di dimensioni maggiori (270 l). Entrambi i modelli sono dotati di una resistenza elettrica integrativa.

Si riportano di seguito i dati prestazionali (COP e potenza utile) a pieno carico degli scaldacqua in pompa di calore, secondo norma UNI/TS 11300, resi disponibili in rete dal produttore e utilizzati all'interno dei modelli energetici post-intervento del condominio.

aroSTOR VWL B 200/5			aroSTOR VWL B 270/5		
55°C**			55°C**		
	POTENZA [kW]	COP		POTENZA [kW]	COP
7 °C	2,2	3,2	7 °C	2,2	3,2
15 °C	2,5	3,6	15 °C	2,5	3,5
20 °C	2,7	3,8	20 °C	2,7	3,8
35 °C	2,9	4,1	35 °C	2,9	4,1

** Temperatura iniziale acqua fredda di 10°C. Temperatura di mandata 55°C (EN16147:2017/ciclo di prelievo L)

Figura 39 - Dati prestazionali degli scaldacqua in pompa di calore Vaillant aroSTOR VWL B 200/5 e 270/5

Si sottolinea che la marca e il modello degli scaldacqua scelti in questa fase preliminare di progettazione non risultano definitivi, e possano essere oggetto di modifica nelle fasi progettuali successive.

7.2 SOLUZIONE 2

La seconda soluzione progettuale prevede, oltre all'installazione nei singoli alloggi di scaldacqua in pompa di calore, l'introduzione di impianti autonomi di raffrescamento ad espansione diretta mono o multisplit, nelle unità immobiliari in cui non sono attualmente presenti. Tali sistemi di raffreddamento consistono in pompe di calore aria-aria costituite da un'unità esterna, installabile sui balconi afferenti agli alloggi interessati dall'intervento, e uno o più terminali interni ad espansione diretta, quali ventilconvettori a parete, in numero differente a seconda della dimensione dell'unità immobiliare da climatizzare.



*Figura 40 - Esempio di unità esterna (sinistra) e interna (destra) di un sistema di raffrescamento a espansione diretta –
FONTE: Mitsubishi*

Tale intervento è previsto per garantire una condizione di comfort termo-igrometrico durante il periodo estivo in tutte le unità immobiliari di cui si compone il condominio: è chiaro, infatti, come l'installazione di nuovi sistemi di climatizzazione estiva dove non presenti, anche se caratterizzati da un'alta efficienza, non può comportare un risparmio energetico rispetto allo stato di fatto.

Per poter dimensionare i sistemi autonomi di raffrescamento, è stato prima necessario determinare il carico termico estivo di progetto delle unità immobiliari interessate dall'intervento. Questo è stato valutato tramite il modulo EC706 di EDILCLIMA Programmi, che utilizza il metodo di calcolo Carrier-Pizzetti. Tale metodologia ipotizza condizioni al contorno stazionarie di temperatura e umidità dell'ambiente interno ed esterno, e, tramite l'utilizzo di opportuni fattori di accumulo $f_{a,i}$ e differenze di temperatura equivalenti ΔT_{equiv} , tiene conto della variabilità degli apporti termici nel corso della giornata, e dei conseguenti fenomeni di attenuazione e sfasamento del carico di raffreddamento effettivo rispetto all'apporto di calore istantaneo. Nel caso in esame, le condizioni di progetto estive considerate sono le seguenti:

- ambiente interno: $T_{int} = 26 \text{ }^\circ\text{C}$, $UR_{int} = 50\%$
- ambiente esterno: $T_{est} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $UR_{est} = 50\%$

Nel metodo Carrier-Pizzetti, il carico termico estivo dell'edificio, o di una sua zona termica, viene valutato in più ore della giornata (arco temporale 8:00 - 18:00), e quello massimo, ottenuto un una determinata ora del giorno, risulta il carico frigorifero di progetto; quest'ultimo è la somma di diversi contributi sensibili e latenti, quali:

- il carico di radiazione solare attraverso le superfici opache e trasparenti dell'involucro edilizio
- il carico di trasmissione attraverso le superfici opache e trasparenti dell'involucro edilizio
- il carico di ventilazione (sensibile e latente)
- i carichi endogeni dovuti a presone, illuminazione ed apparecchiature elettriche (sensibili e latenti).

Nel caso studio in esame, il carico frigorifero di progetto è stato valutato per gli alloggi interessati dall'intervento in tutte e quattro le casistiche di isolamento dell'involucro riportate al paragrafo 6.2.

Una volta determinato il carico termico estivo nei diversi alloggi, è stato possibile definire in maniera opportuna le taglie delle unità esterne dei sistemi di raffrescamento ad espansione diretta da installarvi. In questa fase di progettazione preliminare, si è ipotizzato di installare le unità esterne MITSUBISHI, serie MUZ-AP (unità monosplit, da installarsi negli alloggi a piano terreno di dimensioni ridotte) e MXZ (unità multisplit, da installarsi negli altri alloggi), di taglie differenti a seconda della potenza frigorifera richiesta dall'unità immobiliare in esame. I dati prestazionali delle macchine (potenza frigorifera nominale, EER etc.) si sono ottenuti a partire dalle schede tecniche messe a disposizione in rete dal produttore.

Si riportano di seguito in Tabella 24, 25, 26 e 27, per le quattro casistiche di isolamento dell'involucro edilizio sopra citate, i carichi termici di progetto estivo degli alloggi interessati dall'intervento, le taglie delle unità esterne di raffrescamento installate e i loro dati prestazionali (potenza frigorifera nominale, EER), che verranno utilizzati all'interno dei modelli energetici post-intervento dell'edificio.

Si mette in evidenza come la marca e il modello delle unità di raffrescamento scelte in questa fase preliminare non risultano definitivi, e possano essere oggetto di modifica nelle fasi progettuali successive.

SOLUZIONE PROGETTUALE A RELATIVA ALL'INVOLUCRO EDILIZIO				
U.I.	Carico frigorifero di progetto [kW]	Modello unità esterna installata	Potenza frigorifera nominale [kW]	EER
T1	6.8	MUZ-AP71VG	7.1	3.53
T3	2.0	MUZ-AP25VG	2.5	4.17
T4	2.4	MUZ-AP25VG	2.5	4.17
T5	2.0	MUZ-AP25VG	2.5	4.17
T6	3.1	MUZ-AP35VG	3.5	3.54
T7	1.5	MUZ-AP20VG	2	4.17
T8	1.4	MUZ-AP20VG	2	4.17
P13	6.8	MXZ-4F72VF4	7.2	3.89
P21	2.8	MXZ-2F33VF4	3.3	3.88
P22	4.6	MXZ-3F54VF4	5.4	4.09
P23	7.3	MXZ-4F72VF4	7.2	3.89
P24	4.7	MXZ-3F54VF4	5.4	4.09
P32	7.7	MXZ-4F80VF4	8	3.56
P33	4.7	MXZ-3F54VF4	5.4	4.09
P43	5.2	MXZ-3F54VF4	5.4	4.09
P52	9.2	MXZ-5F102VF2	10.2	3.64
P62	11.5	MXZ-6F120VF2	12	3.33

Tabella 24 - Sistemi di raffrescamento ad espansione diretta installati nelle diverse unità immobiliari - soluzione progettuale A relativa all'involucro edilizio

SOLUZIONE PROGETTUALE B RELATIVA ALL'INVOLUCRO EDILIZIO				
U.I.	Carico frigorifero di progetto [kW]	Modello unità esterna installata	Potenza frigorifera nominale [kW]	EER
T1	7.3	MUZ-AP71VG	7.1	3.53
T3	2.5	MUZ-AP25VG	2.5	4.17
T4	2.4	MUZ-AP25VG	2.5	4.17
T5	2.0	MUZ-AP25VG	2.5	4.17
T6	3.1	MUZ-AP35VG	3.5	3.54
T7	1.5	MUZ-AP20VG	2	4.17
T8	1.4	MUZ-AP20VG	2	4.17
P13	8.2	MXZ-4F80VF4	8	3.56
P21	3.2	MXZ-2F33VF4	3.3	3.88
P22	5.4	MXZ-3F54VF4	5.4	4.09
P23	8.7	MXZ-4F102VF4	10.2	3.64
P24	4.7	MXZ-3F54VF4	5.4	4.09
P32	9.3	MXZ-4F102VF4	10.2	3.64
P33	5.6	MXZ-3F54VF4	5.4	4.09
P43	6.2	MXZ-3F68VF4	6.8	3.7
P52	11.4	MXZ-5F120VF2	12	3.33
P62	11.5	MXZ-6F120VF2	12	3.33

Tabella 25 - Sistemi di raffrescamento ad espansione diretta installati nelle diverse unità immobiliari - soluzione progettuale B relativa all'involucro edilizio

SOLUZIONE PROGETTUALE C RELATIVA ALL'INVOLUCRO EDILIZIO				
U.I.	Carico frigorifero di progetto [kW]	Modello unità esterna installata	Potenza frigorifera nominale [kW]	EER
T1	7.1	MUZ-AP71VG	7.1	3.53
T3	2.5	MUZ-AP25VG	2.5	4.17
T4	2.4	MUZ-AP25VG	2.5	4.17
T5	2.0	MUZ-AP25VG	2.5	4.17
T6	3.1	MUZ-AP35VG	3.5	3.54
T7	1.5	MUZ-AP20VG	2	4.17
T8	1.4	MUZ-AP20VG	2	4.17
P13	7.7	MXZ-4F80VF4	7.2	3.56
P21	3.0	MXZ-2F33VF4	3.3	3.88
P22	5.2	MXZ-3F54VF4	5.4	4.09
P23	8.3	MXZ-4F80VF4	8	3.56
P24	4.4	MXZ-3F54VF4	5.4	4.09
P32	8.9	MXZ-4F102VF4	10.2	3.64
P33	5.3	MXZ-3F54VF4	5.4	4.09
P43	5.8	MXZ-3F54VF4	5.4	4.09
P52	10.9	MXZ-5F120VF2	12	3.33
P62	10.5	MXZ-6F120VF2	12	3.33

Tabella 26 - Sistemi di raffrescamento ad espansione diretta installati nelle diverse unità immobiliari - soluzione progettuale C relativa all'involucro edilizio

SOLUZIONE PROGETTUALE D RELATIVA ALL'INVOLUCRO EDILIZIO				
U.I.	Carico frigorifero di progetto [kW]	Modello unità esterna installata	Potenza frigorifera nominale [kW]	EER
T1	6.7	MUZ-AP71VG	7.1	3.53
T3	2.0	MUZ-AP25VG	2.5	4.17
T4	2.4	MUZ-AP25VG	2.5	4.17
T5	2.0	MUZ-AP25VG	2.5	4.17
T6	3.1	MUZ-AP35VG	3.5	3.54
T7	1.5	MUZ-AP20VG	2	4.17
T8	1.4	MUZ-AP20VG	2	4.17
P13	6.5	MXZ-4F68VF4	6.8	3.7
P21	2.6	MXZ-2F33VF4	3.3	3.88
P22	4.4	MXZ-3F54VF4	5.4	4.09
P23	6.9	MXZ-4F72VF4	7.2	3.89
P24	4.4	MXZ-3F54VF4	5.4	4.09
P32	7.4	MXZ-4F80VF4	8	3.56
P33	4.4	MXZ-3F54VF4	5.4	4.09
P43	5.0	MXZ-3F54VF4	5.4	4.09
P52	8.8	MXZ-5F102VF2	10.2	3.64
P62	10.5	MXZ-6F120VF2	12	3.33

Tabella 27 - Sistemi di raffrescamento ad espansione diretta installati nelle diverse unità immobiliari - soluzione progettuale D relativa all'involucro edilizio

7.3 SOLUZIONE 3

La terza soluzione progettuale analizzata risulta più costosa e complessa da un punto di vista realizzativo rispetto alle prime due sopra descritte, in quanto, oltre a coinvolgere i sistemi autonomi di produzione di acqua calda sanitaria e di raffrescamento relativi ai singoli alloggi, prevede una serie di interventi che interessano i sottosistemi di generazione, distribuzione, regolazione ed erogazione del calore dell'impianto centralizzato di climatizzazione invernale, che risultano invasivi sul sistema edificio-impianto sia per le parti comuni che per quelle private.

A livello di singole unità immobiliari, viene previsto il totale rifacimento dei sistemi emissivi attualmente presenti, tranne che nello studio dentistico a piano terreno (U.I. T10), e l'installazione di un nuovo sistema di erogazione del calore a pannelli radianti a soffitto. Tale intervento è previsto sia per gli alloggi in cui sono presenti le serpentine radianti a soffitto originarie del fabbricato, che, come illustrato al paragrafo 5.4.1., presentano diverse criticità che le rendono terminali emissivi ormai obsoleti, sia nei sei loft a piano terreno, dove è stato introdotto nel 2021 un nuovo sistema di erogazione del calore a radiatori.

La sostituzione del sistema emissivo a radiatori, nonostante risulti di recente installazione, è prevista nell'ottica di un intervento globale sull'impianto di riscaldamento dell'edificio, che include l'installazione di una pompa di calore centralizzata, ovvero un sistema di generazione tanto più efficiente quanto più basse sono le temperature dell'acqua a cui opera. L'accoppiamento di una pompa di calore con radiatori tradizionali piuttosto che con sistemi emissivi radianti a soffitto o pavimento richiederebbe un funzionamento del sistema di riscaldamento a temperature molto più elevate, riducendone di conseguenza l'efficienza complessiva in maniera non trascurabile. Per lo stesso motivo si è scelto invece di non sostituire i pannelli radianti a pavimento presenti nello studio dentistico a piano terreno (U.I. T10), che, oltre ad essere di recente installazione (anno 2021), sono terminali a bassa temperatura che ben si accoppiano con una pompa di calore.

La scelta di sostituire i sistemi emissivi attualmente presenti con pannelli radianti a soffitto invece che a pavimento è dovuta a svariati fattori: innanzitutto, i sistemi radianti a soffitto, trasmettendo il calore per irraggiamento verso il basso in ambiente, consentono di ottenere una distribuzione più uniforme del calore all'interno dei locali, riducendo anche le perdite dovute alla stratificazione dell'aria che si verificano nel caso di utilizzo di pannelli a pavimento. Inoltre, i pannelli a soffitto, a differenza di quelli a pavimento, sono terminali emissivi a bassa inerzia termica, in grado quindi di rispondere rapidamente alle variazioni di carico nel locale in cui sono installati e di consentire un controllo più preciso della temperatura ambiente.

Infine, installare pannelli radianti a soffitto in un edificio esistente soggetto a riqualificazione energetica come quello analizzato, risulta meno complesso e invasivo per l'utenza, non richiedendo modifiche strutturali significative, come la rimozione o la sostituzione del pavimento esistente, il suo innalzamento per l'installazione delle serpentine radianti o la posa in opera di

massetti aggiuntivi. L'introduzione dei pannelli a soffitto comporta una riduzione dell'altezza netta dei locali in cui vengono installati, che in fase preliminare è stata prevista pari a 30 cm²⁶.

I nuovi pannelli radianti a soffitto sono composti da una struttura portante in cartongesso, entro cui sono integrate le tubazioni per il passaggio del fluido termovettore, che viene preaccoppiata a una lastra di materiale coibente di spessore opportuno (e.g. EPS), che ha lo scopo di evitare che il calore generato dal pannello radiante venga disperso attraverso il soffitto nell'ambiente superiore, in modo tale così da permettere il disaccoppiamento termico dei diversi alloggi²⁷.

E' importante mettere in evidenza come, negli alloggi siti al piano terreno, al quarto e al quinto piano, in corrispondenza delle porzioni di soffitto che si affacciano verso l'ambiente esterno, ovvero che separano gli ambienti climatizzati dalle terrazze afferenti ai piani arretrati superiori (U.I. T1, T4, T5, T6, P42, P43, P51, P52, P53), è stato necessario prevedere un opportuno isolamento termico a intradosso del solaio, consistente in 10 cm di stiferite GTE.

A titolo esemplificativo, si riporta di seguito in Figura 41 l'immagine di un pannello radiante a soffitto in cartongesso installato all'interno di un locale.



Figura 41 – Esempio di pannello radiante installato a soffitto all'interno di un locale – FONTE: Eurothem

A livello di progettazione preliminare, si è considerata l'installazione dei pannelli radianti a soffitto marca Eurothem, modello Leonardo 10, 5.5 e 3.5 alta resa a seconda dell'unità immobiliare considerata, scelti in modo tale da fornire la potenza termica necessaria per far fronte al carico di progetto invernale dei diversi alloggi, calcolato secondo UNI 12831 tramite il software EC700 di EDILCLIMA Programmi. In condizione di progetto invernale è prevista una temperatura di mandata dell'acqua ai pannelli pari a 40 °C, con un ΔT di 5 °C mandata - ritorno.

²⁶ In questo modo è possibile sia rispettare l'altezza minima dei locali di abitazione prevista dal comma 1 e 2 del DM 5/7/75, pari a 2.70 m, sia avere a disposizione un controsoffitto di dimensioni adeguate per il passaggio di eventuali impianti elettrici, di ventilazione meccanica etc.

²⁷ Tale disaccoppiamento termico consente la possibilità di realizzare una contabilizzazione dei consumi a livello di singola unità immobiliare.

A livello di singola unità immobiliare, i circuiti radianti installati nei diversi locali sono collegati tramite opportune linee di adduzione, tipicamente in multistrato, a dei collettori di distribuzione di zona (immagine esemplificativa in Figura 42), che ricevono il fluido termovettore (acqua calda) dalla centrale termica tramite opportuni stacchi dalle colonne montanti di distribuzione.

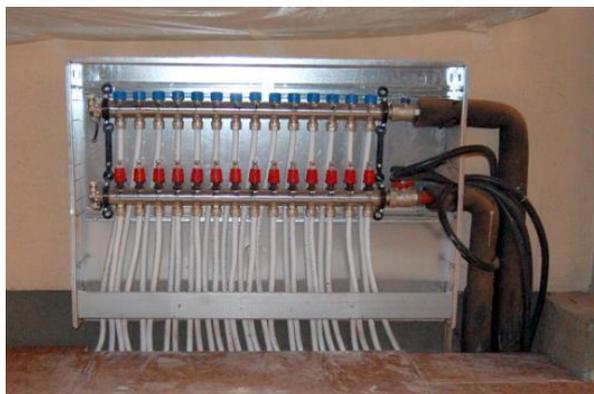


Figura 42 - Esempio di collettore di distribuzione di zona - FONTE: Floortech

In concomitanza con l'intervento di sostituzione dei terminali emissivi, è stata prevista l'installazione di un sistema di termoregolazione e contabilizzazione diretta dei consumi a livello di singola unità immobiliare, attualmente non presente nel condominio oggetto di analisi a causa delle caratteristiche del sistema emissivo a serpentine radianti originario del fabbricato, come già illustrato al paragrafo 5.4.1.

In particolare, il controllo della temperatura ambiente nei singoli locali afferenti ai diversi alloggi si prevede essere realizzato mediante un sistema di regolazione PID (Proporzionale, Integrativo, Derivativo), il quale, sulla base dei segnali di temperatura ricevuti dai sensori posti in ambiente, gestisce l'apertura e la chiusura dei circuiti radianti agendo sulle testine elettrotermiche poste sui nuovi collettori di distribuzione.

Nell'ottica di un intervento di riqualificazione energetica globale dell'edificio, si prevede anche il totale rifacimento della rete di distribuzione del fluido termovettore che collega il sistema di generazione del calore ai terminali emissivi installati nei singoli alloggi, a meno della linea dedicata all'alimentazione dei pannelli radianti a pavimento presenti nello studio dentistico, realizzata nel 2021.

A livello preliminare, si ipotizza la realizzazione di una rete di distribuzione orizzontale a zone, in cui alle colonne montanti di mandata e di ritorno, opportunamente coibentate e site nei due vani scala presenti all'interno dell'edificio, si collegano tramite opportuni stacchi i nuovi collettori di distribuzione posti all'interno delle varie unità immobiliari. In questo modo è possibile gestire in maniera diversificata e autonoma il riscaldamento dei singoli alloggi, a cui viene dedicata una porzione autonoma del sistema di distribuzione. Il dimensionamento della nuova rete si rimanda ad una fase progettuale successiva.

Con l'obiettivo di ottimizzare l'efficienza energetica complessiva dell'impianto di riscaldamento centralizzato, si prevede a livello di generazione l'installazione di una nuova pompa di calore aria – acqua ad integrazione dello scambiatore di teleriscaldamento attualmente presente in centrale termica, la quale, accoppiata con i nuovi pannelli radianti a soffitto da installarsi nelle diverse unità immobiliari e coi pannelli radianti a pavimento presenti nello studio dentistico, può operare in condizioni ottimali di temperatura. Tenendo conto sia dello spazio disponibile in centrale termica, sia dei problemi di rumorosità che potrebbero essere causati dalla pompa di calore, si è ipotizzato di installare tale macchina su uno dei due torrini ascensori presenti nell'edificio. Si riporta di seguito in Figura 43 lo schema di funzionamento di massima dell'impianto di climatizzazione invernale riqualificato.

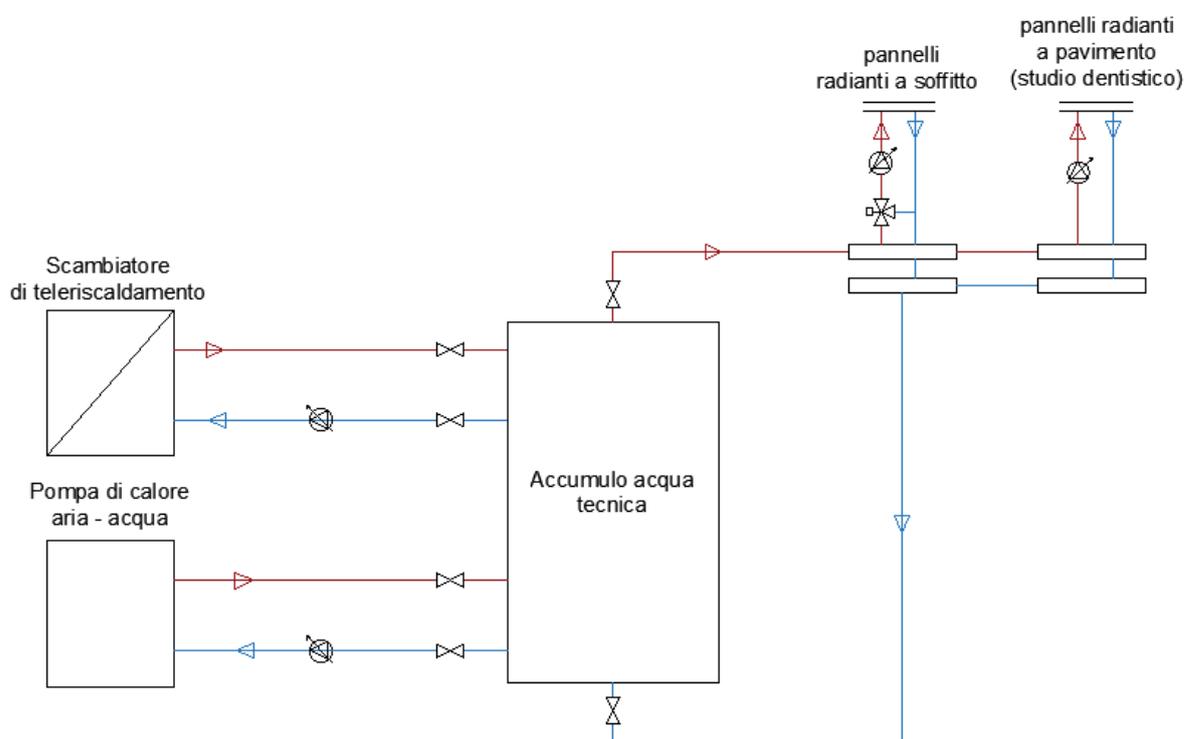


Figura 43 - Schema preliminare di funzionamento dell'impianto termico condominiale

Pompa di calore e scambiatore di teleriscaldamento, collegati idraulicamente ad uno stesso accumulatore di acqua tecnica²⁸ installato in centrale termica, andranno ad operare con una logica di funzionamento alternata: fino a un determinato valore di temperatura esterna, detto di cut-off e scelto in modo tale consentire un funzionamento efficiente della pompa, la generazione termica verrà realizzata unicamente mediante la pompa di calore di nuova installazione, mentre al di sotto di tale valore di temperatura la generazione termica passerà automaticamente allo scambiatore di teleriscaldamento esistente, che fungerà quindi da fonte di riscaldamento supplementare.

²⁸ A livello di progettazione preliminare si è considerato un accumulatore di volume pari 2000 l, considerando 7 l di accumulatore al kW termico installato, secondo quanto indicato nei quaderni Caleffi.

In questa fase di progettazione preliminare si è scelto di impostare un valore di temperatura di cut-off della pompa pari 0 °C, che consente sia di far funzionare la macchina a valori elevati di COP, sia di limitarne i cicli di sbrinamento, che, sul lungo termine, ne possono danneggiare i componenti, richiedendo la necessità di interventi di manutenzione straordinaria e riducendone la vita utile.

Il valore finale di temperatura di cut-off verrà definito nelle fasi progettuali successive, in funzione dell'efficienza della pompa di calore effettivamente installata nell'edificio e dei costi di energia elettrica e di teleriscaldamento.

In fase di progettazione preliminare, si è considerata l'installazione della pompa di calore Viessmann, modello Energycal AW PRO MT 220.2²⁹, di taglia scelta in funzione del carico di progetto invernale dell'edificio, calcolato secondo UNI 12831 tramite il software EC700 di EDIL-CLIMA Programmi. I dati prestazionali della macchina (COP, potenza utile etc.), anche ai carichi parziali, si sono ottenuti a partire dall'archivio interno di EC700.

Si riporta di seguito per completezza la scheda tecnica della pompa di calore sopra citata, dove si evidenzia mediante rettangolo rosso la taglia scelta della macchina.

Energycal AW PRO MT		180.2	200.2	210.2	220.2	235.2	250.2
Riscaldamento (A7/W35) - EN 14511	Potenza termica kW	181,5	203,6	213,5	223,4	237,4	251,2
	COP	4,1	4,2	4,1	4,1	4,1	4,2
Riscaldamento (A7/W45) - EN 14511	Potenza termica kW	176,2	197,6	207,4	217,1	230,4	243,6
	COP	3,3	3,4	3,4	3,4	3,3	3,4
	Portata acqua l/h	30.046	33.730	35.409	37.089	39.364	41.639
Raffreddamento (A35/W18) - EN 14511	Potenza Frigo kW	200,0	227,0	237,0	247,0	263,0	280,0
	EER	3,57	3,64	3,63	3,59	3,58	3,67
Raffreddamento (A35/W7) - EN 14511	Potenza Frigo kW	153,6	173,0	181,0	189,0	201,3	213,7
	EER/ ESEER	2,89 / 3,84	2,94 / 3,91	2,92 / 3,89	2,90 / 3,86	2,90 / 3,85	2,95 / 3,93
Limiti operativi	Limiti	-20 ÷ 40 °C					
	T max mandata	Max 62 °C con Te ≥ +2					
Assorbimento elettrico solo pompa di calore	Pot. Max assorbita kW	75,8	82,8	87,8	92,8	99,4	104,4
	Cor. Max assorbita A	130,7	143,7	153,7	163,7	172,6	177,6
Dimensioni e Pesì	Lunghezza mm	4608				5708	
	Profondità mm	1208					
	Altezza mm	1912					
	Peso in funzione Kg	1597	1613	1624	1664	1835	1886

Figura 44 - Scheda tecnica pompa di calore Viessmann Energycal AW PRO MT 220.2

²⁹Tale pompa di calore aria – acqua può essere utilizzata non solo per il riscaldamento, ma anche per il raffrescamento e la produzione da acqua calda sanitaria. Si è scelto tale modello considerando anche le soluzioni progettuali 5 e 6, che includono la realizzazione di un impianto centralizzato di raffreddamento e di produzione di ACS.

7.4 SOLUZIONE 4

La quarta soluzione progettuale prevede, oltre agli interventi descritti al paragrafo precedente, anche l'installazione in copertura di un impianto fotovoltaico a servizio di quello centralizzato di riscaldamento: l'energia elettrica prodotta da quest'ultimo viene infatti utilizzata durante la stagione invernale per alimentare la pompa di calore aria – acqua di nuova installazione e gli ausiliari elettrici di centrale.

L'impianto a fonte rinnovabile, caratterizzato da una superficie captante pari a 44 m^2 e da una potenza di picco di 9.66 kW_p , è costituito da 23 pannelli in silicio monocristallino, installati con un'inclinazione di 25° sulla falda Sud – Ovest del tetto, ovvero quella prospiciente Via Vela (angolo di Azimut pari a 27°), che risulta l'unica porzione di copertura idonea per orientamento all'installazione dei pannelli. Si riporta di seguito in Figura 45 una rappresentazione grafica preliminare della distribuzione dei pannelli fotovoltaici in copertura, scelta tenendo anche conto degli ombreggiamenti generati nell'arco della giornata dai torrini ascensori e dagli abbaini presenti in copertura.

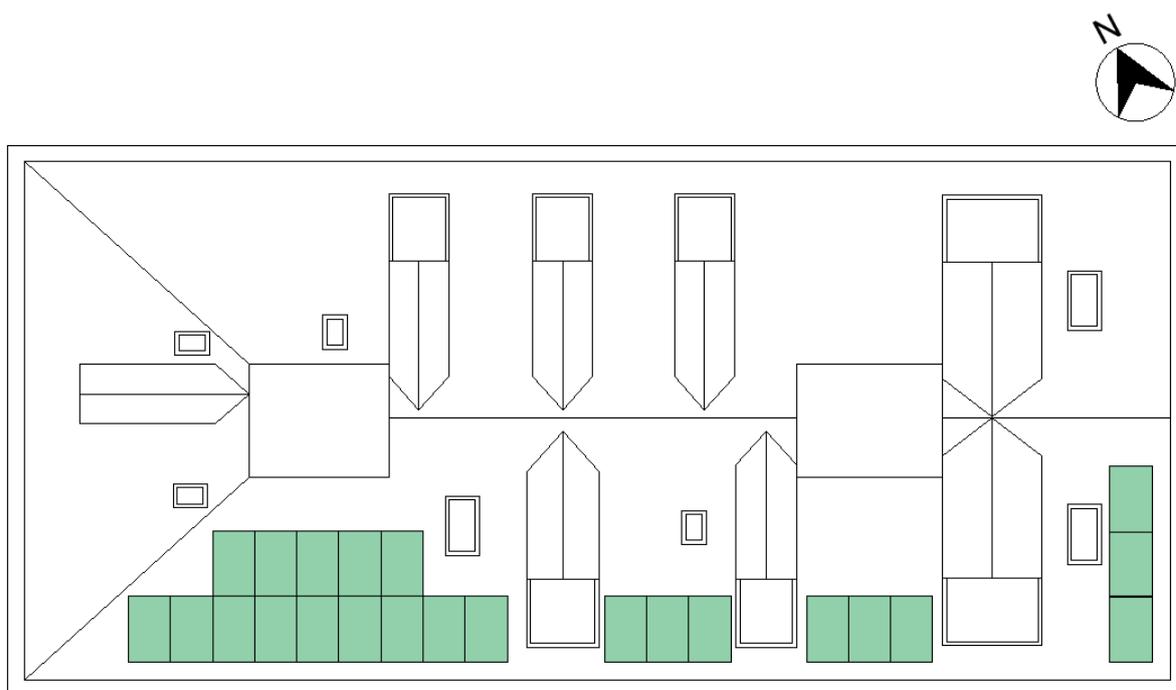


Figura 45 - Ipotesi preliminare relativa alla disposizione dei pannelli fotovoltaici in copertura

In fase di progettazione preliminare è stata prevista l'installazione dei pannelli solari SUNPOWER, modello MAXEON 3, caratterizzati da una potenza di picco pari a 420 W_p , da un'area captante di 1.90 m^2 e da un'efficienza nominale del singolo modulo del 22%.

Si riporta di seguito in Figura 46 l'andamento della produzione annua dell'impianto fotovoltaico stimato preliminarmente, ottenuto mediante simulazione energetica dell'edificio realizzata tramite il software EC713 di EDILCLIMA Programmi.

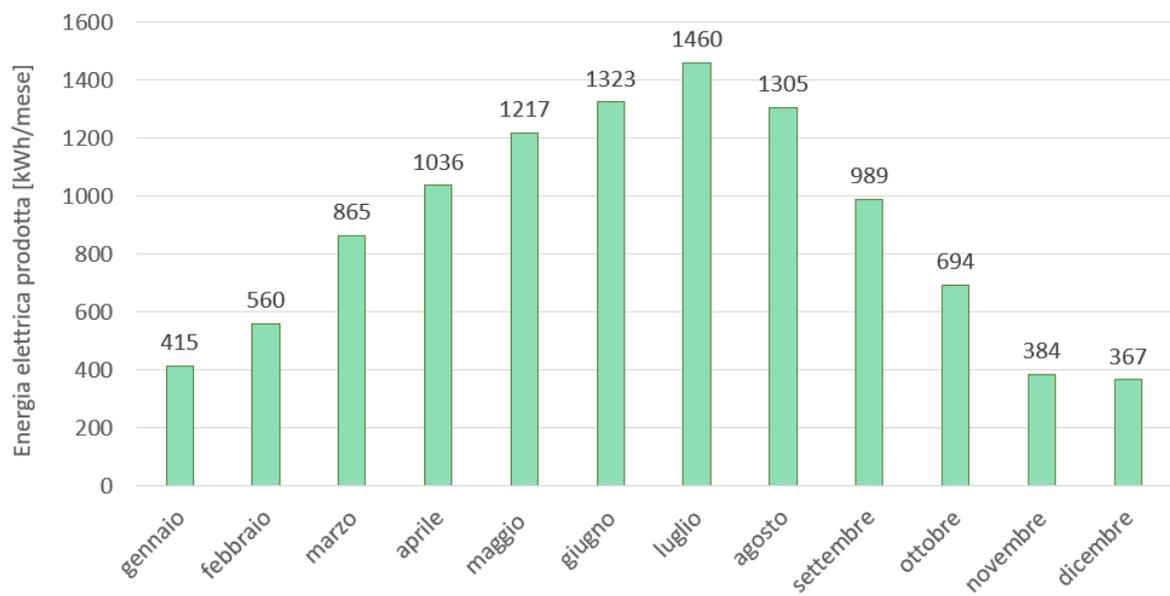


Figura 46 - Produzione di energia elettrica mensile dell'impianto fotovoltaico

7.5 SOLUZIONE 5

La quinta soluzione progettuale prevede, oltre agli interventi descritti ai paragrafi 7.2, 7.3 e 7.4 relativi all'impianto di riscaldamento, alle fonti rinnovabili e ai sistemi di raffrescamento autonomi, la rimozione dei sistemi autonomi di produzione di acqua calda sanitaria e la realizzazione di un impianto centralizzato di produzione di ACS.

L'intervento prevede che la produzione di acqua calda sanitaria avvenga in combinazione con il riscaldamento, sia mediante la pompa di calore aria - acqua di nuova installazione, di cui alla soluzione 3, sia mediante lo scambiatore di teleriscaldamento attualmente presente nel condominio, che fungerà da backup per la pompa nei momenti in cui questa non sarà in grado di soddisfare completamente la domanda di ACS, come nei periodi di picco di richiesta da parte dell'utenza o nel caso di condizioni climatiche avverse (bassi valori di temperatura esterna).

Pompa di calore e scambiatore di teleriscaldamento verranno collegati ad un nuovo bollitore a doppia serpentina, adeguatamente coibentato, in cui si prevede di stoccare l'acqua calda sanitaria ad una temperatura di 55 °C. A livello di progettazione preliminare è prevista l'installazione del bollitore Cordivari, Modello EXTRA 2 WXB – 2000, dotato di un volume di accumulo pari a 2000 l.

Si riporta di seguito in Figura 47 lo schema di funzionamento di massima dell'impianto centralizzato di climatizzazione invernale e produzione di ACS.

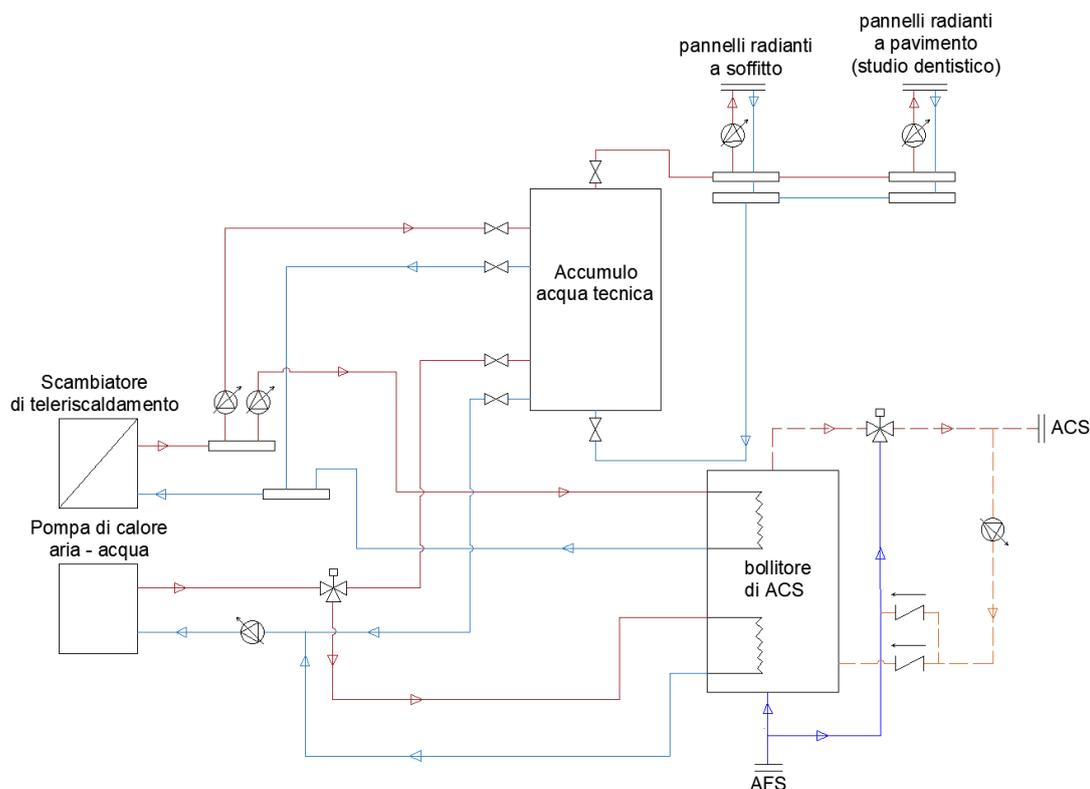


Figura 47 - Schema preliminare di funzionamento dell'impianto di riscaldamento e produzione di ACS condominiale

L'intervento di centralizzazione della produzione di ACS prevede anche la realizzazione di una nuova rete di distribuzione dell'acqua calda sanitaria alle varie unità immobiliari e di una opportuna rete di ricircolo. A livello preliminare, si ipotizza l'installazione di due montanti di distribuzione di ACS e di ricircolo nei due vani scala presenti all'interno dell'edificio, da cui saranno realizzati degli opportuni stacchi per il collegamento con i punti di prelievo presenti nei vari alloggi. Il dimensionamento della nuova rete si rimanda, in ogni caso, ad una fase progettuale successiva.

È importante sottolineare che all'interno delle unità immobiliari verranno installati dei contatori volumetrici per l'ACS, in modo tale da garantire una contabilizzazione separata dei consumi a livello di singolo alloggio.

Per quanto riguarda l'utilizzo di fonti rinnovabili, l'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico installato in copertura e descritto al paragrafo 7.4. verrà utilizzata sia per alimentare l'impianto di riscaldamento centralizzato durante la stagione invernale, sia quello di produzione di acqua calda sanitaria sopra descritto durante l'intero anno.

In questa soluzione progettuale il sistema di raffrescamento viene mantenuto autonomo nelle diverse unità immobiliari, e realizzato mediante sistemi mono o multisplit (soluzione 2, paragrafo 7.2).

7.6 SOLUZIONE 6

Nell'ultima soluzione progettuale analizzata, oltre agli interventi previsti ai paragrafi 7.3, 7.4 e 7.5 relativi all'impianto di riscaldamento, a quello di produzione di ACS e all'utilizzo di fonti rinnovabili, si prevede la realizzazione di un impianto centralizzato per il raffrescamento estivo e l'installazione nelle singole unità immobiliari di sistemi di ventilazione meccanica controllata con recupero del calore sensibile.

Il nuovo impianto centralizzato per la climatizzazione estiva non coinvolgerà lo studio dentistico a piano terreno, dove si prevede di mantenere sia il sistema di raffrescamento autonomo VRF attualmente presente che quello di ventilazione meccanica controllata, entrambi installati nel 2021.

Per le altre unità immobiliari presenti all'interno dell'edificio, la produzione di acqua refrigerata per la climatizzazione estiva verrà realizzata mediante la nuova pompa di calore aria – acqua installata nel condominio, utilizzata anche per il riscaldamento invernale e la produzione di ACS, di cui al paragrafo 7.3. È importante mettere in evidenza come l'introduzione nelle singole unità immobiliari di un sistema di ventilazione meccanica con recupero del calore consente di ridurre le dispersioni termiche per ventilazione nei vari alloggi, comportando una conseguente diminuzione del carico termico di progetto invernale ed estivo dell'edificio, calcolati tramite il software EC700 ed EC706 di EDILCLIMA Programmi. Questo permette l'installazione di una pompa di calore centralizzata di taglia inferiore rispetto a quella ipotizzata nella terza soluzione, che presenterà di conseguenza un costo di investimento minore. Si riporta di seguito la scheda tecnica della pompa di calore scelta, dove si evidenzia mediante rettangolo rosso la taglia selezionata della macchina.

Energycal AW PRO MT		180.2	200.2	210.2	220.2	235.2	250.2
Riscaldamento (A7/W35) - EN 14511	Potenza termica kW	181,5	203,6	213,5	223,4	237,4	251,2
	COP	4,1	4,2	4,1	4,1	4,1	4,2
Riscaldamento (A7/W45) - EN 14511	Potenza termica kW	176,2	197,6	207,4	217,1	230,4	243,6
	COP	3,3	3,4	3,4	3,4	3,3	3,4
	Portata acqua l/h	30.046	33.730	35.409	37.089	39.364	41.639
Raffreddamento (A35/W18) - EN 14511	Potenza Frigo kW	200,0	227,0	237,0	247,0	263,0	280,0
	EER	3,57	3,64	3,63	3,59	3,58	3,67
Raffreddamento (A35/W7) - EN 14511	Potenza Frigo kW	153,6	173,0	181,0	189,0	201,3	213,7
	EER / ESEER	2,89 / 3,84	2,94 / 3,91	2,92 / 3,89	2,90 / 3,86	2,90 / 3,85	2,95 / 3,93
Limiti operativi	Limiti	-20 ÷ 40 °C					
	T max mandata	Max 62 °C con Te ≥ +2					
Assorbimento elettrico solo pompa di calore	Pot. Max assorbita kW	75,8	82,8	87,8	92,8	99,4	104,4
	Cor. Max assorbita A	130,7	143,7	153,7	163,7	172,6	177,6
Dimensioni e Pesì	Lunghezza mm	4608				5708	
	Profondità mm	1208					
	Altezza mm	1912					
	Peso in funzione Kg	1597	1613	1624	1664	1835	1886

Figura 48 - Scheda tecnica pompa di calore Viessmann Energycal AW PRO MT 180.2

A livello di singola unità immobiliare, il raffrescamento estivo viene realizzato mediante i pannelli radianti a soffitto di nuova installazione, di cui alla soluzione 3, utilizzati anche per il riscaldamento invernale. Tale tipologia di terminali emissivi consente, però, di far fronte solo al carico termico sensibile richiesto in regime estivo dalle varie unità immobiliari; risulta quindi necessario prevedere l'installazione nei singoli alloggi di opportuni sistemi di deumidificazione, sempre serviti dalla pompa di calore condominiale, che consentano di coprire la quota latente del carico termico in ambiente.

Tenendo conto di quanto sopra detto, in questa fase di progettazione preliminare si è ipotizzato di installare, a livello di singolo alloggio, delle unità di ventilazione meccanica e trattamento aria, marca Eurotherm, modello Deuclima VMC 500 e 300 S (Figura 49), in grado di effettuare al contempo il rinnovo e la deumidificazione dell'aria ambiente. Tali macchine, adatte per l'installazione interna a controsoffitto, sono dotate di un recuperatore di calore sensibile a doppio flusso, di efficienza pari all'80%, e realizzano la deumidificazione dell'aria tramite un ciclo frigorifero dedicato, che include un compressore ad alta efficienza e due scambiatori di calore (evaporatore e condensatore). Nel dimensionamento di massima delle macchine da installare nei diversi alloggi si è considerato un numero di ricambi d'aria di progetto pari a 1 vol/h.

Nelle varie unità immobiliari, la distribuzione dell'aria verrà realizzata mediante opportune canalizzazioni, correnti nel controsoffitto, che collegheranno le bocchette di mandata e ripresa dell'aria³⁰ e l'unità di ventilazione meccanica installata. Il loro dimensionamento si rimanda, in ogni caso, ad una fase progettuale successiva.

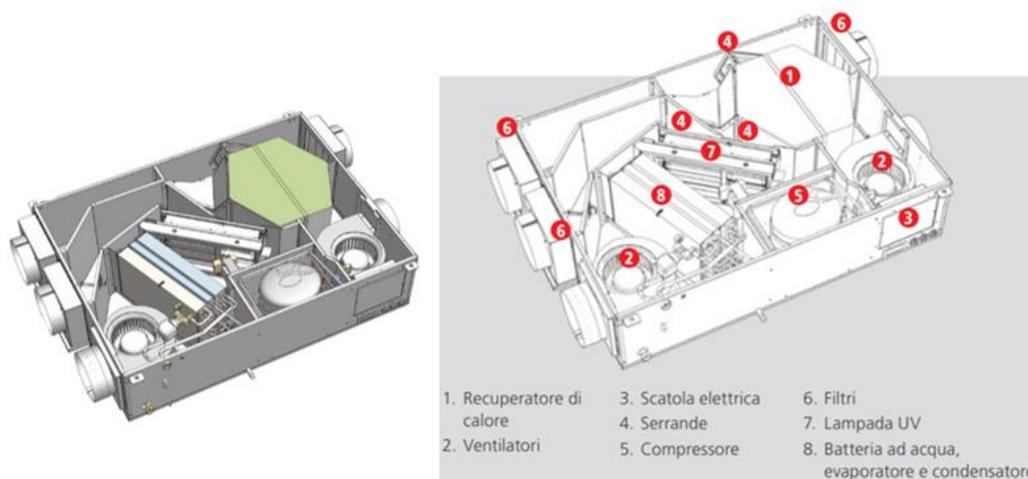


Figura 49 - Unità di ventilazione e trattamento aria Deuclima di Eurotherm

³⁰ A livello di progettazione preliminare, nelle varie unità immobiliari si considera di riprendere l'aria dai bagni e dai corridoi, e di immetterla negli altri locali.

È importante sottolineare che sarà comunque possibile modificare la marca e il modello delle unità scelte, andando a prevedere anche l'eventuale realizzazione di una ventilazione meccanica controllata separata dalla deumidificazione nei vari alloggi.

Lo schema di funzionamento di massima dell'impianto centralizzato di riscaldamento, raffreddamento e produzione di acqua calda sanitaria è riportato di seguito in Figura 50.

In regime invernale, il funzionamento risulta analogo a quello descritto ai paragrafi precedenti. In regime estivo, la pompa di calore centralizza di nuova installazione produrrà acqua refrigerata a 16 °C, che, opportunamente stoccata nell'accumulo installato in centrale termica, sarà utilizzata per alimentare i pannelli radianti a soffitto e i deumidificatori presenti nei singoli alloggi (vengono previsti degli opportuni stacchi dalle colonne montanti di distribuzione del fluido termovettore). La temperatura di mandata dell'acqua ai pannelli è stata scelta tenendo conto di quella di rugiada dell'aria interna, pari a 14.8 °C, in modo tale da evitare fenomeni di condensa indesiderati in corrispondenza dei terminali siti all'interno degli alloggi.

La produzione di acqua calda sanitaria verrà realizzata, sia in regime invernale che estivo, tramite lo scambiatore di teleriscaldamento esistente e la pompa di calore aria – acqua, come descritto al paragrafo 7.5.

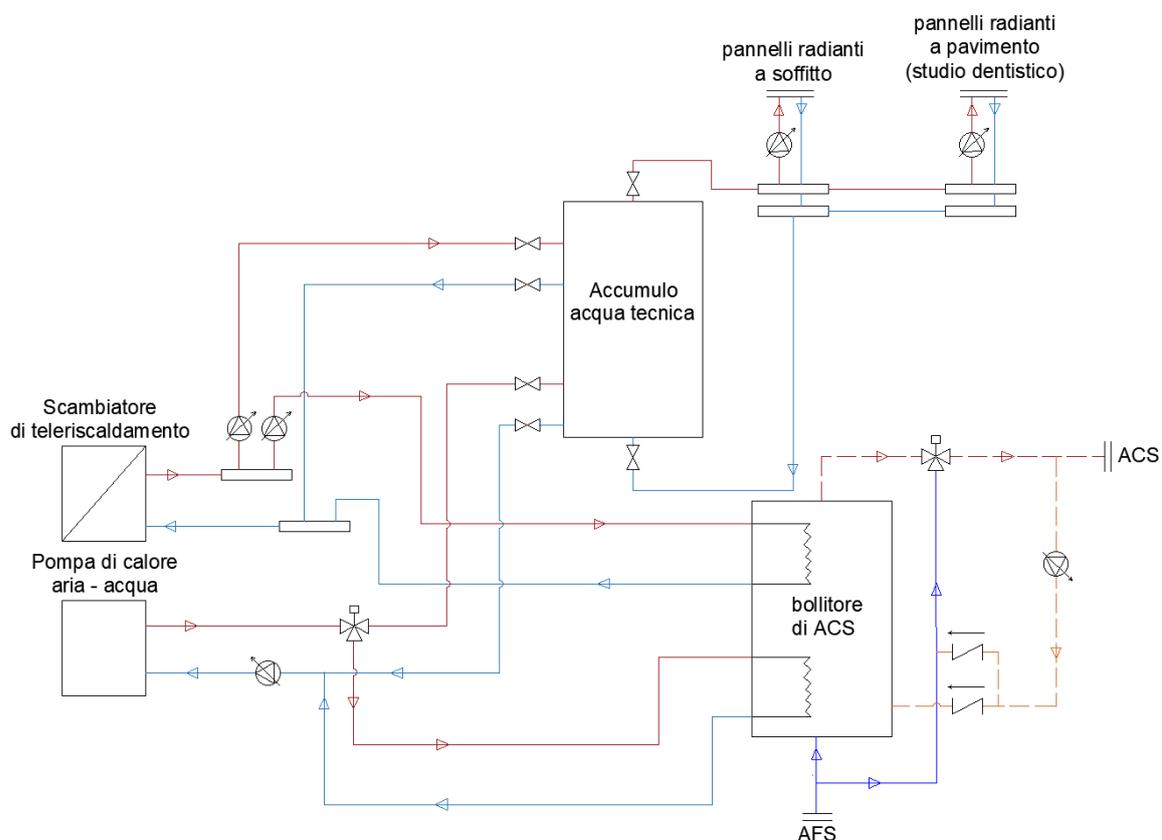


Figura 50 - Schema preliminare di funzionamento dell'impianto di riscaldamento, raffreddamento e produzione di ACS condominiale

In questa soluzione progettuale, l'impianto fotovoltaico installato in copertura e descritto al paragrafo 7.4. sarà utilizzato per alimentare l'impianto di riscaldamento durante la stagione invernale, quello di raffrescamento nella stagione estiva e l'impianto di produzione di acqua calda sanitaria durante l'intero anno (ovvero la pompa di calore centralizzata e gli ausiliari elettrici siti in centrale termica).

8 DEFINIZIONE DEI PACCHETTI PROGETTUALI E ANALISI DELLA PERFORMANCE ENERGETICA

Nel presente capitolo vengono definiti i pacchetti progettuali da applicare all'edificio oggetto di analisi, ottenuti combinando in un'opportuna matrice degli interventi le diverse soluzioni progettuali relative all'involucro edilizio opaco e trasparente, agli impianti tecnici a servizio dell'edificio e all'installazione di fonti rinnovabili, analizzate nei capitoli precedenti. Vengono così definite 12 alternative progettuali, di cui si è analizzata la performance energetica ottenuta, espressa in termini di fabbisogno di energia primaria dell'edificio, rispetto allo stato di fatto. Per ognuna di esse viene anche definito l'indice di prestazione energetica totale globale $EP_{gl,tot}$, espresso in $[kWh/m^2 \cdot anno]$, che risulta il parametro energetico che verrà utilizzato nella successiva analisi di cost-optimal, per individuare le soluzioni progettuali di ottimo sotto il profilo energetico-economico.

8.1 MATRICE DEGLI INTERVENTI

Si riporta di seguito Figura 51 la matrice degli interventi, in cui sono indicati tramite una X le 12 diverse combinazioni di interventi da applicare all'edificio.

Le prime due soluzioni progettuali relative agli impianti tecnici, che coinvolgono unicamente i sistemi autonomi di raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria presenti negli alloggi, vengono combinate con tutte le casistiche d'intervento relative all'involucro edilizio, dalle meno invasive e costose (A e B) a quelle invece più complesse e caratterizzate da costi di investimento iniziali maggiori (C e D).

Al contrario, le soluzioni d'impianto 3, 4, 5, 6 sono combinate unicamente con la soluzione progettuale D relativa all'involucro edilizio. Tali casistiche d'intervento risultano infatti costose, complesse da realizzare ed invasive per l'utenza, ma anche molto più complete rispetto alle prime due. Per questo motivo si sono valutate nell'ottica di una riqualificazione energetica che coinvolga in maniera globale l'edificio, e di conseguenza anche il suo involucro edilizio opaco e trasparente, corrispondente alla soluzione progettuale D.

Soluzioni progettuali relative agli IMPIANTI TECNICI e all'INSTALLAZIONE DI FONTI RINNOVABILI						
	Soluzione 1	Soluzione 2	Soluzione 3	Soluzione 4	Soluzione 5	Soluzione 6
Soluzioni progettuali relative all' INVOLUCRO EDILIZIO opaco e trasparente	A sostituzione serramenti	X	X			
	B coibentazione superfici orizzontali	X	X			
	C coibentazione superfici orizzontali e pareti verticali	X	X			
	D coibentazione superfici orizzontali, pareti verticali e sostituzione serramenti	X	X	X	X	X

Figura 51 - Matrice degli interventi

8.2 PERFORMANCE ENERGETICA DEI DIVERSI PACCHETTI PROGETTUALI

Si riportano di seguito i risultati ottenuti dalle simulazioni energetiche dell'edificio post-intervento, per i 12 diversi pacchetti progettuali sopra indicati, in termini di fabbisogno di energia primaria annuo $Q_{p,tot}$ [kWh/anno] e indici di prestazione energetica totale EP_{tot} [kWh/m²·anno], relativi ai singoli servizi energetici e all'edificio nel suo complesso. Vengono inoltre riportate le classi energetiche convenzionali indicative ottenute per il fabbricato nelle 12 soluzioni previste.

PACCHETTO PROGETTUALE 1 - A		
INVOLUCRO EDILIZIO	Serramenti	nuovi elementi in vetrocamera - $U_w = 1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ (+ isolamento cassonetti e sostituzione avvolgibili)
IMPIANTI TECNICI	Produzione di ACS	nuovi scaldacqua in pompa di calore autonomi nelle singole unità immobiliari
RISULTATI ENERGETICI OTTENUTI		
Servizio energetico	$Q_{p,tot}$ [kWh/anno]	EP_{tot} [kWh/m ² ·anno]
Riscaldamento	292206	79.4
Raffrescamento	79330	21.56
Produzione di ACS	22885	6.22
Ventilazione meccanica	6353	1.73
TOTALE	400774	108.91
CLASSE ENERGETICA CONVENZIONALE		
B		

PACCHETTO PROGETTUALE 1 - B		
INVOLUCRO EDILIZIO	Superfici orizzontali	coibentazione pavimenti – $U_{pav} \leq 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$ coibentazione coperture – $U_{sol} \leq 0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$
IMPIANTI TECNICI	Produzione di ACS	nuovi scaldacqua in pompa di calore autonomi nelle singole unità immobiliari
RISULTATI ENERGETICI OTTENUTI		
Servizio energetico	$Q_{p,tot}$ [kWh/anno]	EP_{tot} [kWh/m ² ·anno]
Riscaldamento	324996	88.31
Raffrescamento	79330	21.56
Produzione di ACS	24300	6.6
Ventilazione meccanica	6353	1.73
TOTALE	434979	118.20
CLASSE ENERGETICA CONVENZIONALE		
B		

PACCHETTO PROGETTUALE 1 - C		
INVOLUCRO EDILIZIO	Superfici orizzontali	isolamento pavimenti – $U_{pav} \leq 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$ isolamento coperture – $U_{sol} \leq 0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Pareti verticali	isolamento p. verticali - $U_{m,pareti} \leq 0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$ (tramite isolamento a cappotto esterno e insufflaggio dell'intercapedine muraria)
IMPIANTI TECNICI	Pareti verticali	isolamento p. verticali - $U_{m,pareti} \leq 0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$ (tramite isolamento a cappotto esterno e insufflaggio dell'intercapedine muraria)
RISULTATI ENERGETICI OTTENUTI		
Servizio energetico	$Q_{p,tot}$ [kWh/anno]	EP_{tot} [kWh/m ² ·anno]
Riscaldamento	240815	65.44
Raffrescamento	79330	21.56
Produzione di ACS	25272	6.87
Ventilazione meccanica	6353	1.73
TOTALE	351770	95.60
CLASSE ENERGETICA CONVENZIONALE		
A1		

PACCHETTO PROGETTUALE 1 – D		
INVOLUCRO EDILIZIO	Serramenti	nuovi elementi in vetrocamera - $U_w = 1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ (+ isolamento cassonetti e sostituzione avvolgibili)
	Superfici orizzontali	isolamento pavimenti – $U_{pav} \leq 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$ isolamento coperture – $U_{sol} \leq 0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Pareti verticali	isolamento p. verticali – $U_{m,pareti} \leq 0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$ (tramite isolamento a cappotto esterno e insufflaggio dell'intercapedine muraria)
IMPIANTI TECNICI	Pareti verticali	isolamento p. verticali – $U_{m,pareti} \leq 0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$ (tramite isolamento a cappotto esterno e insufflaggio dell'intercapedine muraria)
RISULTATI ENERGETICI OTTENUTI		
Servizio energetico	$Q_{p,tot}$ [kWh/anno]	EP_{tot} [kWh/m ² ·anno]
Riscaldamento	181870	49.42
Raffrescamento	79330	21.56
Produzione di ACS	22755	6.18
Ventilazione meccanica	6353	1.73
TOTALE	290308	78.89
CLASSE ENERGETICA CONVENZIONALE		
A1		

PACCHETTO PROGETTUALE 2 - A		
INVOLUCRO EDILIZIO	Serramenti	nuovi elementi in vetrocamera - $U_w = 1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ (+ isolamento cassonetti e sostituzione avvolgibili)
IMPIANTI TECNICI	Raffrescamento	nuovi sistemi autonomi mono o multisplit per il raffrescamento dove non attualmente presenti
	Produzione di ACS	nuovi scaldacqua in pompa di calore autonomi nelle singole unità immobiliari
RISULTATI ENERGETICI OTTENUTI		
Servizio energetico	$Q_{p,tot}$ [kWh/anno]	EP_{tot} [kWh/m ² ·anno]
Riscaldamento	292206	79.4
Raffrescamento	79330	21.56
Produzione di ACS	41810	11.36
Ventilazione meccanica	6353	1.73
TOTALE	419699	114.05
CLASSE ENERGETICA CONVENZIONALE		
B		

PACCHETTO PROGETTUALE 2 - B		
INVOLUCRO EDILIZIO	Superfici orizzontali	coibentazione pavimenti – $U_{pav} \leq 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$ coibentazione coperture- $U_{sol} \leq 0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Raffrescamento	nuovi sistemi autonomi mono o multisplit per il raffrescamento dove non attualmente presenti
IMPIANTI TECNICI	Produzione di ACS	nuovi scaldacqua in pompa di calore autonomi nelle singole unità immobiliari
RISULTATI ENERGETICI OTTENUTI		
Servizio energetico	$Q_{p,tot}$ [kWh/anno]	EP_{tot} [kWh/m ² ·anno]
Riscaldamento	324996	88.31
Raffrescamento	79330	21.56
Produzione di ACS	52452	14.25
Ventilazione meccanica	6353	1.73
TOTALE	463131	125.85
CLASSE ENERGETICA CONVENZIONALE		
B		

PACCHETTO PROGETTUALE 2 - C		
INVOLUCRO EDILIZIO	Superfici orizzontali	isolamento pavimenti – $U_{pav} \leq 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$ isolamento coperture – $U_{sol} \leq 0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Pareti verticali	isolamento p. verticali – $U_{m,pareti} \leq 0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$ (tramite isolamento a cappotto esterno e insufflaggio dell'intercapedine muraria)
IMPIANTI TECNICI	Raffrescamento	nuovi sistemi autonomi mono o multisplit per il raffrescamento dove non attualmente presenti
	Produzione di ACS	nuovi scaldacqua in pompa di calore autonomi nelle singole unità immobiliari
RISULTATI ENERGETICI OTTENUTI		
Servizio energetico	$Q_{p,tot}$ [kWh/anno]	EP_{tot} [kWh/m ² ·anno]
Riscaldamento	240815	65.44
Raffrescamento	79330	21.56
Produzione di ACS	53583	14.56
Ventilazione meccanica	6353	1.73
TOTALE	380081	103.29
CLASSE ENERGETICA CONVENZIONALE		
A1		

PACCHETTO PROGETTUALE 2 - D		
INVOLUCRO EDILIZIO	Serramenti	nuovi elementi in vetrocamera - $U_w = 1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ (+ isolamento cassonetti e sostituzione avvolgibili)
	Superfici orizzontali	isolamento pavimenti - $U_{pav} \leq 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$ isolamento coperture - $U_{sol} \leq 0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Pareti verticali	isolamento p. verticali - $U_{m,pareti} \leq 0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$ (tramite isolamento a cappotto esterno e insufflaggio dell'intercapedine muraria)
IMPIANTI TECNICI	Raffrescamento	nuovi sistemi autonomi mono o multisplit per il raffrescamento dove non attualmente presenti
	Produzione di ACS	nuovi scaldacqua in pompa di calore autonomi nelle singole unità immobiliari
RISULTATI ENERGETICI OTTENUTI		
Servizio energetico	$Q_{p,tot}$ [kWh/anno]	EP_{tot} [kWh/m ² ·anno]
Riscaldamento	181870	49.42
Raffrescamento	79330	21.56
Produzione di ACS	43305	11.77
Ventilazione meccanica	6353	1.73
TOTALE	310858	84.48
CLASSE ENERGETICA CONVENZIONALE		
A1		

PACCHETTO PROGETTUALE 3 - D		
INVOLUCRO EDILIZIO	Serramenti	nuovi elementi in vetrocamera - $U_w = 1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ (+ isolamento cassonetti e sostituzione avvolgibili)
	Superfici orizzontali	isolamento pavimenti - $U_{pav} \leq 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$ isolamento coperture - $U_{sol} \leq 0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Pareti verticali	isolamento p. verticali - $U_{m,pareti} \leq 0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$ (tramite isolamento a cappotto esterno e insufflaggio dell'intercapedine muraria)
IMPIANTI TECNICI	Riscaldamento	riqualificazione dell'impianto di riscaldamento centralizzato e dei suoi sottosistemi di emissione, regolazione, distribuzione e generazione
	Raffrescamento	nuovi sistemi autonomi mono o multisplit per il raffrescamento dove non attualmente presenti
	Produzione di ACS	nuovi scaldacqua in pompa di calore autonomi nelle singole unità immobiliari
RISULTATI ENERGETICI OTTENUTI		
Servizio energetico	$Q_{p,tot}$ [kWh/anno]	EP_{tot} [kWh/m ² -anno]
Riscaldamento	143602	39.02
Raffrescamento	79330	21.56
Produzione di ACS	42596	11.57
Ventilazione meccanica	6353	1.73
TOTALE	271881	73.88
CLASSE ENERGETICA CONVENZIONALE		
A2		

PACCHETTO PROGETTUALE 4 - D		
INVOLUCRO EDILIZIO	Serramenti	nuovi elementi in vetrocamera - $U_w = 1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ (+ isolamento cassonetti e sostituzione avvolgibili)
	Superfici orizzontali	isolamento pavimenti - $U_{pav} \leq 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$ isolamento coperture - $U_{sol} \leq 0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Pareti verticali	isolamento p. verticali - $U_{m,pareti} \leq 0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$ (tramite isolamento a cappotto esterno e insufflaggio dell'intercapedine muraria)
IMPIANTI TECNICI	Riscaldamento	riqualificazione dell'impianto di riscaldamento centralizzato e dei suoi sottosistemi di emissione, regolazione, distribuzione e generazione
	Raffrescamento	nuovi sistemi autonomi mono o multisplit per il raffrescamento dove non attualmente presenti
	Produzione di ACS	nuovi scaldacqua in pompa di calore autonomi nelle singole unità immobiliari
FONTI RINNOVABILI	Fotovoltaico	nuovo impianto fotovoltaico in copertura a servizio delle utenze comuni - 9.66 kW_p
RISULTATI ENERGETICI OTTENUTI		
Servizio energetico	$Q_{p,tot}$ [kWh/anno]	EP_{tot} [kWh/m ² ·anno]
Riscaldamento	135053	36.7
Raffrescamento	79330	21.56
Produzione di ACS	42596	11.57
Ventilazione meccanica	6353	1.73
TOTALE	263332	71.56
CLASSE ENERGETICA CONVENZIONALE		
A2		

PACCHETTO PROGETTUALE 5 - D		
INVOLUCRO EDILIZIO	Serramenti	nuovi elementi in vetrocamera - $U_w = 1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ (+ isolamento cassonetti e sostituzione avvolgibili)
	Superfici orizzontali	isolamento pavimenti - $U_{pav} \leq 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$ isolamento coperture - $U_{sol} \leq 0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Pareti verticali	isolamento p. verticali - $U_{m,pareti} \leq 0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$ (tramite isolamento a cappotto esterno e insufflaggio dell'intercapedine muraria)
IMPIANTI TECNICI	Riscaldamento	riqualificazione dell'impianto di riscaldamento centralizzato e dei suoi sottosistemi di emissione, regolazione, distribuzione e generazione
	Raffrescamento	nuovi sistemi autonomi mono o multisplit per il raffrescamento dove non attualmente presenti
	Produzione di ACS	nuovo impianto centralizzato per la produzione di acqua calda sanitaria
FONTI RINNOVABILI	Fotovoltaico	nuovo impianto fotovoltaico in copertura a servizio delle utenze comuni - 9.66 Kw_p
RISULTATI ENERGETICI OTTENUTI		
Servizio energetico	$Q_{p,tot}$ [kWh/anno]	EP_{tot} [kWh/m ² ·anno]
Riscaldamento	140734	38.24
Raffrescamento	40166	10.91
Produzione di ACS	42596	11.57
Ventilazione meccanica	6353	1.73
TOTALE	229849	62.45
CLASSE ENERGETICA CONVENZIONALE		
A3		

PACCHETTO PROGETTUALE 6 - D		
INVOLUCRO EDILIZIO	Serramenti	nuovi elementi in vetrocamera - $U_w = 1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ (+ isolamento cassonetti e sostituzione avvolgibili)
	Superfici orizzontali	isolamento pavimenti - $U_{pav} \leq 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$ isolamento coperture - $U_{sol} \leq 0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Pareti verticali	isolamento p. verticali - $U_{m,pareti} \leq 0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$ (tramite isolamento a cappotto esterno e insufflaggio dell'intercapedine muraria)
IMPIANTI TECNICI	Riscaldamento	riqualificazione dell'impianto di riscaldamento centralizzato e dei suoi sottosistemi di emissione, regolazione, distribuzione e generazione
	Raffrescamento	nuovo impianto centralizzato di raffrescamento
	Produzione di ACS	nuovo impianto centralizzato per la produzione di acqua calda sanitaria
	Ventilazione meccanica	nuovi sistemi di ventilazione meccanica controllata con recupero del calore nelle singole unità immobiliari
FONTI RINNOVABILI	Fotovoltaico	nuovo impianto fotovoltaico in copertura a servizio delle utenze comuni - 9.66 kW_p
RISULTATI ENERGETICI OTTENUTI		
Servizio energetico	$Q_{p,tot}$ [kWh/anno]	EP_{tot} [kWh/m ² -anno]
Riscaldamento	122559	33.30
Raffrescamento	48922	13.29
Produzione di ACS	43513	11.82
Ventilazione meccanica	52638	14.30
TOTALE	267632	72.72
CLASSE ENERGETICA CONVENZIONALE		
A3		

Sono riassunti in tabella seguente gli indici di prestazione energetica totale globale $EP_{gl,tot}$ dei vari pacchetti progettuali analizzati e il valore percentuale di risparmio energetico ottenuto rispetto alla condizione pre-intervento.

Pacchetto progettuale	EP _{gl,tot} [kWh/m ² ·anno]	Risparmio % rispetto allo stato di fatto
Stato di fatto	128.93	-
1 – A	108.91	16%
1 - B	118.20	8%
1 – C	95.60	26%
1 - D	78.89	39%
2 – A	114.05	12%
2 – B	126	2%
2 – C	103	20%
2 – D	84.48	34%
3 – D	73.88	43%
4 - D	71.56	44%
5 – D	62.45	52%
6 - D	72.72	44%

Tabella 28 – EP_{gl,tot} dei diversi pacchetti progettuali analizzati e risparmio energetico % rispetto allo stato di fatto

Si può notare da quanto sopra riportato che uno dei fattori maggiormente influenti sulla prestazione energetica dell'edificio è la tipologia di intervento previsto per l'involucro edilizio: si ha, infatti, che i pacchetti progettuali più performanti risultano quelli in cui si interviene in maniera globale sull'involucro, isolando sia le pareti verticali che le superfici orizzontali, e sostituendo i serramenti originali del fabbricato (soluzione D).

Si evidenzia inoltre come i pacchetti progettuali 2-A, 2-B, 2-C e 2-D, che prevedono l'installazione, per motivi di comfort termico estivo, di nuovi impianti di raffrescamento autonomo dove non presenti, introducono consumi energetici che non si verificano allo stato di fatto, provocando un conseguente aumento dell'EP_{gl,tot} rispetto alle casistiche 1-A, 1-B, 1-C, 1-D.

Come già precedentemente ipotizzato, i pacchetti progettuali energeticamente più performanti risultano gli ultimi quattro (3-D, 4-D, 5-D, 6-D), che combinano interventi di retrofit degli impianti tecnici sempre più completi con una riqualificazione globale dell'involucro edilizio opaco e trasparente (soluzione D), introducendo anche l'utilizzo di fonti rinnovabili.

Si può notare, inoltre, come le soluzioni 3-D e 4-D presentano un valore di EP_{gl,tot} del tutto analogo; tra i due pacchetti progettuali l'unica differenza è l'utilizzo di pannelli fotovoltaici a servizio dell'impianto di climatizzazione invernale (pompa di calore aria – acqua e ausiliari di centrale), che, a causa della stagione in cui vengono utilizzati e della ridotta potenza di picco dell'impianto installato in copertura (dovuta alla scarsa superficie utile disponibile), non influiscono in maniera determinante sulla prestazione energetica del fabbricato.

Si evidenzia, infine, che la variante progettuale 5-D risulta più performante energeticamente della 6-D, che, rispetto all'altra, prevede la realizzazione di un impianto di raffrescamento centralizzato e l'introduzione di una ventilazione meccanica controllata con recupero del calore all'interno degli alloggi.

Ciò può essere imputabile a diversi fattori: le perdite di calore che si verificano nell'accumulo di acqua refrigerata e nella rete di distribuzione del fluido termovettore, non presenti nel caso di utilizzo di impianti autonomi ad espansione diretta, il valore di COP della pompa di calore utilizzata per la generazione dell'acqua refrigerata e i consumi elettrici introdotti dall'installazione di sistemi di ventilazione meccanica controllata all'interno degli alloggi.

In ogni caso, risulta chiaro che un minor valore di $EP_{gl,tot}$ post-intervento, da un punto di vista economico, comporta costi di esercizio annuali minori. Tali costi, insieme a quelli di investimento iniziale, di gestione e di manutenzione vengono valutati per i vari pacchetti progettuali previsti al capitolo successivo, così da poterne definire il costo globale [€/m²].

9 CALCOLO DEL COSTO GLOBALE

Nel presente capitolo viene calcolato il costo globale [€/m²] relativo ai 12 pacchetti progettuali precedentemente sottoposti ad analisi energetica, secondo la metodologia prevista dalla norma UNI EN 15459 [32] e descritta al paragrafo 3.2.4.1. La formula utilizzata nella valutazione è riportata di seguito.

$$C_G(\tau) = C_I + \sum_j \left[\sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) \cdot R_d(i)) - V_{f,\tau}(j) \right]$$

Dove:

- τ = periodo di calcolo
- $C_G(\tau)$ = costo globale, riferito all'anno d'inizio τ_0
- C_I = costo di investimento iniziale per l'insieme di misure j
- $C_{a,i}(j)$ = costo annuale, durante l'anno i , per l'insieme di misure j ; comprende i costi di esercizio, di manutenzione e di sostituzione
- $R_d(i)$ = fattore di attualizzazione all'anno i ; riferisce i costi futuri all'anno di inizio τ_0 . Si calcola come:

$$R_d(p) = \left(\frac{1}{1 + \frac{r}{100}} \right)^p$$

dove:

p = numero di anni a partire dal periodo iniziale

r = tasso di sconto reale (l'inflazione è esclusa)

- $V_{f,\tau}(j)$ = valore residuo dell'insieme di misure j alla fine del periodo di calcolo, attualizzato all'anno di inizio τ_0

Nella stima del costo globale si è assunto un periodo di calcolo τ pari a 30 anni, stabilito dal Regolamento Delegato UE n. 244/2012 [5] per gli edifici a destinazione d'uso residenziale, e un tasso di sconto reale r pari al 4%³¹, sempre suggerito dal Regolamento Delegato.

³¹ Rendimento medio reale dei titoli di stato a lungo termine nell'UE.

9.1 COSTI DI INVESTIMENTO INIZIALE

Prima di tutto sono stati valutati i costi d'investimento iniziale degli elementi edilizi d'involucro e d'impianto relativi ai 12 pacchetti progettuali analizzati. Le diverse voci di costo sono state ricavate dal Prezziario della Regione Piemonte 2023 [37] e dai Prezziari DEI (Tipografia del Genio Civile) 2023, dei prezzi informativi dell'edilizia per recupero, ristrutturazione e manutenzione [38] e per impianti tecnologici [39]. Per gli elementi edilizi non presenti nei Prezziari sopra citati, si è fatto riferimento al Prezziario della Regione Lombardia 2023 [40]. È stato così possibile ricavare in maniera analitica i prezzi dei diversi componenti coinvolti negli interventi, a partire dalle voci di costo unitario riportate nei Prezziari e dalla definizione delle rispettive quantità. Sia per l'involucro edilizio che per le componenti impiantistiche, si è tenuto conto anche dei costi relativi alla posa in opera degli elementi considerati, in tutti i casi in cui non fossero già inclusi nel prezzo unitario degli elementi stessi.

I costi d'investimento iniziale così ricavati sono stati maggiorati del 20%, di cui 10% è stato aggiunto per tenere conto dell'IVA³² e un altro 10% per tener conto dei costi relativi alle spese tecniche (costi di progettazione, pratiche comunali etc.).

Si mette in evidenza come la stima analitica dei costi iniziali, che risulta da un lato molto precisa, richiede di considerare nel dettaglio i diversi componenti d'involucro e d'impianto coinvolti nell'intervento, che vengono stimati uno ad uno nell'analisi. Risulta quindi chiaro che, in questa fase di progettazione preliminare, i costi d'investimento iniziale ottenuti per i diversi pacchetti progettuali sono valori indicativi, che andranno implementati poi in maniera opportuna nelle successive fasi progettuali, in cui saranno elaborati in maniera più dettagliata i progetti relativi all'involucro edilizio e agli impianti tecnici a servizio dell'edificio.

Si riportano di seguito in forma sintetica, per ognuno dei 12 pacchetti progettuali analizzati, i costi d'investimento iniziale C.I. [€] relativi agli elementi edilizi d'involucro e d'impianto coinvolti negli interventi. Per alleggerire la trattazione, le voci di costo ricavate dai Prezziari sono state di seguito riassunte e raggruppate tra loro.

³² Si è considerata l'IVA agevolata al 10%, applicabile nei casi di manutenzione ordinaria e straordinaria agli immobili a prevalente destinazione d'uso abitativa privata.

PACCHETTO PROGETTUALE 1 - A		
	Descrizione	C.I. [€]
INVOLUCRO TRASPARENTE	Fornitura e posa in opera di serramenti con telaio in PVC e vetrocamera, con interposta intercapedine riempita di gas. $U_w \leq 1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$.	79727.89
	Rimozione di infissi di qualsiasi natura, in qualunque piano di fabbricato	6344.52
	Fornitura e posa in opera di persiane avvolgibili con stecche in plastica, complete di accessori	30655.41
	Fornitura e posa in opera di copertura coibentata del cassonetto avente trasmittanza U_{sb} inferiore o uguale al valore del serramento	34336
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	181276.89
	Descrizione	C.I. [€]
IMPIANTO DI PRODUZIONE ACS	Fornitura e posa in opera di scaldacqua a pompa di calore aria-acqua per la produzione di acqua calda sanitaria. Capacità 200 - 270 l.	76198.11
	Rimozione di scaldabagni elettrici e caldaie murali di potenza fino a 30 W, comprese le relative opere murarie e idrauliche	1638.44
	Carotaggi per perforazione di strutture edili, \varnothing foro 110 ÷ 150 mm	1959.72
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	95755.52
COSTO D'INVESTIMENTO INIZIALE TOTALE [€]		277032.41

PACCHETTO PROGETTUALE 1 - B		
	Descrizione	C.I. [€]
INVOLUCRO OPACO - SUPERFICI ORIZZONTALI	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda = 0.024 \text{ W/mK}$. Per isolamento termico di pareti, coperture e solai. Spessori: 5 - 8 - 10 cm	24574.91
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda \leq 0.028 \text{ W/mK}$. Per isolamento termico di coperture e solai. Spessore: 10 cm	10048.88
	Membrana prefabbricata elastoplastomerica. Spessore: 4 mm	3523.63
	Realizzazione di isolamento termico a cappotto con lastre di qualsiasi dimensione e spessore, compreso il carico, lo scarico, il trasporto e il deposito a qualsiasi piano del fabbricato	54306.31
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	110944.48
	Descrizione	C.I. [€]
IMPIANTO DI PRODUZIONE ACS	Fornitura e posa in opera di scaldacqua a pompa di calore aria-acqua per la produzione di acqua calda sanitaria. Capacità 200 - 270 l.	76198.11
	Rimozione di scaldabagni elettrici e caldaie murali di potenza fino a 30 W, comprese le relative opere murarie e idrauliche	1638.44
	Carotaggi per perforazione di strutture edili, \varnothing foro 110 ÷ 150 mm	1959.72
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	95755.52
COSTO D'INVESTIMENTO INIZIALE TOTALE [€]		206700

PACCHETTO PROGETTUALE 1 - C		
INVOLUCRO OPACO - PARETI VERTICALI	Descrizione	C.I. [€]
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda \leq 0.028$ W/mK. Per isolamento termico a cappotto. Spessore: 10 cm	60940.6
	Materassino isolante composto da aerogel rinforzato con fibre di poliestere o polietilene tereftalato (PET), $\lambda = 0.0135$ W/mK. Spessore: 1 cm	15825.4
	Realizzazione di isolamento termico a cappotto con lastre di qualsiasi dimensione e spessore, compreso il carico, lo scarico, il trasporto e il deposito a qualsiasi piano del fabbricato	89862.4
	Insufflaggio a secco in intercapedini di pareti interne e/o esterne, tramite schiuma poliuretana rigida a bassa densità a celle aperte ($\lambda = 0.035$ W/mK), compreso ogni onere per dare l'opera finita a regola d'arte	96414.98
	Nolo di ponteggio tubolare esterno, comprensivo di piani di lavoro e sottopiani, compreso il trasporto, il montaggio, lo smontaggio, nonché ogni dispositivo necessario per la conformità alle norme di sicurezza vigenti	162749.7
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	510951.7
INVOLUCRO OPACO - SUPERFICI ORIZZONTALI	Descrizione	C.I. [€]
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda = 0.024$ W/mK. Per isolamento termico di pareti, coperture e solai. Spessori: 5 - 8 - 10 cm	24574.9
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda \leq 0.028$ W/mK. Per isolamento termico di coperture e solai. Spessore: 10 cm	10048.9
	Membrana prefabbricata elastoplastomerica. Spessore: 4 mm	3523.6
	Realizzazione di isolamento termico a cappotto con lastre di qualsiasi dimensione e spessore, compreso il carico, lo scarico, il trasporto e il deposito a qualsiasi piano del fabbricato	54306.3
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	110944.5
IMPIANTO DI PRODUZIONE ACS	Descrizione	C.I. [€]
	Fornitura e posa in opera di scaldacqua a pompa di calore aria-acqua per la produzione di acqua calda sanitaria. Capacità 200 - 270 l	76198.1
	Rimozione di scaldabagni elettrici e caldaie murali di potenza fino a 30 W, comprese le relative opere murarie e idrauliche	1638.4
	Carotaggi per perforazione di strutture edili, \varnothing foro 110 ÷ 150 mm	1959.7
TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	95755.5	
COSTO D'INVESTIMENTO INIZIALE TOTALE [€]		717551.7

PACCHETTO PROGETTUALE 1 - D		
INVOLUCRO TRASPARENTE	Descrizione	C.I. [€]
	Fornitura e posa in opera di serramenti con telaio in PVC e vetrocamera, con interposta intercapedine riempita di gas. $U_w \leq 1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$.	79727.9
	Rimozione di infissi di qualsiasi natura, in qualunque piano di fabbricato	6344.5
	Fornitura e posa in opera di persiane avvolgibili con stecche in plastica, complete di accessori	30655.4
	Fornitura e posa in opera di copertura coibentata del cassonetto avente trasmittanza U_{sb} inferiore o uguale al valore del serramento	34336
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	181276.9
INVOLUCRO OPACO - PARETI VERTICALI	Descrizione	C.I. [€]
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda \leq 0.028 \text{ W/mK}$. Per isolamento termico a cappotto. Spessore: 10 cm	60940.6
	Materassino isolante composto da aerogel rinforzato con fibre di poliestere o polietilene tereftalato (PET), $\lambda = 0.0135 \text{ W/mK}$. Spessore: 1 cm	15825.4
	Realizzazione di isolamento termico a cappotto con lastre di qualsiasi dimensione e spessore, compreso il carico, lo scarico, il trasporto e il deposito a qualsiasi piano del fabbricato	89862.4
	Insufflaggio a secco in intercapedini di pareti interne e/o esterne, tramite schiuma poliuretanicca rigida a bassa densità a celle aperte ($\lambda = 0.035 \text{ W/mK}$), compreso ogni onere per dare l'opera finita a regola d'arte	96414.9
	Nolo di ponteggio tubolare esterno, comprensivo di piani di lavoro e sottopiani, compreso il trasporto, il montaggio, lo smontaggio, nonché ogni dispositivo necessario per la conformità alle norme di sicurezza vigenti	162749.7
TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	510951.7	
INVOLUCRO OPACO - SUPERFICI ORIZZONTALI	Descrizione	C.I. [€]
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda = 0.024 \text{ W/mK}$. Per isolamento termico di pareti, coperture e solai. Spessori: 5 - 8 - 10 cm	24574.9
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda \leq 0.028 \text{ W/mK}$. Per isolamento termico di coperture e solai. Spessore: 10 cm	10048.9
	Membrana prefabbricata elastoplastomerica. Spessore: 4 mm	3523.6
	Realizzazione di isolamento termico a cappotto con lastre di qualsiasi dimensione e spessore, compreso il carico, lo scarico, il trasporto e il deposito a qualsiasi piano del fabbricato	54306.3
TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	110944.5	
IMPIANTO DI PRODUZIONE ACS	Descrizione	C.I. [€]
	Fornitura e posa in opera di scaldacqua a pompa di calore aria-acqua per la produzione di acqua calda sanitaria. Capacità 200 - 270 l	76198.1
	Rimozione di scaldabagni elettrici e caldaie murali di potenza fino a 30 W, comprese le relative opere murarie e idrauliche	1638.4
	Carotaggi per perforazione di strutture edili, \varnothing foro 110 ÷ 150 mm	1959.7
TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	95755.5	
COSTO D'INVESTIMENTO INIZIALE TOTALE [€]		898928.6

PACCHETTO PROGETTUALE 2 - A			
INVOLUCRO TRASPARENTE	Descrizione		C.I. [€]
	Fornitura e posa in opera di serramenti con telaio in PVC e vetrocamera, con interposta intercapedine riempita di gas. $U_w \leq 1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$.		79727.9
	Rimozione di infissi di qualsiasi natura, in qualunque piano di fabbricato		6344.5
	Fornitura e posa in opera di persiane avvolgibili con stecche in plastica, complete di accessori		30655.4
	Fornitura e posa in opera di copertura coibentata del cassonetto avente trasmittanza U_{sb} inferiore o uguale al valore del serramento		34336
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)		181276.9
IMPIANTO DI PRODUZIONE ACS	Descrizione		C.I. [€]
	Fornitura e posa in opera di scaldacqua a pompa di calore aria-acqua per la produzione di acqua calda sanitaria. Capacità 200 - 270 l		76198.1
	Rimozione di scaldabagni elettrici e caldaie murali di potenza fino a 30 W, comprese le relative opere murarie e idrauliche		1638.4
	Carotaggi per perforazione di strutture edili, \varnothing foro 110 ÷ 150 mm		1959.7
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)		95755.5
IMPIANTO DI RAFFRESCAMENTO	Condizionatori autonomi tipo monosplit a pompa di calore, composti da una motocondensante esterna e un'unità interna, forniti e posti in opera, compresi di collegamento elettrico, quota parte di tubazioni in rame coibentato e tubazioni di scarico condensa. P. frigo: 2.0 - 2.5 - 3.4 - 7.1 kW		13665.4
	Condizionatori autonomi tipo multisplit a pompa di calore, composti da una motocondensante esterna e da più unità interne, forniti e posti in opera compresi di collegamento elettrico, quota parte di tubazioni in rame coibentato e tubazioni di scarico condensa.		60744.5
	- P. frigo 3.9 kW - 2 unità interne - P. frigo 5.2 kW - 3 unità interne - P. frigo 6.8 kW - 4 unità interne	- P. frigo 8 kW - 4 unità interne - P. frigo 10.2 kW - 4 unità interne - P. frigo 12 kW - 6 unità interne	
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)		89291.9
COSTO D'INVESTIMENTO INIZIALE TOTALE [€]			366324.3

PACCHETTO PROGETTUALE 2 - B		
INVOLUCRO OPACO - SUPERFICI ORIZZONTALI	Descrizione	C.I. [€]
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda = 0.024$ W/mK. Per isolamento termico di pareti, coperture e solai. Spessori: 5 - 8 - 10 cm	24574.9
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda \leq 0.028$ W/mK. Per isolamento termico di coperture e solai. Spessore: 10 cm	10048.9
	Membrana prefabbricata elastoplastomerica. Spessore: 4 mm	3523.7
	Realizzazione di isolamento termico a cappotto con lastre di qualsiasi dimensione e spessore, compreso il carico, lo scarico, il trasporto e il deposito a qualsiasi piano del fabbricato	54306.3
TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)		110944.5
IMPIANTO DI PRODUZIONE ACS	Descrizione	C.I. [€]
	Fornitura e posa in opera di scaldacqua a pompa di calore aria-acqua per la produzione di acqua calda sanitaria. Capacità 200 - 270 l	76198.1
	Rimozione di scaldabagni elettrici e caldaie murali di potenza fino a 30 W, comprese le relative opere murarie e idrauliche	1638.4
	Carotaggi per perforazione di strutture edili, \varnothing foro 110 ÷ 150 mm	1959.7
TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)		95755
IMPIANTO DI RAFFRESCAME NTO	Descrizione	C.I. [€]
	Condizionatori autonomi tipo monosplit a pompa di calore, composti da una motocondensante esterna e un'unità interna, forniti e posti in opera, compresi di collegamento elettrico, quota parte di tubazioni in rame coibentato e tubazioni di scarico condensa. P. frigo: 2.0 - 2.5 - 3.4 - 7.1 kW	13665.42
	Condizionatori autonomi tipo multisplit a pompa di calore, composti da una motocondensante esterna e da più unità interne, forniti e posti in opera compresi di collegamento elettrico, quota parte di tubazioni in rame coibentato e tubazioni di scarico condensa.	69103.3
	- P. frigo 3.9 kW - 2 unità interne - P. frigo 5.2 kW - 3 unità interne - P. frigo 6.8 kW - 4 unità interne	
- P. frigo 8 kW - 4 unità interne - P. frigo 10.2 kW - 5 unità interne - P. frigo 12 kW - 6 unità interne		
TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)		99322.4
COSTO D'INVESTIMENTO INIZIALE TOTALE [€]		306022.4

PACCHETTO PROGETTUALE 2 - C			
INVOLUCRO OPACO - PARETI VERTICALI	Descrizione		C.I. [€]
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda \leq 0.028$ W/mK. Per isolamento termico a cappotto. Spessore: 10 cm		60940.6
	Materassino isolante composto da aerogel rinforzato con fibre di poliestere o polietilene tereftalato (PET), $\lambda = 0.0135$ W/mK. Spessore: 1 cm		15825.4
	Realizzazione di isolamento termico a cappotto, compreso il carico, lo scarico, il trasporto e il deposito a qualsiasi piano del fabbricato		89862.4
	Insufflaggio a secco in intercapedini di pareti interne e/o esterne, tramite schiuma poliuretanicca rigida a bassa densità a celle aperte ($\lambda = 0.035$ W/mK), compreso ogni onere per dare l'opera finita a regola d'arte		96414.9
	Nolo di ponteggio tubolare esterno, comprensivo di piani di lavoro e sottopiani, compreso il trasporto, il montaggio, lo smontaggio, nonché ogni dispositivo necessario per la conformità alle norme di sicurezza vigenti		162749.7
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)		510951.7
INVOLUCRO OPACO - SUPERFICI ORIZZONTALI	Descrizione		C.I. [€]
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda = 0.024$ W/mK. Per isolamento termico di pareti, coperture e solai. Spessori: 5 - 8 - 10 cm		24574.9
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda \leq 0.028$ W/mK. Per isolamento termico di coperture e solai. Spessore: 10 cm		10048.9
	Membrana prefabbricata elastoplastomerica. Spessore: 4 mm		3523.6
	Realizzazione di isolamento termico a cappotto, compreso il carico, lo scarico, il trasporto e il deposito a qualsiasi piano del fabbricato		54306.3
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)		110944.5
IMPIANTO DI PRODUZIONE ACS	Descrizione		C.I. [€]
	Fornitura e posa in opera di scaldacqua a pompa di calore aria-acqua per la produzione di acqua calda sanitaria. Capacità 200 - 270 l		76198.1
	Rimozione di scaldabagni elettrici e caldaie murali di potenza fino a 30 W, comprese le relative opere murarie e idrauliche		1638.4
	Carotaggi per perforazione di strutture edili, \varnothing foro 110 ÷ 150 mm		1959.7
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)		95755.5
IMPIANTO DI RAFFRESCA- MENTO	Descrizione		C.I. [€]
	Condizionatori autonomi tipo monosplit a pompa di calore, composti da una motocondensante esterna e un'unità interna, forniti e posti in opera, compresi di collegamento elettrico, quota parte di tubazioni in rame coibentato e tubazioni di scarico condensa. P. frigo: 2.0 - 2.5 - 3.4 - 7.1 kW		13665.4
	Condizionatori autonomi tipo multisplit a pompa di calore, composti da una motocondensante esterna e da più unità interne, forniti e posti in opera compresi di collegamento elettrico, quota parte di tubazioni in rame coibentato e tubazioni di scarico condensa		65088.3
	- P. frigo 3.9 kW - 2 unità interne - P. frigo 5.2 kW - 3 unità interne	- P. frigo 8 kW - 4 unità interne - P. frigo 10.2 kW - 5 unità interne - P. frigo 12 kW - 6 unità interne	
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)		86629

PACCHETTO PROGETTUALE 2 – D		
INVOLUCRO TRASPARENTE	Descrizione	C.I. [€]
	Fornitura e posa in opera di serramenti con telaio in PVC e vetrocamera, con interposta intercapedine riempita di gas. $U_w \leq 1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$.	79727.9
	Rimozione di infissi di qualsiasi natura, in qualunque piano di fabbricato	6344.5
	Fornitura e posa in opera di persiane avvolgibili con stecche in plastica, complete di accessori	30655.4
	Fornitura e posa in opera di copertura coibentata del cassonetto avente trasmittanza U_{sb} inferiore o uguale al valore del serramento	34336
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	181276.9
INVOLUCRO OPACO - PARETI VERTICALI	Descrizione	C.I. [€]
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda \leq 0.028 \text{ W/mK}$. Per isolamento termico a cappotto. Spessore: 10 cm	60940.6
	Materassino isolante composto da aerogel rinforzato con fibre di poliestere o polietilene tereftalato (PET), $\lambda = 0.0135 \text{ W/mK}$. Spessore: 1 cm	15825.4
	Realizzazione di isolamento termico a cappotto con lastre di qualsiasi dimensione e spessore, compreso il carico, lo scarico, il trasporto e il deposito a qualsiasi piano del fabbricato	89862.4
	Insufflaggio a secco in intercapedini di pareti interne e/o esterne, tramite schiuma poliuretanicca rigida a bassa densità a celle aperte ($\lambda = 0.035 \text{ W/mK}$), compreso ogni onere per dare l'opera finita a regola d'arte	96414.9
	Nolo di ponteggio tubolare esterno, comprensivo di piani di lavoro e sottopiani, compreso il trasporto, il montaggio, lo smontaggio, nonché ogni dispositivo necessario per la conformità alle norme di sicurezza vigenti	162749.7
TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	510951.7	
INVOLUCRO OPACO - SUPERFICI ORIZZONTALI	Descrizione	C.I. [€]
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda = 0.024 \text{ W/mK}$. Per isolamento termico di pareti, coperture e solai. Spessori: 5 - 8 - 10 cm	24574.9
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda \leq 0.028 \text{ W/mK}$. Per isolamento termico di coperture e solai. Spessore: 10 cm	10048.9
	Membrana prefabbricata elastoplastomerica. Spessore: 4 mm	3523.63
	Realizzazione di isolamento termico a cappotto con lastre di qualsiasi dimensione e spessore, compreso il carico, lo scarico, il trasporto e il deposito a qualsiasi piano del fabbricato	54306.3
TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	110944.5	
IMPIANTO DI PRODUZIONE ACS	Descrizione	C.I. [€]
	Fornitura e posa in opera di scaldacqua a pompa di calore aria-acqua per la produzione di acqua calda sanitaria. Capacità 200 - 270 l	76198.1
	Rimozione di scaldabagni elettrici e caldaie murali di potenza fino a 30 W, comprese le relative opere murarie e idrauliche	1638.4
	Carotaggi per perforazione di strutture edili, \varnothing foro 110 ÷ 150 mm	1959.7
TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	95755.5	
	Descrizione	C.I. [€]

IMPIANTO DI RAFFRESCAMENTO	Condizionatori autonomi tipo monosplit a pompa di calore, composti da una motocondensante esterna e un'unità interna, forniti e posti in opera, compresi di collegamento elettrico, quota parte di tubazioni in rame coibentato e tubazioni di scarico condensa. P. frigo: 2.0 - 2.5 – 3.4 – 7.1 kW	13665.4	
	Condizionatori autonomi tipo multisplit a pompa di calore, composti da una motocondensante esterna e da più unità interne, forniti e posti in opera compresi di collegamento elettrico, quota parte di tubazioni in rame coibentato e tubazioni di scarico condensa	55678	
	- P. frigo 3.9 kW - 2 unità interne		- P. frigo 8 kW - 4 unità interne
	- P. frigo 5.2 kW - 3 unità interne		- P. frigo 10.2 kW - 5 unità interne
- P. frigo 6.8 kW - 4 unità interne	- P. frigo 12 kW - 6 unità interne		
TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)		83212.4	
COSTO D'INVESTIMENTO INIZIALE TOTALE [€]		982140.9	

PACCHETTO PROGETTUALE 3 - D		
INVOLUCRO TRASPARENTE	Descrizione	C.I. [€]
	Fornitura e posa in opera di serramenti con telaio in PVC e vetrocamera, con interposta intercapedine riempita di gas. $U_w \leq 1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$	79727.9
	Rimozione di infissi di qualsiasi natura, in qualunque piano di fabbricato	6344.52
	Fornitura e posa in opera di persiane avvolgibili con stecche in plastica, complete di accessori	30655.4
	Fornitura e posa in opera di copertura coibentata del cassonetto avente trasmittanza U_{sb} inferiore o uguale al valore del serramento	34336
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	181276.9
INVOLUCRO OPACO - PARETI VERTICALI	Descrizione	C.I. [€]
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda \leq 0.028 \text{ W/mK}$. Per isolamento termico a cappotto. Spessore: 10 cm	60940.6
	Materassino isolante composto da aerogel rinforzato con fibre di poliestere o polietilene tereftalato (PET), $\lambda = 0.0135 \text{ W/mK}$. Spessore: 1 cm	15825.4
	Realizzazione di isolamento termico a cappotto con lastre di qualsiasi dimensione e spessore, compreso il carico, lo scarico, il trasporto e il deposito a qualsiasi piano del fabbricato	89862.4
	Insufflaggio a secco in intercapedini di pareti interne e/o esterne, tramite schiuma poliuretanicca rigida a bassa densità a celle aperte ($\lambda = 0.035 \text{ W/mK}$), compreso ogni onere per dare l'opera finita a regola d'arte	96414.9
	Nolo di ponteggio tubolare esterno, comprensivo di piani di lavoro e sottopiani, compreso il trasporto, il montaggio, lo smontaggio, nonché ogni dispositivo necessario per la conformità alle norme di sicurezza vigenti	162749.7
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda \leq 0.028 \text{ W/mK}$. Per isolamento termico a cappotto. Spessore: 10 cm	60940.6
TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	510951.7	
INVOLUCRO OPACO - SUPERFICI ORIZZONTALI	Descrizione	C.I. [€]
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda = 0.024 \text{ W/mK}$. Per isolamento termico di pareti, coperture e solai. Spessori: 5 - 8 - 10 cm	41266.8
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda \leq 0.028 \text{ W/mK}$. Per isolamento termico di coperture e solai. Spessore: 10 cm	10048.9
	Membrana prefabbricata elastoplastomerica. Spessore: 4 mm	3523.6
	Realizzazione di isolamento termico a cappotto con lastre di qualsiasi dimensione e spessore, compreso il carico, lo scarico, il trasporto e il deposito a qualsiasi piano del fabbricato	98801.2
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	157671.7
IMPIANTO DI PRODUZIONE ACS	Descrizione	C.I. [€]
	Fornitura e posa in opera di scaldacqua a pompa di calore aria-acqua per la produzione di acqua calda sanitari. Capacità 200 - 270 l	76198.1
	Rimozione di scaldabagni elettrici e caldaie murali di potenza fino a 30 W, comprese le relative opere murarie e idrauliche	1638.4
	Carotaggi per perforazione di strutture edili, \varnothing foro 110 ÷ 150 mm	1959.7
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	95755.5

	Descrizione	C.I. [€]	
IMPIANTO DI RAFFRESCAMENTO	Condizionatori autonomi tipo monosplit a pompa di calore, composti da una motocondensante esterna e un'unità interna, forniti e posti in opera, compresi di collegamento elettrico, quota parte di tubazioni in rame coibentato e tubazioni di scarico condensa. P. frigo: 2.0 - 3.4 – 6.0 kW	12694.4	
	Condizionatori autonomi tipo multisplit a pompa di calore, composti da una motocondensante esterna e da più unità interne, fornite e poste in opera, comprese di collegamento elettrico, quota parte di tubazioni in rame coibentato e tubazioni di scarico condensa.	58665.3	
	- P. frigo 3.9 kW - 2 unità interne - P. frigo 5.2 kW - 3 unità interne - P. frigo 6.8 kW - 4 unità interne	- P. frigo 8 kW - 4 unità interne - P. frigo 10.2 kW - 5 unità interne	
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)		74233.7
IMPIANTO DI RISCALDAMENTO	Descrizione	C.I. [€]	
	Sistema emissivo a pannelli radianti a soffitto, incluso collegamento alla rete di distribuzione, collettori e teste elettrotermiche	552202.3	
	Rimozione di radiatori comprensiva di quota parte di tubo con deposito al piano cortile del materiale di risulta	689	
	Moduli contacalorie diretti, forniti e posati in opera	25752	
	Sistema di regolazione della temperatura ambiente. Centralina di regolazione e smartpoint di temperatura, compreso quant'altro necessario per rendere l'impianto completo e funzionante a regola d'arte	108330.6	
	Tubazioni di distribuzione in acciaio nero, fornite e posati in opera. Ø ¾", 1", 2" ½, 3"	15684.2	
	Isolamento termico delle tubazioni, fornito e posato in opera. Con coppelle in lana di roccia, sp. 5 cm - con guaina in elastomero espanso a celle chiuse, sp. 1.9 cm	15673	
	Serbatoio inerziale per acqua tecnica con copertura esterna in PVC e isolamento termico in schiuma poliuretanicca, fornito e posato in opera. Capacità di 2000 l	3214.9	
	Pompa di calore condensata ad aria ad inversione di ciclo, fornita e posata in opera, comprensiva di kit idronico. P. termica: tra 200 e 230 kWt - P. frigo: tra 175 e 200 kWf	45407.9	
	Sistema di contabilizzazione dell'energia termica, fornito e posato in opera in centrale termica	7444.5	
	Sistema di regolazione in centrale termica, fornito e posato in opera	10000	
	Elettropompa di potenza pari a 1.5 W, fornita e posata in opera	2813.6	
	Opere murarie ed elettriche accessorie	20000	
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)		968654.5
	COSTO D'INVESTIMENTO INIZIALE TOTALE [€]		1988543.9

PACCHETTO PROGETTUALE 4 - D		
INVOLUCRO TRASPARENTE	Descrizione	C.I. [€]
	Fornitura e posa in opera di serramenti con telaio in PVC e vetrocamera, con interposta intercapedine riempita di gas. $U_w \leq 1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$.	21260
	Rimozione di infissi di qualsiasi natura, in qualunque piano di fabbricato	38053.1
	Fornitura e posa in opera di persiane avvolgibili con stecche in plastica, complete di accessori	20414.7
	Fornitura e posa in opera di copertura coibentata del cassonetto avente trasmittanza U_{sb} inferiore o uguale al valore del serramento	6344.5
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	181276.9
INVOLUCRO OPACO - PARETI VERTICALI	Descrizione	C.I. [€]
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda \leq 0.028 \text{ W/mK}$. Per isolamento termico a cappotto. Spessore: 10 cm	60940.6
	Materassino isolante composto da aerogel rinforzato con fibre di poliestere o polietilene tereftalato (PET), $\lambda = 0.0135 \text{ W/mK}$. Spessore: 1 cm	15825.4
	Realizzazione di isolamento termico a cappotto con lastre di qualsiasi dimensione e spessore, compreso il carico, lo scarico, il trasporto e il deposito a qualsiasi piano del fabbricato	89862.4
	Insufflaggio a secco in intercapedini di pareti interne e/o esterne, tramite e schiuma poliuretanicca rigida a bassa densità a celle aperte ($\lambda = 0.035 \text{ W/mK}$), compreso ogni onere per dare l'opera finita a regola d'arte	96414.9
	Nolo di ponteggio tubolare esterno, comprensivo di piani di lavoro e sottopiani, compreso il trasporto, il montaggio, lo smontaggio, nonché ogni dispositivo necessario per la conformità alle norme di sicurezza vigenti	162749.7
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	510951.7
INVOLUCRO OPACO - SUPERFICI ORIZZONTALI	Descrizione	C.I. [€]
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda = 0.024 \text{ W/mK}$. Per isolamento termico di pareti, coperture e solai. Spessori: 5 - 8 - 10 cm	41266.8
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda \leq 0.028 \text{ W/mK}$. Per isolamento termico di coperture e solai. Spessore: 10 cm	10048.9
	Membrana prefabbricata elastoplastomerica. Spessore: 4 mm	3523.6
	Realizzazione di isolamento termico a cappotto con lastre di qualsiasi dimensione e spessore, compreso il carico, lo scarico, il trasporto e il deposito a qualsiasi piano del fabbricato	98801.2
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	157671.7
IMPIANTO DI PRODUZIONE ACS	Descrizione	C.I. [€]
	Fornitura e posa in opera di scaldacqua a pompa di calore aria-acqua per la produzione di acqua calda sanitaria. Capacità 200 - 270 l	76198.1
	Rimozione di scaldabagni elettrici e caldaie murali di potenza fino a 30 W, comprese le relative opere murarie e idrauliche	1638.4
	Carotaggi per perforazione di strutture edili, \varnothing foro 110 ÷ 150 mm	1959.7
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	95755.5
	Descrizione	C.I. [€]

IMPIANTO DI RAFFRESCAMENTO	Condizionatori autonomi tipo monosplit a pompa di calore, composti da una motocondensante esterna e un'unità interna, forniti e posti in opera, compresi di collegamento elettrico, quota parte di tubazioni in rame coibentato e tubazioni di scarico condensa. P. frigo: 2.0 - 3.4 – 6.0 kW	12694.4
	Condizionatori autonomi tipo multisplit a pompa di calore, composti da una motocondensante esterna e da più unità interne, fornite e poste in opera, comprese di collegamento elettrico, quota parte di tubazioni in rame coibentato e tubazioni di scarico condensa.	58665.3
	- P. frigo 3.9 kW - 2 unità interne - P. frigo 5.2 kW - 3 unità interne - P. frigo 6.8 kW - 4 unità interne	
	- P. frigo 8 kW - 4 unità interne - P. frigo 10.2 kW - 5 unità interne	
TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)		74233.7
IMPIANTO DI RISCALDAMENTO	Descrizione	C.I. [€]
	Sistema emissivo a pannelli radianti a soffitto, incluso collegamento alla rete di distribuzione, collettori e teste elettrotermiche	552202.3
	Rimozione di radiatori comprensiva di quota parte di tubo con deposito al piano cortile del materiale di risulta	689.04
	Moduli contacalorie diretti, forniti e posati in opera	25752
	Sistema di regolazione della temperatura ambiente. Centralina di regolazione e smartpoint di temperatura, compreso quant'altro necessario per rendere l'impianto completo e funzionante a regola d'arte	108330.6
	Tubazioni di distribuzione in acciaio nero, fornite e posati in opera. Ø ¾", 1", 2" ½, 3"	15684.2
	Isolamento termico delle tubazioni, fornito e posato in opera. Con coppelle in lana di roccia, sp. 5 cm - con guaina in elastomero espanso a celle chiuse, sp. 1.9 cm	15673
	Serbatoio inerziale per acqua tecnica con copertura esterna in PVC e isolamento termico in schiuma poliuretanicca, fornito e posato in opera. Capacità di 2000 l	3214.9
	Pompa di calore condensata ad aria ad inversione di ciclo, fornita e posata in opera, comprensiva di kit idronico. P. termica: tra 200 e 230 kWt - P. frigo: tra 175 e 200 kWf	45407.9
	Sistema di contabilizzazione dell'energia termica, fornito e posato in opera in centrale termica	7444.5
	Sistema di regolazione in centrale termica, fornito e posato in opera	10000
	Elettropompa di potenza pari a 1.5 W, fornita e posata in opera	2813.6
	Opere murarie ed elettriche accessorie	20000
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	
IMPIANTO FOTOVOLTAICO	Descrizione	C.I. [€]
	Fornitura e posa in opera di impianto fotovoltaico costituito da moduli in silicio monocristallino, comprensivo di sostegni, cablaggi, inverter bidirezionale e ogni onere per dare l'opera finita a regola d'arte. Potenza complessiva da 7a 20 kWp	28625.3
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	
COSTO D'INVESTIMENTO INIZIALE TOTALE [€]		2022894.3

PACCHETTO PROGETTUALE 5 - D		
INVOLUCRO TRASPARENTE	Descrizione	C.I. [€]
	Fornitura e posa in opera di serramenti con telaio in PVC e vetrocamera, con interposta intercapedine riempita di gas. $U_w \leq 1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$.	21260
	Rimozione di infissi di qualsiasi natura, in qualunque piano di fabbricato	38053.1
	Fornitura e posa in opera di persiane avvolgibili con stecche in plastica, complete di accessori	20414.7
	Fornitura e posa in opera di copertura coibentata del cassonetto avente trasmittanza U_{sb} inferiore o uguale al valore del serramento	6344.5
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	181276.9
INVOLUCRO OPACO - PARETI VERTICALI	Descrizione	C.I. [€]
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda \leq 0.028 \text{ W/mK}$. Per isolamento termico a cappotto. Spessore: 10 cm	60940.6
	Materassino isolante composto da aerogel rinforzato con fibre di poliestere o polietilene tereftalato (PET), $\lambda = 0.0135 \text{ W/mK}$. Spessore: 1 cm	15825.4
	Realizzazione di isolamento termico a cappotto con lastre di qualsiasi dimensione e spessore, compreso il carico, lo scarico, il trasporto e il deposito a qualsiasi piano del fabbricato	89862.4
	Insufflaggio a secco in intercapedini di pareti interne e/o esterne, tramite e schiuma poliuretanicca rigida a bassa densità a celle aperte ($\lambda = 0.035 \text{ W/mK}$), compreso ogni onere per dare l'opera finita a regola d'arte	96414.9
	Nolo di ponteggio tubolare esterno, comprensivo di piani di lavoro e sottopiani, compreso il trasporto, il montaggio, lo smontaggio, nonché ogni dispositivo necessario per la conformità alle norme di sicurezza vigenti	162749.7
TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	510951.7	
INVOLUCRO OPACO - SUPERFICI ORIZZONTALI	Descrizione	C.I. [€]
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda = 0.024 \text{ W/mK}$. Per isolamento termico di pareti, coperture e solai. Spessori: 5 - 8 - 10 cm	41266.8
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda \leq 0.028 \text{ W/mK}$. Per isolamento termico di coperture e solai. Spessore: 10 cm	10048.9
	Membrana prefabbricata elastoplastomerica. Spessore: 4 mm	3523.6
	Realizzazione di isolamento termico a cappotto con lastre di qualsiasi dimensione e spessore, compreso il carico, lo scarico, il trasporto e il deposito a qualsiasi piano del fabbricato	98801.2
TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	157671.7	
IMPIANTO DI RAFFRESCA- MENTO	Descrizione	C.I. [€]
	Condizionatori autonomi tipo monosplit a pompa di calore, composti da una motocondensante esterna e un'unità interna, forniti e posti in opera, compresi di collegamento elettrico, quota parte di tubazioni in rame coibentato e tubazioni di scarico condensa. P. frigo: 2.0 - 3.4 – 6.0 kW	12694.4
	Condizionatori autonomi tipo multisplit a pompa di calore, composti da una motocondensante esterna e da più unità interne, fornite e poste in opera, comprese di collegamento elettrico, quota parte di tubazioni in rame coibentato e tubazioni di scarico condensa.	58665.3

	- P. frigo 3.9 kW - 2 unità interne - P. frigo 5.2 kW - 3 unità interne - P. frigo 6.8 kW - 4 unità interne	- P. frigo 8 kW - 4 unità interne - P. frigo 10.2 kW - 5 unità interne	
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)		74233.7
IMPIANTO DI RI-SCALDAMENTO	Descrizione		C.I. [€]
	Sistema emissivo a pannelli radianti a soffitto, incluso collegamento alla rete di distribuzione, collettori e teste elettrotermiche		552202.3
	Rimozione di radiatori comprensiva di quota parte di tubo con deposito al piano cortile del materiale di risulta		689.04
	Moduli contacalorie diretti, forniti e posati in opera		25752.01
	Sistema di regolazione della temperatura ambiente. Centralina di regolazione e smartpoint di temperatura, compreso quant'altro necessario per rendere l'impianto completo e funzionante a regola d'arte		108330.6
	Tubazioni di distribuzione in acciaio nero, fornite e posati in opera. \varnothing ¾", 1", 2" ½, 3"		15684.2
	Isolamento termico delle tubazioni, fornito e posato in opera. Con coppelle in lana di roccia, sp. 5 cm - con guaina in elastomero espanso a celle chiuse, sp. 1.9 cm		15673
	Serbatoio inerziale per acqua tecnica con copertura esterna in PVC e isolamento termico in schiuma poliuretanicca, fornito e posato in opera. Capacità di 2000 l		3214.99
	Pompa di calore condensata ad aria ad inversione di ciclo, fornita e posata in opera, comprensiva di kit idronico. P. termica: tra 200 e 230 kWt - P. frigo: tra 175 e 200 kWf		45407.87
	Sistema di contabilizzazione dell'energia termica, fornito e posato in opera in centrale termica		7444.52
	Sistema di regolazione in centrale termica, fornito e posato in opera		10000
	Elettropompa di potenza pari a 1.5 W, fornita e posata in opera		2813.6
	Opere murarie ed elettriche accessorie		20000
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)		968654.48
IMPIANTO DI PRODUZIONE ACS	Descrizione		C.I. [€]
	Rimozione di scaldabagni elettrici e caldaie murali di potenza fino a 30 W, comprese le relative opere murarie e idrauliche		2093.58
	Tubazioni in acciaio zincato per la distribuzione e il ricircolo dell'acqua calda sanitaria, forniti e posati in opera (\varnothing 1", 2", 2" ½)		7074
	Isolamento termico delle tubazioni di distribuzione e ricircolo dell'acqua calda sanitaria, fornito e posato in opera. Con coppelle in lana di roccia, sp. 3 - 4 - 5 cm		2746.4
	Tubazioni multistrato in polietilene pre-coibentato per la distribuzione e il ricircolo dell'acqua calda sanitaria, forniti e posati in opera (\varnothing 1")		4784.64
	Elettropompa per ricircolo di acqua calda sanitaria, fornita e posata in opera. Q = 3.5 m ³ /h, H = 2.1 m		513.87
	Sistema di contabilizzazione dell'energia termica, fornito e posato in opera in centrale termica		7444.52
	Bollitore per la produzione di acqua calda sanitaria, completamente coibentato, fornito e posato in opera. Capacità di 2000 l		8072.94
	Miscelatore elettronico regolabile con funzione antilegionella		2103.12
Elettropompa di potenza pari a 1.5 W, fornita e posata in opera		2813.6	

	Contatori per acqua calda sanitaria a quadrante asciutto	2209.8
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	47827.75
IMPIANTO FOTVOLTAICO	Descrizione	C.I. [€]
	Fornitura e posa in opera di impianto fotovoltaico costituito da moduli in silicio monocristallino, comprensivo di sostegni, cablaggi, inverter bidirezionale e ogni onere per dare l'opera finita a regola d'arte. Potenza complessiva da 7a 20 kWp	28625.28
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	34350.34
COSTO D'INVESTIMENTO INIZIALE TOTALE [€]		1974966.5

PACCHETTO PROGETTUALE 6 - D		
INVOLUCRO TRASPARENTE	Descrizione	C.I. [€]
	Fornitura e posa in opera di serramenti con telaio in PVC e vetrocamera, con interposta intercapedine riempita di gas. $U_w \leq 1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$.	21260
	Rimozione di infissi di qualsiasi natura, in qualunque piano di fabbricato	38053.1
	Fornitura e posa in opera di persiane avvolgibili con stecche in plastica, complete di accessori	20414.7
	Fornitura e posa in opera di copertura coibentata del cassonetto avente trasmittanza U_{sb} inferiore o uguale al valore del serramento	6344.5
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	181276.9
INVOLUCRO OPACO - PARETI VERTICALI	Descrizione	C.I. [€]
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda \leq 0.028 \text{ W/mK}$. Per isolamento termico a cappotto. Spessore: 10 cm	60940.6
	Materassino isolante composto da aerogel rinforzato con fibre di poliestere o polietilene tereftalato (PET), $\lambda = 0.0135 \text{ W/mK}$. Spessore: 1 cm	15825.4
	Realizzazione di isolamento termico a cappotto con lastre di qualsiasi dimensione e spessore, compreso il carico, lo scarico, il trasporto e il deposito a qualsiasi piano del fabbricato	89862.4
	Insufflaggio a secco in intercapedini di pareti interne e/o esterne, tramite e schiuma poliuretanicca rigida a bassa densità a celle aperte ($\lambda = 0.035 \text{ W/mK}$), compreso ogni onere per dare l'opera finita a regola d'arte	96414.9
	Nolo di ponteggio tubolare esterno, comprensivo di piani di lavoro e sottopiani, compreso il trasporto, il montaggio, lo smontaggio, nonché ogni dispositivo necessario per la conformità alle norme di sicurezza vigenti	162749.7
TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	510951.7	
INVOLUCRO OPACO - SUPERFICI ORIZZONTALI	Descrizione	C.I. [€]
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda = 0.024 \text{ W/mK}$. Per isolamento termico di pareti, coperture e solai. Spessori: 5 - 8 - 10 cm	41266.8
	Pannelli isolanti in schiuma polyiso espansa rigida, $\lambda \leq 0.028 \text{ W/mK}$. Per isolamento termico di coperture e solai. Spessore: 10 cm	10048.9
	Membrana prefabbricata elastoplastomerica. Spessore: 4 mm	3523.6
	Realizzazione di isolamento termico a cappotto con lastre di qualsiasi dimensione e spessore, compreso il carico, lo scarico, il trasporto e il deposito a qualsiasi piano del fabbricato	98801.2
TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	157671.7	

IMPIANTO DI RI-SCALDAMENTO E RAFFRESCAMENTO	Descrizione	C.I. [€]
	Sistema emissivo a pannelli radianti a soffitto, incluso collegamento alla rete di distribuzione, collettori e teste elettrotermiche	552202.3
	Rimozione di radiatori comprensiva di quota parte di tubo con deposito al piano cortile del materiale di risulta	689
	Moduli contacalorie diretti, forniti e posati in opera	25752
	Sistema di regolazione della temperatura ambiente. Centralina di regolazione e smartpoint di temperatura e umidità, compreso quant'altro necessario per rendere l'impianto completo e funzionante a regola d'arte	108330.6
	Deumidificatori dell'aria ambiente, forniti e posati in opera. Q _i fino a 80 l/giorno	48158
	Tubazioni di distribuzione in acciaio nero, forniti e posati in opera. Ø ¾", ½", 1", 2" ½, 3"	22908.2
	Isolamento termico delle tubazioni, fornito e posato in opera. Con cospelle in lana di roccia, sp. 5 cm e con guaina in elastomero espanso a celle chiuse, sp. 1.9 cm	31056.2
	Serbatoio inerziale per acqua tecnica con copertura esterna in PVC e isolamento termico in schiuma poliuretana, fornito e posato in opera. Capacità di 1500 l	2444.3
	Pompa di calore condensata ad aria ad inversione di ciclo, fornita e posata in opera, comprensiva di kit idronico. P. termica: tra 170 e 200 kWt - P. frigo: tra 150 e 175 kWf	38374.5
	Sistema di contabilizzazione dell'energia termica, fornito e posato in opera in centrale termica	7444.5
	Sistema di regolazione in centrale termica, fornito e posato in opera	10000
	Elettropompa di potenza pari a 1.5 W, fornita e posata in opera	2813.6
	Opere murarie e elettriche accessorie	20000
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	1044207.9
IMPIANTO DI PRODUZIONE ACS	Descrizione	C.I. [€]
	Rimozione di scaldabagni elettrici e caldaie murali di potenza fino a 30 W, comprese le relative opere murarie e idrauliche	2093.58
	Tubazioni in acciaio zincato per la distribuzione e il ricircolo dell'acqua calda sanitaria, forniti e posati in opera (Ø 1", 2", 2" ½)	7074
	Isolamento termico delle tubazioni di distribuzione e ricircolo dell'acqua calda sanitaria, fornito e posato in opera. Con cospelle in lana di roccia, sp. 3 - 4 - 5 cm	2746.4
	Tubazioni multistrato in polietilene pre-coibentato per la distribuzione e il ricircolo dell'acqua calda sanitaria, forniti e posati in opera (Ø 1")	4784.64
	Elettropompa per ricircolo di acqua calda sanitaria, fornita e posata in opera. Q = 3.5 m ³ /h, H = 2.1 m	513.87
	Sistema di contabilizzazione dell'energia termica, fornito e posato in opera in centrale termica	7444.52
	Bollitore per la produzione di acqua calda sanitaria, completamente coibentato, fornito e posato in opera. Capacità di 2000 l	8072.94
	Miscelatore elettronico regolabile con funzione antilegionella	2103.12
	Elettropompa di potenza pari a 1.5 W, fornita e posata in opera	2813.6
	Contatori per acqua calda sanitaria a quadrante asciutto	2209.8

	Rimozione di scaldabagni elettrici e caldaie murali di potenza fino a 30 W, comprese le relative opere murarie e idrauliche	2093.58						
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	47827.75						
IMPIANTO DI VENTILAZIONE MECCANICA CONTROLLATA	Descrizione	C.I. [€]						
	Recuperatori di calore sensibile a flussi incrociati, completi di filtri sintetici posizionati sull'aspirazione dell'aria espulsa e sulla presa dell'aria esterna, forniti e posati in opera.	131316.3						
	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Q_{nom}: 100 – 160 m³/h</td> <td>Q_{nom}: 400 – 500 m³/h</td> </tr> <tr> <td>Q_{nom}: 200 m³/h</td> <td>Q_{nom}: 600 m³/h</td> </tr> <tr> <td>Q_{nom}: 300 – 350 m³/h</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Q _{nom} : 100 – 160 m ³ /h	Q _{nom} : 400 – 500 m ³ /h	Q _{nom} : 200 m ³ /h	Q _{nom} : 600 m ³ /h	Q _{nom} : 300 – 350 m ³ /h		
	Q _{nom} : 100 – 160 m ³ /h	Q _{nom} : 400 – 500 m ³ /h						
	Q _{nom} : 200 m ³ /h	Q _{nom} : 600 m ³ /h						
	Q _{nom} : 300 – 350 m ³ /h							
	Bocchette di mandata a doppia alettatura regolabili, complete di serranda di taratura e controtelaio, fornite e posate in opera. 200x100 mm	810						
	Griglie di ripresa aria con alette orizzontali fisse, complete di serranda di taratura e controtelaio, fornite e posate in opera. 200x200 mm	7021.2						
	Condotte rettilinee a sezione circolare in lamiera zincata per la realizzazione di reti aerauliche, fornite e posate in opera. Ø da 0 a 300 mm	32778.7						
Isolamento dei canali di distribuzione aria in lana minerale rivestita esternamente con lamierino in alluminio, fornito e posato in opera	35827.2							
Condotto flessibile in alluminio-poliestere, fornito e posato in opera. Ø _{nom} 102 mm	5874							
TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	266401.5							
IMPIANTO FOTOVOLTAICO	Descrizione	C.I. [€]						
	Fornitura e posa in opera di impianto fotovoltaico costituito da moduli in silicio monocristallino, comprensivo di sostegni, cablaggi, inverter bidirezionale e ogni onere per dare l'opera finita a regola d'arte. Potenza complessiva da 7a 20 kWp	28625.28						
	TOTALE (con maggiorazione del 20% per IVA e spese tecniche)	34350.34						
COSTO D'INVESTIMENTO INIZIALE TOTALE [€]		2242687.7						

Si riporta di seguito in Figura 52 un grafico riassuntivo dei costi d'investimento iniziale [€], suddivisi per ambito d'intervento, relativi ai 12 pacchetti progettuali considerati nell'analisi.

COSTI DI INVESTIMENTO INIZIALE [€]

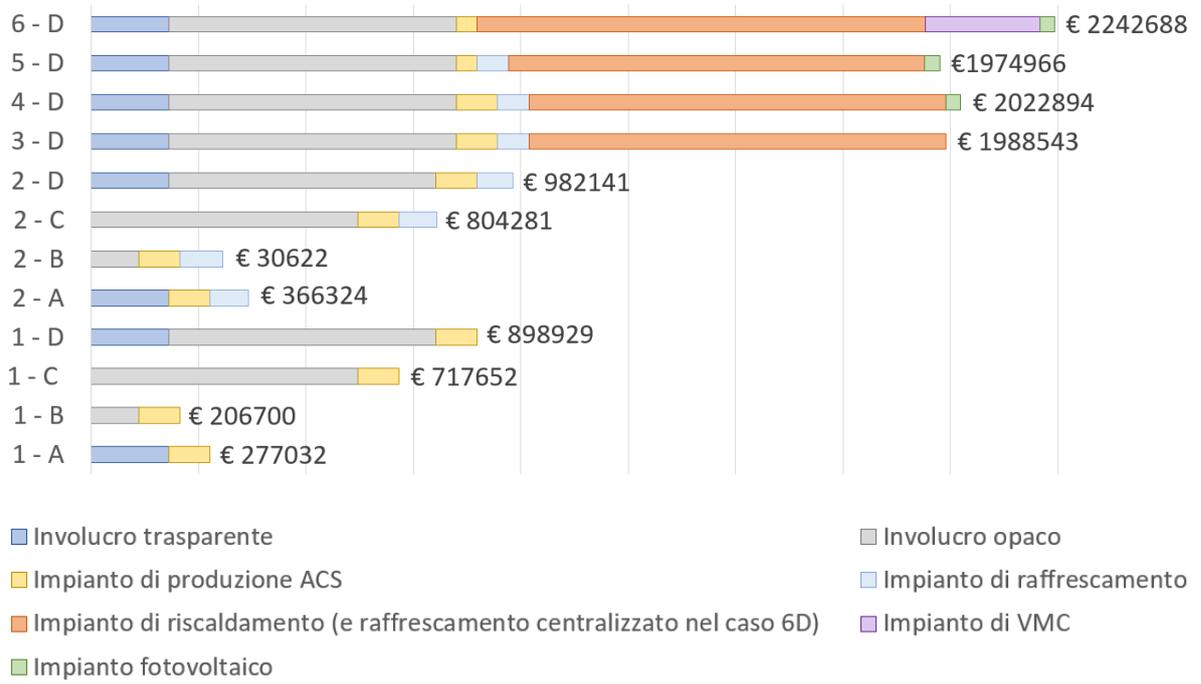


Figura 52 - Costi di investimento iniziali, suddivisi per ambito d'intervento, dei 12 pacchetti progettuali analizzati

9.2 COSTI DI ESERCIZIO

Si sono poi valutati i costi di esercizio relativi ai 12 pacchetti progettuali, durante il periodo di calcolo τ adottato, pari a 30 anni. In output alle simulazioni energetiche dell'edificio post-intervento si sono ottenuti, per i diversi servizi energetici del fabbricato, i consumi annuali dei vettori energetici utilizzati, che nelle casistiche analizzate sono energia termica da teleriscaldamento [kWh_t] ed energia elettrica [kWh_e].

I costi di esercizio sono calcolati, durante il ciclo di vita utile dell'edificio, come prodotto tra il consumo annuale di un dato vettore energetico [kWh_x/anno] ed il suo costo unitario [$\text{€}/\text{kWh}_x$], e vengono riferiti all'anno di inizio τ_0 mediante il fattore di attualizzazione $R_d(i)$. È importante sottolineare che nel calcolo non viene considerato solo il costo di fornitura del vettore energetico, ma anche i relativi oneri e costi connessi, compresi IVA e accise.

Per quanto riguarda il teleriscaldamento, la tariffa di tale vettore energetico è stata ricavata dal sito web di IREN³³ [41] che fornisce, in funzione del comune servito, una tabella aggiornata trimestralmente del prezzo unitario di vendita, in [$\text{€}/\text{kWh}_t$]. Nel caso di fornitura di teleriscaldamento per la produzione di acqua igienico-sanitaria, oltre alla quota consumo, in [$\text{€}/\text{kWh}_t$], è presente anche una quota annuale fissa, in [$\text{€}/\text{m}^3$], ovvero un costo unitario in funzione dei metri cubi di acqua annualmente riscaldati. In questa fase di valutazione preliminare, si è fatto riferimento alle opzioni di prezzo monomie, riportate di seguito per la fornitura di riscaldamento e di acqua igienico-sanitaria³⁴ nel comune di Torino. Nell'analisi si è applicata alle tariffe di vendita indicate da IREN un'aliquota IVA del 10% (aliquota agevolata per fornitura di teleriscaldamento a edifici a destinazione d'uso residenziale).

TARIFFA TELERISCALDAMENTO IREN – FORNITURA RISCALDAMENTO	
dal 1° gennaio 2024 – OPZIONE MONOMIA	
	Quota consumo [$\text{€}/\text{kWh}_t$]
Consumi fino a 406.977 kWh/anno	0.095958
Consumi oltre 406.977 kWh/anno	0.091738
TARIFFA TELERISCALDAMENTO IREN – FORNITURA DI ACQUA IGIENICO - SANITARIA	
dal 1° gennaio 2024 – OPZIONE MONOMIA	
	Quota consumo [$\text{€}/\text{kWh}_t$]
per tutti gli stabili	0.268276
per tutti i consumi	0.073802

Tabella 29 - Tariffe IREN teleriscaldamento [41]

Per quanto riguarda il costo dell'energia elettrica consumata a livello di singola unità immobiliare, in questa fase progettuale preliminare in cui non si hanno a disposizione i contratti di

³³ Uno dei principali operatori a livello italiano nel settore dei servizi energetici. Gestisce la rete di teleriscaldamento della città di Torino.

³⁴ La fornitura di acqua igienico-sanitaria tramite teleriscaldamento fa riferimento ai pacchetti progettuali 5-D e 6-D, dove si prevede la realizzazione di un impianto centralizzato di produzione di ACS.

fornitura relativi ai singoli condomini, si è fatto riferimento alla tariffa monoraria per utenze domestiche del servizio a maggior tutela, stabilita a livello nazionale da ARERA³⁵ e aggiornata trimestralmente [42]. Nel caso in esame il trimestre di riferimento è aprile – giugno 2024. Si riportano di seguito le varie componenti di prezzo dell’energia elettrica stabilite dall’Autorità, e le imposte che si sono tenute in conto nell’analisi (accise e IVA).

TARIFFA MONORARIA ENERGIA ELETTRICA			
1° aprile – 1° giugno 2024			
	Materia energia	Trasporto e gestione del contatore	Oneri di sistema
Quota energia [€/kWh _{el}]	0.07043	0.01220	0.038637
Quota fissa [€/anno]	58.4003	22.0800	-
Quota potenza ³⁶ [€/kW·anno]	-	22.3988	-
IVA E ACCISE			
	Materia energia		
Fornitura e abitazione di residenza - consumi fino a 150 kWh/mese	0		
Fornitura e abitazione di residenza - consumi oltre 150 kWh/mese	0.0227		
Fornitura di residenza con potenza impegnata oltre i 3 kW	0.0227		
IVA	10% ³⁷		

Tabella 30 - Tariffa monoraria ARERA energia elettrica ed imposte da considerare [42]

Per quanto riguarda, invece, il costo dell’energia elettrica per usi condominiali, si è utilizzato, in questa fase di progettazione preliminare, il prezzo unitario in [€/kWh_{el}], già comprensivo di imposte, ricavato dalla bolletta elettrica condominiale resa disponibile dall’amministratore, relativa all’anno solare 2022. Tale valore risulta pari a 0.14 [€/kWh_{el}].

Sono riassunti di seguito in Tabella 31 e Tabella 32 i costi di esercizio dei 12 pacchetti progettuali analizzati, relativi rispettivamente al teleriscaldamento e all’energia elettrica. Sono indicati, per ogni pacchetto progettuale, i consumi e i costi annui del vettore energetico considerato, e i costi complessivi, attualizzati all’anno di inizio τ_0 , durante l’intero periodo di calcolo.

³⁵ Autorità di Regolazione per Energia e Reti Ambiente.

³⁶ In via conservativa, si è considerata una potenza impegnata pari a 4.5 kW in tutti gli alloggi in cui è installato un sistema di raffrescamento autonomo, sia già esso presente allo stato di fatto che di nuova installazione.

³⁷ Aliquota agevolata per fornitura di energia elettrica per uso residenziale di privati.

Pacchetto progettuale	TELERISCALDAMENTO					
	Fornitura riscaldamento		Fornitura acqua igienico - sanitaria		Costo annuo totale [€/anno]	Costo totale attualizzato durante l'intero periodo di calcolo [€]
	Consumo annuo [kWh/anno]	Costo annuo [€/anno]	Consumo annuo [kWh/anno]	Costo annuo [€/anno]		
1	317272	33489.27	-	-	33489.27	579097.49
2	353749	37339.55	-	-	37339.55	645676.76
3	261322	27583.53	-	-	27583.53	476975.32
4	196599	20751.77	-	-	196599	358840.32
5	317272	33489.27	-	-	33489.27	579097.49
6	353749	37339.55	-	-	37339.55	645676.76
7	261322	27583.53	-	-	27583.53	476975.32
8	196599	20751.77	-	-	196599	358840.32
9	94758	10002.07	-	-	94758	172956.08
10	94758	10002.07	-	-	94758	172956.08
11	96263	10160.93	10419	1198.17	11359.09	196421.8
12	85336	9007.54	10419	1198.17	10205.71	176477.4

Tabella 31 – Costi di esercizio per il teleriscaldamento relativi ai 12 pacchetti progettuali analizzati

Pacchetto progettuale	ENERGIA ELETTRICA					
	Singole unità immobiliari ³⁸		Condominiale ³⁹		Costo annuo totale [€/anno]	Costo totale attualizzato durante l'intero periodo di calcolo [€]
	Consumo annuo [kWh/anno]	Costo annuo [€/anno]	Consumo annuo [kWh/anno]	Costo annuo [€/anno]		
1	31626.21	12109.88	2097	293.58	12403.5	214481.1
2	32189.21	11990.48	2006	280.84	12271.32	212196.1
3	32591.21	12099.63	1790	250.6	12350.23	213560.6
4	31570.21	11768.49	1631	228.34	11996.83	207449.55
5	39446.21	13966.96	2097	293.58	14260.54	246593.77
6	43842.21	14404.89	2010	281.4	14686.29	253955.77

³⁸ Energia elettrica utilizzata per i servizi energetici di produzione di acqua calda sanitaria, raffrescamento e ventilazione meccanica controllata realizzati a livello di singola unità immobiliare

³⁹ Energia elettrica ad uso condominiale per

7	44309.21	14511.67	1785	249.9	14761.57	255257.6
8	40031.21	13869.89	1631	228.34	14098.23	243787.13
9	39769.21	13823.61	12319	1724.66	15548.27	268861.12
10	39769.21	13823.61	8786	1230.04	15053.65	260308.14
11	20226.21	10288.66	13548	1896.72	12185.38	210709.94
12	24390.24	5764.23	30791	4310.74	10074.97	174216.77

Tabella 32 - Costi di esercizio per l'energia elettrica relativi ai 12 pacchetti progettuali analizzati

Sono riassunti di seguito in Figura 53 i costi di esercizio complessivi relativi ai 12 pacchetti progettuali analizzati, comprendenti sia i costi di energia elettrica che di teleriscaldamento annuali, opportunamente attualizzati e valutati durante l'intero periodo di calcolo considerato (30 anni).

COSTI DI ESERCIZIO COMPLESSIVI ATTUALIZZATI [€]

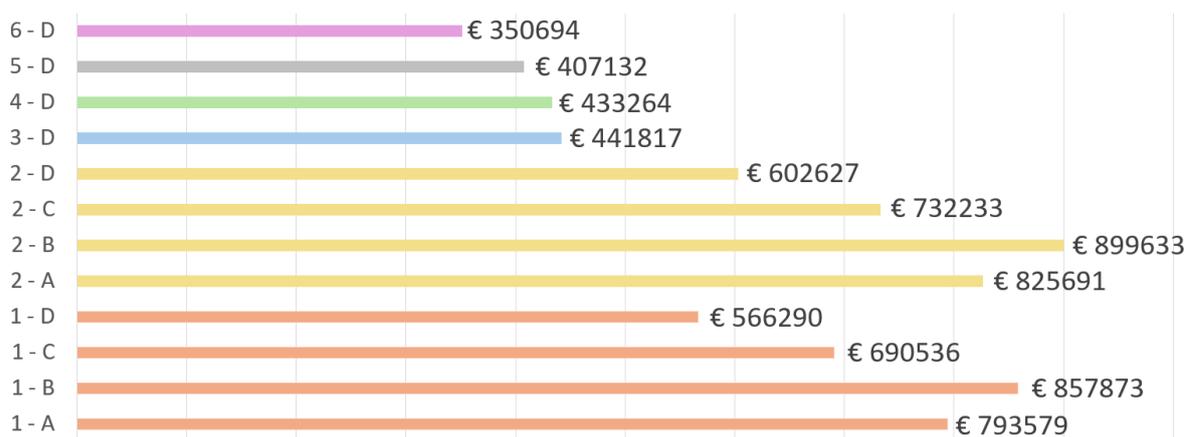


Figura 53 - Costi di esercizio attualizzati dei 12 pacchetti progettuali analizzati, relativi all'intero periodo di calcolo

9.3 COSTI DI MANUTENZIONE E SOSTITUZIONE

Due ulteriori voci di costo da considerare nell'analisi sono quelle di manutenzione periodica degli elementi edilizi di cui si compone il fabbricato, e di sostituzione degli stessi nel caso in cui la loro vita utile risulti più breve del ciclo di vita dell'edificio analizzato (periodo di calcolo τ pari a 30 anni).

All'allegato A della norma UNI EN 15459 - *Economical data for energy systems*, vengono forniti i dati relativi alla vita utile dei principali elementi impiantistici e al costo annuale per la loro manutenzione, espresso come percentuale di incidenza rispetto al costo di investimento iniziale. Gli eventuali costi di sostituzione vengono invece assunti pari a quelli di investimento iniziale del componente considerato. Sia i costi di manutenzione periodica che gli eventuali costi di sostituzione vengono poi opportunamente riferiti all'anno di inizio τ_0 , mediante il fattore di attualizzazione $R_d(i)$.

È importante sottolineare che, nel caso studio in esame, i costi di sostituzione considerati sono relativi unicamente ai componenti impiantistici, in quanto la vita utile considerata per i componenti d'involucro trasparente (30 anni) e opaco (50 anni) risulta superiore al periodo di calcolo assunto nell'analisi (30 anni).

Si riportano di seguito, per i 12 pacchetti progettuali analizzati, i costi di manutenzione periodica e di sostituzione dei componenti impiantistici, opportunamente attualizzati all'anno di inizio τ_0 , la loro vita utile e l'incidenza percentuale della manutenzione sul costo di investimento iniziale.

PACCHETTI PROGETTUALI						
1 - A		1 - B		1 - C		1 - D
Componente	C.I. [€]	Vita utile [anni]	% annua di manutenzione	Costo annuo di manutenzione [€/anno]	C_{tot} di manutenzione attualizzato [€]	C_{tot} di sostituzione attualizzato [€]
Scaldacqua in pompa di calore	91438	20	4%	3658	63246	41731
TOTALE					63246	41731

PACCHETTO PROGETTUALE 2 - A						
Componente	C.I. [€]	Vita utile [anni]	% annua di manutenzione	Costo annuo di manutenzione [€/anno]	C_{tot} di manutenzione attualizzato [€]	C_{tot} di sostituzione attualizzato [€]
Scaldacqua in pompa di calore	91438	20	4%	3658	63245.77	41731
Sistemi split di raffrescamento	89292	15	4%	3572	61761.52	49581
TOTALE					125008	91312

PACCHETTO PROGETTUALE 2 - B						
Componente	C.I. [€]	Vita utile [anni]	% annua di manutenzione	Costo annuo di manutenzione [€/anno]	C _{tot} di manutenzione attualizzato [€]	C _{tot} di sostituzione attualizzato [€]
Scaldacqua in pompa di calore	91438	20	4%	3658	63246	41731
Sistemi split di raffrescamento	99322	15	4%	3973	68700	55150
TOTALE					131945	96881

PACCHETTO PROGETTUALE 2 - C						
Componente	C.I. [€]	Vita utile [anni]	% annua di manutenzione	Costo annuo di manutenzione [€/anno]	C _{tot} di manutenzione attualizzato [€]	C _{tot} di sostituzione attualizzato [€]
Scaldacqua in pompa di calore	91438	20	4%	3658	63246	41731
Sistemi split di raffrescamento	94504	15	4%	3780	65367	52475
TOTALE					128613	94206

PACCHETTO PROGETTUALE 2 - D						
Componente	C.I. [€]	Vita utile [anni]	% annua di manutenzione	Costo annuo di manutenzione [€/anno]	C _{tot} di manutenzione attualizzato [€]	C _{tot} di sostituzione attualizzato [€]
Scaldacqua in pompa di calore	91438	20	4%	3658	63246	41731
Sistemi split di raffrescamento	83212	15	4%	3328	57556	46205
TOTALE					120802	87936

PACCHETTO PROGETTUALE 3 - D						
Componente	C.I. [€]	Vita utile [anni]	% annua di manutenzione	Costo annuo di manutenzione [€/anno]	C _{tot} di manutenzione attualizzato [€]	C _{tot} di sostituzione attualizzato [€]
Scaldacqua in pompa di calore	91438	20	4%	3658	63246	41731
Sistemi split di raffrescamento	74234	15	4%	2969	51346	41219
Pannelli radianti a soffitto	662643	30	2%	13253	229169	-
Sistemi di regolazione ambiente	129997	20	4%	5200	89916	59329
Contatori	30747	10	1%	307	5317	34804
Tubazioni di distribuzione –	37629	30	0.5%	188	3253	-

acqua tecnica						
Pompe di circolazione	3376	15	2%	68	1168	1875
Accumulo di acqua tecnica	3858	20	1%	39	667	1761
Pompa di calore	54489	20	4%	2180	37689	24868
TOTALE					481771	205587

PACCHETTO PROGETTUALE 4 - D						
Componente	C.I. [€]	Vita utile [anni]	% annua di manutenzione	Costo annuo di manutenzione [€/anno]	C _{tot} di manutenzione attualizzato [€]	C _{tot} di sostituzione attualizzato [€]
Scaldacqua in pompa di calore	91438	20	4%	3658	63246	41731
Sistemi split di raffrescamento	74234	15	4%	2969	51346	41219
Pannelli radianti a soffitto	662643	30	2%	13253	229169	-
Sistemi di regolazione ambiente	129997	20	4%	5200	89916	59329
Contatori	30747	10	1%	307	5317	34804
Tubazioni di distribuzione – acqua tecnica	37629	30	0.5%	188	3253	-
Pompe di circolazione	3376	15	2%	68	1168	1875
Accumulo di acqua tecnica	3858	20	1%	39	667	1761
Pompa di calore	54489	20	4%	2180	37689	24868
Fotovoltaico	34350	25	1%	344	5940	12855
TOTALE					487711	218472

PACCHETTO PROGETTUALE 5 - D						
Componente	C.I. [€]	Vita utile [anni]	% annua di manutenzione	Costo annuo di manutenzione [€/anno]	C _{tot} di manutenzione attualizzato [€]	C _{tot} di sostituzione attualizzato [€]
Sistemi split di raffrescamento	74234	15	4%	2969	51346	41219
Pannelli radianti a soffitto	662643	30	2%	13253	229169	-
Sistemi di regolazione ambiente	129997	20	4%	5200	89916	59329
Contatori – acqua tecnica e sanitaria	42332	10	1%	423	7320	47918

Tubazioni di distribuzione – acqua tecnica e sanitaria	55155	30	0.5%	276	4770	-
Pompe di circolazione	7369	15	2%	147	2549	4092
Accumulo di acqua tecnica	3858	20	1%	39	667	1761
Boiler per produzione di ACS	9688	20	1%	97	1675	4421
Pompa di calore	54489	20	4%	2180	37689	24868
Fotovoltaico	34350	25	1%	344	5940	12855
TOTALE					431040	196493

PACCHETTO PROGETTUALE 6 - D						
Componente	C.I. [€]	Vita utile [anni]	% annua di manutenzione	Costo annuo di manutenzione [€/anno]	C _{tot} di manutenzione attualizzato [€]	C _{tot} di sostituzione attualizzato [€]
Pannelli radianti a soffitto	662643	30	2%	13253	229169	-
Sistemi di regolazione ambiente	129997	20	4%	5200	89916	59329
Contatori – acqua tecnica e sanitaria	42332	10	1%	423	7320	47918
Tubazioni di distribuzione – acqua tecnica e sanitaria	82283	30	0.5%	411	7114	-
Pompe di circolazione	7369	15	2%	147	2549	4092
Accumulo di acqua tecnica	2933	20	1%	29	507	1339
Boiler per produzione di ACS	9688	20	1%	97	1675	4421
Pompa di calore	46049	20	4%	1842	21016	21016
Fotovoltaico	34350	25	1%	344	5940	12885
Recuperatore di calore VMC	157580	20	4%	6303	108995	8286
Bocchette VMC	18155	20	4%	726	12557	71917
Canali di distribuzione aria	89376	30	2%	1788	30910	-
TOTALE					528504	231203

9.4 VALORE RESIDUO

L'ultima voce di costo da considerare nell'analisi è il valore residuo degli elementi edilizi. Questo va calcolato per i componenti che hanno un ciclo di vita utile maggiore del periodo di calcolo adottato, o per quelli che, sostituiti, presentano una vita utile superiore all'arco temporale considerato.

Dividendo il costo di investimento iniziale, o quello di sostituzione, per gli anni di vita utile del componente, se ne ricava l'ammortamento annuo. Moltiplicando poi tale valore per le annualità residue, ovvero il numero di anni rimanenti prima che l'elemento debba essere sostituito o nuovamente sostituito, si ottiene il suo valore residuo rispetto al ciclo di vita utile dell'edificio. Questo deve poi essere opportunamente riferito all'anno di inizio τ_0 , mediante il fattore di attualizzazione $R_d(i)$.

Si riportano di seguito, per i 12 pacchetti progettuali analizzati, i valori residui dei diversi componenti d'involucro e impiantistici, la cui vita utile è stata ricavata dall'allegato A della norma UNI EN 15459 - *Economical data for energy systems*. La vita utile dell'involucro opaco è stata assunta pari a 50 anni, mentre quella dell'involucro trasparente pari a 30 anni, ovvero coincidente con il periodo di calcolo adottato.

PACCHETTI PROGETTUALI					
1 - A			2 - A		
Componente	C.I. [€]	Vita utile [anni]	annualità residue [anni]	ammortamento annuo [€/anno]	Valore residuo attualizzato [€]
Scaldacqua in pompa di calore	91438	20	10	4572	13554
TOTALE					13554

PACCHETTI PROGETTUALI					
1 - B			2 - B		
Componente	C.I. [€]	Vita utile [anni]	annualità residue [anni]	ammortamento annuo [€/anno]	Valore residuo attualizzato [€]
Scaldacqua in pompa di calore	91438	20	10	4572	13554
Involucro opaco	110944	50	20	2219	13156
TOTALE					26710

PACCHETTI PROGETTUALI					
	1 - C	1 - D	2 - C	2 - D	
Componente	C.I. [€]	Vita utile [anni]	annualità residue [anni]	ammortamento annuo [€/anno]	Valore residuo attualizzato [€]
Scaldacqua in pompa di calore	91438	20	10	4572	13554
Involucro opaco	621896	50	20	12437.92	73747
TOTALE					87301

PACCHETTO PROGETTUALE 3 - D					
Componente	C.I. [€]	Vita utile [anni]	annualità residue [anni]	ammortamento annuo [€/anno]	Valore residuo attualizzato [€]
Scaldacqua in pompa di calore	91438	20	10	4572	13554
Sistemi di regolazione ambiente	129997	20	10	6500	19269
Accumulo di acqua tecnica	3858	20	10	193	572
Pompa di calore	54489	20	10	2724	8077
Involucro opaco	668623	50	20	13372.47	79288
TOTALE					120760

PACCHETTO PROGETTUALE 4 - D					
Componente	C.I. [€]	Vita utile [anni]	annualità residue [anni]	ammortamento annuo [€/anno]	Valore residuo attualizzato [€]
Scaldacqua in pompa di calore	91438	20	10	4572	13554
Sistemi di regolazione ambiente	129997	20	10	6500	19269
Accumulo di acqua tecnica	3858	20	10	193	572
Pompa di calore	54489	20	10	2724	8077
Impianto fotovoltaico	34350	25	20	1374	8147
Involucro opaco	668623	50	20	13372	79288
TOTALE					128907

PACCHETTO PROGETTUALE 5 - D					
Componente	C.I. [€]	Vita utile [anni]	annualità residue [anni]	ammortamento annuo [€/anno]	Valore residuo attualizzato [€]
Sistemi di regolazione ambiente	129997	20	10	6500	19269
Accumulo di acqua tecnica	3858	20	10	193	572
Bollitore per produzione di ACS	9688	20	10	484	1436
Pompa di calore	54489	20	10	2724	8077
Impianto fotovoltaico	34350	25	20	1374	8147
Involucro opaco	668623	50	20	13372	79288
TOTALE					116789

PACCHETTO PROGETTUALE 6 - D					
Componente	C.I. [€]	Vita utile [anni]	annualità residue [anni]	ammortamento annuo [€/anno]	Valore residuo attualizzato [€]
Sistemi di regolazione ambiente	129997	20	10	6500	19269
Accumulo di acqua tecnica	3858	20	10	147	435
Bollitore per produzione di ACS	9688	20	10	484	1436
Pompa di calore	46049	20	10	2302	6826
Impianto fotovoltaico	34350	25	20	1374	8147
Bocchette VMC	18155	20	10	908	2691
Recuperatore di calore VMC	157580	20	10	7879	23358
Involucro opaco	668623	50	20	13372	79288
TOTALE					141450

9.5 COSTO GLOBALE DEI PACCHETTI PROGETTUALI ANALIZZATI

Si riassumono di seguito in Tabella 33 le diverse componenti del costo globale relativo ai 12 pacchetti progettuali analizzati. Il costo globale specifico, riportato in [€/m²], risulta il parametro economico utilizzato nell'analisi di cost-optimal condotta al paragrafo successivo.

	Costi Iniziali [€]	Costi di esercizio [€]	Costi di sostituzione e manutenzione [€]	Valore residuo [€]	Costo Globale [€]	Costo Globale specifico [€/m ²]
1 - A	277032	793579	104977	13554	1162034	315.75
1 - B	206700	857873	104977	26710	1142840	310.54
1 - C	717652	690536	104977	87301	1425864	387.44
1 - D	898929	566290	104977	87301	1482894	402.94
2 - A	366324	825691	216319	13554	1394781	379
2 - B	306022	899633	228826	26710	1407771	382.53
2 - C	812156	732233	222819	87301	1679907	456.47
2 - D	982141	602627	208738	87301	1706206	463.62
3 - D	1988544	441817	687358	120760	2996959	814.35
4 - D	2022894	433264	706183	128907	3033435	824.26
5 - D	1974967	407132	627533	116789	2892842	786.06
6 - D	2242688	350694	759706	141450	3211638	872.68

Tabella 33 - Componenti del costo globale relativo ai 12 pacchetti progettuali analizzati

10 COST-OPTIMAL ANALYSIS

Nel presente capitolo viene effettuata l'analisi di cost-optimal, sulla base degli indicatori di prestazione energetica ed economica delle 12 combinazioni progettuali precedentemente calcolati, con l'obiettivo di determinare la strategia di intervento ottimale, che consenta di massimizzare la performance energetico – economica dell'edificio.

10.1 GRAFICO DI COST-OPTIMAL

Una volta determinato il costo globale [€/m²] e l'indice di prestazione energetica totale globale EP_{gl,tot} [kWh/m²·anno] dei pacchetti progettuali analizzati, per confrontare tra loro i diversi scenari di intervento si procede all'elaborazione del grafico di cost-optimal, dove sull'asse delle ascisse è rappresentata l'energia primaria, in [kWh/m²·anno], sull'asse delle ordinate il costo globale, in [€/m²], e i pacchetti progettuali sono riportati come punti all'interno di tale grafico. Collegando tra loro i punti inferiori, ovvero quelli caratterizzati da un costo globale minore, si ricava la curva di costo specifica (cost - curve), il cui punto di minimo corrisponde al cost optimal level. Nel caso in cui più pacchetti progettuali presentino costi globali molto simili, il livello ottimale in funzione dei costi ricade su quello caratterizzato dal minor consumo di energia primaria.

Per facilitare l'analisi si riporta di seguito una tabella riassuntiva degli indici di prestazione energetica ed economica calcolati per i 12 pacchetti progettuali considerati.

Pacchetto progettuale	EP _{gl,tot} [kWh/m ² ·anno]	C _{gl} [€/m ²]
1 - A	108.9	315.8
1 - B	118.2	310.5
1 - C	95.6	387.4
1 - D	78.9	402.9
2 - A	114.1	379
2 - B	126	382.5
2 - C	103	456.5
2 - D	84.5	463.6
3 - D	73.9	814.4
4 - D	71.6	824.3
5 - D	62.5	786
6 - D	72.7	872.7

Tabella 34 - Indici di prestazione energetica ed economica dei 12 pacchetti progettuali analizzati

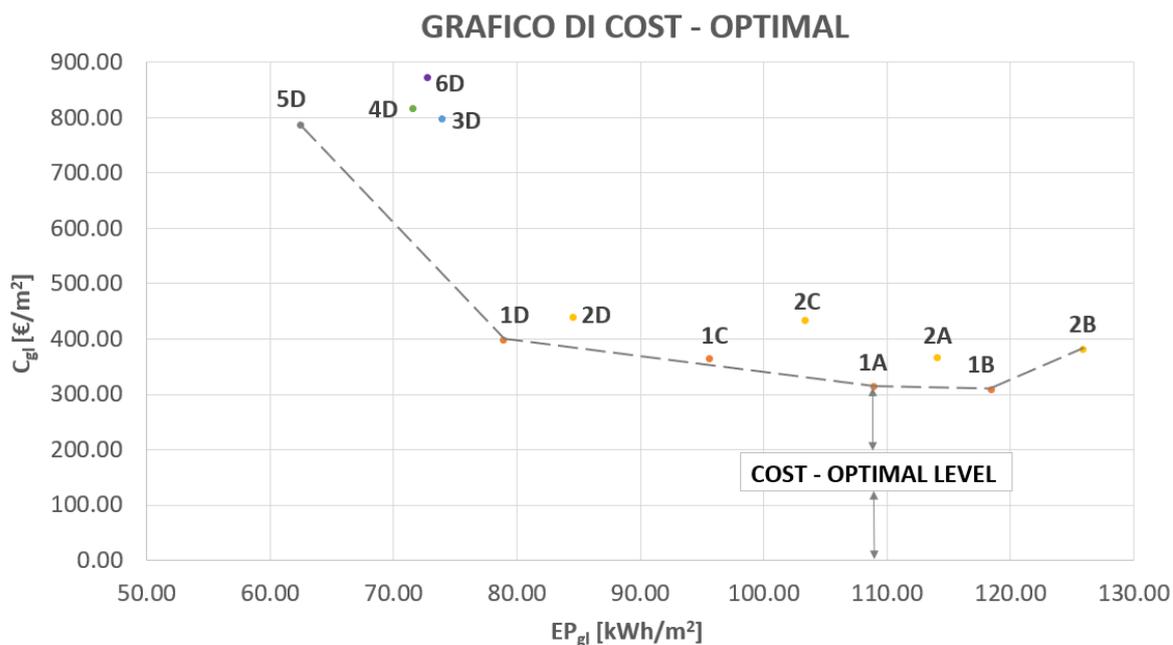


Figura 54 - Grafico di Cost - Optimal

Analizzando il grafico sopra riportato è possibile effettuare alcune considerazioni.

Da un punto di vista della performance energetica, si riscontra che le varianti progettuali 3, 4, 5 e 6-D consentono di ridurre in maniera significativa il fabbisogno di energia primaria dell'edificio allo stato di fatto, pari a 129 [kWh/m²·anno], di un valore compreso tra il 40% (soluzioni 3,4, e 6D) e il 50% (soluzione 5-D). Tale risultato è dovuto principalmente alle scelte di intervento relative all'involucro opaco e trasparente: si nota infatti come anche le soluzioni progettuali 1-D e 2-D, che prevedono una riqualificazione globale dell'involucro edilizio, consentono riduzioni analoghe del fabbisogno energetico dell'edificio, rispettivamente pari al 40% e al 35%.

Da un'analisi d'insieme del grafico di cost-optimal, risulta chiaro come i pacchetti progettuali 3, 4, 5 e 6-D, che prevedono la realizzazione di interventi impiantistici sempre più complessi e invasivi per l'utenza, non risultano convenienti da un punto di vista economico, in quanto presentano costi globali, compresi tra 780 e 880 [€/m²], nettamente superiori a quelli relativi alle altre varianti progettuali, compresi invece tra 300 e 460 [€/m²]. In questo caso studio, l'installazione di un impianto fotovoltaico a servizio delle utenze elettriche comuni, presente nelle soluzioni 4, 5 e 6-D, non influenza in maniera determinante la prestazione energetica dell'edificio; ciò è dovuto al fatto che, a causa della ridotta superficie utile disponibile in copertura, l'impianto installato non è in grado di produrre una quantità di energia sufficiente a coprire in maniera determinante i consumi elettrici dell'edificio, relativi alla pompa di calore centralizzata di nuova installazione e agli ausiliari di centrale.

È possibile, inoltre, notare che le soluzioni d'intervento 2-A, 2-B, 2-C e 2-D risultano meno performanti da un punto di vista energetico-economico in confronto alle rispettive alternative

progettuali 1-A, 1-B, 1-C e 1-D. Questo è dovuto al fatto che la soluzione impiantistica 2 rispetto alla 1 prevede, per ragioni di comfort termico estivo, l'installazione di nuovi sistemi autonomi di raffrescamento dove non presenti, che comportano l'insorgenza di consumi energetici e costi aggiuntivi. Prediligere il comfort termo-igrometrico all'interno dei singoli alloggi a discapito di un aumento dei costi globali e dei consumi energetici è una scelta che dovrà essere presa dai singoli condomini.

Analizzando la curva di costo specifica, rappresentata in Figura 54 tramite linea grigia tratteggiata, è possibile individuare il cost – optimal level, rappresentato nel caso studio dalla variante progettuale 1-A (sostituzione dei serramenti originali del fabbricato e introduzione negli alloggi di scaldacqua autonomi in pompa di calore per la produzione di ACS). Tale soluzione, però, caratterizzata da un $EP_{gl,tot}$ pari a 108.9 [kWh/m²·anno], consente di ridurre il fabbisogno di energia primaria dell'edificio solo del 16% rispetto alla condizione pre-intervento.

Confrontando tale variante con il pacchetto d'interventi 1-D (riqualificazione globale dell'involucro edilizio e introduzione negli alloggi di scaldacqua autonomi in pompa di calore per la produzione di ACS) si nota che, a fronte di un aumento del costo globale pari a 87 [€/m²], si raggiunge un livello di prestazione energetica molto più elevato ($EP_{gl,tot}$ pari a 78.9 [kWh/m²·anno]), che riduce il fabbisogno di energia primaria dell'edificio del 40% rispetto alla condizione pre-intervento.

Nell'ottica di un caso studio reale procedere con la variante progettuale 1-D rispetto a quella 1-A consente di intervenire in maniera globale sull'involucro opaco e trasparente del fabbricato, andando ad abbattere le dispersioni termiche del condominio e ponendo così le giuste basi per la futura realizzazione di interventi di retrofit relativi agli impianti tecnici, alcuni dei quali necessari, come la sostituzione degli attuali sistemi emissivi radianti a soffitto originari dell'edificio, ormai vetusti e obsoleti, la realizzazione di nuove linee di distribuzione del fluido termovettore e l'introduzione di una termoregolazione e contabilizzazione separata dei consumi a livello di singola unità immobiliare.

10.2 ANALISI DI SENSITIVITA'

Come suggerito dal Regolamento Delegato CE n. 244/2012 [5], per valutare la stabilità dei risultati ottenuti nell'analisi di cost-optimal è necessario effettuare un'analisi di sensitività sui parametri il cui andamento può avere un impatto significativo sul risultato finale.

In particolare, nel caso studio in esame sono stati effettuati tre tipi di analisi di sensitività:

- variazione del tasso di sconto reale r (3.67% e 2.45%)
- riduzione del periodo di calcolo τ (20 anni, 10 anni)
- introduzione degli incentivi fiscali ad oggi disponibili a livello nazionale nel calcolo dei costi di investimento iniziale (Ecobonus e Bonus Casa).

10.2.1 Variazione del tasso di sconto reale

Nell'analisi di sensitività si sono considerati due differenti valori del tasso di sconto reale r : uno pari al 3.67%, corrispondente al tasso di interesse Euribor⁴⁰ a 12 mesi medio relativo all'anno 2024, ed uno pari al 2.45%, corrispondente al valore di rendimento di un Btp (Buono del Tesoro Poliennale)⁴¹ con scadenza trentennale (1° settembre 2050). Si riportano di seguito in Figura 55 i risultati ottenuti.

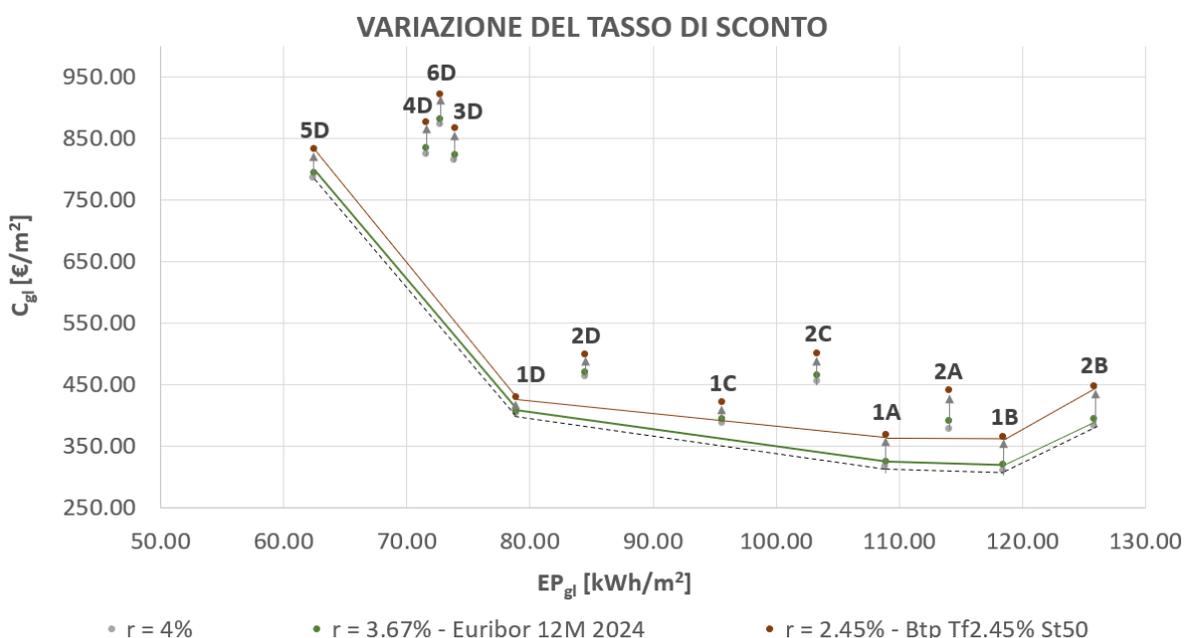


Figura 55 - Analisi di sensitività - variazione del tasso di sconto reale r

⁴⁰ L'Euribor (EURO Inter Bank Offered Rate) corrisponde al tasso interbancario di riferimento calcolato giornalmente dalla European Money Markets Institute come media dei tassi d'interesse che le primarie banche europee applicano una all'altra nelle transizioni finanziarie. I tassi Euribor vengono generalmente distinti in base alla loro durata: 1 mese, 3 mesi, 6 mesi, 12 mesi.

⁴¹ I Buoni del Tesoro Poliennali sono titoli di credito a medio-lungo termine emessi dal Tesoro con scadenza a 3, 5, 7, 10, 15 e 30 anni.

Dal grafico sopra riportato si nota come una riduzione del tasso di sconto reale r porta ad un aumento del costo globale relativo ai pacchetti di intervento analizzati, che risulta più significativo per le soluzioni progettuali caratterizzate da costi di esercizio maggiori (ciò è visibile maggiormente nel caso di adozione di un tasso di sconto pari al 2.45%, che risulta più distante da quello del 4% utilizzato nell'analisi originale). In entrambi i casi, sia applicando un tasso di sconto del 3.67% che del 2.45%, l'andamento complessivo del grafico rimane invariato, e il livello di cost-optimal si conferma essere quello relativo alla soluzione progettuale 1-A.

10.2.2 Riduzione del periodo di calcolo

Si è poi considerata la riduzione del periodo di calcolo τ utilizzato nell'analisi (30 anni), ponendolo pari a 20 e a 10 anni. I risultati ottenuti si riportano di seguito in Figura 56.

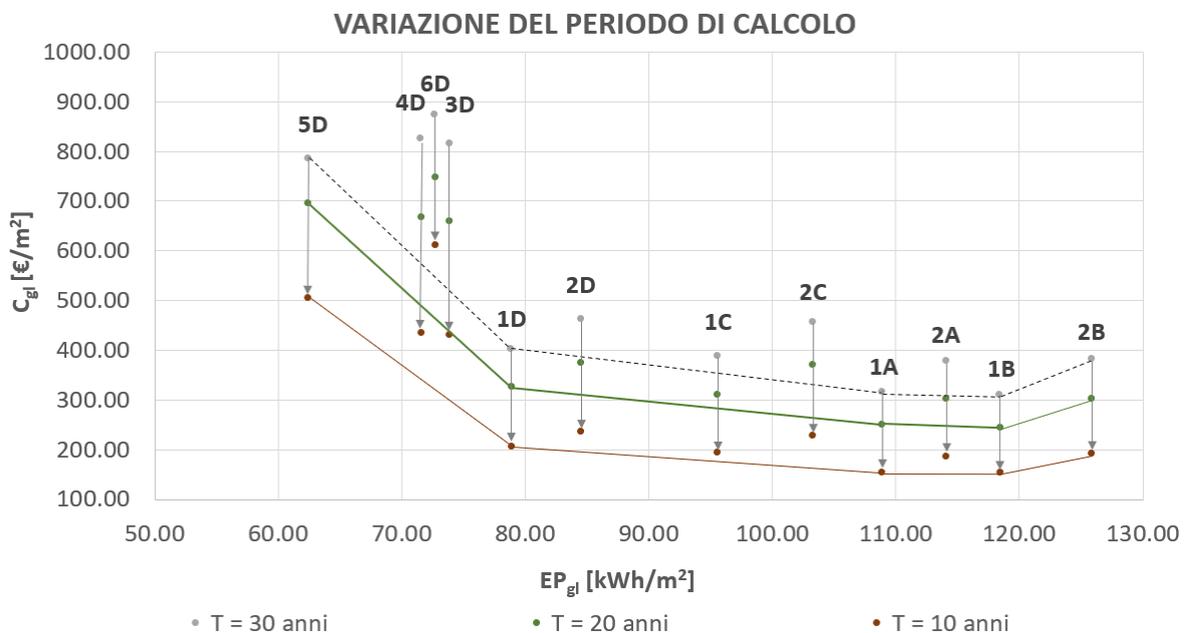


Figura 56 - Analisi di sensitività - variazione del periodo di calcolo

Come si nota dal grafico sopra riportato, la riduzione del ciclo di vita utile dell'edificio rispetto a quello utilizzato nell'analisi originale comporta una riduzione significativa dei costi globali dei pacchetti progettuali analizzati. Ciò è dovuto al fatto che, considerando un periodo di calcolo più breve, i componenti edilizi da sostituire sono pochi, ed il loro valore residuo risulta maggiore. In entrambi i casi, sia considerando un periodo di calcolo τ pari a 20 anni che a 10 anni, l'andamento complessivo del grafico rimane invariato, e il livello di cost-optimal si conferma essere quello relativo alla soluzione progettuale 1-A.

10.2.3 Introduzione degli incentivi fiscali

Nell'ultima analisi di sensitività condotta si è tenuto conto degli incentivi fiscali ad oggi disponibili a livello nazionale per gli interventi di riqualificazione energetica degli edifici. In particolare, i meccanismi di incentivazione considerati nella valutazione del costo globale sono l'Ecobonus e il Bonus Casa, le cui caratteristiche vengono riassunte di seguito in Tabella 35⁴². Tali meccanismi di incentivazione risultano cumulabili nel caso in cui vengano utilizzati per interventi relativi a componenti d'involucro e impiantistici differenti. In questa fase di progettazione preliminare si è ipotizzato che in ognuna delle casistiche d'intervento considerate tutti i proprietari delle diverse unità immobiliari abbiano la capienza fiscale per usufruire degli incentivi disponibili.

ECOBONUS	BONUS CASA
<u>Scadenza temporale</u> 31 dicembre 2024	
<u>Beneficiari</u> Sia edifici residenziali che non residenziali	<u>Beneficiari</u> Solo edifici residenziali ⁴³
<u>Interventi a cui spetta l'agevolazione fiscale</u> <ul style="list-style-type: none"> • interventi di efficienza energetica relativi all'involucro edilizio e agli impianti tecnici, sia sulle singole unità immobiliari che sulle parti comuni degli edifici condominiali 	<u>Interventi a cui spetta l'agevolazione fiscale</u> <ul style="list-style-type: none"> • lavori sulle singole unità immobiliari di manutenzione straordinaria, ristrutturazione edilizia, restauro e risanamento conservativo • lavori sulle parti comuni di edifici condominiali di manutenzione ordinaria e straordinaria, ristrutturazione edilizia, restauro e risanamento conservativo
<u>Meccanismo di incentivazione</u> Detrazione fiscale in 10 anni dall'IRPEF ⁴⁴ o dall'IRES ⁴⁵ di una parte dei costi sostenuti	<u>Meccanismo di incentivazione</u> Detrazione fiscale in 10 anni dall'IRPEF di una parte dei costi sostenuti
<u>% di detrazione fiscale e limiti di spesa</u> per gli interventi d'interesse nel caso studio	<u>% di detrazione fiscale e limiti di spesa</u> per gli interventi d'interesse nel caso studio

⁴² Quanto riportato in tabella è stato ricavato dalla Guida ANIT sull'Ecobonus (anno 2022) [45] e dalla guida dell'Agenzia delle entrate relativa al Bonus Casa (anno 2022) [44].

⁴³ Lo studio dentistico e il locale commerciale a piano terreno, essendo unità immobiliari ad uso non residenziale, non possono usufruire del Bonus Casa, né per gli interventi relativi alla singola unità immobiliare né per quelli relativi alle parti condominiali comuni.

⁴⁴ Imposta sul Reddito delle Persone Fisiche.

⁴⁵ Imposta sul reddito della società.

Singole unità immobiliari

- Detrazione fiscale del 50% per la sostituzione di serramenti e infissi – spesa massima detraibile: 60000 € per unità immobiliare

$$U_{w, \text{nuovi serramenti}} \leq 1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$$

come indicato all'allegato E del Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico 6 agosto 2020 [43] per gli edifici situati in fascia climatica E

- Detrazione fiscale del 65% per l'installazione di scaldacqua in pompa di calore per produzione di acqua calda sanitaria - spesa massima detraibile: 30000 € per unità immobiliare

$$\text{COP}_{\text{scaldacqua in Pdc}} > 2.6$$

come indicato all'allegato 2 del DLgs 28/11

- Detrazione fiscale del 65% per l'installazione di dispositivi di controllo da remoto degli impianti - spesa massima detraibile: 15000 € per unità immobiliare (intervento ammissibile solo in edifici residenziali)

Parti condominiali comuni

- Detrazione fiscale del 65% per l'isolamento termico delle parti comuni opache con incidenza inferiore al 25% della superficie disperdente - spesa massima detraibile: 60000 € per unità immobiliare

$$U_{\text{copertura, post-intervento}} \leq 0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{\text{pavimento, post-intervento}} \leq 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{\text{parete perimetrale, post-intervento}} \leq 0.23 \text{ W/m}^2\text{K}$$

come indicato all'allegato E del Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico 6 agosto 2020 [43] per gli edifici situati in fascia climatica E

Singole unità immobiliari

- Detrazione fiscale del 50% delle spese sostenute per:

- l'installazione di sistemi autonomi di raffrescamento multisplit
- l'installazione di sistemi emissivi radianti a soffitto
- l'installazione di nuovi contatori individuali del calore
- l'installazione di sistemi di ventilazione meccanica controllata

con una spesa massima ammissibile pari a 96000 € per unità immobiliare

Parti condominiali comuni

- Detrazione fiscale del 50% delle spese sostenute per:

- la sostituzione di serramenti e infissi afferenti ai vani scala non riscaldati⁴⁶
- gli interventi di manutenzione straordinaria relativi all'impianto di riscaldamento centralizzato (realizzazione di nuove linee di distribuzione del fluido termovettore, installazione di una nuova pompa di calore centralizzata aria – acqua etc.)
- gli interventi di manutenzione straordinaria relativi all'impianto di produzione di acqua calda sanitaria (centralizzazione dell'impianto di produzione ACS)
- gli interventi di manutenzione straordinaria relativi all'impianto di raffrescamento estivo (centralizzazione dell'impianto di climatizzazione estiva)
- l'installazione di un impianto fotovoltaico in copertura

con una spesa massima ammissibile pari a 96000 € per unità immobiliare

⁴⁶ Non è possibile usufruire dell'Ecobonus per i serramenti relativi ai vani scala in quanto risultano ambienti non climatizzati.

- Detrazione fiscale del 70% per l'isolamento termico delle parti comuni opache con incidenza superiore al 25% della superficie disperdente - spesa massima ammissibile: 40000 euro per unità immobiliare

$$U_{\text{coperture}} \leq 0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{\text{pavimenti}} \leq 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{\text{pareti perimetrali}} \leq 0.23 \text{ W/m}^2\text{K}$$

come indicato all'allegato E del Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico 6 agosto 2020 [43] per gli edifici situati in fascia climatica E

Tabella 35 - Caratteristiche dei bonus fiscali considerati nell'analisi di sensitività [44] [45]

La spesa complessivamente detraibile dai costi di investimento iniziale calcolata per ognuno dei pacchetti progettuali analizzati è stata poi suddivisa in 10 anni, opportunamente riferita all'anno di inizio τ_0 mediante il fattore di attualizzazione $R_d(i)$ e sottratta al costo globale calcolato nell'analisi economica originale. I risultati ottenuti sono riportati di seguito in Figura 57.

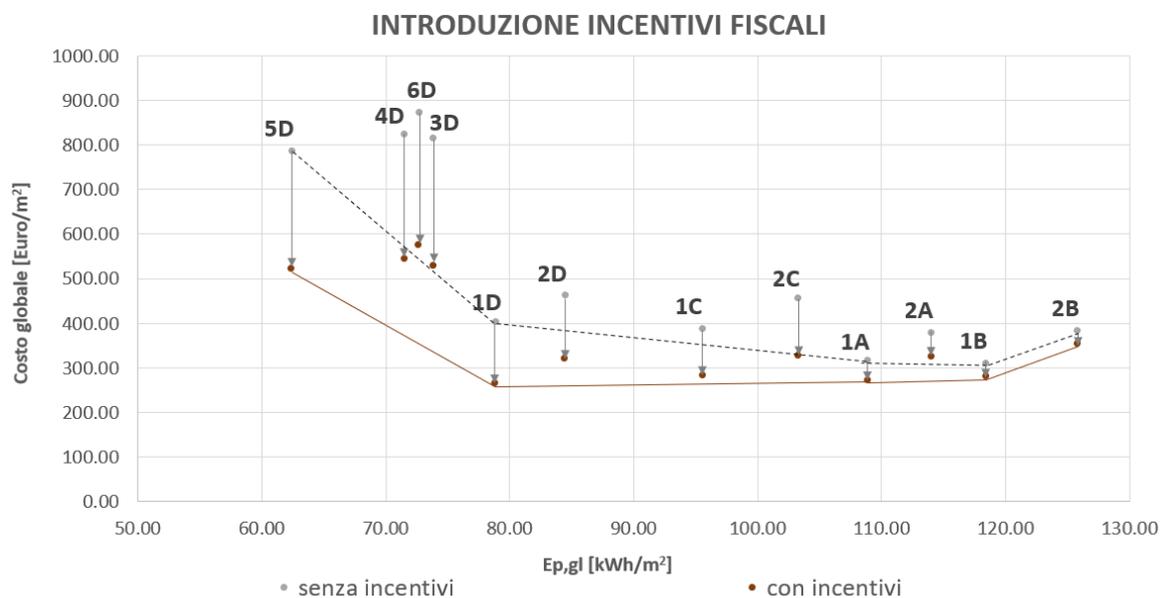


Figura 57 - Analisi di sensitività – introduzione degli incentivi fiscali

Come si nota dal grafico sopra riportato, l'introduzione degli incentivi fiscali nell'analisi di cost-optimal comporta una riduzione del costo globale tanto maggiore quanto più la soluzione progettuale considerata risulta energeticamente performante: si ha, infatti, che le alternative progettuali 3,4,5 e 6-D sono quelle che beneficiano maggiormente delle detrazioni fiscali, seguite dalle soluzioni 1 e 2-D. Ciò è dovuto al fatto che, nel caso studio in esame, gli scenari a prestazione energetica maggiore sono quelli caratterizzati da interventi di retrofit che

interessano in maniera sempre più globale i componenti di involucro edilizio, gli impianti tecnici a servizio del fabbricato e l'utilizzo di fonti rinnovabili, presentando di conseguenza dei costi di investimento iniziale molto alti, che possono essere ridotti quindi in maniera significativa dall'utilizzo degli incentivi fiscali disponibili a livello nazionale.

Ad esempio, nell'alternativa progettuale 6-D, che risulta la più completa da un punto di vista degli interventi progettuali previsti, l'accesso all'Ecobonus e al Bonus casa consente di ridurre del 70% il costo iniziale dell'isolamento termico dell'edificio, del 50% il costo relativo all'installazione di nuovi serramenti nelle unità immobiliari e nei vani scala, del 50% quello relativo all'installazione dell'impianto fotovoltaico in copertura e sempre del 50% il costo di tutti i lavori di manutenzione straordinaria relativi agli impianti tecnici di riscaldamento, raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria, realizzati a livello di singola unità immobiliare o parti condominiali comuni. Ciò comporta una riduzione del costo globale complessivo del 35%: si passa infatti da un valore di 872.7 [€/m²] a uno di 575.32 [€/m²]. Un ragionamento analogo può essere condotto per tutte le altre varianti progettuali caratterizzate da una performance energetica elevata.

Le soluzioni energeticamente meno performanti, che prevedono invece interventi progettuali parziali sia da un punto di vista dell'involucro edilizio che degli impianti tecnici, sono caratterizzate da costi d'investimento iniziale più ridotti, e traggono minor beneficio dall'utilizzo degli incentivi fiscali disponibili. Ad esempio, nel caso del pacchetto progettuale 2-B, l'accesso all'Ecobonus e al Bonus Casa consente una riduzione del costo globale complessivo del 7%, passando da un valore di 382.5 [€/m²] a uno di 352.8 [€/m²].

Analizzando il grafico di cost-optimal sopra riportato che tiene conto degli incentivi fiscali si nota come, a differenza di quanto avviene in quello originale, il livello di costo ottimale è rappresentato dal pacchetto progettuale 1-D, che presenta un valore di costo globale analogo alla variante 1-A (rispettivamente pari a 263.4 e 272.1 [€/m²]), ma una performance energetica nettamente superiore ($EP_{gl,tot}$ 1-A: 108.9 - $EP_{gl,tot}$ 1-D: 78.89 [kWh/m²·anno]).

L'analisi di sensitività condotta non conferma quindi il cost-optimal level ottenuto in precedenza, corrispondente alla soluzione progettuale 1-A, ma mette in luce quanto l'utilizzo degli incentivi fiscali possa influire sulla performance economica relativa agli interventi di riqualificazione energetica di un edificio, abbattendone i costi iniziali e favorendo la realizzazione di quelli che coinvolgono in maniera globale l'edificio e i suoi impianti tecnici, che consentono di raggiungere prestazioni energetiche più elevate.

11 CONCLUSIONI

La presente tesi ha affrontato come argomento l'applicazione della metodologia di cost-optimal ad un caso studio reale, con lo scopo di confrontare, in fase di progettazione preliminare, le prestazioni energetiche ed economiche ottenute in diversi scenari di riqualificazione energetica dell'edificio e di individuare, tra le varianti progettuali considerate, quella/e che consentono l'ottimizzazione della performance energetica del fabbricato in funzione dei costi, in modo tale da offrire delle linee guida da seguire nelle fasi successive di sviluppo del progetto e nella definizione delle opere da realizzare.

Nel presente elaborato la metodologia di cost-optimal è stata applicata ad un edificio condominiale esistente situato nel centro della città di Torino, di epoca di costruzione risalente alla prima metà degli anni Sessanta. Le sue caratteristiche architettoniche, impiantistiche e di struttura edilizia, illustrate ampiamente al quinto capitolo della presente tesi, non hanno reso banale né la costruzione del modello energetico dell'edificio mediante il software EC700, né l'individuazione di soluzioni progettuali relative all'involucro opaco e trasparente, agli impianti tecnici e all'installazione di fonti rinnovabili che potessero risultare efficaci da un punto di vista energetico e al contempo effettivamente realizzabili.

A seguito di uno studio accurato, sono stati individuati 12 pacchetti progettuali da applicare all'edificio, caratterizzati da diversi gradi di complessità e invasività per l'utenza. Per ognuno di essi è stato calcolato il fabbisogno annuo di energia primaria, espresso in [kWh/m²-anno], e il costo globale durante il ciclo di vita utile dell'edificio, espresso in [€/m²].

Le performance energetiche ed economiche delle diverse configurazioni sono state messe a confronto mediante la realizzazione del grafico di cost-optimal, che ha consentito di individuare quale tra quelle previste risulti ottimale in funzione dei costi. La stabilità dei risultati ottenuti è stata verificata mediante la realizzazione di tre analisi di sensitività: una relativa al tasso di sconto r , una al periodo di calcolo τ e l'ultima all'introduzione degli incentivi fiscali nella valutazione del costo globale.

Il punto di minimo della cost-optimal curve è stato identificato nel pacchetto progettuale 1-A, che prevede la sostituzione dei serramenti originali del fabbricato con nuovi elementi più performanti e l'installazione, a livello di singola unità immobiliare, di nuovi boiler in pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria. Tale variante progettuale, caratterizzata da interventi parziali di riqualificazione per quanto riguarda l'involucro edilizio e gli impianti tecnici, consente di ridurre il fabbisogno di energia primaria dell'edificio solo del 16% rispetto allo stato di fatto. Dal confronto di tale soluzione con le altre varianti progettuali, si è considerato che risulti più conveniente procedere nella realizzazione della soluzione 1-D, che a differenza della 1-A prevede una riqualificazione globale dell'involucro edilizio opaco e trasparente: questa, infatti, a fronte di un aumento del costo globale di 87 [€/m²], consente il

raggiungimento di una performance energetica dell'edificio molto più elevata, abbattendone il fabbisogno di energia primaria del 40% rispetto allo stato di fatto.

L'analisi di cost-optimal ha anche messo in evidenza come non sia conveniente da un punto di vista economico la realizzazione delle soluzioni progettuali 3,4,5 e 6-D, che prevedono interventi di riqualificazione degli impianti tecnici sempre più complessi e invasivi per l'utenza. Nel caso studio analizzato, il ruolo giocato dall'impianto fotovoltaico sulla riduzione del fabbisogno energetico dell'edificio non risulta determinante, in quanto la ridotta superficie utile disponibile in copertura non consente l'installazione di una potenza di picco sufficiente a coprire in maniera significativa i consumi elettrici dell'edificio.

La stabilità dei risultati ottenuti dall'analisi di cost-optimal è stata confermata dalle prime due analisi di sensitività condotte, mentre la terza, che prevede l'introduzione degli incentivi fiscali disponibili nel calcolo del costo globale, ha individuato nel pacchetto progettuale 1-D la configurazione ottimale da un punto di vista energetico-economico. Questo ha dimostrato come i meccanismi di incentivazione fiscale risultino fondamentali per favorire la realizzazione di quegli interventi di riqualificazione caratterizzati da costi d'investimento iniziale maggiori, ma che consentono il raggiungimento di prestazioni energetiche dell'edificio più elevate.

Si vogliono, infine, effettuare alcune considerazioni relative all'applicazione della metodologia di cost-optimal nella fase di progettazione preliminare di un intervento di retrofit. Se da un lato tale metodologia si è rivelata un potente strumento decisionale per confrontare la convenienza energetica ed economica di più varianti progettuali, fornendo un valido aiuto nell'individuare quale tra le soluzioni analizzate convenisse sviluppare, dall'altro tale metodologia si è rivelata anche una procedura complessa da sviluppare, che richiede tempi piuttosto lunghi e necessita in input di un elevato numero di dati dettagliati, che molto spesso non sono ancora definiti in fase di progettazione preliminare.

12 BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

[1] Regolamento (UE) 2021/1119 del Parlamento e del Consiglio che istituisce il quadro per il conseguimento della neutralità climatica e che modifica il regolamento (CE) n. 401/2009 e il regolamento (UE) 2018/1999 - "Normativa sul clima" - (da Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, 9/07/2021);

[2] Direttiva 2002/91/CE del Parlamento europeo e del Consiglio sul rendimento energetico nell'edilizia, 16 dicembre 2002 (da Gazzetta ufficiale delle Comunità europee, 4/01/2003);

[3] Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia, 19 maggio 2010 (da Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, 18/06/2010);

[4] Direttiva 2018/844/UE del Parlamento europeo e del Consiglio che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, 30 maggio 2018 (da Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, 19/06/2018);

[5] Regolamento Delegato della Commissione europea n. 244/2012 che integra la direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia istituendo un quadro metodologico comparativo per il calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e degli elementi edilizi, 16 gennaio 2012 (da Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, 21/03/2012);

[6] Orientamenti che accompagnano il regolamento delegato (UE) n. 244/2012 del 16 gennaio 2012 della Commissione che integra la direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia istituendo un quadro metodologico comparativo per calcolare livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e degli elementi edilizi (da Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, 19/04/2012);

[7] Decreto del Ministro dello sviluppo economico di concerto con i Ministri dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare, delle infrastrutture e dei trasporti, della salute e della difesa, Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici, 26 giugno 2015 (<https://www.mimit.gov.it/index.php/it/normativa/decreti-interministeriali/decreto-interministeriale-26-giugno-2015-applicazione-delle-metodologie-di-calcolo-delle-prestazioni-energetiche-e-definizione-delle-prescrizioni-e-dei-requisiti-minimi-degli-edifici>);

[8] Decreto del Ministro dello sviluppo economico di concerto con i Ministri dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare, delle infrastrutture e dei trasporti e per la semplificazione e la pubblica amministrazione, Adeguamento del decreto del Ministro dello sviluppo economico, 26 giugno 2009 – Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici, 26 giugno 2015 (<https://www.mimit.gov.it/it/normativa/decreti-interministeriali/decreto-interministeriale-26-giugno-2015-adeguamento-linee-guida-nazionali-per-la-certificazione-energetica-degli-edifici>);

[9] Requisiti Minimi e Certificazione Energetica degli edifici, guida ANIT di approfondimento tecnico, 16 giugno 2022;

- [10] Manuale GBC Condomini – Riqualificazione, Conduzione e Manutenzione delle Residenze Condominiali esistenti, edizione 2022;
- [11] ISTAT (<https://www.istat.it/it/files/2015/12/C18.pdf>);
- [12] <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>;
- [13] http://www.cornaviera.it/pagina.asp?codice=efficienza_energetica;
- [14] <https://eur-lex.europa.eu/IT/legal-content/summary/energy-performance-of-buildings.html>;
- [15] <https://biblus.acca.it/direttiva-case-green/>;
- [16] <https://focus.namirial.it/direttiva-case-green/>;
- [17] <https://www.infobuildenergia.it/approfondimenti/storia-normativa-energetica-settore-edilizio/>;
- [18] V. Corrado, I. Ballarini, I. Ottati, S. Paduos, Aggiornamento della metodologia comparativa cost-optimal secondo Direttiva 2010/31/UE (Report ricerca di sistema elettrico ENEA, settembre 2014);
- [19] V. Corrado, S. Paduos, Livelli ottimali di costo per i requisiti di prestazione energetica degli edifici (in *Energia e dintorni*, n. marzo 2013, pp. 30-34);
- [20] Søren Aggerholm, Hans Erhorn, Roger Hitchin, Heike Erhorn-Kluttig, Bart Poel, Kirsten Engelund Thomsen, Kim B. Wittchen, Cost optimal levels for energy performance requirements, July 2011 (www.epbd-ca.eu/outcomes/costoptimal-levels-2011.html);
- [21] Corgnati, S.P.; Fabrizio, E.; Filippi, M.; Monetti, V., Reference buildings for cost optimal analysis: Method of definition and application (in *Applied Energy* 2013, 102, pp. 983–993, February 2013);
- [22] M. Ferrara, V. Monetti, E. Fabrizio, Cost-optimal analysis for nearly zero energy buildings design and optimization: a critical review (in *Energies* 2018, 11, 1478, 6 June 2018);
- [23] Verena Marie Barthelmes, Cristina Becchio, Marta Carla Bottero, Stefano Paolo Corgnati, The influence of energy targets and economic concerns in design strategies for a residential nearly-zero energy building (in *Buildings* 2014, 4, pp. 937-962, 25 November 2014);
- [24] V.M. Barthelmes, C. Becchio, S.P. Corgnati, C. Guala, Design and construction of an nZEB in Piedmont Region, North Italy (in *Energy Procedia*, Vol. 78, pp. 1925-1930, 2015)
- [25] Tiziana Buso, Cristina Becchio, Stefano P. Corgnati, NZEB, cost – and comfort – optimal retrofit solutions for an Italian Reference Hotel (in *Energy Procedia*, Vol. 140, pp. 217-230, December 2017);
- [26] UNI TS 11300-1:2014, Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale;

- [27] UNI TS 11300-2:2014, Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali;
- [28] UNI TS 11300-3:2014, Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva;
- [29] UNI TS 11300-4:2014, Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria;
- [30] UNI TS 11300-5:2014, Calcolo dell'energia primaria e dalla quota di energia da fonti rinnovabili;
- [31] UNI TS 11300-6:2014, Determinazione del fabbisogno di energia per ascensori e scale mobili;
- [32] UNI EN 15459:2007, Energy performance of buildings – Economic evaluation procedure for energy systems in buildings;
- [33] UNI CEI ENR 16247-1:2012, Diagnosi energetiche – Parte 1: requisiti generali
- [34] UNI/TR 11775:2020, Diagnosi Energetiche – Linee guida per le diagnosi energetiche degli edifici
- [35] EC700, EC701, EC705, EC709 Manuale d'uso, EDILCLIMA S.r.l., dicembre 2023;
- [36] IRIS 4, Manuale del software, Milano, 7 settembre 2017;
- [37] Prezziario di riferimento per Opere e Lavori Pubblici nella Regione Piemonte, 2023;
- [38] DEI Tipografia del Genio Civile, Prezzi informativi dell'edilizia per recupero, ristrutturazione e manutenzione, marzo 2023;
- [39] DEI Tipografia del Genio Civile, Prezzi informativi dell'edilizia per impianti tecnologici, luglio 2023;
- [40] Prezziario delle Opere Pubbliche nella Regione Lombardia, volume 1.2: Opere Compiute, impianti elettrici e meccanici, edizione 2023;
- [41] https://www.ilteleriscaldamento.eu/teleriscaldamento_piemonte.htm;
- [42] <https://www.arera.it/area-operatori/prezzi-e-tariffe>;
- [43] Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico, di concerto con il Ministro dell'economia e delle finanze, il Ministro dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare ed il Ministro delle infrastrutture e dei trasporti, Requisiti tecnici per l'accesso alle detrazioni fiscali per la riqualificazione energetica degli edifici – cd. Ecobonus (Gazzetta Ufficiale della Repubblica italiana, 6 agosto 2020);
- [44] Ristrutturazioni edilizie: le agevolazioni fiscali, Agenzia delle Entrate, settore comunicazione – ufficio comunicazione istituzionale, ottobre 2022;
- [45] Guida Ecobonus, guida ANIT di approfondimento tecnico, 10 febbraio 2022.

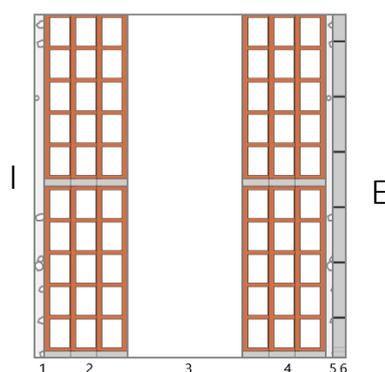
Allegato I

Caratteristiche dei componenti di involucro opaco e trasparente allo stato di fatto

INVOLUCRO OPACO

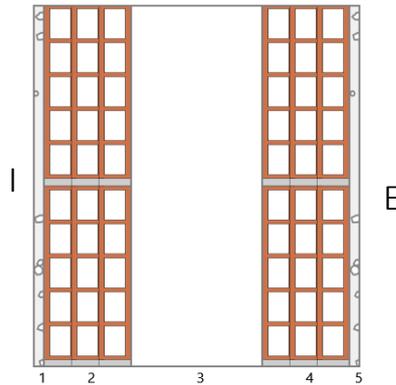
Legenda simboli		
s	Spessore	[mm]
Cond.	Conduttività termica, comprensiva di eventuali coefficienti correttivi	[W/mK]
R	Resistenza termica	[m ² K/W]
M.V.	Massa volumica	[kg/m ³]
C.T.	Capacità termica specifica	[kJ/kgK]
R.V.	Fattore di resistenza alla diffusione del vapore in capo asciutto	-

M1	Muratura perimetrale con rivestimento esterno in clinker	
	sp = 45 cm	U = 0.915 W/m ² K



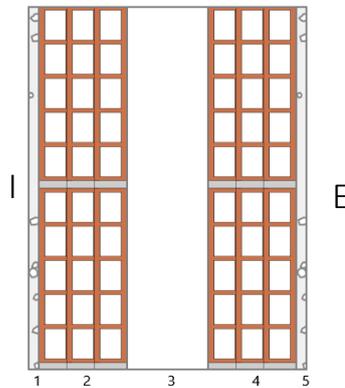
N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Intonaco di calce e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
2	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	120,00	0,3600	0,333	600	1,00	7
3	Intercapedine non ventilata Av<500 mm ² /m	165,00	0,9167	0,180	-	-	-
4	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	120,00	0,3600	0,333	600	1,00	7
5	Malta di calce o di calce e cemento	10,00	0,9000	0,011	1800	1,00	22
6	Piastrelle in ceramica (piastrelle)	20,00	1,3000	0,015	2300	0,84	9999999
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,071	-	-	-

M2	Muratura perimetrale con rivestimento esterno in intonaco	
	sp = 45 cm	U = 0.921 W/m ² K



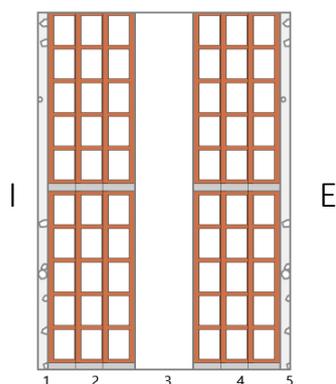
N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Intonaco di calce e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
2	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	120,00	0,3600	0,333	600	1,00	7
3	Intercapedine non ventilata Av<500 mm ² /m	110,00	0,6111	0,180	-	-	-
4	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	120,00	0,3600	0,333	600	1,00	7
5	Intonaco di calce e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,071	-	-	-

M3	Muratura perimetrale cieca verso altro edificio con rivestimento esterno in intonaco, sp. ridotto	
	sp = 38 cm	U = 0.921 W/m ² K



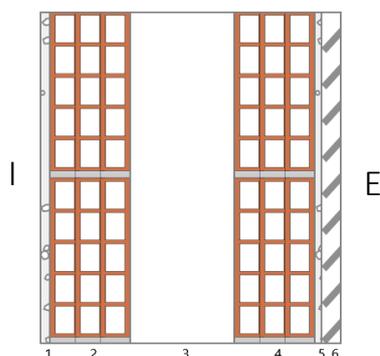
N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Intonaco di calce e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
2	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	120,00	0,3600	0,333	600	1,00	7
3	Intercapedine non ventilata Av<500 mm ² /m	110,00	0,6111	0,180	-	-	-
4	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	120,00	0,3600	0,333	600	1,00	7
5	Intonaco di calce e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
6	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,071	-	-	-

M4	Muratura perimetrale PT cieca verso carraio con rivestimento esterno in intonaco, sp. ridotto	
	sp = 35 cm	U = 0.921 W/m ² K



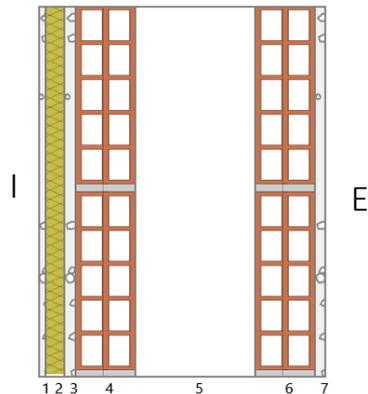
N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Intonaco di calce e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
2	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	120,00	0,3600	0,333	600	1,00	7
3	Intercapedine non ventilata Av<500 mm ² /m	80,00	0,4444	0,180	-	-	-
4	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	120,00	0,3600	0,333	600	1,00	7
5	Intonaco di calce e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,071	-	-	-

M5	Muratura perimetrale PT con rivestimento esterno in materiale lapideo	
	sp = 45 cm	U = 0.920 W/m ² K



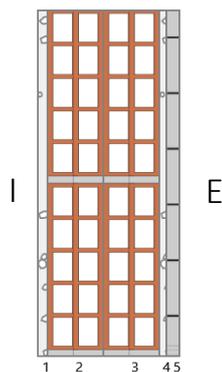
N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Intonaco di calce e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
2	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	120,00	0,3600	0,333	600	1,00	7
3	Intercapedine non ventilata Av<500 mm ² /m	155,00	0,8611	0,180	-	-	-
4	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	120,00	0,3600	0,333	600	1,00	7
5	Malta di cemento	10,00	1,4000	0,007	2000	1,00	22
6	Roccia naturale sedimentaria	30,00	2,3000	0,013	1600	1,00	250
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,071	-	-	-

M6	Muratura perimetrale basso fabbricato con rivestimento esterno in intonaco	
	sp = 38.5 cm	U = 0.654 W/m ² K



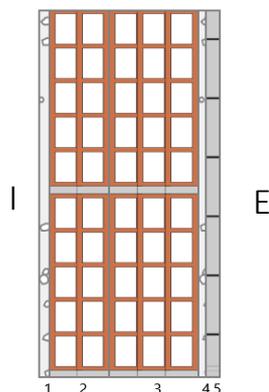
N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Cartongesso in lastre	10,00	0,2500	0,040	900	1,00	10
2	Polistirolo per SICCUS - SICCUS KLIMA	25,00	0,0400	0,625	30	1,25	70
3	Intonaco di calce e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
4	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	80,00	0,3600	0,222	600	1,00	7
5	Intercapedine non ventilata Av<500 mm ² /m	160,00	0,8889	0,180	-	-	-
6	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	80,00	0,3600	0,222	600	1,00	7
7	Intonaco di calce e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,071	-	-	-

M7	Muratura perimetrale con rivestimento esterno in clinker, sp. ridotto	
	sp = 20.5 cm	U = 1.448 W/m ² K



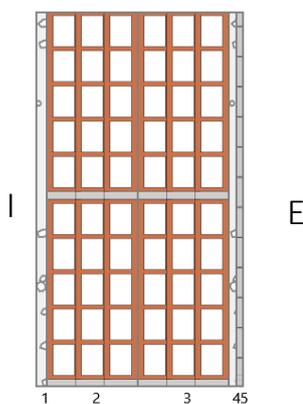
N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Intonaco di calce e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
2	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	80,00	0,3600	0,222	600	1,00	7
3	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	80,00	0,3600	0,222	600	1,00	7
4	Malta di calce o di calce e cemento	10,00	0,9000	0,011	1800	1,00	22
5	Piastrelle in ceramica (piastrelle)	20,00	1,3000	0,015	2300	0,84	9999
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,071	-	-	-

M8	Muratura sottofinestra con rivestimento esterno in clinker	
	sp = 24.5 cm	U = 1.247 W/m ² K



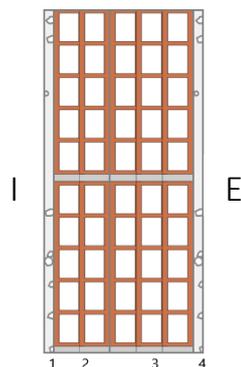
N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Intonaco di calce e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
2	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	80,00	0,3600	0,333	600	1,00	7
3	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	120,00	0,3600	0,333	600	1,00	7
4	Malta di calce o di calce e cemento	10,00	0,9000	0,011	1800	1,00	22
5	Piastrelle in ceramica (piastrelle)	10,00	1,3000	0,008	2300	0,84	9999999
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,071	-	-	-

M9	Muratura sottofinestra con rivestimento esterno in piastrelle	
	sp = 27.5 cm	U = 1.105 W/m ² K



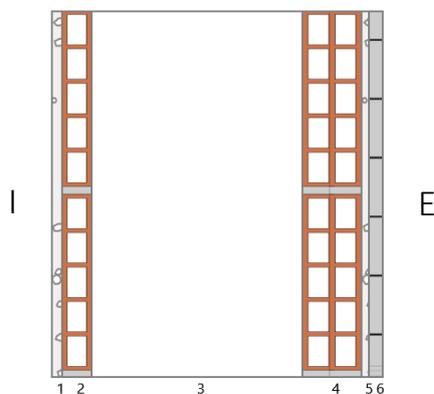
N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Intonaco di calce e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
2	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	120,00	0,3600	0,333	600	1,00	7
3	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	120,00	0,3600	0,333	600	1,00	7
4	Malta di calce o di calce e cemento	10,00	0,9000	0,011	1800	1,00	22
5	Piastrelle in ceramica (piastrelle)	10,00	1,3000	0,008	2300	0,84	9999999
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,071	-	-	-

M10	Muratura sottofinestra con rivestimento esterno in intonaco	
	sp = 23 cm	U = 1.259 W/m ² K



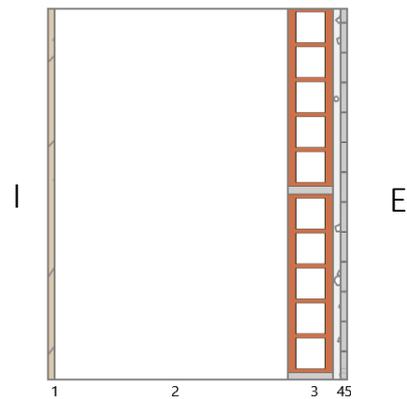
N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Intonaco di calce e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
2	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	80,00	0,3600	0,222	600	1,00	7
3	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	120,00	0,3600	0,333	600	1,00	7
4	Intonaco di calce e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,071	-	-	-

M11	Cassonetto con rivestimento esterno in clinker	
	sp = 45 cm	U = 2.572 W/m ² K



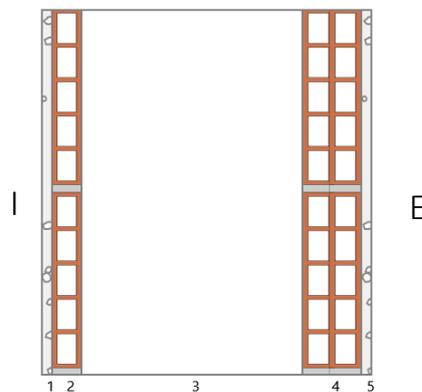
N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Intonaco di calce e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
2	Tavellone per divisori	40,00	0,3636	0,110	850	0,84	9
3	Intercapedine fortemente ventilata Av>1500 mm ² /m	285,00	-	-	-	-	-
4	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	80,00	0,3600	-	600	1,00	-
5	Malta di calce o di calce e cemento	10,00	0,9000	-	1800	1,00	-
6	Piastrelle in ceramica (piastrelle)	20,00	1,3000	-	2300	0,84	-
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,071	-	-	-

M12	Cassonetto con rivestimento esterno in clinker e pannello interno in legno	
	sp = 40 cm	U = 2.913 W/m ² K



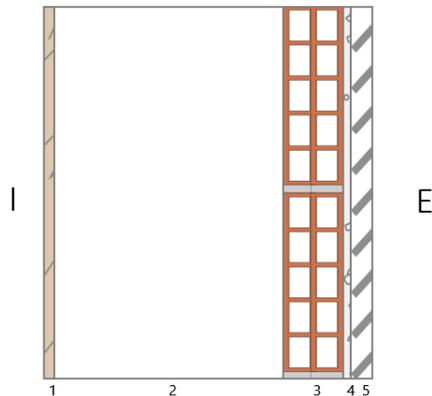
N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Legno di abete flusso perpend. alle fibre	10,00	0,1200	0,083	450	1,60	625
2	Intercapedine fortemente ventilata Av>1500 mm ² /m	310,00	-	-	-	-	-
3	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	60,00	0,3600	-	600	1,00	-
4	Malta di calce o di calce e cemento	10,00	0,9000	-	1800	1,00	-
5	Piastrelle in ceramica (piastrelle)	10,00	1,3000	-	2300	0,84	-
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,071	-	-	-

M13	Cassonetto con rivestimento esterno in intonaco	
	sp = 45 cm	U = 2.572 W/m ² K



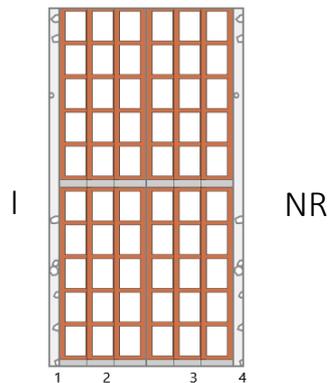
N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Intonaco di calce e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
2	Tavellone per divisori	40,00	0,3636	0,110	850	0,84	9
3	Intercapedine fortemente ventilata Av>1500 mm ² /m	300,00	-	-	-	-	-
4	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	80,00	0,3600	-	600	1,00	-
5	Intonaco di calce e sabbia	15,00	0,8000	-	1600	1,00	-
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,071	-	-	-

M14	Cassonetto con rivestimento esterno in pietra	
	sp = 45 cm	U = 2.597 W/m ² K



N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Legno di abete flusso perpend. alle fibre	15,00	0,1200	0,125	450	1,60	625
2	Intercapedine fortemente ventilata Av>1500 mm ² /m	305,00	-	-	-	-	-
3	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	80,00	0,3600	-	600	1,00	-
4	Malta di cemento	10,00	1,4000	-	2000	1,00	-
5	Roccia naturale sedimentaria	30,00	2,3000	-	1600	1,00	-
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,071	-	-	-

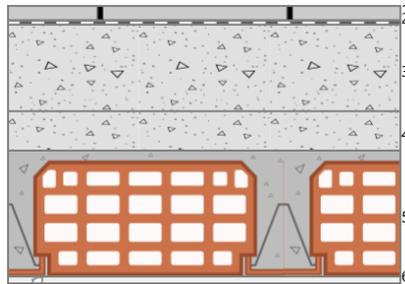
M15	Muratura verso ambienti non riscaldati (ingressi, vani scala)	
	sp = 27 cm	U = 0.911 W/m ² K



N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Intonaco di calce e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
2	Muratura in laterizio pareti interne (um. 0.5%)	120,00	0,3000	0,400	800	1,00	7
3	Muratura in laterizio pareti interne (um. 0.5%)	120,00	0,3000	0,400	800	1,00	7
4	Intonaco di calce e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,130	-	-	-

S1	Soffitto verso esterno	
	sp = 35.4 cm	U = 1.507 W/m ² K

E

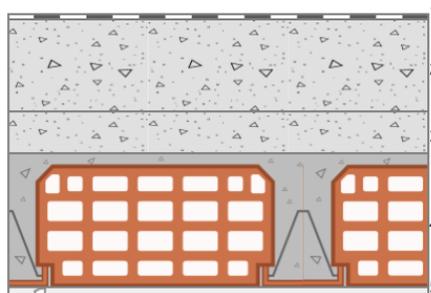


I

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,071	-	-	-
1	Piastrelle in ceramica (piastrelle)	20,00	1,3000	0,015	2300	0,84	9999999
2	Impermeabilizzazione con bitume	4,00	0,1700	0,024	1200	1,00	188000
3	Sottofondo di cemento magro	110,00	0,7000	0,157	1600	0,88	20
4	C.l.s. armato (1% acciaio)	50,00	2,3000	0,022	2300	1,00	130
5	Soletta in laterizio spess. 16 - Interasse 50	160,00	0,6100	0,262	1100	0,84	7
6	Intonaco di calce e sabbia	10,00	0,8000	0,013	1600	1,00	10
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,100	-	-	-

S2	Soffitto verso esterno basso fabbricato	
	sp = 33.8 cm	U = 1.488 W/m ² K

E

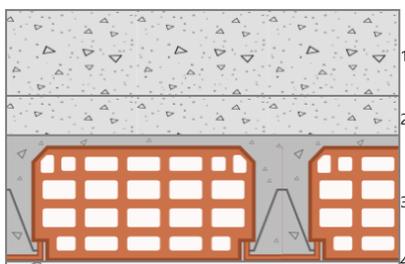


I

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,071	-	-	-
1	Impermeabilizzazione con bitume	8,00	0,1700	0,047	1200	1,00	188000
2	Sottofondo di cemento magro	110,00	0,7000	0,157	1600	0,88	20
3	C.l.s. armato (1% acciaio)	50,00	2,3000	0,022	2300	1,00	130
4	Soletta in laterizio spess. 16 - Interasse 50	160,00	0,6100	0,262	1100	0,84	7
5	Intonaco di calce e sabbia	10,00	0,8000	0,013	1600	1,00	10
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,100	-	-	-

S3	Soffitto verso vani chiusi non riscaldati nel piano sottotetto	
	sp = 33 cm	U = 1.530 W/m ² K

NR

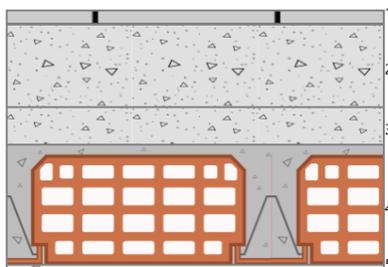


I

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,100	-	-	-
1	Sottofondo di cemento magro	110,00	0,7000	0,157	1600	0,88	20
2	C.I.s. armato (1% acciaio)	50,00	2,3000	0,022	2300	1,00	130
3	Soletta in laterizio spess. 16 - Interasse 50	160,00	0,6100	0,262	1100	0,84	7
4	Intonaco di calce e sabbia	10,00	0,8000	0,013	1600	1,00	10
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,100	-	-	-

P1	Pavimento verso esterno (su rampa di accesso all'autorimessa)	
	sp = 35 cm	U = 1.408 W/m ² K

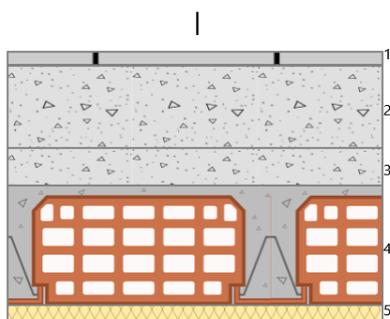
E



I

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,170	-	-	-
1	Piastrelle in ceramica (piastrelle)	20,00	1,3000	0,015	2300	0,84	9999999
2	Sottofondo di cemento magro	110,00	0,7000	0,157	1600	0,88	20
3	C.I.s. armato (1% acciaio)	50,00	2,3000	0,022	2300	1,00	130
4	Soletta in laterizio spess. 16 - Interasse 50	160,00	0,6100	0,262	1100	0,84	7
5	Intonaco di calce e sabbia	10,00	0,8000	0,013	1600	1,00	10
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,071	-	-	-

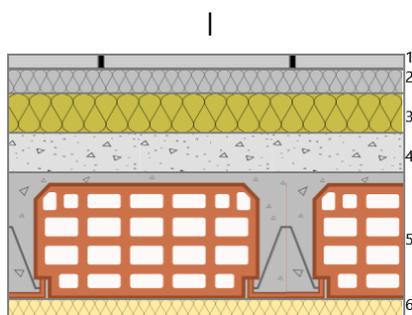
P2	Pavimento verso magazzini non riscaldati (piano seminterrato)	
	sp = 36.5 cm	U = 0.805 W/m ² K



NR

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,170	-	-	-
1	Piastrelle in ceramica (piastrelle)	20,00	1,3000	0,015	2300	0,84	9999999
2	Sottofondo di cemento magro	110,00	0,7000	0,157	1600	0,88	20
3	C.l.s. armato (1% acciaio)	50,00	2,3000	0,022	2300	1,00	130
4	Soletta in laterizio spess. 16 - Interasse 50	160,00	0,6100	0,262	1100	0,84	7
5	Polistirene espanso sint. in lastre da blocchi	25,00	0,0560	0,446	10	1,45	30
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,170	-	-	-

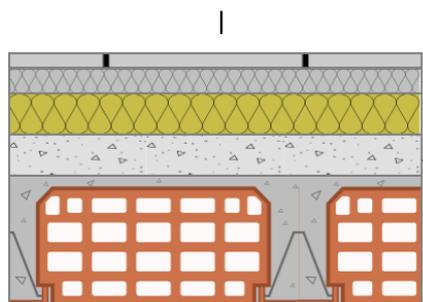
P3	Pavimento basso fabbricato verso magazzini non riscaldati (piano seminterrato)	
	sp = 33.5 cm	U = 0.395 W/m ² K



NR

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,170	-	-	-
1	Piastrelle in ceramica (piastrelle)	20,00	1,3000	0,015	2300	0,84	99999
2	Massetto radiant fibrorinforzato ad elevata conducibilità termica	30,00	2,0200	0,015	2000	1000,00	100
3	Polistirene espanso per CLASSIC FLOOR	50,00	0,0350	1,429	25	1,21	70
4	C.l.s. armato (1% acciaio)	50,00	2,3000	0,022	2300	1,00	130
5	Soletta in laterizio spess. 16 - Interasse 50	160,00	0,6100	0,262	1100	0,84	7
6	Polistirene espanso sint. in lastre da blocchi	25,00	0,0560	0,446	10	1,45	30
7	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,170	-	-	-

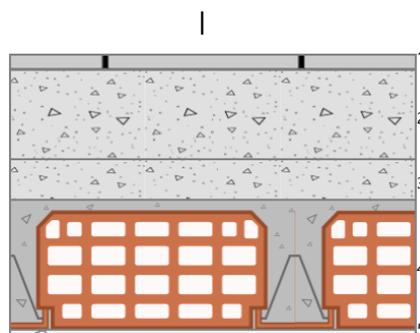
P4	Pavimento basso fabbricato verso autorimessa	
	sp = 31 cm	U = 0.48 W/m ² K



NR

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,170	-	-	-
1	Piastrelle in ceramica (piastrelle)	20,00	1,3000	0,015	2300	0,84	9999
2	Massetto radiant fibrorinforzato ad elevata conducibilità termica	30,00	2,0200	0,015	2000	1000,00	100
3	Polistirene espanso per CLASSIC FLOOR	50,00	0,0350	1,429	25	1,21	70
4	C.l.s. armato (1% acciaio)	50,00	2,3000	0,022	2300	1,00	130
5	Soletta in laterizio spess. 16 - Interasse 50	160,00	0,6100	0,262	1100	0,84	7
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,170	-	-	-

P5	Pavimento verso androne non riscaldato	
	sp = 35 cm	U = 1.236 W/m ² K



NR

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,170	-	-	-
1	Piastrelle in ceramica (piastrelle)	20,00	1,3000	0,015	2300	0,84	99999
2	Sottofondo di cemento magro	110,00	0,7000	0,157	1600	0,88	20
3	C.l.s. armato (1% acciaio)	50,00	2,3000	0,022	2300	1,00	130
4	Soletta in laterizio spess. 16 - Interasse 50	160,00	0,6100	0,262	1100	0,84	7
5	Intonaco di calce e sabbia	10,00	0,8000	0,013	1600	1,00	10
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,017	-	-	-

INVOLUCRO TRASPARENTE

Tipologia	Categoria	Dimensioni (LxH) [mm]
F1	Finestra	240 x 180
F2	Finestra	75 x 180
F3	Porta finestra	120 x 260
F4	Finestra	165 x 180
F5	Porta finestra	110 x 250
F6	Finestra	60 x 170
F7	Porta finestra	120 x 250
F8	Porta finestra	75 x 250
F9	Finestra	80 x 170
F10	Finestra	180 x 170
F11	Finestra	120 x 170
F12	Porta finestra	180 x 240
F13	Finestra	180 x 160
F14	Porta finestra	240 x 240
F15	Porta finestra	110 x 240
F16	Finestra	60 x 150
F17	Finestra	110 x 150
F18	Porta finestra	80 x 240
F19	Finestra	140 x 160
F20	Finestra	110 x 170
F21	Porta finestra	340 x 250
F22	Finestra (vetrina U.I. T1)	345 x 320
F23	Porta finestra (ingresso lato strada U.I. T1)	200x320
F24	Finestra	345 x 200
F25	Finestra	270 x 165
F26	Finestra	140 x 165
F27	Finestra	355 x 165
F28	Finestra	300 x 165
F29	Finestra	200 x 165
F30	Finestra	75 x 165
F31	Finestra	75 x 80

Tabella 36 - Classificazione dei serramenti in differenti tipologie in funzione delle dimensioni

Figura 58 – Indicazione in pianta delle differenti tipologie di serramento presenti – PIANO TIPO

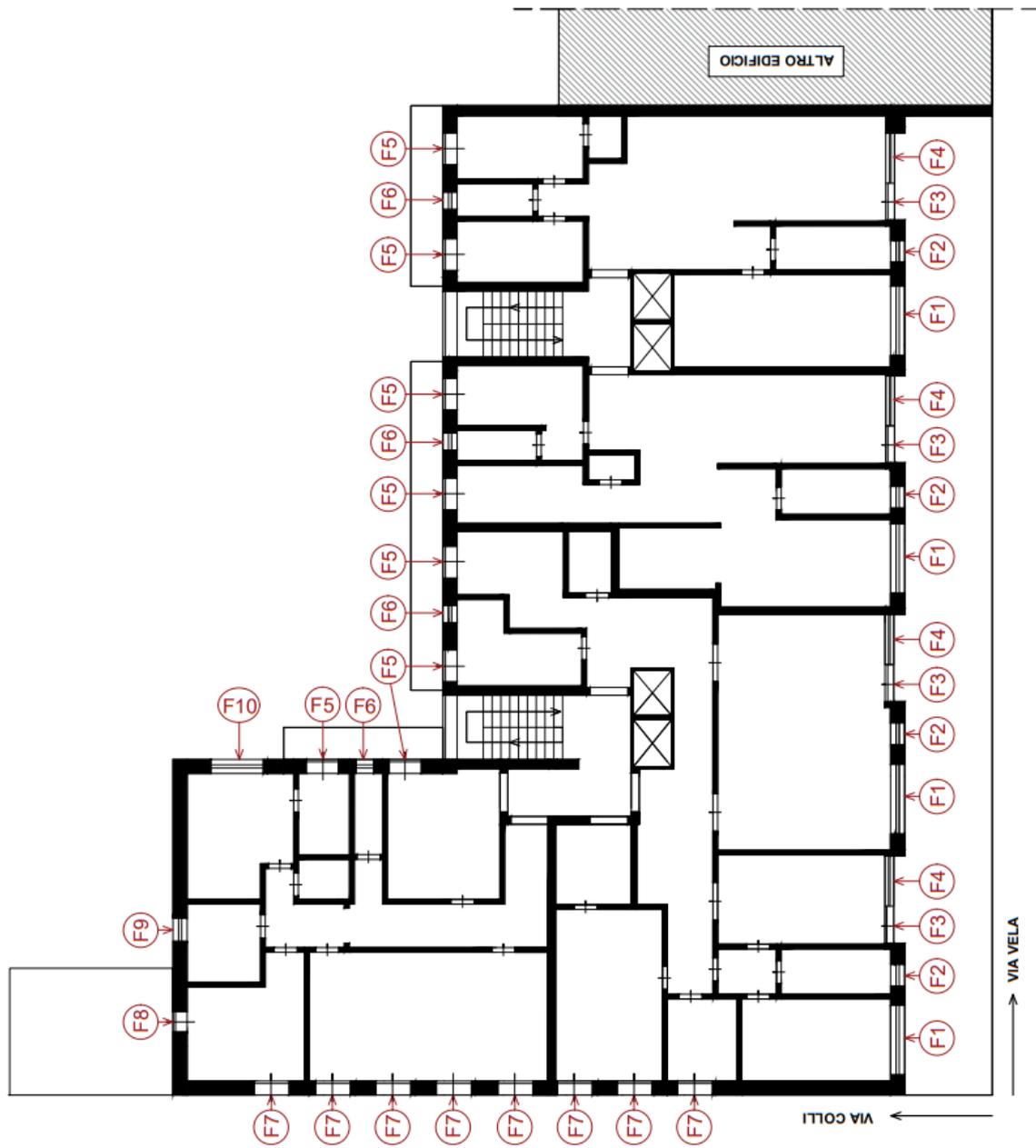


Figura 59 - Indicazione in pianta delle differenti tipologie di serramento presenti – PIANO QUINTO

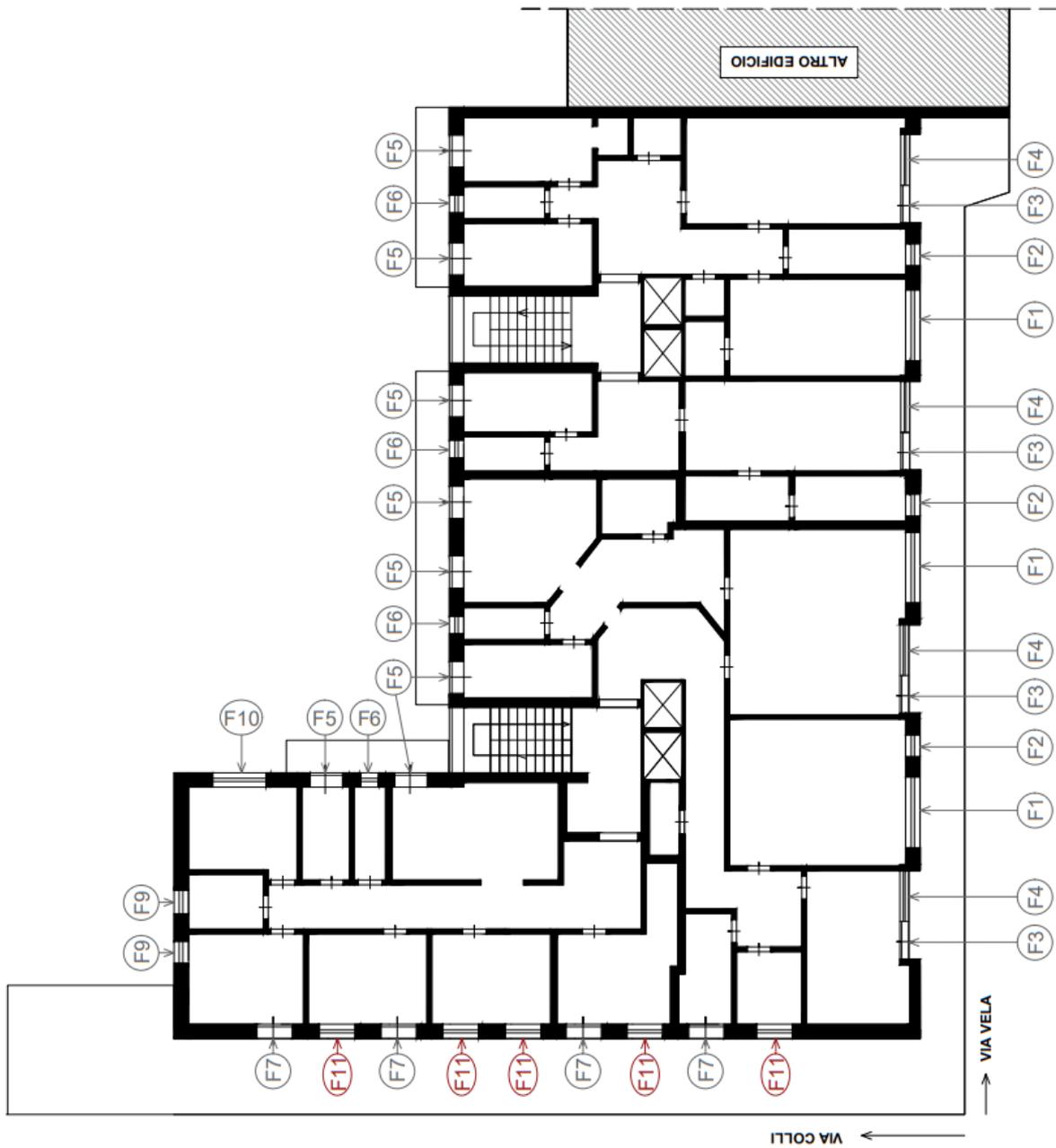


Figura 60 - Indicazione in pianta delle differenti tipologie di serramento presenti – PIANO SESTO

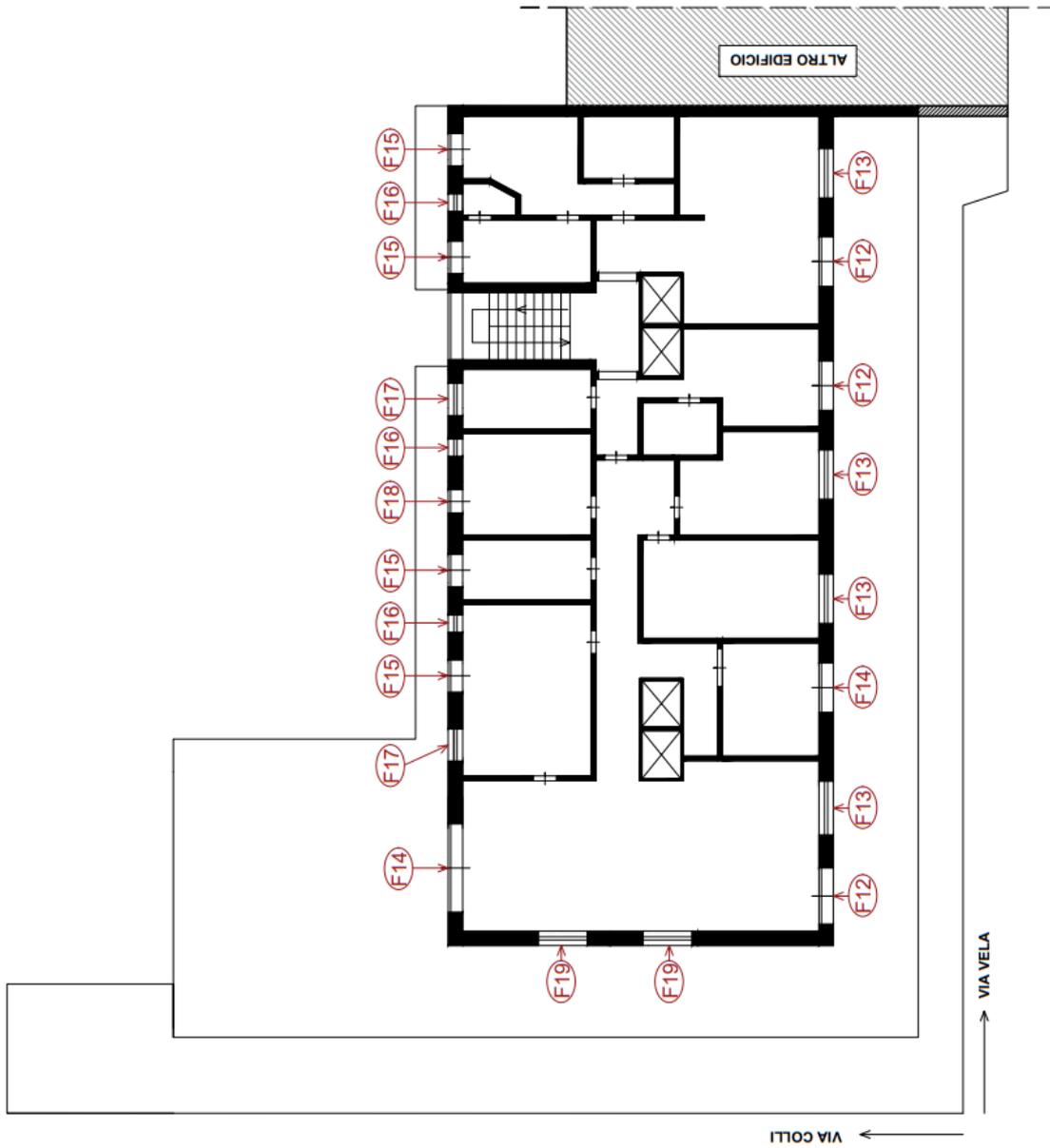
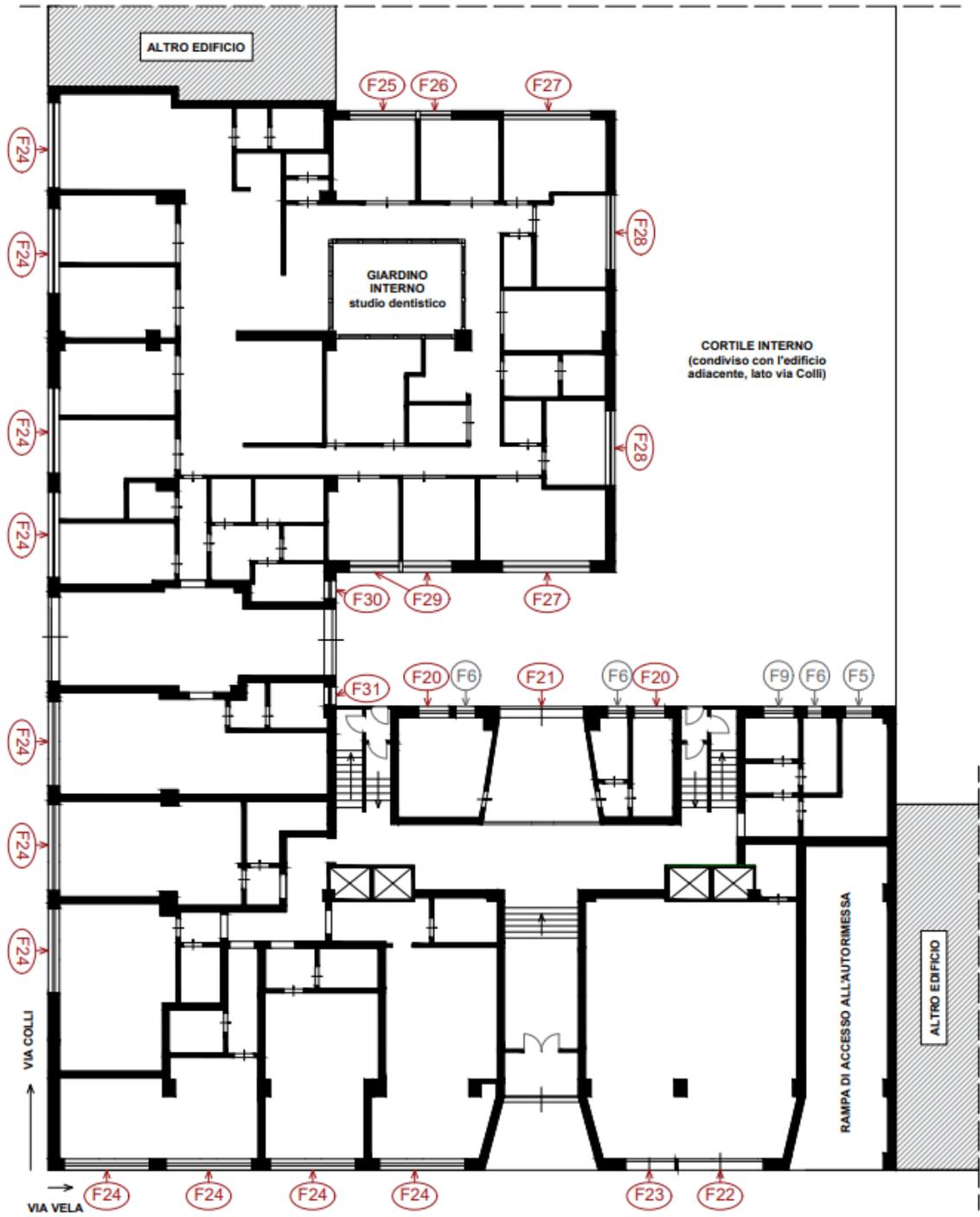


Figura 61 - Indicazione in pianta delle differenti tipologie di serramento presenti – PIANO TERRA



	Serramenti originali		Serramenti sostituiti					
	Telaio in legno e vetro singolo		Telaio in PVC e vetro camera				Telaio in legno e vetro camera	
	Quantità	U_w [W/m ² K]	Quantità	U_w [W/m ² K]	Quantità	U_w [W/m ² K]	Quantità	U_w [W/m ² K]
F1	15	3.989	4	1.681	-	-	-	-
F2	14	3.909	5	1.660	-	-	-	-
F3	15	3.643	5	1.668	-	-	-	-
F4	15	3.887	5	1.650	-	-	-	-
F5	28	3.721	8	1.743	2	1.3	-	-
F6	16	3.609	6	1.714	1	1.3	-	-
F7	20	3.827	12	1.731	5	1.3	-	-
F8	2	3.912	1	1.690	1	1.3	-	-
F9	2	3.952	3	1.675	1	1.3	-	-
F10	2	3.849	2	1.725	1	1.3	-	-
F11	1	3.834	4	1.721	-	-	-	-
F12	-	-	1	1.786	-	-	2	2.017
F13	-	-	1	1.758	-	-	3	2.057
F14	-	-	-	-	-	-	2	2.018
F15	-	-	2	1.808	-	-	2	2.028
F16	-	-	1	1.766	-	-	2	2.074
F17	-	-	-	-	-	-	2	2.077
F18	-	-	-	-	-	-	1	2.121
F19	-	-	-	-	-	-	2	2.049
F20	2	3.777	-	-	-	-	-	-
F21	1	3.891	-	-	-	-	-	-
F22	1	3.441	-	-	-	-	-	-
F23	1	3.695	-	-	-	-	-	-
F24	-	-	7	1.3	4	1.17	-	-
F25	-	-	1	1.2	-	-	-	-
F26	-	-	1	1.2	-	-	-	-
F27	-	-	2	1.18	-	-	-	-
F28	-	-	2	1.17	-	-	-	-
F29	-	-	2	1.18	-	-	-	-
F30	-	-	1	1.280	-	-	-	-
F31	-	-	1	1.3	-	-	-	-

Figura 62 - Trasmissione termica U_w delle diverse tipologie di serramenti e numero degli elementi originali e sostituiti

RINGRAZIAMENTI

E alla fine anche io sono arrivata alla conclusione di questi 2 (o forse dovrei dire 4) anni di magistrale. Ho immaginato talmente tante volte questo momento, e adesso che è arrivato, e mi trovo a pensare a tutte le persone da ringraziare, qualsiasi cosa mi venga in mente di scrivere mi sembra riduttiva o banale, ma ci proverò lo stesso, perché non sarei qui se non fosse per voi.

Voglio ringraziare prima di tutto le mie coinquiline, in particolare Sofi, Betta e Sara, e Richi (hai visto, ti ho messo tra i coinquilini!), che sono stati per me in questi anni a Torino come una seconda famiglia: grazie per la quotidianità passata insieme, per le risate, i pianti e le serate sul balcone a parlare di tutto, sempre accompagnate da una birra o un bicchiere di Amaro del Capo.

Grazie a Marco e Richi, con cui ho studiato insieme tutti gli esami, che mi hanno sopportato nei miei (numerosi) momenti di sclero e sono riusciti a farmi ridere anche quando da ridere non c'era proprio nulla.

Grazie a Feffo, Sapo, Cate, Agno, Angie e Carlo, che mi sono compagni di vita ormai da un po' di anni, e con cui sono cresciuta insieme affrontando momenti di crisi e momenti di gioia.

Grazie a Cate, Marghe e Silli, che sono per me come delle sorelle: grazie perché mi siete vicine da sempre, e anche se ogni tanto non ci sentiamo per un po', su di voi sono sicura di poter contare.

Grazie anche a Giorgia, perché il rapporto con te, nonostante sia nato da poco in termini di tempo, è stato fondamentale in quest'ultimo anno, e mi ha insegnato tanto su chi sono e chi voglio diventare.

Un grazie gigante a Luca, che, anche se non era assolutamente tenuto a farlo, ha usato il suo tempo per aiutarmi a concludere questa tesi. Davvero, grazie.

Ringrazio la mia famiglia, per tutto quello che mi ha insegnato con le parole ma soprattutto con i fatti. Grazie perché ci siete sempre stati, soprattutto nei momenti difficili, dove non mi avete mai fatto sentire sola. Grazie perché la donna che sono oggi la devo in gran parte a voi. Ma soprattutto voglio ringraziare Pietro, anche se un solo grazie non basta per tutto quello che hai fatto per me negli ultimi due anni. Mi sei stato vicino, mi hai supportato (e sopportato) in un momento davvero difficile della mia vita, hai creduto che ce la potessi fare anche quando a me sembrava impossibile. Non hai mai perso la pazienza, mi hai aiutato passo dopo passo a portare a termine questa tesi, che senza di te non arriverebbe nemmeno a pagina 1. Mi hai insegnato che le difficoltà si affrontano, mi hai fatto ridere quando ero davvero giù e mi hai portato a bere un buon bicchiere di vino (o birra) tutte le (numerose) volte che era necessario. Avrei un altro miliardo di grazie da dirti, ma non basterebbero le 200 pagine di questa tesi per scriverli tutti.

Insomma ragazzi, con queste poche righe spero di essere riuscita almeno un po' a farvi capire quanto siete importanti per me, perché davvero senza di voi io non sarei qui.

Grazie davvero di tutto, vi voglio bene.