UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di Ingegneria Industriale

Tesi di laurea magistrale in Ingegneria Energetica

RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA DI UN COMPLESSO DI EDILIZIA RESIDENZIALE PUBBLICA

Relatore: Prof. Ing. Michele De Carli

Correlatore: Ing. Giulia Alessio

Laureando: Mattia Mometti

Matricola: 1058027

Anno accademico 2014-2015

SOMMARIO

L’epoca di costruzione dello stock edilizio italiano e il basso tasso di crescita di nuovi edifici altamente performanti dal punto di vista energetico porta in primo piano il cruciale tema della riqualificazione del patrimonio esistente. Nel settore dell’edilizia residenziale pubblica tale questione assume ancora più rilevanza, dato che nel corso degli anni è spesso mancata una costante manutenzione degli stabili. Alla crescente richiesta di alloggi sociali si risponde spesso con edifici obsoleti dal punto di vista impiantistico, non in grado di garantire condizioni adeguate di comfort e con elevati costi di mantenimento per gli inquilini, dovuti soprattutto agli alti consumi energetici.

Il caso studio analizzato nel presente lavoro di tesi è un condominio di edilizia residenziale pubblica costruito nel Nord-Est italiano nella seconda metà degli anni ’50. Il potenziale di miglioramento del complesso è stato studiato approfonditamente, valutando diverse ipotesi per la riduzione dei consumi dovuti alla climatizzazione invernale. Sono state avanzate delle proposte di intervento dapprima sul solo involucro edilizio, per poi passare ad analizzare anche la situazione impiantistica. Per le diverse soluzioni considerate è stato valutato il fabbisogno di energia primaria che ne risulterebbe ed è stato fatto un confronto con quello dello stato attuale. È stata infine condotta un’analisi economica delle diverse tipologie di intervento proposte, tenendo conto dei costi di investimento, dei risparmi ottenibili dagli inquilini sulla spesa di riscaldamento, nonché degli incentivi cui è possibile accedere.

INDICE

INTRODUZIONE **pag. 1**

CAPITOLO 1. L'EDILIZIA RESIDENZIALE PUBBLICA **pag. 3**

1.1. Cenni storici pag. 3
1.2. Lo stato attuale pag. 7
1.3. Nuovi indirizzi per nuovi problemi pag. 8

CAPITOLO 2. STATO DI FATTO DELL'EDIFICIO IN ESAME **pag. 13**

2.1. Località pag. 13
2.1.1. Caratteristiche climatiche pag. 14
2.1.2. Quartiere risorgimento pag. 18
2.2. Descrizione generale dell'edificio in esame pag. 21
2.3. Questionari pag. 24
2.4. Modello pag. 26
2.4.1. Superfici opache pag. 26
2.4.2. Superfici vetrate pag. 32
2.4.3. Condizioni interne pag. 32
2.4.3.1. Infiltrazione pag. 33
2.4.3.2. Ventilazione pag. 33
2.4.3.3. Riscaldamento pag. 33
2.4.3.4. Raffrescamento pag. 33
2.4.3.5. Carichi interni pag. 34
2.5. Simulazioni pag. 34
2.6. Risultati pag. 35

CAPITOLO 3. RETROFIT DELL'INVOLUCRO **pag. 39**

3.1. Ipotesi analizzate pag. 39
3.1.1. Isolamento delle pareti esterne pag. 40
3.1.2. Isolamento del sottotetto pag. 41
3.1.3. Isolamento del soffitto del piano seminterrato pag. 42
3.1.4. Sostituzione delle finestre pag. 43
3.2. Risultati pag. 44

CAPITOLO 4. RETROFIT DELL'IMPIANTO DI RISCALDAMENTO **pag. 49**

4.1. Impianto radiante pag. 50
4.1.1. Caratteristiche dell'impianto radiante scelto pag. 50
4.1.2. Analisi del comfort pag. 56
4.2. Impianto centralizzato con pompa di calore aria-acqua pag. 62
4.2.1. Caratteristiche della pompa di calore scelta pag. 64
4.2.2. Simulazioni pag. 66

4.2.2.1. Modello senza accumulo pag. 66
4.2.2.2. Modello con accumulo pag. 68
4.2.2.3. Confronto tra le due simulazioni pag. 71
4.3. Impianto centralizzato con caldaia a condensazione pag. 72
4.3.1. Caratteristiche della caldaia scelta pag. 74
4.3.2. Simulazione pag. 75
4.4. Impianto centralizzato con caldaia a pellet pag. 76
4.4.1. Caratteristiche della caldaia scelta pag. 77
4.4.2. Simulazione pag. 79
4.5. Caldaie singole a metano pag. 79
4.6. Confronto dei risultati pag. 81
4.7. Classi energetiche pag. 83

CAPITOLO 5. ANALISI DEI CONSUMI ELETTRICI pag. 89

5.1. Illuminazione ed elettrodomestici pag. 89
5.2. Pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria pag. 91
5.3. Impianti di generazione di calore e di distribuzione pag. 93
5.4. Impianto fotovoltaico pag. 94
5.5. Confronto tra la produzione dell'impianto fotovoltaico e i consumi elettrici pag. 97

CAPITOLO 6. ANALISI ECONOMICA pag. 103

6.1. Costo degli interventi pag. 103
6.2. Risparmio in bolletta pag. 106
6.3. Incentivi pag. 108
6.3.1. Certificati bianchi pag. 109
6.3.2. Conto termico pag. 111
6.4. Ritorno dell'investimento pag. 114
6.5. Fotovoltaico pag. 119

CONCLUSIONI pag. 123

APPENDICE: TRNSYS pag. 127

1. TRNBuild pag. 127
2. Simulation Studio pag. 130

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA pag. 133

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1. *Titolo di godimento dell'abitazione* pag. 7
Figura 1.2. *Proprietà dello stock in affitto* pag. 7
Figura 2.1. *Posizione geografica di Castelfranco Veneto nella Regione* pag. 13
Figura 2.2. *Andamento annuale delle temperature [°C]* pag. 16
Figura 2.3. *Radiazione diretta e diffusa sul piano orizzontale* pag. 17
Figura 2.4. *Collocazione del quartiere Risorgimento nel Comune* pag. 18
Figura 2.5. *Zona nord del quartiere Risorgimento* pag. 19
Figura 2.6. *Vista del condominio numero catastale 1187* pag. 21
Figura 2.7. *Planimetrie dei diversi piani. Dall'alto verso il basso: piano seminterrato, piano primo, piano secondo, piano terzo, sottotetto. Il rosso indica gli appartamenti occupati, l'azzurro quelli vuoti, il giallo le zone non riscaldate* pag. 23
Figura 2.8. *Struttura n° 15 indicata dalla norma UNI/TS 11300-1* pag. 26
Figura 2.9. *Struttura n° 16 indicata dalla norma UNI/TS 11300-1* pag. 27
Figura 2.10. *Muratura in mattoni pieni* pag. 30
Figura 2.11. *Muratura in mattoni forati* pag. 30
Figura 2.12. *Muratura in mattoni pieni con bitume* pag. 30
Figura 2.13. *Solaio interpiano di 30 cm* pag. 31
Figura 2.14. *Solaio adiacente al sottotetto* pag. 31
Figura 2.15. *Solaio adiacente al vespaio aerato* pag. 31
Figura 2.16. *Falda del tetto* pag. 31
Figura 2.17. *Andamento annuale della potenza richiesta dall'edificio* pag. 37
Figura 2.18. *Potenza richiesta dall'edificio durante la stagione di riscaldamento* pag. 37
Figura 3.1. *Pareti esterne* pag. 41
Figura 3.2. *Solaio adiacente al sottotetto* pag. 42
Figura 3.3. *Soffitto del piano seminterrato* pag. 43
Figura 3.4. *Finestra vetro camera con intercapedine di 16 mm con gas Argon* pag. 43
Figura 3.5. *Confronto tra lo stato di fatto e le singole ipotesi di intervento* pag. 44
Figura 3.6. *Confronto tra lo stato di fatto e la somma delle singole ipotesi di intervento* pag. 45
Figura 3.7. *Potenza termica richiesta dall'edificio durante la stagione di riscaldamento* pag. 46

Figura 4.1 *Potenza termica specifica richiesta alla parte attiva del soffitto radiante durante la stagione di riscaldamento* pag. 51
Figura 4.2 *Sezione dell'impianto radiante a soffitto* pag. 52
Figura 4.3 *Prospetto 17 della norma UNI/TS11300-2* pag. 53
Figura 4.4 *Prospetto 20 della norma UNI/TS11300-2* pag. 53
Figura 4.5 *Prospetto 21b della norma UNI/TS11300-2* pag. 54
Figura 4.6 *Prospetto 22 della norma UNI/TS11300-2* pag. 54
Figura 4.7 *Relazione tra PMV e PPD* pag. 57
Figura 4.8 *Relazione tra il PPD (Percentuale di Persone Insoddisfatte) e la differenza di temperatura media radiante* pag. 58
Figura 4.9 *Superfici poste superiormente (da 1 a 5) ed inferiormente (da A ad E) al baricentro del corpo umano di una stanza tipo* pag. 59
Figura 4.10 *Numero di ore durante le quali si riscontra un'asimmetria radiante pari a ΔT per l'appartamento C1* pag. 60
Figura 4.11 *Numero di ore durante le quali si riscontra un'asimmetria radiante pari a ΔT per l'appartamento E1* pag. 61
Figura 4.12 *Principio di funzionamento di un ciclo inverso* pag. 62
Figura 4.13 *Andamento del COP in funzione della differenza di temperatura tra l'utenza e la sorgente* pag. 64
Figura 4.14 *Campo di lavoro della pompa di calore* pag. 65
Figura 4.15 *Andamento del COP in funzione della temperatura esterna per una temperatura di uscita dal condensatore di 35, 40, 45 e 50 °C* pag. 65
Figura 4.16 *Modello con pompa di calore centralizzata senza accumulo* pag. 66
Figura 4.17 *Schema e caratteristiche dell'accumulo* pag. 68
Figura 4.18 *Modello con pompa di calore centralizzata con accumulo* pag. 69
Figura 4.19 *Andamento della temperatura climatica* pag. 70
Figura 4.20 *Confronto tra i consumi elettrici del modello senza accumulo e di quello con accumulo* pag. 72
Figura 4.21 *Schema di funzionamento della caldaia* pag. 74
Figura 4.22 *Caldaia a pellet* pag. 78
Figura 4.23 *Confronto tra le singole ipotesi di intervento* pag. 81
Figura 4.24 *Valori di EPi limite in funzione dei gradi giorno (GG) e del rapporto S/V (superficie su volume)* pag. 83
Figura 4.25 *Valori limite di EPi per le diverse classi energetiche per il riscaldamento invernale* pag. 84
Figura 4.26 *Valori limite per le diverse classi energetiche per la produzione di acqua calda sanitaria* pag. 85
Figura 4.27 *Valori limite per le diverse classi energetiche degli edifici* pag. 86

Figura 5.1	*Profili della potenza elettrica richiesta dall'edificio per le settimane tipo delle stagioni estiva (in rosso), invernale (in azzurro) e primaverile e autunnale (in verde)*	pag. 90
Figura 5.2	*Pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria*	pag. 91
Figura 5.3	*Schema e dimensioni dei moduli fotovoltaici*	pag. 94
Figura 5.4	*Produzione del fotovoltaico a seconda della potenza installata per le tre collocazioni sul tetto*	pag. 96
Figura 6.1	*Spesa annuale per tipologia di impianto di riscaldamento*	pag. 107
Figura 6.2	*Interventi incentivabili con il conto termico. Categoria 1: interventi di incremento dell'efficienza energetica in edifici esistenti (art. 4, comma 1)*	pag. 111
Figura 6.3	*Interventi incentivabili con il conto termico. Categoria 2: interventi di piccole dimensioni di produzione di energia termica da fonti rinnovabili e di sistemi ad alta efficienza (art. 4, comma 1)*	pag. 112
Figura 6.4	*Ritorno dell'investimento per il caso di isolamento termico dell'involucro edilizio e sostituzione degli infissi*	pag. 115
Figura 6.5	*Ritorno dell'investimento per il caso di isolamento termico dell'involucro edilizio, sostituzione degli infissi e installazione della pompa di calore centralizzata*	pag. 115
Figura 6.6	*Ritorno dell'investimento per il caso di isolamento termico dell'involucro edilizio, sostituzione degli infissi e installazione della caldaia centralizzata a condensazione*	pag. 116
Figura 6.7	*Ritorno dell'investimento per il caso di isolamento termico dell'involucro edilizio, sostituzione degli infissi e installazione della caldaia centralizzata a pellet*	pag. 116
Figura 6.8	*Valore attuale netto (VAN) a 25 anni*	pag. 117
Figura 6.9	*Indice di profittabilità (IP) a 25 anni*	pag. 118
Figura 6.10	*Ritorno dell'investimento per l'installazione dell'impianto fotovoltaico da 15 kW di potenza*	pag. 120
Figura 6.11	*Valore attuale netto (VAN) a 25 anni*	pag. 121
Figura 6.12	*Indice di profittabilità (IP) a 25 anni*	pag. 121
Figura 1	*Schermata iniziale di TRNBuild*	pag. 128
Figura 2	*Finestra di comando di una zona termica*	pag. 129
Figura 3	*Finestre per la creazione di nuove superfici opache e di nuovi materiali*	pag. 130
Figura 4	*Schermata di Simulation Studio del modello dell'edificio*	pag. 131

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1.1. *Tappe principali della legislazione italiana sull'edilizia sociale* pag. 4
Tabella 2.1. *Alcune caratteristiche geografiche di Castelfranco Veneto* pag. 14
Tabella 2.2. *Temperature massima, minima, media annuale e media della stagione di riscaldamento* pag. 16
Tabella 2.3. *Temperature medie e giorni di riscaldamento per ogni mese* pag. 17
Tabella 2.4. *Indirizzi e numero di appartamenti per ogni condominio* pag. 20
Tabella 2.5. *Superfici nette degli appartamenti* pag. 22
Tabella 2.6. *Materiali utilizzati nel modello TRNBuild e loro caratteristiche* pag. 28
Tabella 2.7. *Tipologie di strutture opache del condominio* pag. 29
Tabella 2.8. *Caratteristiche del vetro* pag. 32
Tabella 2.9. *Caratteristiche del telaio* pag. 32
Tabella 2.10. *Superfici nette e valori dei carichi interni per i diversi appartamenti* pag. 34
Tabella 2.11. *Fabbisogno annuale totale (Q), fabbisogno specifico (Qs) e potenza massima richiesta (Pmax) in riscaldamento (h) e raffrescamento (c) per ogni appartamento e per il condominio nel suo complesso* pag. 36
Tabella 3.1. *Limiti di legge della trasmittanza in [W/m^{2}K] per interventi di riqualificazione edilizia* pag. 40
Tabella 3.2. *Limiti della trasmittanza termica in [W/m^{2}K] per poter accedere alle agevolazioni fiscali per la ristrutturazione* pag. 40
Tabella 3.3. *Caratteristiche del polistirene espanso* pag. 41
Tabella 3.4. *Caratteristiche della lana di roccia* pag. 42
Tabella 3.5. *Caratteristiche dell'isolante multistrato* pag. 42
Tabella 3.6. *Caratteristiche del vetro* pag. 43
Tabella 3.7. *Caratteristiche del telaio* pag. 43
Tabella 3.8 *Riduzione percentuale del fabbisogno energetico netto rispetto allo stato di fatto* pag. 46
Tabella 4.1 *Caratteristiche costruttive dell'impianto radiante* pag. 52
Tabella 4.2 *Rendimenti di emissione, regolazione e distribuzione* pag. 55
Tabella 4.3 *Caratteristiche tecniche della pompa di calore in due condizioni operative* pag. 65
Tabella 4.4 *Caratteristiche tecniche della caldaia per le condizioni di pieno carico e di carico parziale* pag. 75

Tabella 4.5 *Caratteristiche tecniche della caldaia alle condizioni nominali* pag. 78
Tabella 4.6 *Rendimenti di emissione, regolazione e distribuzione* pag. 79
Tabella 4.7 *Caratteristiche tecniche della caldaia alle condizioni nominali* pag. 80
Tabella 4.8 *Fattori di conversione in energia primaria* pag. 81
Tabella 4.9 *Energia primaria totale, energia primaria specifica e riduzione percentuale del consumo di energia primaria rispetto alla situazione esistente* pag. 82
Tabella 4.10 *Valori limite per l'edificio in esame per l'individuazione delle classi energetiche* pag. 86
Tabella 4.11 *Consumi di energia primaria in funzione della tipologia di intervento* pag. 87
Tabella 4.12 *Consumi di energia primaria per l'acqua calda sanitaria* pag. 87
Tabella 4.13 *Classi energetiche dell'edificio in funzione della tipologia di intervento* pag. 88
Tabella 5.1 *Caratteristiche tecniche della pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria* pag. 91
Tabella 5.2 *Consumi elettrici per la distribuzione, per la generazione e totali nel caso di pompa di calore con accumulo* pag. 93
Tabella 5.3 *Caratteristiche tecniche di un modulo fotovoltaico nelle condizioni standard (STC)* pag. 94
Tabella 5.4 *Caratteristiche tecniche di un modulo fotovoltaico nelle condizioni NOCT* pag. 95
Tabella 5.5 *Energia prodotta dall'impianto fotovoltaico in un anno per le diverse ipotesi formulate* pag. 96
Tabella 5.6 *Produzione dell'impianto fotovoltaico, fabbisogno elettrico, quota di autoconsumo ed energia prelevata dalla rete per i quattro casi studiati e per le tre orientazioni dell'impianto di potenza installata 15 kW* pag. 98
Tabella 5.7 *Produzione dell'impianto fotovoltaico, fabbisogno elettrico, quota di autoconsumo ed energia prelevata dalla rete per i quattro casi studiati e per le tre orientazioni dell'impianto di potenza installata 20 kW* pag. 99
Tabella 5.8 *Produzione dell'impianto fotovoltaico, fabbisogno elettrico, quota di autoconsumo ed energia prelevata dalla rete per i quattro casi studiati e per le tre orientazioni dell'impianto di potenza installata 25 kW* pag. 100

Tabella 5.9 *Percentuali di autoconsumo dell'edificio rispetto alla produzione dell'impianto fotovoltaico per i tre casi 15 kW, 20 kW e 25 kW di potenza installata, nel caso di impianto collocato interamente sulla falda est del tetto* pag. 101
Tabella 5.10 *Quota del fabbisogno elettrico coperta dal fotovoltaico per i tre casi 15 kW, 20 kW e 25 kW di potenza installata, nel caso di impianto collocato interamente sulla falda est del tetto* pag. 101
Tabella 6.1 *Prezzi unitari e spesa totale dei diversi interventi* pag. 105
Tabella 6.2 *Prezzi di energia elettrica, gas metano e pellet a seconda della tipologia di impianto considerata, calcolati sulla base della fascia di consumo* pag. 107
Tabella 6.3 *Risparmio totale e percentuale sulla spesa annua per i diversi tipi di intervento rispetto al caso di caldaie autonome senza isolamento termico dell'involucro edilizio* pag. 108
Tabella 6.4 *Tipologie di intervento incentivabili nel caso in esame e schede tecniche corrispondenti* pag. 109
Tabella 6.5 *Scheda tecnica, vita utile e valori annuale e totale dell'incentivo per ogni tipologia di intervento considerata* pag. 110
Tabella 6.6 *Soggetti ammessi e corrispettive categorie di intervento incentivabili* pag. 112
Tabella 6.7 *Valore annuale, durata e valore totale dell'incentivo per ogni tipologia di intervento considerata* pag. 113

INTRODUZIONE

Sempre più spesso oggi si fa riferimento al concetto di *sviluppo sostenibile*, uno sviluppo che risponda alle esigenze del presente senza compromettere la possibilità per le generazioni future di soddisfare le proprie, come definito dalla Commissione Indipendente sull'Ambiente e lo Sviluppo già nel 1987. Non così spesso, tuttavia, la parola *sostenibilità* viene declinata in tutte le sue dimensioni: ambientale, sociale ed economica. Nel trattare il settore dell'edilizia residenziale pubblica, invece, non si può prescindere dall'affrontare l'idea di *sviluppo sostenibile* in tutte le sue forme.

Il settore residenziale è responsabile di circa il 40% del consumo globale di energia in Europa. Ridurre i consumi e migliorare l'efficienza negli usi energetici di questo settore, quindi, risulta essere un passaggio obbligato per rispettare quegli obiettivi che l'Europa impone in campo ambientale.

L'edilizia residenziale pubblica in Italia rappresenta una piccola percentuale del patrimonio residenziale occupato. Nonostante ciò, il potenziale di intervento è di notevole importanza per l'avvio di un piano di riqualificazione energetica del settore residenziale nel suo complesso. Gran parte degli immobili, infatti, sono stati costruiti intorno alla metà del secolo scorso, quando gli standard energetici richiesti erano minimi o inesistenti. Interventi di riqualificazione energetica che coinvolgano questi edifici potrebbero quindi portare a grossi risultati in termini di riduzione dei consumi. Un piano di riqualificazione energetica di questo settore, inoltre, rientra negli obiettivi europei che attribuiscono un ruolo dimostrativo agli interventi sul patrimonio pubblico in quanto la maggior parte degli immobili sono di proprietà e gestiti da organismi pubblici. Infine, essendo questo stock abitativo composto in parte da condomini di proprietà sia pubblica che privata, gli interventi di riqualificazione energetica potrebbero coinvolgere anche un rilevante numero di alloggi privati.

Le politiche di edilizia residenziale pubblica coinvolgono per lo più persone con difficoltà economiche e sociali. Non devono quindi essere trascurati gli aspetti di comunicazione e coinvolgimento delle singole utenze. Un progetto di

riqualificazione, infatti, deve essere compreso e condiviso da chi poi usufruirà dell'edificio considerato in quanto i comportamenti dei singoli individui sono determinanti per il raggiungimento degli obiettivi prefissati di riduzione dei consumi e di efficienza energetica.

Gli interventi proposti devono tener conto anche del fatto che le disponibilità economiche degli attori coinvolti (gli inquilini proprietari degli appartamenti, quelli in affitto e l'ente pubblico) spesso non sono sufficienti per affrontare gli investimenti richiesti dalle opere di riqualificazione. È necessario perciò individuare forme di finanziamento che possano garantire la copertura finanziaria degli interventi.

Esiste quindi un ampio margine di miglioramento in campo energetico per quanto riguarda il settore di edilizia residenziale pubblica. Ci sono tuttavia anche notevoli difficoltà che possono essere superate solo attraverso una stretta collaborazione tra tutti gli attori coinvolti.

In questo lavoro di tesi viene svolta un'analisi di riqualificazione energetica di un condominio di edilizia residenziale pubblica situato a Castelfranco Veneto. Dopo un'introduzione sulle politiche di edilizia residenziale pubblica attuate nel corso degli anni e sui propositi futuri del settore sviluppata nel capitolo 1, l'attenzione viene portata sul caso pratico dell'edificio in esame. Nel capitolo 2 vengono descritti l'edificio oggetto di studio e la modellazione dello stato di fatto dello stesso condotta mediante il software di simulazione dinamica TRNSYS. Nel capitolo 3 si passa ad analizzare l'ipotesi di retrofit dell'involucro edilizio. Nel capitolo 4 vengono quindi sviluppate alcune proposte di intervento sull'impianto di riscaldamento e vengono individuate le classi energetiche dell'edificio per le singole ipotesi. Nel capitolo 5 dapprima viene esaminata un'ipotesi di intervento sull'impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria, in seguito viene condotta un'analisi dei consumi elettrici del condominio e valutata la possibilità di installare un impianto fotovoltaico sul tetto dell'edificio. Nel capitolo 6 viene infine svolta un'analisi economica dei singoli investimenti.

CAPITOLO 1. L'EDILIZIA RESIDENZIALE PUBBLICA

1.1. CENNI STORICI

Il problema abitativo iniziò ad affermarsi in Europa già nel 1800. Lo spopolamento delle campagne e l'aumento della popolazione nelle città che ebbero origine con la rivoluzione industriale generarono molti problemi in diversi ambiti, da quello sociale a quello sanitario, da quello economico a quello abitativo. Fu solo nel XX secolo, tuttavia, che nacque l'idea che lo Stato dovesse intervenire direttamente per garantire qualità di vita minime a tutti gli abitanti; uno Stato che avesse il ruolo non solo di risolvere i problemi contingenti ma anche quello di pianificare le politiche future affinché non si creassero nuove situazioni di disagio sociale.
La Tab. 1.1 riassume le tappe fondamentali della legislazione in materia di edilizia sociale in Italia. Anche il nostro Paese, infatti, pur rimanendo fino alla seconda metà del XX secolo per lo più agricolo, fu coinvolto nei mutamenti sociali derivati dall'industrializzazione. Il primo intervento legislativo su questo tema in Italia risale al 1903: la legge Luzzatti. Essa aveva principalmente i seguenti obiettivi:

- frenare la speculazione privata;
- creare nuove possibilità di investimento dei capitali;
- migliorare le condizioni di vita delle fasce più deboli (proletari, piccoli artigiani, piccoli proprietari rurali, ecc.). Nella legge si specificava in effetti che alla base di qualsiasi intervento di edilizia popolare avrebbe dovuto esserci non un interesse economico o esigenze di profitto, quanto piuttosto il "bene Casa";
- creare nuova ricchezza tassabile da parte dello Stato senza alcun investimento diretto da parte dello stesso.

Per ottenere questi obiettivi la legge si rivolgeva a soggetti privati per la costruzione di nuovi alloggi popolari garantendo loro importanti agevolazioni

fiscali. La legge prevedeva anche la creazione degli Istituti Autonomi per le Case Popolari (IACP), enti con competenza territoriale comunale dotati di autonomia decisionale in materia, nati da cooperative, società di mutuo soccorso, enti ed istituzioni di beneficienza, banche, Monti di Pietà e Comuni consorziati tra loro. La legge, tuttavia, non specificava ancora il carattere giuridico ed economico che tali enti dovevano assumere. Per questo infatti si dovette attendere la promulgazione del Testo Unico sull'Edilizia Popolare del 1908. Gli IACP divennero quindi a tutti gli effetti enti pubblici senza scopo di lucro.

Anno	Evento
1903	Legge Luzzatti
1908	Testo Unico sull'Edilizia Economica e Popolare
1938	Secondo Testo Unico
1942	Legge urbanistica
1949-1955	Primo settennio INA fabbricato
1955-1963	Secondo settennio INA Casa
1962	Legge 167
1963	Piano Decennale Gescal
1972	Riforma dell'Edilizia Residenziale Pubblica (Legge 865)
1975-1977	Piani straordinari: leggi 166 e 513
1978	Legge 457
1991	Legge 179
2000	Legge 136
2001	Legge 21
2008	Definizione di "Alloggio Sociale"
2009	Piano Nazionale per l'Edilizia Abitativa

Tab. 1.1. Tappe principali della legislazione italiana sull'edilizia sociale.

Nei decenni successivi, per finanziare i loro progetti edilizi, gli IACP furono costretti a ricorrere al credito non solo dei comuni ma anche di altri enti.
Con il Testo Unico sull'edilizia economica e popolare del 1938 la gestione degli Istituti Autonomi venne affidata alle Province.
A partire dal secondo dopoguerra, per finanziare l'edilizia economica e popolare, oltre al ricorso al credito esterno, vennero previste delle erogazioni

dirette da parte dello Stato. Dopo la Seconda guerra mondiale la necessità più impellente era quella di ricostruire ciò che la guerra aveva distrutto. Fu proprio questo bisogno a fungere da stimolo ai due piani settennali INA. Questi furono realizzati attraverso due provvedimenti: la legge 43 del 28 febbraio 1949 (piano Fanfani) e la legge 408 del 2 luglio 1949 (la legge Tupini). La prima aveva come obiettivo l'incremento dell'occupazione operaia mediante la costruzione di case per lavoratori. Vennero perciò definite caratteristiche tecniche e tipologiche degli alloggi al fine di edificare il maggior numero di alloggi al minor costo possibile. Questo provvedimento, tuttavia, era rivolto esclusivamente ai lavoratori dipendenti. Venne quindi redatta la legge 408 che si rivolgeva a tutti i cittadini indipendentemente dal lavoro da essi svolto purché fossero in possesso di determinati requisiti economici e sociali. Mancò tuttavia in questo periodo un regolare flusso di investimenti, con conseguenti problemi di bilancio per gli istituti stessi.

Negli anni Sessanta l'obiettivo della legislazione si spostò verso la creazione di quartieri popolari finalizzati a rispondere alle necessità del boom economico di quegli anni. In quel decennio infatti un numero di persone sempre maggiore si spostò dalle campagne verso le principali città, spinto dalla speranza di un lavoro che gli avrebbe garantito una vita dignitosa. Si presentò perciò la necessità di individuare nuovi spazi per l'edilizia popolare. A questo scopo venne presto fatto uso dell'esproprio, strumento reso legale dalla legge 167 del 1962: "Disposizioni per favorire l'acquisizione di aree fabbricabili per l'edilizia economica e popolare". Per tutto il decennio l'interesse principale fu quello di costruire. Questa spinta spesso non era accompagnata da alcuna attenzione nei confronti del contesto urbano in cui le opere edilizie andavano ad inserirsi. Fu così che si diede avvio alla realizzazione delle periferie delle grandi città, caratterizzate da grandi palazzoni occupati in prevalenza da famiglie operaie con una quasi totale assenza di servizi: un esempio poco edificante di progettazione urbanistica nonché di integrazione tra le diverse fasce sociali.

Si dovettero attendere gli anni Settanta per l'introduzione del concetto di "recupero" nell'ambito dell'edilizia sociale. Con la legge 865 del 1972 si diede avvio alle prime politiche di recupero dell'esistente e si iniziò a parlare di

“Edilizia Residenziale Pubblica” e non più di “Edilizia Popolare”. Fu con questa legge inoltre che gli IACP vennero trasformati da Enti Pubblici Economici ad Enti Pubblici non Economici.

Solo con la legge 457 del 1978, tuttavia, furono incentivati attraverso i Piani di Recupero (PdR) i primi interventi con finalità di conservazione, ricostruzione o miglioramento del patrimonio edilizio e urbanistico esistente. Questi investimenti non furono però sufficienti per attuare un reale cambiamento del settore. La legge infatti permetteva agli IACP anche l’accesso a significativi finanziamenti pubblici. Ciò comportò un forte aumento dell’attività edilizia, ancora una volta non accompagnata da un’accurata pianificazione territoriale.

Sempre agli anni Settanta risale la decisione di trasferire progressivamente alle Regioni la gestione degli Istituti e delle politiche sull’edilizia pubblica. Iniziò in questo modo una lenta riorganizzazione degli Enti Pubblici.

Il decennio successivo fu caratterizzato da un profondo vuoto legislativo. Si dovette attendere fino agli anni Novanta per vedere nuove proposte di legge in materia. Vennero quindi promossi programmi di Riqualificazione Urbana (PRiU) a partire dal 1992 e di Recupero Urbano (PRU) dal 1993 con l’obiettivo di attuare interventi sul patrimonio di edilizia residenziale pubblica attraverso un insieme di opere di realizzazione, manutenzione e ammodernamento dei complessi urbanistici esistenti. Diverse Regioni, come il Veneto nel 1995 e la Lombardia nel 1996, inoltre, trasformarono nuovamente gli enti per l’edilizia residenziale pubblica da Enti Pubblici non Economici ad Enti Pubblici Economici.

A partire poi dagli anni 2000, con la modifica della Carta Costituzionale attraverso la legge costituzionale n°3 del 18-10-2001, si affidò alle Regioni il potere legislativo su tutte le materie non riservate alla competenza esclusiva dello Stato (che manteneva per esempio il compito di individuare i livelli essenziali minimi delle prestazioni atti a garantire i diritti fondamentali stabiliti dalla Carta Costituzionale). Anche la gestione delle politiche sull’edilizia pubblica venne quindi interamente delegata alle Regioni. Mancò tuttavia la definizione delle linee guida che avrebbero dovuto indirizzare le politiche pubbliche sulla casa.

1.2. LO STATO ATTUALE

Secondo le stime Istat del 2006 oltre il 70% delle abitazioni in Italia è di proprietà, mentre il 19% è in affitto (Fig. 1.1). Queste ultime sono per quasi il 70% di privati cittadini e per il 23 % (corrispondente a circa 973.000 abitazioni) di proprietà di un Ente pubblico (Fig. 1.2).

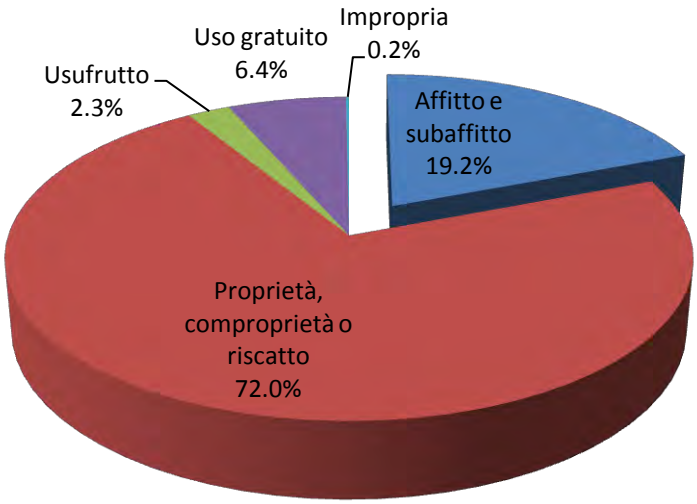


Fig. 1.1. Titolo di godimento dell'abitazione.

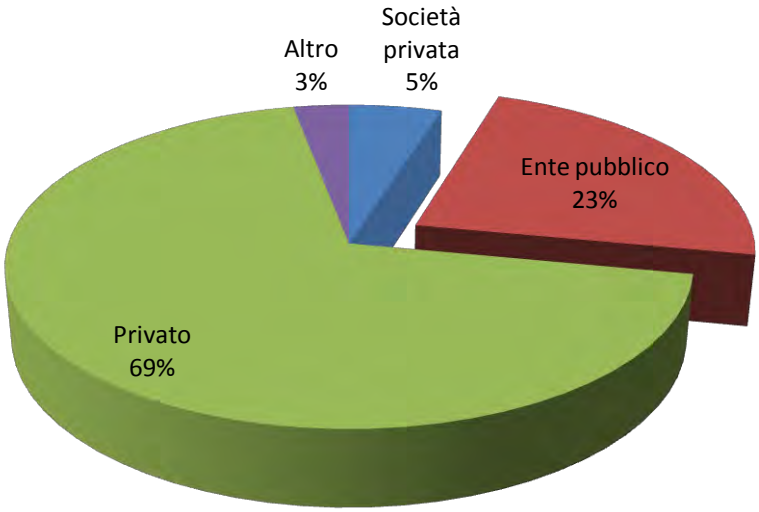


Fig. 1.2. Proprietà dello stock in affitto.

Oggi parlare di edilizia sociale non significa solo rispondere alla domanda di nuovi alloggi, ma anche affrontare i nuovi bisogni sociali che si stanno delineando come indicato dal Decreto del Ministro delle Infrastrutture Prot. n° 3904 del 2008 in cui è stata data una nuova definizione di alloggio sociale. Questo è "l'unità immobiliare adibita ad uso residenziale in locazione permanente che svolge la funzione di interesse generale, nella salvaguardia della coesione sociale, di ridurre il disagio abitativo di individui e nuclei familiari svantaggiati, che non sono in grado di accedere alla locazione di alloggi nel libero mercato. L'alloggio sociale si configura come elemento essenziale del sistema di edilizia residenziale sociale costituito dall'insieme dei servizi abitativi finalizzati al soddisfacimento delle esigenze primarie".

Nel 2009 è stato emanato il Piano Nazionale per l'edilizia abitativa che prevedeva tra l'altro il finanziamento di interventi di competenza dell'edilizia residenziale pubblica e la costituzione di un sistema di fondi immobiliari per alloggi sociali. Questo piano, tuttavia, è stato riconosciuto parzialmente illegittimo dalla Corte Costituzionale nel 2010.

I requisiti per l'accesso e la permanenza negli alloggi sociali vengono oggi definiti dalle Regioni in base alle condizioni economiche dei richiedenti, alla composizione del nucleo familiare e alle caratteristiche dell'alloggio. Questo in particolare deve soddisfare precisi parametri di salubrità e sicurezza. In genere per essere ritenuto adeguato esso deve avere un numero di vani non inferiore al numero di componenti del nucleo familiare. Gli alloggi di nuova costruzione, inoltre, devono rispettare i principi di sostenibilità ambientale e di risparmio energetico stabiliti dalla legge. Ancora oggi manca però un preciso orientamento legislativo in materia di edilizia e di urbanistica.

1.3. NUOVI INDIRIZZI PER NUOVI PROBLEMI

Negli ultimi decenni la società europea si è trovata ad affrontare profondi cambiamenti in diversi ambiti.

Sotto il profilo sociale e culturale l'aumento della popolazione anziana, la presenza di forti comunità straniere non solo nelle grandi città, ma anche nei paesi più piccoli, l'affermarsi di nuove forme di famiglia stanno determinando un

profondo cambiamento nell'organizzazione della società in tutta Europa, e così pure in Italia.

Non di secondaria importanza è l'aspetto economico. La crisi di questi ultimi anni, infatti, ha colpito gravemente il tessuto sociale europeo espandendo la fascia di popolazione più povera.

Si deve infine ricordare l'importanza che il tema ambientale ha assunto nelle decisioni politiche degli ultimi anni. I problemi ecologici legati all'inquinamento e al riscaldamento globale hanno oggi un ruolo centrale in gran parte delle scelte politiche europee. A partire dal protocollo di Kyoto del 1997 la legislazione in materia si è evoluta in modo significativo. Nel 2009, in Europa è entrato in vigore il "Pacchetto clima-energia" (il cosiddetto "Piano 20-20-20"). Esso prevede che tutti i Paesi europei, entro il 2020, riducano del 20% le emissioni di gas serra, portino al 20% il risparmio energetico e aumentino al 20% il consumo di fonti rinnovabili.

Per poter rispettare tali obiettivi la legislazione in materia di energia si è notevolmente evoluta nel corso degli anni. Per quanto riguarda il settore edilizio, l'Europa ha affrontato per la prima volta il tema del rendimento energetico degli edifici con la direttiva "Energy Performance Building Directive" (EPBD) 2002/91/CE. L'obiettivo era quello di delineare delle misure atte a migliorare il rendimento energetico degli edifici esistenti e di nuova costruzione. Tale direttiva è stata recepita dall'Italia con il Decreto Legislativo 19 agosto 2005 n. 192, successivamente integrato con il Decreto Legislativo 29 dicembre 2006 n. 311.

La Direttiva 2002/91/CE è stata poi sostituita dalla Direttiva 2010/31/UE che persegue gli stessi obiettivi prevedendo tuttavia delle integrazioni. In particolare, per quanto riguarda il settore edilizio, la direttiva specifica che "gli edifici sono responsabili del 40 % del consumo globale di energia nell'Unione. Il settore è in espansione, e ciò è destinato ad aumentarne il consumo energetico. Pertanto, la riduzione del consumo energetico e l'utilizzo di energia da fonti rinnovabili nel settore dell'edilizia costituiscono misure importanti necessarie per ridurre la dipendenza energetica dell'Unione e le emissioni di gas a effetto serra. Unitamente ad un maggior utilizzo di energia da fonti rinnovabili, le misure

adottate per ridurre il consumo di energia nell'Unione consentirebbero a quest'ultima di conformarsi al protocollo di Kyoto allegato alla convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC) e di rispettare sia l'impegno a lungo termine di mantenere l'aumento della temperatura globale al di sotto di 2 °C, sia l'impegno di ridurre entro il 2020 le emissioni globali di gas a effetto serra di almeno il 20 % al di sotto dei livelli del 1990 e del 30 % qualora venga raggiunto un accordo internazionale. La riduzione del consumo energetico e il maggior utilizzo di energia da fonti rinnovabili rappresentano inoltre strumenti importanti per promuovere la sicurezza dell'approvvigionamento energetico e gli sviluppi tecnologici e per creare posti di lavoro e sviluppo regionale, in particolare nelle zone rurali."

La direttiva 2010/31/UE specifica anche il ruolo che gli enti pubblici dovrebbero avere nelle politiche riguardanti l'efficienza energetica degli edifici. "Gli enti pubblici dovrebbero dare il buon esempio […]. Gli Stati membri dovrebbero includere, nei loro piani nazionali, misure volte ad incitare gli enti pubblici ad adottare tempestivamente i miglioramenti in materia di efficienza energetica […]."

In Italia, in particolare, il settore dell'edilizia residenziale pubblica offre ampie possibilità di miglioramento delle prestazioni energetiche. La gran parte degli edifici delle aree suburbane, infatti, è stata realizzata dopo il 1950 con tecnologie a basso costo e di scarsa qualità. Per questo tipo di edifici, le strategie più efficaci per migliorare non solo il bilancio energetico ma anche il loro valore architettonico sono l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche dell'involucro edilizio e l'utilizzo di fonti di energia rinnovabili.

Anche se esperienze di riqualificazione energetica sono sempre più frequenti in Europa ed anche in Italia, risulta comunque evidente come gli obiettivi proposti dall'Unione Europea possano essere raggiunti solo attraverso uno sforzo unanime da parte di tutti gli attori coinvolti: dalla politica, alle imprese, alla società civile. È proprio in quest'ultima che negli ultimi anni sembra essere maturata una sensibilità sempre maggiore nei confronti dei risvolti ambientali delle singole scelte politiche. Questa attenzione si riscontra anche in un nuovo modo di intendere l'edilizia e il concetto stesso di città. L'opinione pubblica

esige sempre più spesso una nuova ridefinizione degli spazi urbani e dà un'importanza crescente all'idea di recupero degli immobili esistenti. Vengono apprezzati maggiormente i progetti che prevedono la riqualificazione di strutture esistenti piuttosto che la ricerca di nuovi spazi per la realizzazione di opere edilizie.

Nel quadro appena delineato le scelte urbanistiche non possono più prescindere dalle esigenze ambientali e di integrazione sociale. Esse devono essere "sostenibili" sotto più punti di vista: ambientale, energetico, sociale ed economico.

CAPITOLO 2. STATO DI FATTO DELL'EDIFICIO IN ESAME

2.1. LOCALITÀ

Castelfranco Veneto è un comune italiano di oltre 32.000 abitanti della provincia di Treviso.

Si colloca nella zona occidentale della provincia al confine con quella di Padova ed ha un'estensione di oltre 50 km^2. Nella Fig. 2.1 si può vedere la collocazione geografica del comune all'interno della regione Veneto.

Fig. 2.1. Posizione geografica di Castelfranco Veneto nella Regione.

Negli ultimi anni Castelfranco Veneto si è dimostrata particolarmente attenta alle problematiche ambientali. Ne è testimonianza l'adesione che il Comune stesso ha dato al "Patto dei Sindaci". Si tratta di un movimento europeo su base volontaria nato in seguito all'adozione del pacchetto europeo su clima ed energia (pacchetto 20-20-20). L'adesione al "Patto dei sindaci" comporta un impegno da parte del soggetto sottoscrivente (paese, città o regione) "ad andare oltre gli obiettivi della politica energetica UE in termini di riduzione di emissioni di CO_2 attraverso misure di miglioramento dell'efficienza energetica nell'utilizzo e nella produzione di energia oltre che l'aumento di produzione locale di energia rinnovabile". Il Comune ha realizzato quindi il PAES, un documento che, a seguito di un'analisi della situazione attuale attraverso un Inventario Base delle Emissioni (IBE), specifica gli obiettivi da raggiungere entro il 2020 e le proposte di intervento per il raggiungimento di tali obiettivi. È prevista inoltre una fase di monitoraggio che consentirà di evidenziare i reali progressi ottenuti nel campo della riduzione di emissioni.
Risulta perciò chiaro come tutti quei progetti di riqualificazione edilizia aventi lo scopo di ridurre i consumi degli edifici pubblici e non e di migliorarne l'efficienza energetica si inseriscano perfettamente all'interno del percorso intrapreso dall'amministrazione comunale.

2.1.1. CARATTERISTICHE CLIMATICHE

Nella seguente tabella (Tab. 2.1) sono riportate alcune caratteristiche geografiche del comune di Castelfranco Veneto.

Fascia climatica	E
Altezza massima	58 m
Altezza minima	31 m
Latitudine	45°40'37''20 N
Longitudine	11°55'37''20 E
Gradi giorno	2.429

Tab. 2.1. Alcune caratteristiche geografiche di Castelfranco Veneto.

Per le simulazioni si è scelto di utilizzare i dati climatici forniti da “Energy Plus”. Il “Progetto Finalizzato Energetica” del 1979, realizzato dall’IFA (Istituto di Fisica dell’Atmosfera del CNR) ha portato alla costruzione di un TRY (Test Reference Year) per diverse località italiane. Il metodo utilizzato è il seguente: “utilizzando i dati provenienti dalle stazioni del Servizio Meteorologico dell’Aeronautica Militare (68 stazioni sparse in modo piuttosto omogeneo sul territorio nazionale), raccolti in maniera praticamente continua nel periodo 1951-1970, sono state calcolate, per ogni stazione, il valore medio e la varianza della temperatura dell’aria per ogni mese dell’anno sull’intera popolazione. La stessa operazione è stata poi ripetuta per ogni singolo mese di ogni singolo anno. È stato quindi selezionato quale mese tipo più rappresentativo quello con valore medio e varianza della temperatura dell’aria più prossimi ai valori calcolati per quel mese sull’intera popolazione. L’anno tipo è stato infine costruito come composizione dei mesi tipo.”
I dati sono stati raccolti in diversi record, a seconda della località. Essi sono riportati nel seguente ordine:

1. numero del mese;
2. numero del giorno del mese;
3. ora del giorno;
4. irradiazione oraria diretta sul piano orizzontale in kJ/m^2;
5. irradiazione oraria diffusa sul piano orizzontale in kJ/m^2;
6. temperatura dell’aria in °C;
7. velocità dell’aria in m/s;
8. umidità relativa in %.

Per il progetto sono stati considerati i dati climatici relativi alla località di Istrana (TV), in quanto è la stazione di rilevamento più vicina alla località in esame.
Nella Fig. 2.2 è rappresentato l’andamento della temperatura dell’aria utilizzato nelle simulazioni. Nella Tab. 2.2 sono quindi riportati i valori di temperatura minima e massima annuale, oltre al valore medio.

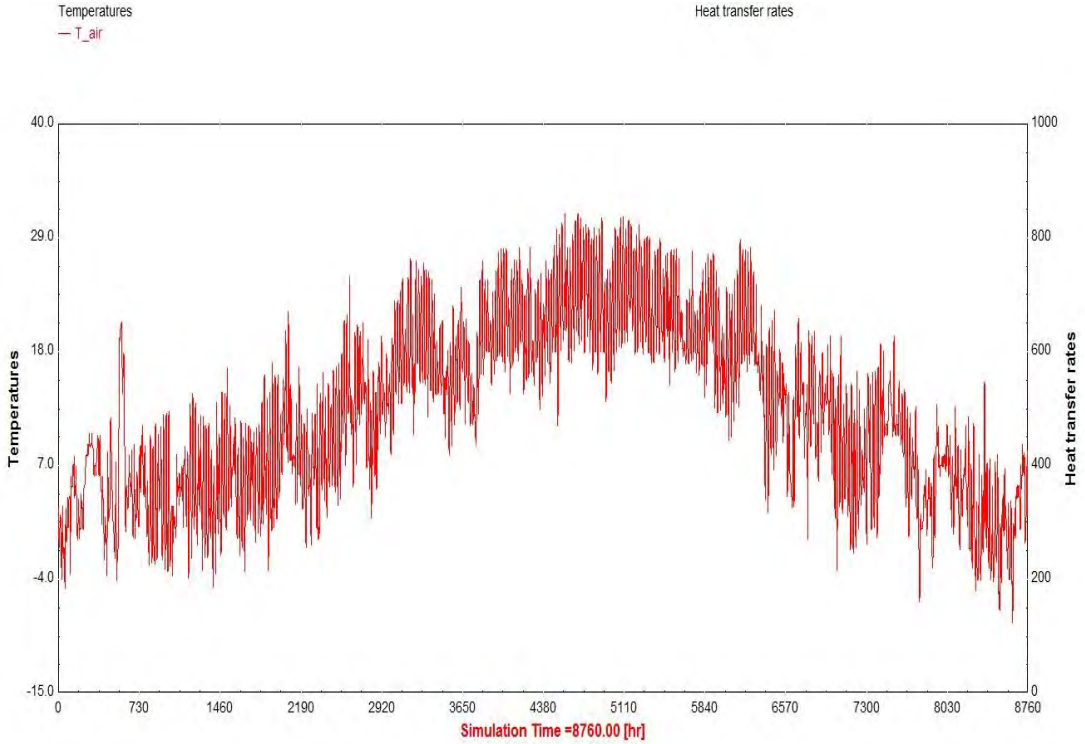


Fig. 2.2. Andamento annuale delle temperature [°C].

	Temperatura [°C]	Giorno
Massima	31.45	10 luglio
Minima	-8.10	26 dicembre
Media annuale	12.20	-
Media della stagione di riscaldamento	5.78	-

Tab. 2.2 Temperature massima, minima, media annuale e media della stagione di riscaldamento.

Vengono di seguito riportate le temperature medie nei singoli mesi e il numero di giorni di riscaldamento per ogni mese (Tab. 2.3). Si ricorda che il periodo di riscaldamento per i comuni in fascia climatica E va dal 15 ottobre al 15 aprile.

Mesi	Temperatura media mensile [°C]	n° di giorni di riscaldamento
Gennaio	4.86	31
Febbraio	4.09	28
Marzo	7.02	31
Aprile	10.19	15
Maggio	17.00	-
Giugno	19.51	-
Luglio	22.83	-
Agosto	22.11	-
Settembre	17.50	-
Ottobre	10.45	16
Novembre	7.67	30
Dicembre	2.55	31

Tab. 2.3. Temperature medie e giorni di riscaldamento per ogni mese.

Nel grafico seguente (Fig. 2.3) è riportato l'andamento della radiazione solare diretta e diffusa sul piano orizzontale per la località in esame.

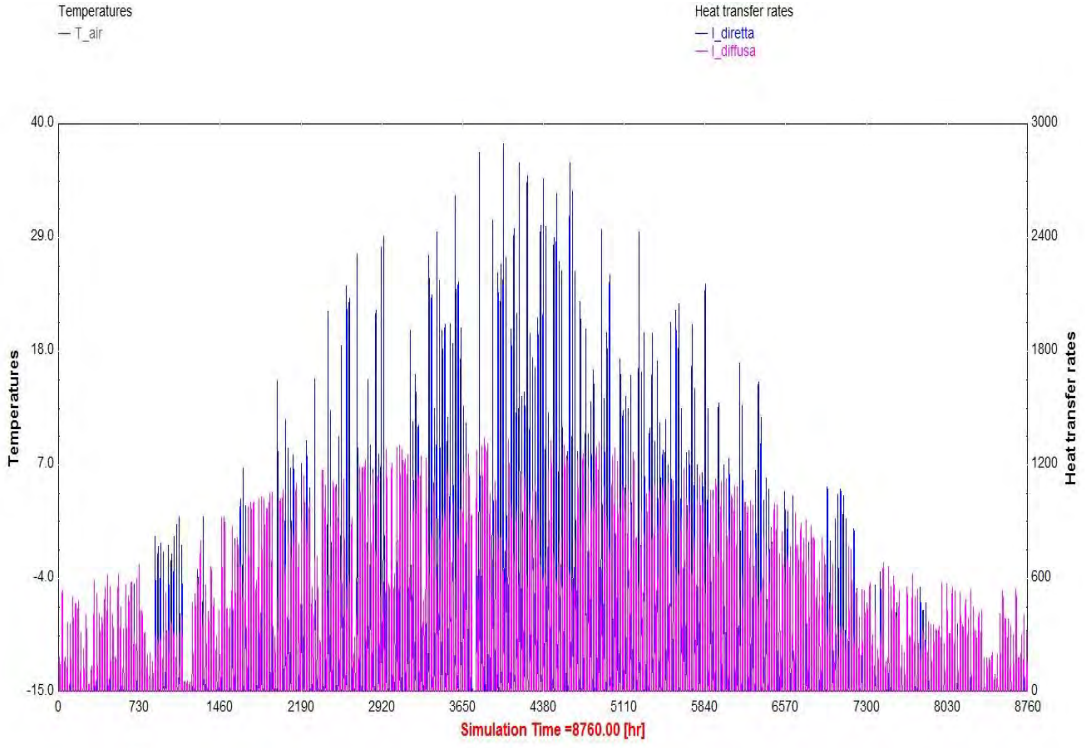


Fig. 2.3. Radiazione diretta e diffusa sul piano orizzontale.

2.1.2. QUARTIERE RISORGIMENTO

Il condominio studiato si trova all'interno del quartiere Risorgimento, a poco più di 1 km a nord-ovest del centro storico (Fig. 2.4). Il cuore del quartiere è un centro polifunzionale con un'area giochi e diversi spazi aperti alle attività promosse o sostenute dall'associazione di quartiere, chiamato centro "Due Mulini".

Nella zona sono presenti diversi condomini di edilizia residenziale pubblica costruiti nella seconda metà del 1900. In particolare in questo progetto viene presa in esame la parte settentrionale del quartiere stesso, lungo le vie Goito e Marsala, dove si trovano il centro polifunzionale e 10 condomini popolari, nonché alcune case singole (Fig. 2.5).

Fig. 2.4. Collocazione del quartiere Risorgimento nel Comune.

Fig. 2.5. Zona nord del quartiere Risorgimento.

I condomini popolari sono stati costruiti alla fine degli anni ’50 e da allora non sono state fatte modifiche sostanziali alle strutture ad eccezione del condominio numero catastale 1187 di via Goito. All’inizio degli anni duemila, infatti, tre appartamenti di questo edificio sono stati divisi per creare sei miniappartamenti. Gli edifici sono stati realizzati dall’AEEP (Ente per l’Edilizia Economica e Popolare di Castelfranco Veneto) e hanno dai 5 ai 15 appartamenti l’uno. Oggi però non tutti gli appartamenti sono di proprietà dell’ente (Tab. 2.4).

Numero catastale	Via	n° totale appartamenti	n° appartamenti privati
1183	Goito	12	3
1184	Goito	12	8
1185	Goito	6	1
1186	Goito	6	3
1187	Goito	15	5
1188	Goito	12	3
1189	Goito	6	3
1190	Goito	5	3
1191	Marsala	6	1
1192	Marsala	12	5

Tab. 2.4. Indirizzi e numero di appartamenti per ogni condominio.

Un aspetto rilevante riguarda l'impianto di riscaldamento dei condomini, la cui realizzazione non era stata prevista in fase di costruzione. I condotti del gas arrivavano fino alla parete esterna di ogni condominio e il completamento dell'impianto era stato delegato ai singoli inquilini. Questa scelta ha comportato una notevole disomogeneità impiantistica. Ogni inquilino ha realizzato un impianto a seconda delle proprie capacità economiche e dei propri gusti: alcuni appartamenti sono ora provvisti di riscaldamento con caldaia a metano e radiatori, altri invece hanno installato stufe a pellet, altri ancora stufe a gas. In generale non si conosce il numero e la tipologia degli impianti di riscaldamento presenti nei diversi condomini. L'unica eccezione è rappresentata dagli appartamenti del condominio numero catastale 1187 che sono stati sdoppiati negli anni 2000 nei quali l'ente ha realizzato un impianto di riscaldamento autonomo a radiatori con caldaia a metano a camera stagna.

2.2. DESCRIZIONE GENERALE DELL'EDIFICIO IN ESAME

Il condominio scelto per l'analisi di riqualificazione è l'edificio numero catastale 1187 di via Goito (Fig. 2.6).

Fig. 2.6. Vista del condominio numero catastale 1187.

Questo condominio, come gli altri del quartiere, è stato realizzato alla fine degli anni cinquanta dall'AEEP (Azienda per l'Edilizia Economica e Popolare di Castelfranco Veneto). Ha subito successivamente delle modifiche durante i primi anni duemila, quando sono stati sdoppiati alcuni appartamenti.

L'edificio, le cui dimensioni in pianta sono di 37.80 m per 10.25 m, è costituito da un piano seminterrato adibito a cantine, da tre piani con appartamenti con cinque appartamenti l'uno e da un sottotetto non praticabile. Cinque dei quindici appartamenti sono di proprietà degli inquilini mentre i restanti dieci sono dell'AEEP.

Nella Fig. 2.7 sono riportate le planimetrie dei singoli piani recuperate dagli archivi dell'AEEP mentre nella Tab. 2.5 sono raccolte le superfici nette dei singoli appartamenti. Sono stati indicati in colore rosso gli appartamenti occupati, in azzurro quelli vuoti e in giallo gli ambienti non riscaldati (il piano

seminterrato, i vani scala e il sottotetto). Come si può notare, attualmente risultano abitati solamente dieci appartamenti su quindici.

Appartamenti	Superficie netta [m^2]
A, B, E	71.13
C	26.41
D	45.87

Tab. 2.5. Superfici nette degli appartamenti.

Gli appartamenti, la cui altezza netta è di 2.80 m, erano inizialmente dodici. Nei primi anni 2000 tre appartamenti sono stati divisi per ricavarne sei (quelli denominati nelle planimetrie con le lettere C e D). L'intervento ha comportato la chiusura delle terrazze preesistenti, simmetriche a quelle degli appartamenti B, in modo da ricavare lo spazio per i bagni degli appartamenti C.

I bagni degli appartamenti D, invece, non hanno pareti rivolte verso l'esterno. Sono perciò provvisti di un impianto di ventilazione forzata.

Per quanto riguarda il piano seminterrato, esso ha un'altezza di 2 m ed una superficie minore rispetto agli altri piani dell'edificio. Esso in effetti confina con il vespaio aerato, un ambiente profondo circa 1.4 m ed interamente riempito di ghiaia.

Il tetto dell'edificio è caratterizzato da due falde spioventi, una in direzione sud-est e l'altra in direzione nord-ovest, inclinate di 13°.

Il sottotetto non è praticabile. Ha un'altezza di 20 cm nel punto più basso e di 1.3 m in quello più alto.

Fig. 2.7. Planimetrie dei diversi piani. Dall'alto verso il basso: piano seminterrato, piano primo, piano secondo, piano terzo, sottotetto. Il rosso indica gli appartamenti occupati, l'azzurro quelli vuoti, il giallo le zone non riscaldate.

2.3. QUESTIONARI

Oltre alle planimetrie del condominio è stato necessario recuperare una serie di informazioni direttamente dagli inquilini. Sono stati perciò presentati loro dei semplici questionari che sono stati compilati durante un colloquio.
Le informazioni richieste riguardavano il comportamento dei soggetti rispetto all'impianto di riscaldamento e/o raffrescamento, alcune specifiche tecniche riguardanti gli impianti stessi, eventuali interventi realizzati nel corso degli anni sull'involucro edilizio e i consumi di gas metano e di energia elettrica. Le informazioni raccolte sono risultate utili per tarare il modello.
Va detto che solamente gli inquilini di sei dei dieci appartamenti occupati si sono resi disponibili per un incontro e per la compilazione del questionario.
Il questionario è suddiviso in quattro parti principali.

1. La prima parte riguarda le informazioni personali e comportamentali dei singoli inquilini. In particolare vengono indicati l'indirizzo preciso (il piano e la posizione dell'appartamento all'interno del condominio), il numero di persone che vi abitano e le ore di occupazione dell'appartamento stesso.
2. La seconda parte riguarda l'involucro: la tipologia di vetri e telai, la presenza o meno di doppie finestre, tapparelle, isolamento del cassonetto, la tipologia di superfici opache (la presenza o meno di isolante e, se nota, la composizione della muratura), eventuali interventi sull'involucro o sugli infissi.
3. La terza parte riguarda l'impianto. Si richiede:
    a. il tipo di combustibile (gas, legna. pellet, elettricità, altro);
    b. il tipo di impianto (autonomo o centralizzato);
    c. il tipo di caldaia (aperta, a camera stagna, a condensazione);
    d. la regolazione dell'impianto (un solo termostato, un termostato per ogni stanza, un termostato in zona giorno e uno in zona notte, una sonda esterna);
    e. l'apparecchio riscaldante (radiatore, stufetta elettrica, stufetta a gas, stufa a legna, stufa a pellet, pavimento radiante).

Viene poi chiesto come avviene la regolazione dell'impianto, a quale temperatura si imposta il termostato durante il giorno, se viene variata la temperatura durante la notte o in particolari momenti della giornata. Se è presente un impianto per il condizionamento estivo si richiedono le medesime informazioni anche per tale impianto.

Infine si chiede se l'impianto dell'acqua calda sanitaria per bagni e cucina è lo stesso dell'impianto di riscaldamento o se è di altra natura (boiler elettrico, scalda acqua a gas, scalda acqua a pompa di calore).

4. La quarta parte riguarda i consumi. In particolare si specifica per quali bisogni viene utilizzato il gas (cucina, riscaldamento, acqua calda sanitaria) e per quali l'energia elettrica (elettrodomestici, illuminazione, acqua calda sanitaria, riscaldamento, raffrescamento). Si procede poi con la visione delle bollette del gas metano e dell'energia elettrica delle quali si trascrivono le letture.

Le informazioni ricavate attraverso i questionari sono certamente passibili di errori talvolta anche piuttosto significativi. Risulta infatti difficile ricavare informazioni precise, soprattutto per quanto riguarda i comportamenti individuali, essendo essi caratterizzati da una forte variabilità.

In particolare è interessante notare come i sei appartamenti degli inquilini intervistati vengano riscaldati utilizzando il gas metano. Tra gli altri, invece, alcuni hanno un impianto di riscaldamento provvisto di caldaia autonoma a camera stagna, mentre altri hanno delle stufe a gas. Alcuni dei sei appartamenti oggetto del questionario sono dotati anche di un sistema di raffrescamento estivo.

Per quanto riguarda i consumi sono state riscontrate alcune difficoltà. In particolare non tutte le letture erano riferite allo stesso arco di tempo.

Diversi inquilini tuttavia erano in possesso delle bollette di diversi anni precedenti quindi è stato possibile fare un confronto tra i consumi di più anni.

2.4. MODELLO

Il modello del condominio è stato creato con l'utilizzo di TRNBuild, l'applicativo di TRNSYS che consente di descrivere in maniera dettagliata l'involucro di un edificio.

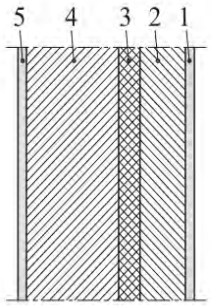
Sono state individuate 19 zone: il piano seminterrato (indicato con I nella precedente Fig. 2.7), i vani scala (V1 e V2), il sottotetto (ST) e i cinque appartamenti di ogni piano (indicati dalle lettere A, B, C, D, E) seguite dai numeri 1, 2 e 3 a seconda del piano di appartenenza.

2.4.1. SUPERFICI OPACHE

La composizione dei muri è stata individuata attraverso il confronto tra l'appendice B della norma *UNI/TS 11300-1 (2008) – Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale* che fornisce delle indicazioni di massima sulla composizione dei muri a seconda della regione e del periodo storico di costruzione dell'edificio e le informazioni ricavate attraverso il colloquio con gli inquilini del condominio stesso. In particolare la norma indica due tipologie di muratura per la regione Veneto per edifici costruiti negli anni 50': le strutture n° 15 e 16 (Fig. 2.8 e Fig. 2.9).

STRUTTURA N° 15: DESCRIZIONE: Muratura in mattoni pieni con intercapedine o isolamento leggero

Sezione struttura



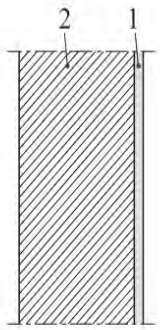
Rif.	Materiali	Massa volumica (kg/m^3)	Conduttività [W/(m × K)]
1	Intonaco interno (a base di calce)	1 600 - 1 800	0,90
2	Muro in laterizio spessore 8 cm	650 - 800	0,30
3	Intercapedine d'aria o polistirolo		
4	Muro in mattoni pieni	1 800	0,72
5	Intonaco esterno	1 800	0,90
6			
7			
8			
9			
10			

Muratura con spessori variabili da 15 cm a 80 cm.

Negli edifici multipiano si riscontrano spessori decrescenti verso i piani più alti.

Fig. 2.8. Struttura n° 15 indicata dalla norma UNI/TS 11300-1.

STRUTTURA N° 16. DESCRIZIONE: Muratura in mattoni pieni a 3 teste

Sezione struttura	Rif.	Materiali	Massa volumica (kg/m^3)	Conduttività [W/(m × K)]
	1	Intonaco interno (a base di calce)	1 600 - 1 800	0,90
	2	Muro in mattoni pieni	1 800	0,72
	3			
	4			
	5			
	6			
	7			
	8			
	9			
	10			

Muratura per cui si considerava non necessario l'isolamento (con o senza intonaco esterno). Spessore tipico 40 cm.

Fig. 2.9. Struttura n° 16 indicata dalla norma UNI/TS 11300-1.

In conclusione si è scelto di considerare tutti i muri in mattoni pieni eccetto i muri da 23 cm che separano gli appartamenti C e D e interni agli appartamenti C. Questi infatti sono stati considerati in mattoni forati in quanto eretti in epoca recente.

Per il solaio interpiano è stata considerata la tipologia a pagina 56 della norma *UNI 10355 (1994) – Murature e solai – Valori della resistenza termica e metodo di calcolo* con spessore di 22 cm.

Per il pavimento sopra il vespaio è stata considerata la stessa struttura del solaio interpiano cui è stato però aggiunto uno strato di ghiaia. Questo perché, in base a quanto sostengono i tecnici dell'AEEP, il vespaio aerato è stato interamente riempito di ghiaia. Il pavimento del piano seminterrato è stato rappresentato con 36 cm di calcestruzzo, con una trasmittanza pari a 2.082 W/m^2K.

Per ogni parete è stato considerato un coefficiente di assorbimento pari a 0.6. Per la superficie esterna del tetto, invece, è stato considerato pari a 0.75. Il tetto, infatti, è in tegole rosse, mentre le pareti sono di colore beige e grigio chiaro.

I materiali utilizzati e le loro caratteristiche sono riassunti nella seguente tabella (Tab. 2.6).

Materiale	Conducibilità [W/mK]	Calore specifico [kJ/kgK]	Densità [kg/m^3]
Bitume	0.170	1.47	1200
Blocco solaio	0.667	0.84	918.18
Calcestruzzo	1.160	0.88	2000
Ghiaia	1.200	0.84	1700
Guaina bituminosa	0.044	1.00	1200
Intonaco di calce	0.900	0.91	1800
Massetto	0.470	0.90	800
Mattoni forati	0.300	0.84	800
Mattoni pieni	0.720	0.84	1800
Piastrelle di porcellana	1.000	0.75	2300
Tegole	0.990	1.00	500
Travi e pignatte	0.570	0.84	1500

Tab. 2.6. Materiali utilizzati nel modello TRNBuild e loro caratteristiche.

Nel modello in TRNBuild è stata distinta ogni parete non solo per lo spessore ma anche per la collocazione (muri interni agli appartamenti, verso l'esterno, verso i vani scala, tra due appartamenti adiacenti, ecc.). In questo modo è risultato successivamente più semplice modificare i parametri in funzione dell'intervento di riqualificazione desiderato.

In conclusione le tipologie di strutture opache presenti nel condominio sono sedici e vengono riassunte nella Tab. 2.7.

Di seguito (dalla Fig. 2.10 alla Fig. 2.16) vengono illustrate più nello specifico le singole tipologie di muratura. Nelle tabelle sono indicati i materiali e gli spessori di ogni strato, oltre alla trasmittanza complessiva della struttura.

Tipologia di struttura muraria	Pareti dell'edificio
Muratura da 20 cm	Alcune pareti del piano seminterrato.
Muratura da 23 cm in mattoni forati	Pareti di divisione tra gli appartamenti C e D. Parte del muro interno degli appartamenti C.
Muratura da 23 cm in mattoni pieni	Pareti dei vani scala lato nord-ovest.
Muratura da 30 cm	Parete esterna lato nord-ovest. Parete esterna dei vani scala. Pareti dei vani scala lati nord-est e sud-ovest. Parte del muro interno degli appartamenti C.
Muratura da 40 cm	Pareti esterne lato nord-est e sud-ovest.
Muratura da 45 cm	Parete esterna lato sud-est.
Muratura da 45 cm interrata	Parete lato sud-est del piano seminterrato.
Muratura da 47 cm	Pareti lati nord-est e sud-ovest del piano seminterrato verso l'esterno.
Muratura da 47 cm interrata	Pareti lati nord-est e sud-ovest del piano seminterrato.
Muratura da 22 cm	Parete del piano seminterrato adiacente al vespaio aerato.
Muratura da 10 cm	Pareti interne degli appartamenti e del piano seminterrato.
Solaio interpiano	Solaio tra il piano seminterrato e il piano primo, tra i piani primo e secondo e secondo e terzo.
Solaio interrato	Pavimento del piano seminterrato.
Solaio adiacente al sottotetto	Pavimento del sottotetto.
Solaio adiacente al vespaio aerato	Pavimento degli appartamenti del primo piano adiacenti al vespaio aerato.
Tetto	Falde del tetto.

Tab. 2.7. Tipologie di strutture opache del condominio.

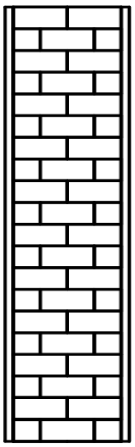


Fig. 2.10. Muratura in mattoni pieni.

		Spessore [m]						
		0.200	0.230	0.300	0.400	0.450	0.470	0.100
Materiali degli strati	Intonaco di calce	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.010
	Mattoni pieni	0.170	0.200	0.270	0.370	0.420	0.440	0.080
	Intonaco di calce	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.010
U [W/m^{2}K]		**2.276**	**2.079**	**1.729**	**1.394**	**1.271**	**1.228**	**3.297**

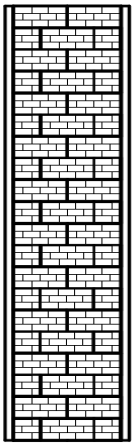


Fig. 2.11. Muratura in mattoni forati.

		Spessore [m]
Materiali degli strati	Intonaco di calce	0.015
	Mattoni forati	0.200
	Intonaco di calce	0.015
U [W/m^{2}K]		**1.149**

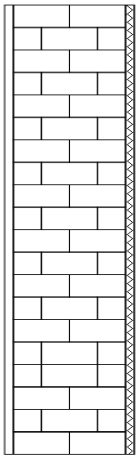
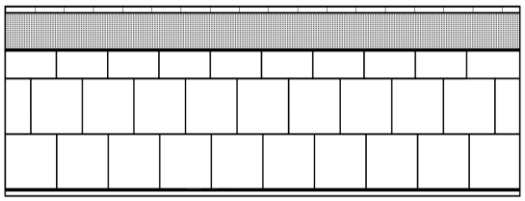


Fig. 2.12. Muratura in mattoni pieni con bitume.

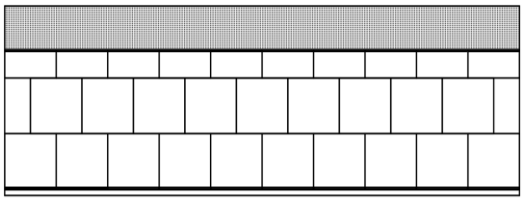
		Spessore [m]		
		0.220	0.450	0.470
Materiali degli strati	Intonaco di calce	0.015	0.015	0.015
	Mattoni pieni	0.190	0.420	0.440
	Bitume	0.015	0.015	0.015
U [W/m^{2}K]		**1.856**	**1.165**	**1.129**

Fig. 2.13. Solaio interpiano di 30 cm.



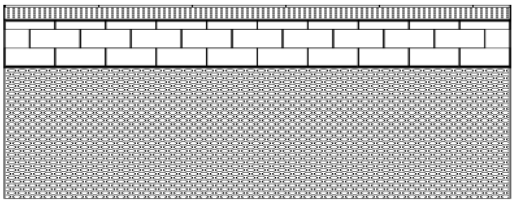
		Spessore [m]
Materiali degli strati	Piastrelle di porcellana	0.010
	Massetto	0.060
	Blocco solaio	0.220
	Intonaco di calce	0.010
U [W/m^{2}K]		**1.541**

Fig. 2.14. Solaio adiacente al sottotetto.



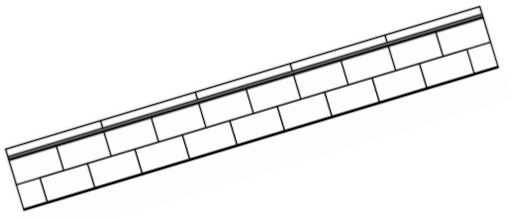
		Spessore [m]
Materiali degli strati	Massetto	0.070
	Blocco solaio	0.220
	Intonaco di calce	0.010
U [W/m^{2}K]		**1.515**

Fig. 2.15. Solaio adiacente al vespaio aerato.



Materiali strati		Spessore [m]
Materiali degli strati	Piastrelle di porcellana	0.010
	Massetto	0.060
	Blocco solaio	0.220
	Ghiaia	0.620
U [W/m^{2}K]		**0.866**

Fig. 2.16. Falda del tetto.



Materiali strati		Spessore [m]
Materiali degli strati	Travi e pignatte	0.100
	Guaina bituminosa	0.005
	Tegole	0.015
U [W/m^{2}K]		**2.109**

2.4.2. SUPERFICI VETRATE

Per le finestre sono state utilizzate due tipologie scelte dalla libreria di Trnsys:

- SINGLE (1001, “Single glazing”, 4 mm);
- INSUL (1002, “Insulating glazing”, 4/16/4 mm).

Per il vetro sono state mantenute le caratteristiche di default (Tab.2.8). Il valore di trasmittanza del telaio, invece, è stato modificato con quello tipico di un telaio in legno tenero (Tab. 2.9).

Vetro		
	SINGLE	INSUL
U [W/m^{2}K]	5.68	2.83
g [%]	0.855	0.755

Tab. 2.8. Caratteristiche del vetro.

Telaio		
	SINGLE	INSUL
U [W/m^{2}K]	1.80	1.80
Area telaio/ finestra [%]	15	15

Tab. 2.9. Caratteristiche del telaio.

La tipologia INSUL è stata utilizzata per tutte le finestre dell’appartamento A1 e per le finestre dei bagni negli appartamenti C1, C2 e C3. Per tutte le altre finestre è stata utilizzata la tipologia SINGLE.

2.4.3. CONDIZIONI INTERNE

Per completare il modello è stato necessario assegnare ad ogni zona termica i parametri di infiltrazione, ventilazione, riscaldamento, raffrescamento, carichi interni, comfort e umidità.

Per poter confrontare i risultati dei singoli interventi è stato necessario considerare delle condizioni standard per ogni appartamento. I parametri non rispettano quindi le attuali condizioni delle singole zone termiche, bensì creano un modello standard che funge da punto di riferimento per valutare qualsiasi ipotesi di intervento.

Di seguito vengono descritti più nello specifico i singoli parametri interni considerati.

2.4.3.1. INFILTRAZIONE

Per ogni zona termica è stato considerato un valore di infiltrazione di 0.3 Vol/h. Questo valore è comunemente utilizzato nelle analisi energetiche degli edifici residenziali.

2.4.3.2. VENTILAZIONE

Non è stato indicato alcun valore di ventilazione. Sono perciò stati trascurati gli apporti derivanti dagli impianti di ventilazione meccanica installati nei bagni degli appartamenti D. Il ricambio d'aria, infatti, è legato principalmente all'apertura e chiusura delle finestre ed è stato compreso di fatto nel valore di 0.3 Vol/h dell'infiltrazione.

2.4.3.3. RISCALDAMENTO

È stata considerata l'ipotesi che tutti gli appartamenti abbiano un sistema di riscaldamento. Sono stati inseriti quindi per tutte le zone termiche i seguenti valori di temperatura di set-point: 18 °C dalle ore 23:00 alle ore 07:00 e 20 °C dalle ore 07:00 alle ore 23:00.
Non è stato posto alcun vincolo alla potenza e nessun tipo di umidificazione.
Per il piano seminterrato, i vani scala e il sottotetto invece non è stata considerata alcuna tipologia di riscaldamento.

2.4.3.4. RAFFRESCAMENTO

È stata considerata una temperatura di set-point per il raffrescamento estivo pari a 26 °C.
Anche in questo caso non è stato posto nessun vincolo alla potenza mentre è stata indicata una percentuale di deumidificazione pari al 50%.
Per il piano seminterrato, i vani scala e il sottotetto non è stata considerata alcuna tipologia di raffrescamento.

2.4.3.5. CARICHI INTERNI

I carichi interni per i diversi appartamenti sono stati calcolati in funzione della superficie interna secondo la seguente formula:

$$\Phi_{int} = (5.294 * Af - 0.01557 * Af^2)\ [W]$$

dove Af è la superficie netta dell'appartamento. La componente radiante è stata considerata pari al 50% del carico complessivo. L'altro 50% è stato considerato convettivo. Nella Tab. 2.10 sono raccolti i valori delle superfici nette e il valore totale dei carichi interni per i singoli appartamenti.
Per il piano seminterrato, i vani scala e il sottotetto non sono stati indicati carichi interni.

	Superficie netta [m^2]	**Q_{int} [W]**
A, B, E	71.13	297.79
C	26.41	128.94
D	45.87	210.08

Tab. 2.10. Superfici nette e valori dei carichi interni per i diversi appartamenti.

2.5. SIMULAZIONI

Per la simulazione è stato utilizzato TrnSTUDIO.
I dati climatici sono stati richiamati attraverso la *type 15-3* nella quale sono state specificate inclinazione ed azimuth delle singole superfici del condominio.
Attraverso la *type 56a* invece è stato richiamato il modello vero e proprio dell'edificio.
Per ogni zona termica sono stati stampati i calori sensibile e latente e le temperature ad intervalli temporali di 15 minuti.
È stata inoltre svolta una simulazione per valutare la correttezza del modello sviluppato. In particolare sono state inserite le condizioni interne dei singoli appartamenti dichiarate dai condomini durante il colloquio. È stata poi fatta la simulazione dinamica ed è stato calcolato il consumo annuo di gas metano a seconda del tipo di impianto termico presente negli appartamenti. I risultati sono

poi stati confrontati con i consumi rilevati dalle bollette visionate durante gli incontri con gli inquilini. Si è notato come in diversi casi i consumi ricavati dalla simulazione si discostino in maniera significativa da quelli reali, con variazioni fino al 66%. Questo errore può avere diverse origini: il modello realizzato potrebbe non rispecchiare il reale stato di fatto dell'edificio, le prestazioni degli impianti di riscaldamento dei singoli appartamenti sono differenti da quelle utilizzate per il calcolo del fabbisogno, la gestione delle temperature all'interno dei locali da parte degli inquilini differisce da quanto dichiarato durante il colloquio. È probabile tuttavia che la causa dell'errore sia da ricercare nelle ultime due ipotesi. Per un appartamento infatti i consumi reali si discostano solo del 2% da quelli ricavati attraverso la simulazione dinamica. Si tratta di un appartamento di cui si conoscono in maniera piuttosto precisa sia le prestazioni degli impianti, sia l'abitudine degli inquilini. Si può quindi concludere che il modello rispecchia con buona approssimazione il reale stato di fatto dell'edificio.

2.6. RISULTATI

Dalla simulazione è stato ottenuto il fabbisogno termico per il riscaldamento nella stagione invernale e per il raffrescamento estivo per ogni appartamento. Mentre per l'inverno è stato trascurato l'apporto del carico latente, per l'estate se n'è tenuto conto. Nella Tab. 2.11 vengono riportati il fabbisogno annuale totale, quello specifico e la potenza massima richiesta di riscaldamento e raffrescamento per ogni appartamento e per il condominio nel suo complesso.
Si può osservare come, ad eccezione dell'appartamento D2, tutti gli altri appartamenti abbiano un fabbisogno specifico per il riscaldamento superiore a 100 kWh/m^2. I consumi più elevati si riscontrano negli appartamenti del terzo piano, caratterizzati da una maggiore dispersione termica. L'appartamento C3 risulta essere il più critico con un fabbisogno specifico di oltre 200 kWh/m^2. In generale il fabbisogno termico specifico più elevato si riscontra negli appartamenti C ed E di ogni piano.

	Q_h [kWh]	Q_c [kWh]	Qs_h [kWh/m^2]	Qs_c [kWh/m^2]	Pmax_h [kW]	Pmax_c [kW]
A1	10903	715	153.3	10.0	6.4	1.9
B1	10293	532	144.7	7.5	6.1	1.7
C1	5001	265	189.4	10.1	2.8	0.9
D1	4841	327	105.5	7.1	3.2	0.9
E1	12647	484	177.8	6.8	7.0	1.8
A2	10248	1212	144.1	17.0	6.6	2.4
B2	8211	1198	115.4	16.8	5.7	2.3
C2	4378	482	165.8	18.3	2.7	1.1
D2	3446	813	75.1	17.7	2.8	1.2
E2	10262	941	144.3	13.2	6.4	2.1
A3	13650	1481	191.9	20.8	7.8	2.7
B3	11473	1430	161.3	20.1	6.9	2.5
C3	5583	562	211.4	21.3	3.1	1.2
D3	5524	963	120.4	21.0	3.6	1.3
E3	13298	1111	187.0	15.6	7.4	2.2
TOT	**129758**	**12515**	**151.4**	**14.6**	**78.5**	**26.1**

Tab. 2.11. Fabbisogno annuale totale (Q), fabbisogno specifico (Qs) e potenza massima richiesta (Pmax) in riscaldamento (h) e raffrescamento (c) per ogni appartamento e per il condominio nel suo complesso.

In Fig. 2.17 è stato rappresentato il carico termico sensibile dell'intero edificio ottenuto dalle simulazioni. I valori negativi rappresentano la potenza termica che deve essere fornita per mantenere le condizioni di set-point impostate, mentre i valori positivi rappresentano la potenza frigorifera.

Segue il grafico della potenza cumulata richiesta dall'edificio (Fig. 2.18). Come si può notare per il 50% delle ore della stagione di riscaldamento la potenza richiesta è inferiore al 40% della potenza di picco.

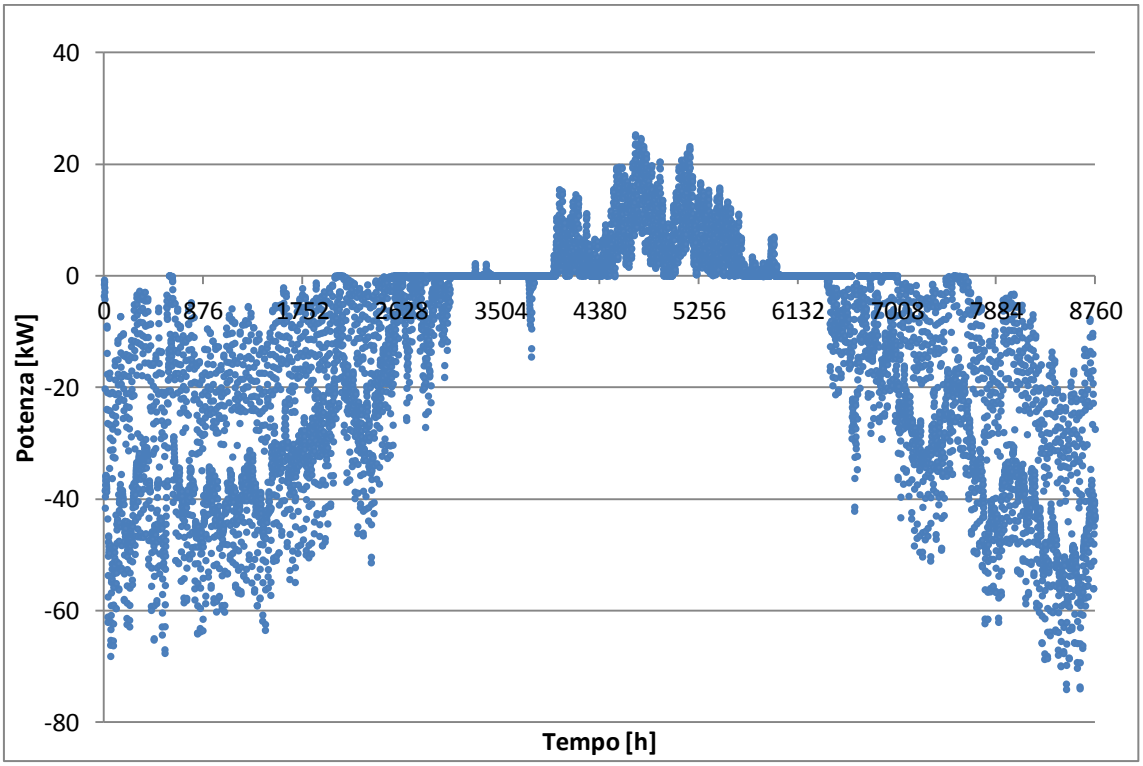


Fig. 2.17. Andamento annuale della potenza richiesta dall'edificio.

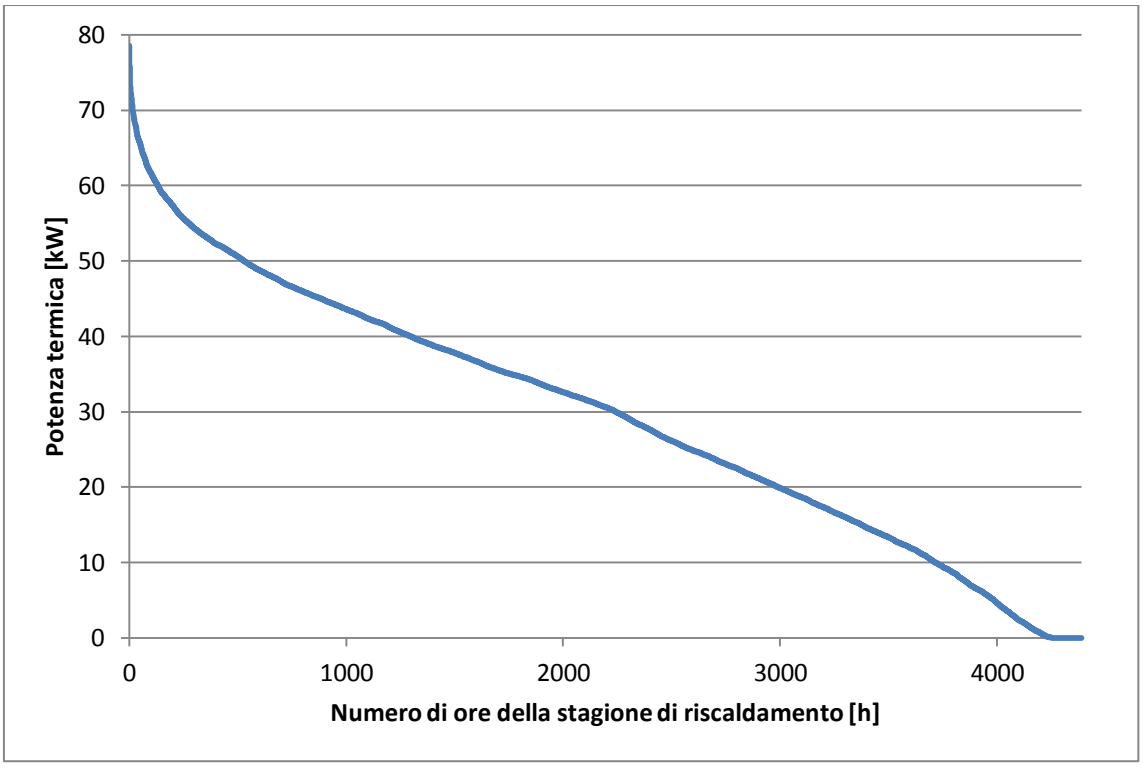


Fig. 2.18. Potenza richiesta dall'edificio durante la stagione di riscaldamento.

CAPITOLO 3. RETROFIT DELL'INVOLUCRO

Da quando l'edificio è stato costruito non è stato fatto alcun intervento per migliorare le prestazioni energetiche dell'involucro nel suo insieme. Come prima cosa sono stati quindi ipotizzati alcuni interventi di miglioramento delle prestazioni termiche delle superfici opache e vetrate descritti nei paragrafi successivi.

3.1. IPOTESI ANALIZZATE

Le ipotesi di intervento fatte, considerate dapprima separatamente e poi nel loro insieme, sono le seguenti:

- isolamento delle pareti esterne con 10 e 15 cm di polistirene espanso;
- isolamento del pavimento del sottotetto con 10 cm di lana di roccia;
- isolamento del soffitto del piano seminterrato con 5 cm di isolante multistrato composto da due strati di 5 mm in lana di legno mineralizzata e legata con cemento ad alta resistenza e da uno strato interno di 40 mm di polistirene espanso estruso;
- sostituzione di tutte le finestre.

Lo spessore degli isolanti è stato scelto in funzione della trasmittanza minima richiesta per legge per interventi di riqualificazione edilizia. Nella Tab. 3.1 sono raccolti i valori limite della trasmittanza termica per legge per la fascia climatica E. Nella Tab. 3.2, invece, sono trascritti, per ogni fascia climatica, i valori limite della trasmittanza per poter accedere agli incentivi fiscali per la ristrutturazione.

	U [W/m^{2}K]
Strutture opache verticali	0.34
Strutture opache orizzontali (coperture)	0.30
Strutture opache orizzontali (pavimenti verso locali non riscaldati o verso l'esterno)	0.33

Tab. 3.1. Limiti di legge della trasmittanza in [W/m^{2}K] per interventi di riqualificazione edilizia.

Zona climatica	Strutture opache verticali	Strutture opache orizzontali o inclinate		Chiusure apribili e assimilabili (**)
		Coperture	Pavimenti (*)	
A	0.54	0.32	0.60	3.7
B	0.41	0.32	0.46	2.4
C	0.34	0.32	0.40	2.1
D	0.29	0.26	0.34	2.0
E	0.27	0.24	0.30	1.8
F	0.26	0.23	0.28	1.6

(*) Pavimenti verso locali non riscaldati o verso l'esterno
(**) Conformemente a quanto previsto all'articolo 4, comma 4, lettera c), del Dpr 2 aprile 2009, n. 59, che fissa il valore massimo della trasmittanza (U) delle chiusure apribili e assimilabili, quali porte, finestre e vetrine anche se non apribili, comprensive degli infissi.

Tab. 3.2. Limiti della trasmittanza termica in [W/m^{2}K] per poter accedere alle agevolazioni fiscali per la ristrutturazione.

3.1.1. ISOLAMENTO DELLE PARETI ESTERNE

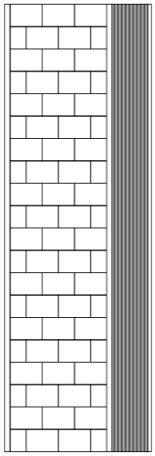
È stato ipotizzato di applicare uno strato di polistirene espanso prima di 10 cm e poi di 15 cm alle pareti esterne dell'edificio senza modificare la struttura muraria preesistente. Il minimo spessore di polistirene espanso che permette di rientrare entro i limiti di legge, infatti, è 10 cm. Uno spessore di 15 cm, invece, consente di accedere anche alle agevolazioni fiscali per la ristrutturazione. L'intervento è completato con l'applicazione di uno strato di intonaco di calce sull'isolante stesso.

Le pareti coinvolte dall'intervento sono tutte quelle perimetrali di tutti i piani, compresa la porzione di muratura verso l'esterno del piano seminterrato e le pareti lato sud-est dei vani scala.

Le caratteristiche del materiale sono riassunte nella seguente tabella (Tab. 3.3). In Fig. 3.1 è visibile la stratigrafia della parete, affiancata da una tabella con le caratteristiche delle diverse pareti oggetto dell'intervento.

Polistirene espanso	
Conducibilità [W/mK]	0.04
Calore specifico [kJ/kgK]	1.34
Densità [kg/m^3]	20

Tab. 3.3. Caratteristiche del polistirene espanso.



		Spessore parete senza isolamento [m]							
		0.300		0.400		0.450		0.470	
Spessore Isolante [cm]		0.100	0.150	0.100	0.150	0.100	0.150	0.100	0.150
Materiali degli strati	Intonaco di calce	0.015		0.015		0.015		0.015	
	Mattoni pieni	0.270		0.370		0.420		0.440	
	Intonaco di calce	0.015		0.015		0.015		0.015	
	Polistirene espanso	0.100	0.150	0.100	0.150	0.100	0.150	0.100	0.150
	Intonaco di calce	0.010		0.010		0.010		0.010	
U [W/m^{2}K]		**0.324**	**0.230**	**0.310**	**0.223**	**0.303**	**0.220**	**0.301**	**0.219**

Fig. 3.1. Pareti esterne.

3.1.2. ISOLAMENTO DEL SOTTOTETTO

La seconda ipotesi prevede l'applicazione di uno strato di lana di roccia di 10 cm sul pavimento del sottotetto. Nella Tab. 3.4 sono indicate le caratteristiche del materiale considerato, mentre nella Fig. 3.2 viene mostrata la stratigrafia del solaio in seguito all'intervento, gli spessori di ogni strato e il valore di trasmittanza termica risultante.

Lana di roccia	
Conducibilità [W/mK]	0.035
Calore specifico [kJ/kgK]	1.03
Densità [kg/m^3]	80

Tab. 3.4. Caratteristiche della lana di roccia.

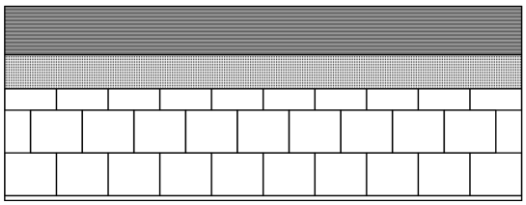


Fig. 3.2. Solaio adiacente al sottotetto.

		Spessori degli strati [m]
Materiali degli strati	Lana di roccia	0.100
	Massetto	0.070
	Blocco solaio	0.220
	Intonaco di calce	0.010
U [W/m^{2}K]		**0.284**

3.1.3. ISOLAMENTO DEL SOFFITTO DEL PIANO SEMINTERRATO

La terza ipotesi prevede l'applicazione di uno strato di 5 cm di un isolante multistrato composto da lana di legno mineralizzata e polistirene espanso estruso sul soffitto del piano seminterrato. Nella Tab. 3.5 sono indicate le caratteristiche del materiale considerato, mentre nella Fig. 3.3 viene mostrata la stratigrafia del solaio in seguito all'intervento, gli spessori di ogni strato e il valore di trasmittanza termica risultante.

Isolante multistrato	
Conducibilità [W/mK]	0.04
Calore specifico [kJ/kgK]	1.81
Densità [kg/m^3]	180

Tab. 3.5. Caratteristiche dell'isolante multistrato.

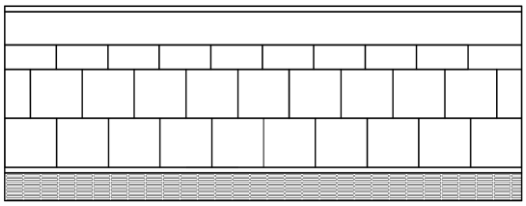


Fig. 3.3. Soffitto del piano seminterrato.

		Spessore degli strati [m]
Materiali degli strati	Piastrelle di porcellana	0.010
	Massetto	0.060
	Blocco solaio	0.220
	Intonaco di calce	0.010
	Isolante multistrato	0.050
U [W/m^{2}K]		**0.527**

3.1.4. SOSTITUZIONE DELLE FINESTRE

Come ultima ipotesi riguardante l'involucro è stata considerata la sostituzione di tutte le finestre del condominio. Dalla libreria di Trnsys è stata scelta la seguente tipologia di finestra:

- INS2_AR_1 (2001, "2-INS Argon", 4/16/4 mm).

Si tratta di una finestra vetro camera con intercapedine di 16 mm riempita con gas Argon (Fig. 3.4). Nelle Tab. 3.6 e Tab. 3.7 sono riportate le caratteristiche rispettivamente del vetro e del telaio della finestra scelta.

Fig. 3.4. Finestra vetro camera con intercapedine di 16 mm con gas Argon.

Vetro	
	INS2_AR_1
U [W/m^{2}K]	1.4
g [%]	0.589

Tab. 3.6. Caratteristiche del vetro.

Telaio	
	INS2_AR_1
U [W/m^{2}K]	1.8
Area telaio/finestra [%]	15

Tab. 3.7. Caratteristiche del telaio.

3.2. RISULTATI

Una volta realizzato il modello in TRNBuild è stata fatta girare la simulazione con Simulation Studio.

Vengono di seguito riportate le variazioni sul fabbisogno termico per il riscaldamento e per il raffrescamento che i singoli interventi comportano (Fig. 3.5).

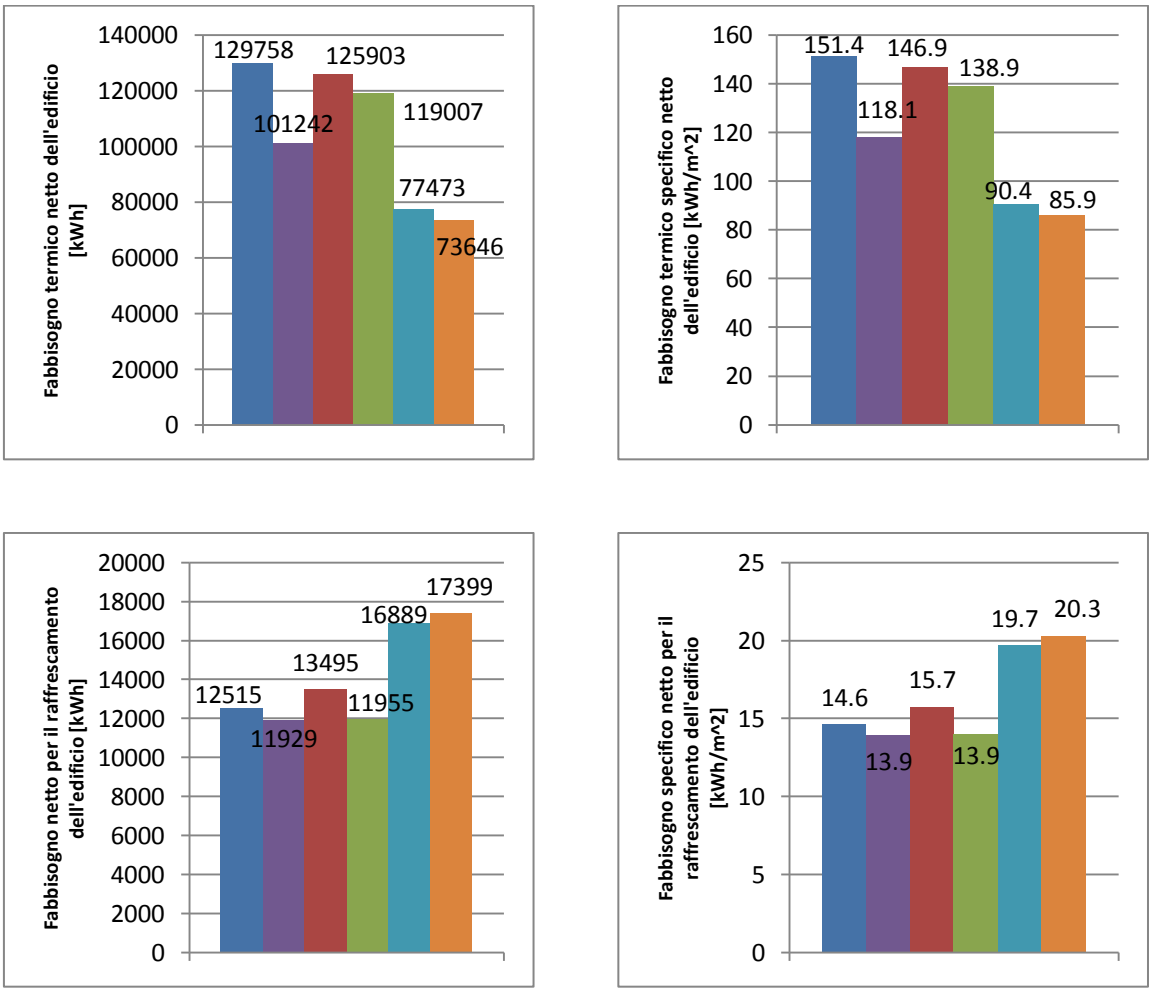


Fig. 3.5. Confronto tra lo stato di fatto e le singole ipotesi di intervento.

Oltre all'analisi dei singoli interventi sono state realizzate delle simulazioni comprendenti tutti gli interventi: la sostituzione delle finestre, l'isolamento del sottotetto e del soffitto del piano seminterrato e l'isolamento delle pareti esterne (con un cappotto prima di 10 cm e poi di 15 cm). Nella Fig. 3.6 vengono confrontati i risultati tra queste ipotesi e lo stato di fatto per la stagione di riscaldamento.

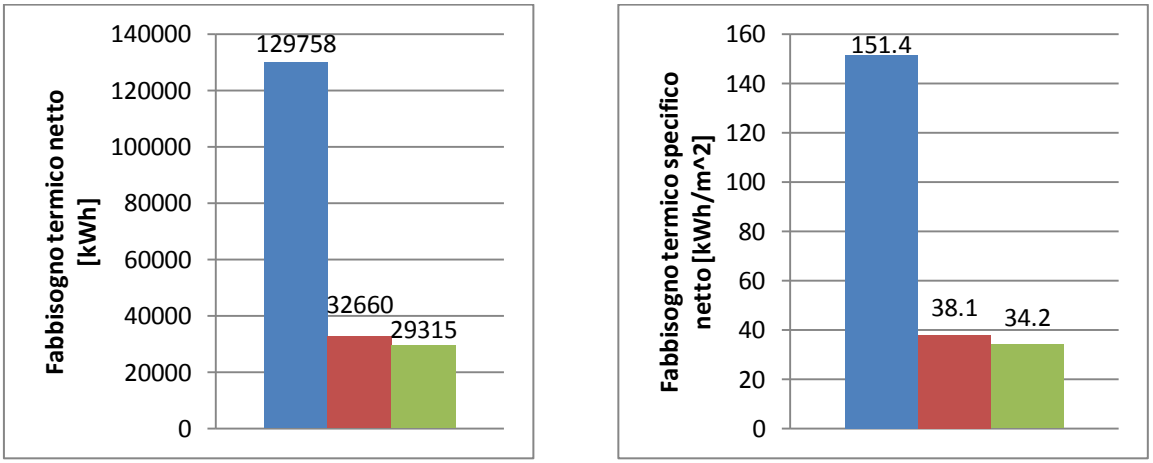


Fig. 3.6. Confronto tra lo stato di fatto e la somma delle singole ipotesi di intervento.

Nella Tab. 3.8 sono riportate le riduzioni percentuali del fabbisogno energetico netto per il riscaldamento dell'edificio che ogni tipologia di intervento comporta rispetto allo stato di fatto.

Nella Fig. 3.7 invece sono riportati gli andamenti della potenza cumulata durante la stagione di riscaldamento per lo stato di fatto e per la somma dei singoli interventi.

Solo sostituzione finestre	**-22%**
Solo isolamento soffitto seminterrato	**-3%**
Solo isolamento sottotetto	**-8%**
Solo cappotto 10 cm	**-40%**
Solo cappotto 15 cm	**-43%**
Sostituzione finestre + isolamento sottotetto e soffitto seminterrato + cappotto 10 cm	**-75%**
Sostituzione finestre + isolamento sottotetto e soffitto seminterrato + cappotto 15 cm	**-77%**

Tab. 3.8. Riduzione percentuale del fabbisogno energetico netto rispetto allo stato di fatto.

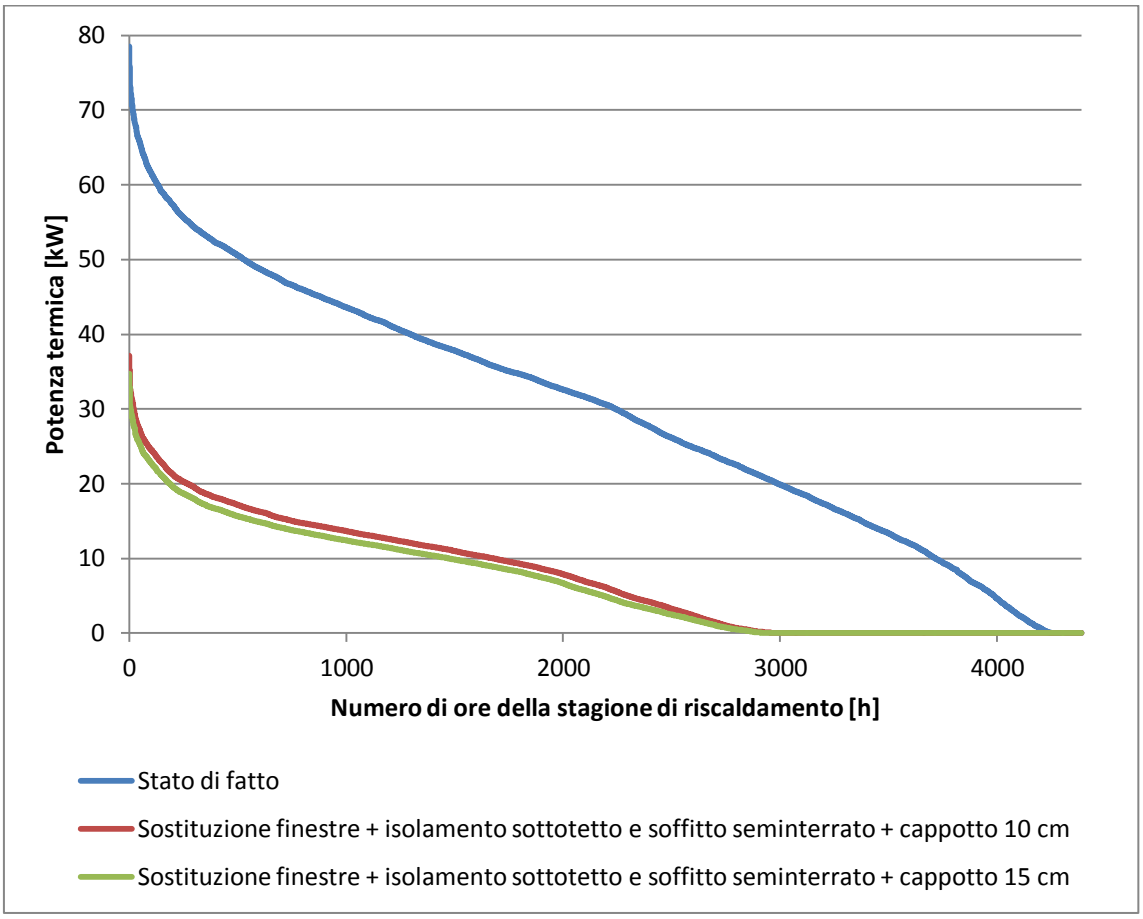


Fig. 3.7. Potenza termica richiesta dall'edificio durante la stagione di riscaldamento.

Dai risultati ottenuti si evince che gli interventi di isolamento termico sull'involucro possono comportare una riduzione anche sensibile del fabbisogno energetico netto per il riscaldamento.

L'intervento che comporta una maggiore riduzione del fabbisogno termico (tra il 40% e il 43%, a seconda dello spessore di isolante utilizzato) è il cappotto esterno, seguito dall'intervento di sostituzione delle finestre che porta ad una riduzione del 22%. Gli interventi di isolamento del sottotetto e del soffitto del piano seminterrato, invece comportano una riduzione assai inferiore del fabbisogno termico (rispettivamente dell'8% e del 3%).

Una conseguenza di tali interventi è la riduzione della potenza termica richiesta durante la stagione invernale che rende interessante l'ipotesi di installazione di impianti di riscaldamento a bassa temperatura.

CAPITOLO 4. RETROFIT DELL'IMPIANTO DI RISCALDAMENTO

Come già evidenziato nel capitolo 2, la situazione impiantistica del condominio è varia. Non esiste in effetti un'unica tipologia di impianto di riscaldamento in quanto ogni inquilino lo ha realizzato individualmente secondo il proprio gusto e le proprie possibilità economiche. In particolare i sei appartamenti nati a seguito dell'intervento di sdoppiamento degli anni duemila hanno un impianto autonomo con caldaia a camera stagna a metano e radiatori mentre tra gli altri nove alcuni hanno un impianto con caldaia autonoma e radiatori, altri stufe a gas o a pellet, altri ancora non hanno alcun impianto di riscaldamento.
La riduzione del fabbisogno termico netto derivante dall'intervento di isolamento termico dell'involucro edilizio giustifica l'utilizzo di un sistema di emissione a bassa temperatura. È stato scelto un sistema radiante a soffitto. Gli interventi previsti per l'installazione di questo impianto, infatti, sono meno invasivi di quelli previsti per la realizzazione di altre tipologie di impianto come ad esempio quella con radiatori. Non sarebbe necessario infatti lo sgombero degli appartamenti e verrebbero ridotti notevolmente i disagi per gli inquilini. L'altezza dei locali, pari a 2.8 m, permette inoltre la realizzazione dell'impianto stesso.
Per ciò che riguarda la generazione di calore, invece, sono state fatte tre ipotesi di intervento che prevedono la sostituzione degli attuali impianti con le seguenti tecnologie:

- pompa di calore centralizzata;
- caldaia centralizzata a gas naturale;
- caldaia centralizzata a pellet.

In tutti i casi è necessaria la creazione di un locale per l'impianto di generazione. Nel caso della caldaia centralizzata a pellet si deve considerare anche lo spazio occupato dal locale di stoccaggio del combustibile. Per questi locali si è ipotizzata l'istallazione di moduli prefabbricati nel cortile del condominio, essendo questo sufficientemente ampio.

Per poter meglio comprendere i risultati ottenuti, queste ipotesi sono state confrontate con il caso di installazione di impianti autonomi con caldaie singole a metano e radiatori in ogni appartamento.
Nei paragrafi successivi vengono descritti prima l'impianto radiante e poi i singoli impianti di generazione.

4.1. IMPIANTO RADIANTE

L'impianto radiante è un sistema di tubazioni che partono da un collettore e vengono ancorate alla superficie riscaldante, ritornando infine al collettore stesso formando così dei circuiti chiusi. L'acqua calda, scorrendo all'interno dei tubi, scambia calore con l'ambiente prevalentemente per irraggiamento.
Questa tipologia di impianto garantisce una distribuzione più omogenea delle temperature all'interno degli ambienti e, lavorando a basse temperature, può essere facilmente accoppiata ad impianti di generazione a fonti rinnovabili.
Esistono tre tipologie principali di sistemi radianti a seconda della collocazione del sistema stesso all'interno dell'ambiente da riscaldare:

- sistema radiante a soffitto;
- sistema radiante a parete;
- sistema radiante a pavimento.

Per il riscaldamento l'impianto a soffitto è meno efficiente dal punto di vista energetico rispetto al sistema a pavimento in quanto il coefficiente di scambio termico convettivo è più basso. Non permette inoltre l'utilizzo dell'intera superficie disponibile: il sistema è di tipo modulare e riesce mediamente a coprire il 70% del soffitto.

4.1.1. CARATTERISTICHE DELL'IMPIANTO RADIANTE SCELTO

Nella Fig. 4.1 è riportato in ascissa il numero di ore in cui è richiesta, alla parte attiva dell'impianto radiante, una resa verso l'ambiente da riscaldare almeno pari al valore indicato in ordinata. Tenendo conto che l'impianto copre il 70% della superficie del soffitto, il massimo valore di resa che l'impianto deve essere in grado di garantire è pari a 76 W/m^2.

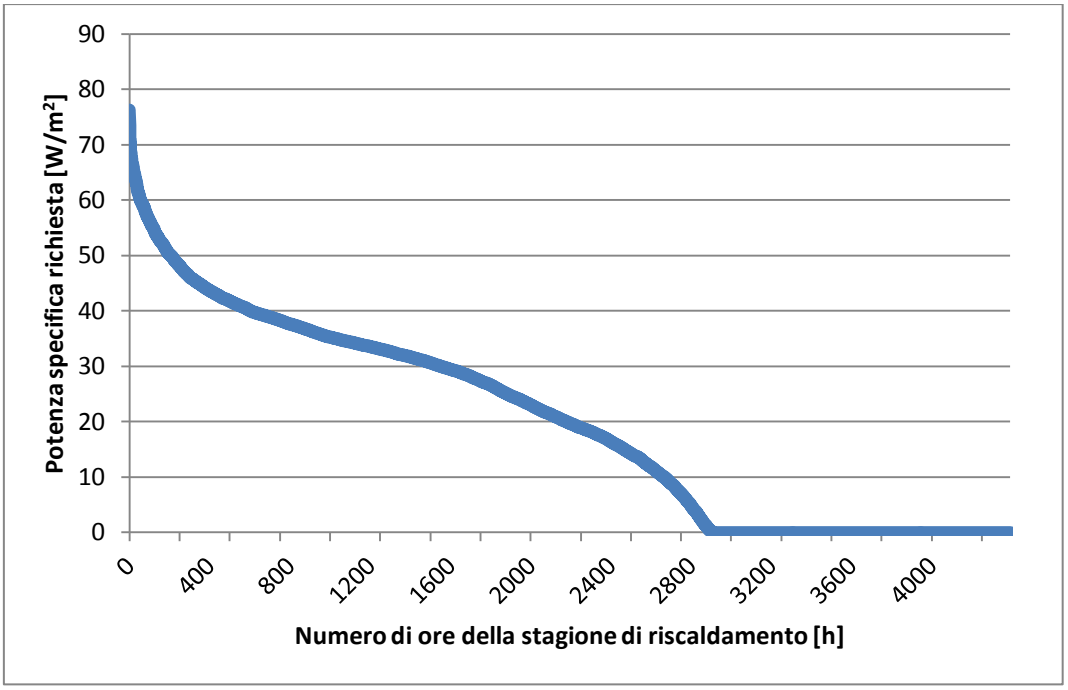


Fig. 4.1. Potenza termica specifica richiesta alla parte attiva del soffitto radiante durante la stagione di riscaldamento.

La norma *UNI/EN1264-3 (1999) – Riscaldamento a pavimento – Impianti e componenti – Dimensionamento* stabilisce la temperatura superficiale massima ammissibile per i diversi sistemi radianti. Per l'impianto a soffitto essa è di 29 °C. Considerando questa temperatura, la resa termica massima ammissibile Φ^* si può ricavare attraverso la seguente formula:

$$\Phi^* = \alpha_{sup} * (t_{sup} - t_i) = 54 \ {}^{W}/_{m^2}$$

dove t_{sup} è la temperatura della superficie radiante, t_i è la temperatura dell'aria dell'ambiente da riscaldare e α_{sup} è il coefficiente di scambio termico che tiene conto di convezione ed irraggiamento che per gli impianti radianti a soffitto in riscaldamento vale 6 W/(m^{2}K).

Dal grafico si può notare come la resa termica superi il valore massimo ammissibile per circa 170 ore durante le circa 4400 ore della stagione di riscaldamento. In questo periodo la temperatura superficiale sarà quindi superiore a 29 °C. Questa condizione è tuttavia accettabile in quanto si verifica

per un periodo limitato di tempo. È stato comunque ritenuto importante sviluppare un'analisi dell'asimmetria radiante nei due appartamenti più sfavoriti per verificare le condizioni di comfort (si veda a tal proposito il paragrafo 4.1.2).
L'impianto radiante a soffitto scelto per il caso in esame è rappresentato in sezione in Fig. 4.2. In Tab. 4.1 sono riportate alcune caratteristiche dell'impianto stesso.

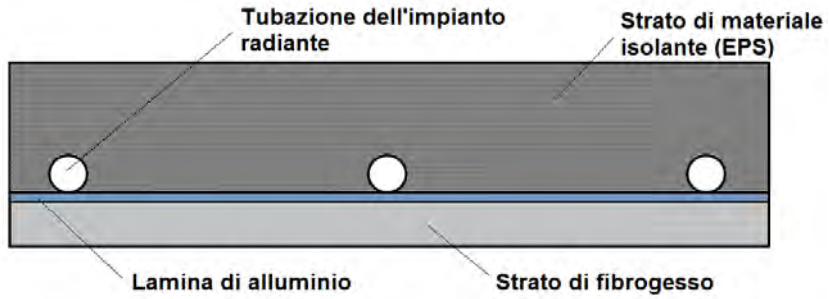


Fig. 4.2. Sezione dell'impianto radiante a soffitto.

Spessore della strato isolante	3.50	cm
Spessore dello strato di fibrogesso	1.25	cm
Diametro dei tubi	1.00	cm
Passo tra i tubi	7.40	cm

Tab. 4.1. Caratteristiche costruttive dell'impianto radiante.

Per i rendimenti di emissione, regolazione e distribuzione sono stati considerati quelli riportati dalla norma *UNI/TS11300-2 (2008), Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria* nei prospetti 17 (Fig. 4.3), 20 (Fig. 4.4) e 21b (Fig. 4.5) rispettivamente.

Rendimenti di emissione (η_e) in locali di altezza minore di 4 m

Tipo di terminale di erogazione	Carico termico medio annuo W/m³ a)		
	<4	4-10	>10
	η_e		
Radiatori su parete esterna isolata (*)	0,95	0,94	0,92
Radiatori su parete interna	0,96	0,95	0,92
Ventilconvettori (**) valori riferiti a t_{media} acqua = 45 °C	0,96	0,95	0,94
Termoconvettori	0,94	0,93	0,92
Bocchette in sistemi ad aria calda (***)	0,94	0,92	0,90
Pannelli isolati annegati a pavimento	0,99	0,98	0,97
Pannelli non isolati annegati a pavimento (****)	0,98	0,96	0,94
Pannelli annegati a soffitto	0,97	0,95	0,93
Pannelli a parete	0,97	0,95	0,93

a) Il carico termico medio annuo, espresso in W/m³ è ottenuto dividendo il fabbisogno annuo di energia termica utile espresso in Wh, calcolato secondo la UNI/TS 11300-1, per il tempo convenzionale di esercizio dei terminali di emissione, espresso in ore, e per il volume lordo riscaldato del locale o della zona espresso in metri cubi.

*) Il rendimento indicato è riferito ad una temperatura di mandata dell'acqua di 85 °C.
Per parete riflettente, si incrementa il rendimento di 0,01.
In presenza di parete esterna non isolata (U > 0,8 W/m² K) si riduce il rendimento di 0,04.
Per temperatura di mandata dell'acqua ≤65 °C si incrementa il rendimento di 0,03.

**) I consumi elettrici non sono considerati e devono essere calcolati separatamente.

***) Per quanto riguarda i sistemi di riscaldamento ad aria calda i valori si riferiscono a impianti con:
- griglie di ripresa dell'aria posizionate ad un'altezza non maggiore di 2,00 m rispetto al livello del pavimento;
- bocchette o diffusori correttamente dimensionati in relazione alla portata e alle caratteristiche del locale;
- corrette condizioni di funzionamento (generatore di taglia adeguata, corretto dimensionamento della portata di aspirazione;
- buona tenuta all'aria dell'involucro e della copertura.

(****) I dati forniti non tengono conto delle perdite di calore non recuperate dal pavimento verso il terreno; queste perdite devono essere calcolate separatamente ed utilizzate per adeguare il valore del rendimento.

Fig. 4.3. Prospetto 17 della norma UNI/TS11300-2.

Rendimenti (η_{rg}) di regolazione [12)]

Tipo di regolazione	Caratteristiche	Sistemi a bassa inerzia termica	Sistemi ad elevata inerzia termica	
		Radiatori, convettori, ventilconvettori, strisceradianti ed aria calda	Pannelli integrati nelle strutture edilizie e disaccoppiati termicamente	Pannelli annegati nelle strutture edilizie e non disaccoppiati termicamente
Solo Climatica (compensazione con sonda esterna)		1 - (0,6 η_u γ)	0,98 - (0,6 η_u γ)	0,94 - (0,6 η_u γ)
Solo ambiente con regolatore	On off	0,94	0,92	0,88
	PI o PID	0,99	0,97	0,93
	P banda prop. 0,5 °C	0,98	0,96	0,92
	P banda prop. 1 °C	0,97	0,95	0,91
	P banda prop. 2 °C	0,95	0,93	0,89
Climatica + ambiente con regolatore	On off	0,97	0,95	0,93
	PI o PID	0,995	0,99	0,97
	P banda prop. 0,5 °C	0,99	0,98	0,96
	P banda prop. 1 °C	0,98	0,97	0,95
	P banda prop. 2 °C	0,97	0,96	0,94
Solo zona con regolatore	On off	0,93	0,91	0,87
	PI o PID	0,995	0,99	0,97
	P banda prop. 0,5 °C	0,99	0,98	0,96
	P banda prop. 1 °C	0,98	0,97	0,95
	P banda prop. 2 °C	0,94	0,92	0,88
Climatica + zona con regolatore	On off	0,96	0,94	0,92
	PI o PID	0,995	0,98	0,96
	P banda prop. 0,5 °C	0,98	0,97	0,95
	P banda prop. 1 °C	0,97	0,96	0,94
	P banda prop. 2 °C	0,96	0,95	0,93

Nota γ rapporto apporti/perdite.
η_u fattore di utilizzo degli apporti definito nella UNI/TS 11300-1.

Fig. 4.4. Prospetto 20 della norma UNI/TS11300-2.

Rendimento di distribuzione

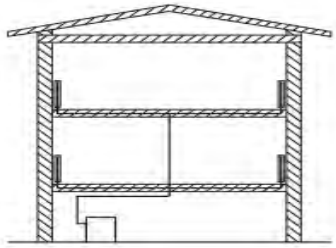
IMPIANTI CENTRALIZZATI A DISTRIBUZIONE ORIZZONTALE					
	Altezza edificio	Isolamento distribuzione			
		Legge 10/91 Periodo di realizzazione dopo il 1993	Discreto Periodo di realizzazione 1993-1977	Medio Periodo di realizzazione 1976-1961	Insufficiente Periodo di realizzazione prima del 1961
	Fino a 3 piani	0,980	0,969	0,958	0,947
	Oltre 3 piani	0,990	0,980	0,969	0,958

Fig. 4.5. Prospetto 21b della norma UNI/TS11300-2.

Il rendimento di emissione viene fornito dalla norma in funzione del carico termico medio annuo [W/m^3] e del tipo di terminale di erogazione. Il rendimento di regolazione viene dato invece in funzione del tipo di regolazione e della tipologia di sistema. Il rendimento di distribuzione infine viene indicato in base al tipo di impianto (autonomo o centralizzato), al tipo di distribuzione, all'altezza dell'edificio e all'anno di costruzione dell'impianto. Questo rendimento deve poi essere modificato attraverso una formula correttiva in funzione delle temperature di mandata e di ritorno di progetto fornita nel prospetto 22 (Fig. 4.6).

Rendimento di distribuzione in funzione della temperatura di mandata e di ritorno di progetto

Temperature di mandata e ritorno di progetto	Rendimento di distribuzione corretto	Tipologia dell'impianto
70/55	$1-(1-\eta)\times 0{,}85$	Impianto a radiatori a temperatura variabile
55/45	$1-(1-\eta)\times 0{,}60$	Impianto a ventilconvettori
30/35	$1-(1-\eta)\times 0{,}25$	Impianto a pannelli
η è il rendimento di distribuzione ricavato dai prospetti 21.		

Fig. 4.6. Prospetto 22 della norma UNI/TS11300-2.

I rendimenti utilizzati sono riassunti nella seguente Tab. 4.2.

$\eta_{emissione}$	97.0%
$\eta_{regolazione}$	99.5%
$\eta_{distribuzione}$	99.5%

Tab. 4.2. Rendimenti di emissione, regolazione e distribuzione.

Tenendo conto di tali rendimenti il generatore di calore deve fornire 30544 kWh/anno. La potenza massima richiesta P_{max} è di 36,2 kW. A partire da questo valore e considerando una differenza di temperatura di progetto ΔT_{prog} pari a 5 °C, è stata calcolata la portata d'acqua dell'impianto m_{prog} come segue:

$$m_{prog} = \frac{P_{max}}{(c_p * \Delta T_{prog})} = 6219 \ \ {}^{l}/_{h}$$

dove c_p è il calore specifico dell'acqua, pari a 4,186 kJ/(kgK).

È stato quindi considerato un coefficiente caratteristico del sistema K_H = 4.376 W/(m^{2}K) che consente di calcolare, a step di 15 minuti, la temperatura media dell'acqua $T_{w,medio}$ all'interno dei tubi attraverso la seguente relazione:

$$T_{w,medio} = T_i + \frac{P^*_{max}}{K_H}$$

dove T_i è la temperatura dell'aria dell'ambiente riscaldato e P^*_{max} è la potenza massima specifica richiesta dall'intero edificio.

La differenza di temperatura dell'acqua tra mandata e ritorno dell'impianto radiante ΔT è stata calcolata, sempre ad intervalli di 15 minuti, come segue:

$$\Delta T = \frac{P}{(c_p * m_{prog})}$$

dove P è la potenza totale richiesta dall'edificio.

Sono infine state calcolate le temperature di mandata $T_{w,v}$ e ritorno $T_{w,r}$ dell'acqua attraverso le seguenti formule:

$$T_{w,v} = T_{w,medio} + \frac{\Delta T}{2} \qquad\qquad T_{w,r} = T_{w,medio} - \frac{\Delta T}{2}$$

Si riscontra che la temperatura di mandata necessaria raggiunge durante la stagione di riscaldamento un valore massimo di circa 40 °C.
La circolazione dell'acqua all'interno dell'impianto radiante è garantita dalla presenza di alcune pompe: una per il tratto dal generatore di calore al collettore centrale, che si è ipotizzato di collocare al primo piano del vano scale indicato come V2 in Fig. 2.7, e una per ogni appartamento. A partire dalle dimensioni e dalle caratteristiche dell'impianto radiante (lunghezza e diametro delle tubazioni, numero dei circuiti in ogni appartamento, rugosità, ecc.) sono state calcolate la portata circolante in ogni appartamento e la prevalenza richiesta. Sono quindi state prese in considerazione due tipologie di pompe ed è stato calcolato il loro consumo annuale in base alle ore di funzionamento. Il consumo elettrico totale dell'impianto di distribuzione risulta essere di circa 1926 kWh di cui 383 kWh per il tratto dal generatore di calore al collettore centrale e 1543 kWh per le pompe dei singoli appartamenti.

4.1.2. ANALISI DEL COMFORT

La norma *UNI/EN/ISO7730 (2006), Ergonomia degli ambienti termici – Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale* definisce il benessere termico come "la condizione mentale di soddisfazione nei confronti dell'ambiente termico". La norma prosegue spiegando come "l'insoddisfazione può essere causata da disagio da caldo o da freddo del corpo nel suo complesso […] oppure da un indesiderato raffreddamento (o riscaldamento) di una particolare parte del corpo".
Le condizioni di comfort all'interno di un certo ambiente sono analizzate attraverso due indici di comfort globale:

- PMV (Predicted Mean Vote);
- PPD (Percentage People Dissatisfied).

Il primo è una funzione di sei variabili indipendenti ed è definito sulla scala di sensazione termica, mentre il secondo definisce la percentuale di persone insoddisfatte. La Fig. 4.7 mostra la relazione sperimentale tra i due indici.

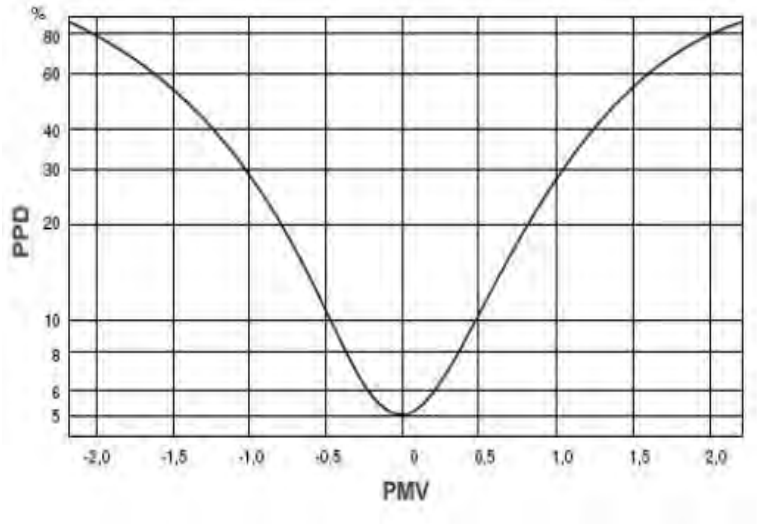


Fig. 4.7. Relazione tra PMV e PPD.

Si può notare come non sia possibile scendere al di sotto di una certa percentuale di persone insoddisfatte (pari al 5%). Come spiega la norma, ciò significa che, "a causa delle diversità individuali, è impossibile individuare un ambiente termico che soddisfi le esigenze di ciascuno; c'è sempre una percentuale di occupanti che si dichiara insoddisfatta".

In generale si possono riscontrare tre problemi principali che possono generare condizioni di discomfort localizzato e che per questo devono essere analizzate opportunamente:

- correnti d'aria;
- asimmetria radiante;
- temperatura della superficie riscaldante.

Mentre le correnti d'aria sono un problema largamente diffuso a prescindere dalla tipologia di impianto di riscaldamento, l'asimmetria radiante e la temperatura della superficie riscaldante sono tipiche degli ambienti provvisti di impianti di riscaldamento radianti.

La temperatura della superficie riscaldante è particolarmente rilevante per i sistemi a pavimento e a parete, piuttosto che per i sistemi a soffitto, poiché le persone sono direttamente a contatto con la superficie calda.

L'asimmetria radiante, invece, si verifica quando all'interno dello stesso ambienti vi è la presenza di ampie superfici calde o fredde che scambiano per

irraggiamento con il corpo umano generando una sensazione di disagio termico. È stato perciò ritenuto necessario, per il caso in esame, verificare che l'installazione dell'impianto radiante a soffitto non generasse particolari condizioni di discomfort.

È stata considerata la relazione tra il PPD e la differenza di temperatura media radiante espressa dal grafico di Fig. 4.8.

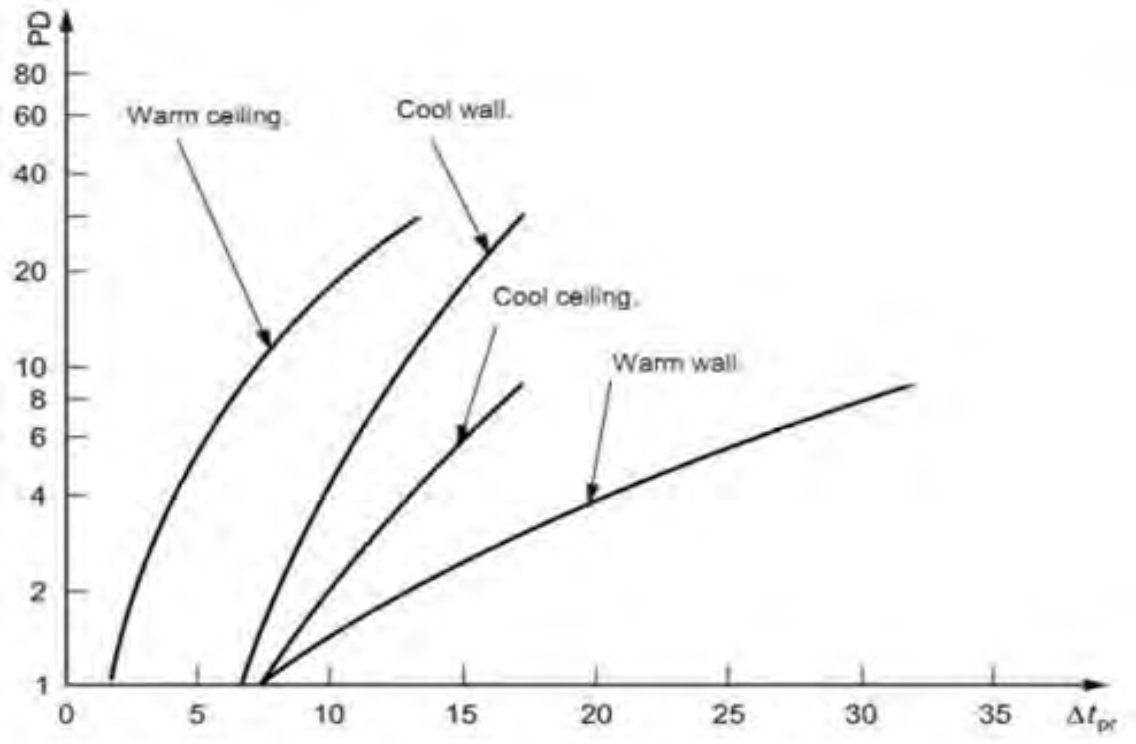


Fig. 4.8. Relazione tra il PPD (Percentuale di Persone Insoddisfatte) e la differenza di temperatura media radiante.

Dal grafico si nota che per mantenere una percentuale di persone insoddisfatte inferiore al 5% è necessario che la differenza di temperatura media radiante non superi i 5 °C.

Per il caso in esame sono stati analizzati i due appartamenti più sfavoriti: l'E1 e il C1 della Fig. 2.7. Il primo, infatti, ha una superficie disperdente estesa ed esposta a nord, mentre il secondo ha la potenza specifica maggiore tra tutti gli appartamenti.

Considerando pari a 1.1 m l'altezza media del baricentro di una persona (Fig. 4.9), per ogni locale è stata calcolata la differenza di temperatura piana radiante media tra le superfici poste superiormente e quelle poste inferiormente a questa altezza.

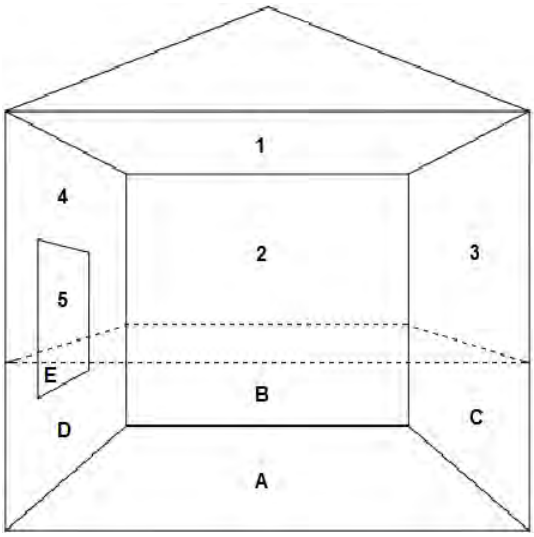


Fig. 4.9. Superfici poste superiormente (da 1 a 5) ed inferiormente (da A ad E) al baricentro del corpo umano di una stanza tipo.

In primo luogo sono state calcolate le temperature media superiore $T_{media,sup}$ e media inferiore $T_{media,inf}$ secondo le seguenti formule:

$$T_{media,sup} = \frac{\sum_i (T_i * A_i)}{\sum_i A_i}$$

$$T_{media,inf} = \frac{\sum_j (T_j * A_j)}{\sum_j A_j}$$

dove T_i è la temperatura della superficie i-esima e A_i la rispettiva area, T_j è la temperatura della superficie j-esima e A_j la rispettiva area. In generale con *i* si intendono tutte le superfici poste ad un'altezza superiore a 1.1 m, mentre con *j* tutte quelle ad un'altezza inferiore. Le superfici considerate sono sia quelle opache che quelle vetrate e le temperature delle superfici stesse sono state ricavate dalla simulazione dinamica fatta con *Simulation Studio*. È stata infine calcolata la differenza di temperatura piana radiante ΔT come:

$$\Delta T = T_{media,sup} - T_{media,inf}$$

I valori di ΔT ottenuti per i locali degli appartamenti C1 ed E1 sono stati riportati rispettivamente nei grafici di Fig. 4.10 e Fig. 4.11. In particolare si è verificato che tale differenza di temperatura non superasse mai i 5 °C, mantenendosi anzi significativamente al di sotto di tale valore per la maggior parte del tempo.
Si può perciò concludere che le temperature alle quali l'impianto radiante si troverà a lavorare non genereranno discomfort all'interno degli appartamenti.

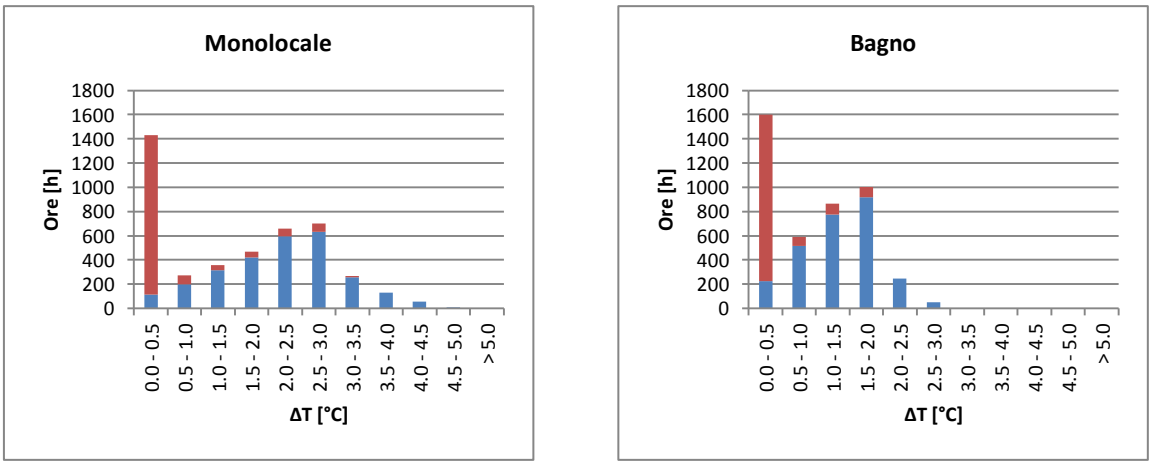


Fig. 4.10. Numero di ore durante le quali si riscontra un'asimmetria radiante pari a ΔT per l'appartamento C1.

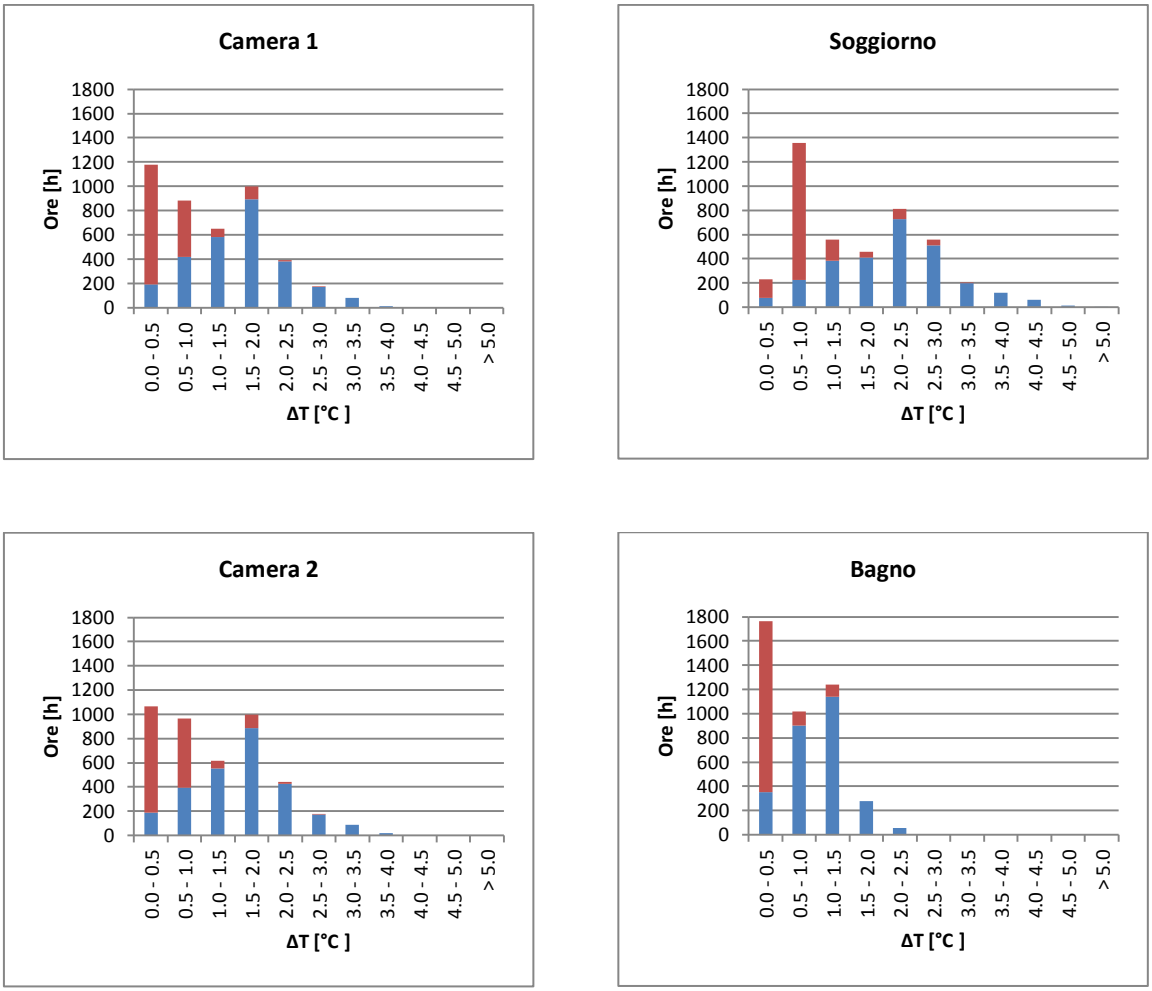


Fig. 4.11. Numero di ore durante le quali si riscontra un'asimmetria radiante pari a ΔT per l'appartamento E1.

4.2. IMPIANTO CENTRALIZZATO CON POMPA DI CALORE ARIA-ACQUA

La pompa di calore è una macchina che funziona tramite un ciclo inverso prelevando calore da un ambiente e trasferendolo in un altro a temperatura più elevata attraverso l'assorbimento di una certa quantità di energia (Fig. 4.12).

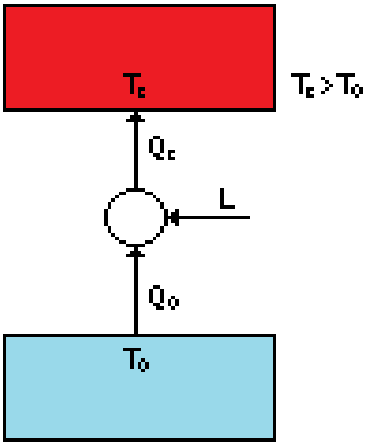


Fig. 4.12. Principio di funzionamento di un ciclo inverso.

A seconda della direzione del flusso di calore (verso l'ambiente interno o verso l'esterno), essa può lavorare per il riscaldamento invernale o per il raffrescamento estivo. Nel caso in cui una stessa macchina sia in grado di operare in entrambe le direzioni si parla di macchina reversibile.

Le pompe di calore possono essere classificate in base al tipo di energia richiesta per il loro funzionamento:

- pompe di calore a compressione;
- pompe di calore ad assorbimento.

Le prime utilizzano energia meccanica, generalmente ricavata da un motore elettrico, per operare un ciclo a compressione di vapore, mentre le seconde utilizzano energia termica in un ciclo ad assorbimento.

La gran parte delle pompe di calore commerciali sono del primo tipo. In questo caso l'efficienza è individuata a seconda dell'effetto utile desiderato. Se lo scopo della macchina è il riscaldamento di un ambiente, l'effetto utile è il calore ceduto all'ambiente stesso. In questo caso il parametro utilizzato per definire

l'efficienza della macchina prende il nome di Coefficiente di Effetto Utile (COP) e viene definito come:

$$COP = \frac{Q_c}{L}$$

dove Q_c è il calore ceduto all'ambiente ed L è il lavoro compiuto dalla macchina. Se invece lo scopo della macchina è il raffrescamento, si utilizza un altro parametro, l'Indice di Efficienza Energetica (EER), definito come:

$$EER = \frac{Q_0}{L}$$

dove Q_0 è il calore sottratto all'ambiente da raffreddare ed L è il lavoro speso.
Le pompe di calore vengono classificate anche in funzione della sorgente termica dalla quale si preleva il calore richiesto. Le sorgenti di calore generalmente utilizzate sono:

- aria;
- acqua;
- terreno.

Anche i fluidi lato utenza e lato sorgente possono variare a seconda delle applicazioni. Si distinguono in questo caso quattro principali tipologie di pompe di calore:

- aria – aria;
- aria – acqua;
- acqua – aria;
- acqua – acqua.

Un importante aspetto di cui tener conto è la dipendenza del COP dalla differenza tra le temperature della sorgente e dell'utenza. All'aumentare di tale differenza, infatti, si nota una riduzione del Coefficiente di Prestazione della macchina (Fig. 4.13).

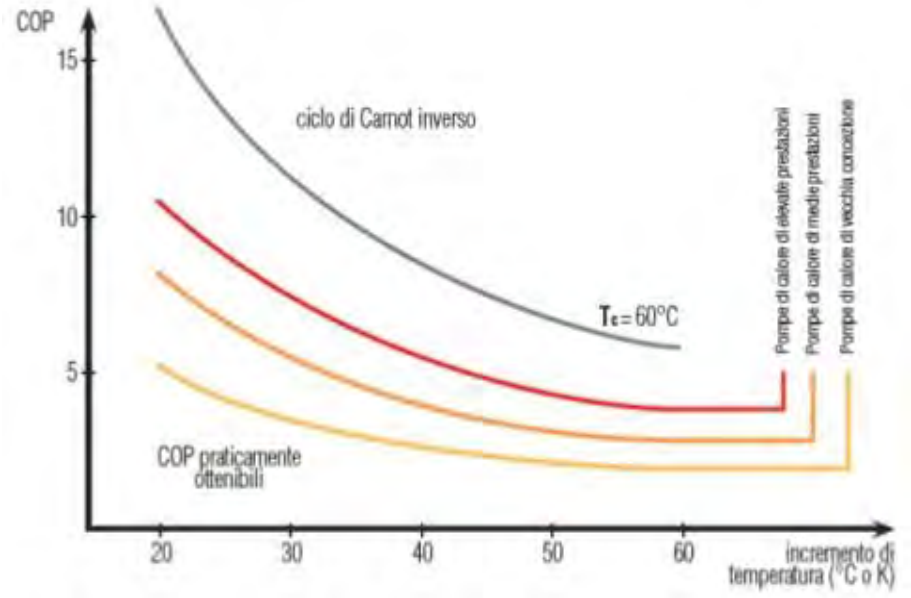


Fig. 4.13. Andamento del COP in funzione della differenza di temperatura tra l'utenza e la sorgente.

4.2.1. CARATTERISTICHE DELLA POMPA DI CALORE SCELTA

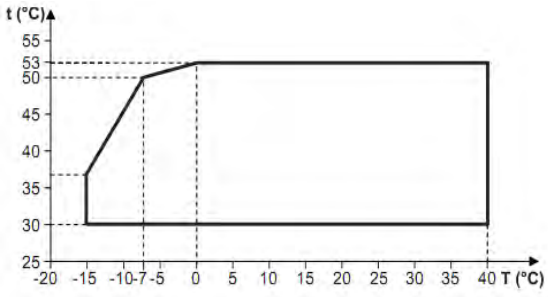
Per il caso in esame è stata scelta una pompa di calore a compressione del tipo aria-acqua. Lo scambiatore di calore lato aria è una batteria alettata con tubi in rame e alette in alluminio, mentre quello lato acqua è uno scambiatore a piastre in acciaio inox. Il modello comprende anche la pompa di circolazione dell'acqua.

Le principali caratteristiche tecniche della pompa di calore sono riassunte nella Tab. 4.3. In Fig. 4.14, invece, è rappresentato il campo di lavoro della pompa di calore in funzione della temperatura dell'acqua prodotta e di quella dell'aria esterna, mentre in Fig. 4.15 è indicato l'andamento del COP in funzione della temperatura dell'aria esterna per diversi valori di temperatura di uscita dal condensatore, come fornito dal costruttore insieme alla potenza termica al condensatore negli stessi punti. La pompa di calore è stata scelta in funzione della potenza termica massima richiesta dall'edificio, pari a 34.7 kW. Come si evince dalla scheda tecnica, la macchina scelta è in grado di fornire questa potenza anche quando la temperatura dell'aria esterna è pari a -7 °C.

Potenza termica[1]	[kW]	55.60
Potenza assorbita[1]	[kW]	15.00
COP[1]	-	3.72
Potenza termica[2]	[kW]	39.70
Potenza assorbita[2]	[kW]	14.00
COP[2]	-	2.84
Potenza elettrica assorbita dalla pompa	[kW]	0.70

[1]Aria: 7 °C B.S. – 6 °C B.U. – Acqua: 30/35 °C
[2]Aria: -7 °C B.S. – Acqua: 35 °C. alla stessa portata d'acqua della condizione [1]

Tab. 4.3. Caratteristiche tecniche della pompa di calore in due condizioni operative.



t (°C)	Temperatura dell'acqua prodotta
T (°C)	Temperatura dell'aria esterna

Fig. 4.14. Campo di lavoro della pompa di calore.

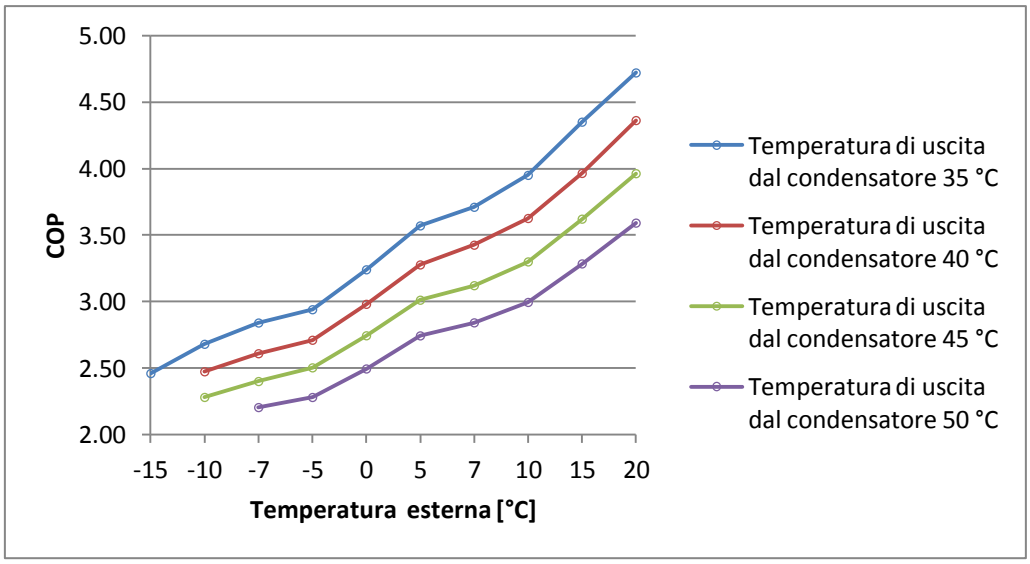


Fig. 4.15. Andamento del COP in funzione della temperatura esterna per una temperatura di uscita dal condensatore di 35, 40, 45 e 50 °C.

4.2.2. SIMULAZIONI

Sono stati realizzati due modelli con la pompa di calore precedentemente descritta: il primo senza accumulo e il secondo con un accumulo. Vengono di seguito descritti i due modelli e i risultati ottenuti.

4.2.2.1. MODELLO SENZA ACCUMULO

Il modello realizzato con Simulation Studio per rappresentare il funzionamento della pompa di calore senza accumulo è rappresentato in Fig. 4.16.
Il funzionamento della pompa di calore è stato modellizzato in un file Excel richiamato nel foglio di lavoro tramite la *type 62*.
La simulazione è stata realizzata a step di 15 minuti.

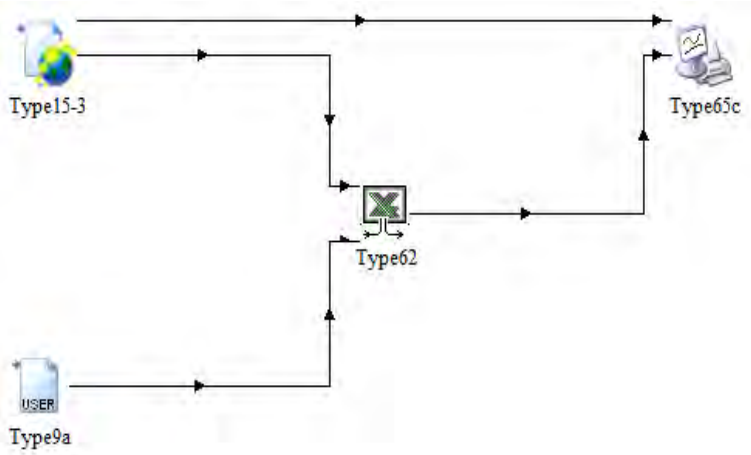


Fig. 4.16. Modello con pompa di calore centralizzata senza accumulo.

I dati di input della pompa di calore sono:

- la temperatura dell'aria esterna;
- la temperatura dell'acqua in uscita dalla pompa di calore;
- la potenza richiesta dall'edificio.

Il primo viene preso direttamente dai dati climatici forniti da Energy Plus, mentre gli altri due input sono stati calcolati precedentemente a partire dal fabbisogno energetico netto dell'edificio come spiegato nel paragrafo 4.1.

Per ogni valore di temperatura dell'aria esterna $T_{a,i}$ e per temperature di uscita dal condensatore pari a T_1 = 35 °C, T_2 = 40 °C, T_3 = 45 °C e T_4 = 50 °C, sono stati ricavati i corrispondenti valori di potenza termica al condensatore $P_{c,i}$ e di Coefficiente di Effetto Utile COP_i, come segue:

$$P_{c,i} = P_{c,n} + \frac{P_{c,m} - P_{c,n}}{T_m - T_n}\left(T_{a,i} - T_n\right)$$

$$COP_i = COP_n + \frac{COP_m - COP_n}{T_m - T_n}\left(T_{a,i} - T_n\right)$$

dove $P_{c,n}$, $P_{c,m}$, COP_n e COP_m sono le potenze termiche al condensatore e i COP riportati nella scheda tecnica in funzione delle temperature dell'aria esterna T_n e T_m per le temperature di uscita dal condensatore T_1, T_2, T_3 e T_4 in modo che $T_n < T_{a,i} < T_m$.

È stata poi calcolata la potenza termica al condensatore P_c e il coefficiente di effetto utile COP in funzione della temperatura di uscita dal condensatore necessaria T come segue:

$$P_c = P_{c,i} + \frac{P_{c,j} - P_{c,i}}{T_j - T_i}(T - T_i)$$

$$COP = COP_i + \frac{COP_j - COP_i}{T_j - T_i}(T - T_i)$$

dove $P_{c,i}$, $P_{c,j}$, COP_i e COP_j sono le potenza termiche al condensatore e i COP ricavati dalle formule precedenti per le temperature di uscita dal condensatore T_i e T_j dove T_i e T_j sono pari a T_1, T_2, T_3 e T_4 in modo che $T_{out,1} < T < T_{out,2}$.

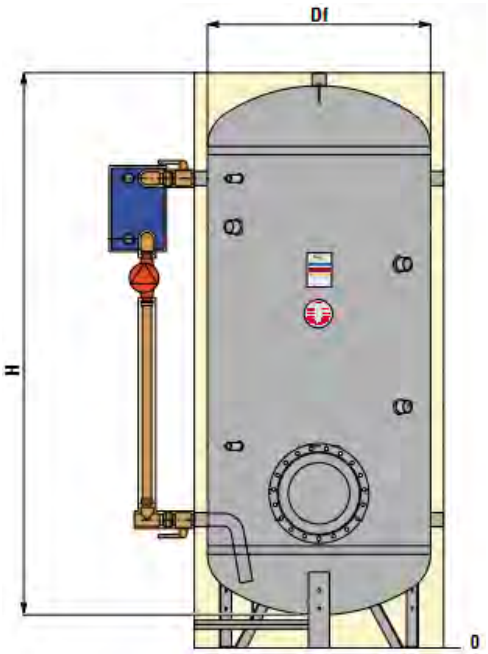
È stata quindi calcolata la potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore come segue:

$$P_{el} = \frac{P_c}{COP}$$

Il consumo totale di energia elettrica durante la stagione di riscaldamento è pari a 10728 kWh di cui 8665 kWh assorbiti dalla pompa di calore e 2064 kWh dal circolatore, dato che l'impianto risulta funzionare per circa 2900 ore.

4.2.2.2. MODELLO CON ACCUMULO

L'accumulo considerato è rappresentato in Fig.4.17. Nella tabella adiacente sono riportate alcune caratteristiche costruttive.



Volume	1500	l
Altezza H	2.250	m
Diametro Df	0.950	m
Superficie	6.739	m^2
Coefficiente di perdita	2.766	kWh/24h

Fig. 4.17. Schema e caratteristiche dell'accumulo.

In Fig. 4.18 è rappresentato il modello realizzato con Simulation Studio.
Anche in questo caso la simulazione è stata realizzata a step di 15 minuti.
La pompa di calore è rappresentata da un foglio Excel richiamato attraverso la *type 62* ed è collegata ad un accumulo (*type 4e*) che è stato suddiviso in 5 nodi. Quest'ultimo viene caricato attraverso una pompa da 700 W che viene azionata quando la pompa di calore è in funzione. La portata di acqua calda proveniente dalla pompa di calore entra al nodo 1, il nodo superiore; la stessa portata viene prelevata al nodo inferiore per andare verso la sorgente di calore. Al lato utenza, l'acqua viene prelevata al nodo più alto e rientra nel serbatoio al nodo 4 dopo essere passata per l'impianto radiante. Prima di andare all'utenza l'acqua di mandata viene miscelata opportunamente con una certa portata d'acqua di ritorno dall'impianto (*type 11h*) in modo da raggiungere la corretta temperatura richiesta dal sistema radiante.

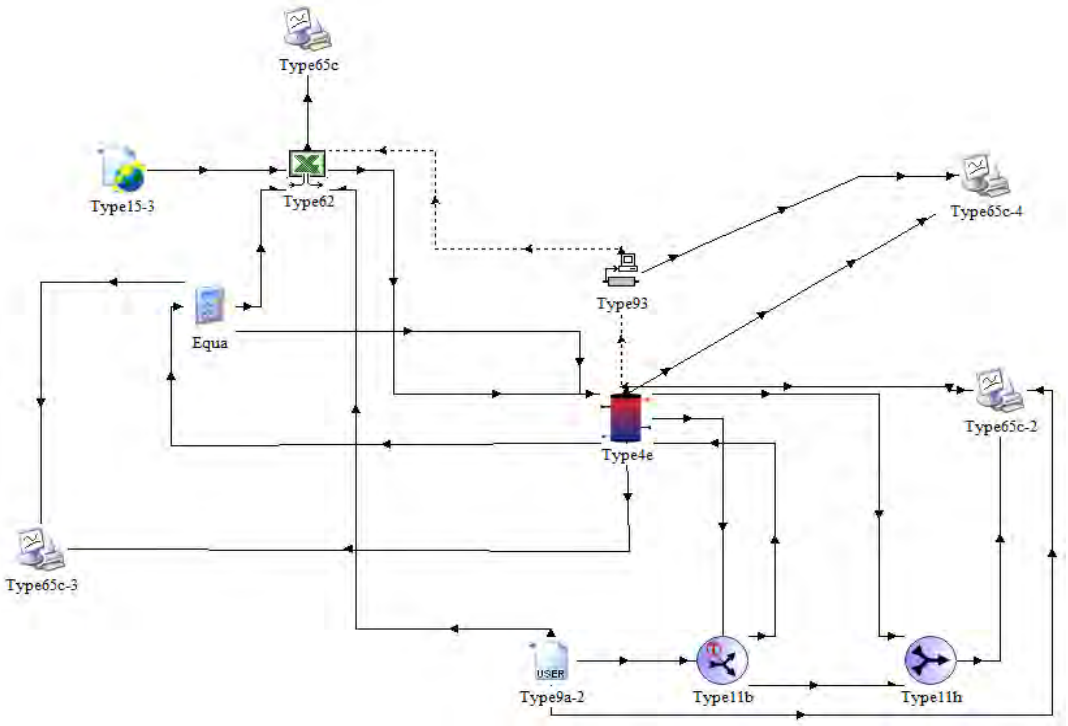


Fig. 4.18. Modello con pompa di calore centralizzata con accumulo.

I dati di input della pompa di calore sono:

- la temperatura dell'aria esterna;
- la temperatura dell'acqua in uscita dalla pompa di calore;
- la temperatura di mandata all'impianto radiante;
- la temperatura media del serbatoio.

Il procedimento per il calcolo della potenza termica al condensatore P_c e il coefficiente di effetto utile COP è lo stesso del caso senza accumulo. In questo caso, tuttavia, la temperatura di uscita dalla pompa di calore è la temperatura dell'acqua prelevata al nodo inferiore del serbatoio aumentata di 5 °C. È stato infatti considerato che la pompa di calore incrementi la temperatura dell'acqua sempre di 5 °C, come in condizioni di progetto.

In ogni istante vengono quindi calcolate la potenza elettrica P_{el} assorbita dalla pompa di calore e la portata m che fluisce nella macchina come segue:

$$P_{el} = \frac{P_c}{COP} \qquad\qquad m = \frac{P_c}{(c_p * \Delta T)}$$

dove c_p è il calore specifico dell'acqua pari a 4,186 kJ/(kgK) e ΔT è la differenza di temperatura dell'acqua tra ingresso e uscita dalla pompa di calore in condizioni di progetto (pari a 5 °C).

Per la presenza dell'accumulo, tuttavia, è stato necessario definire una funzione di controllo *f* che controllasse l'accensione e lo spegnimento della macchina. A tale scopo è stata innanzitutto definita una temperatura climatica che seguisse l'andamento riportato in Fig. 4.19.

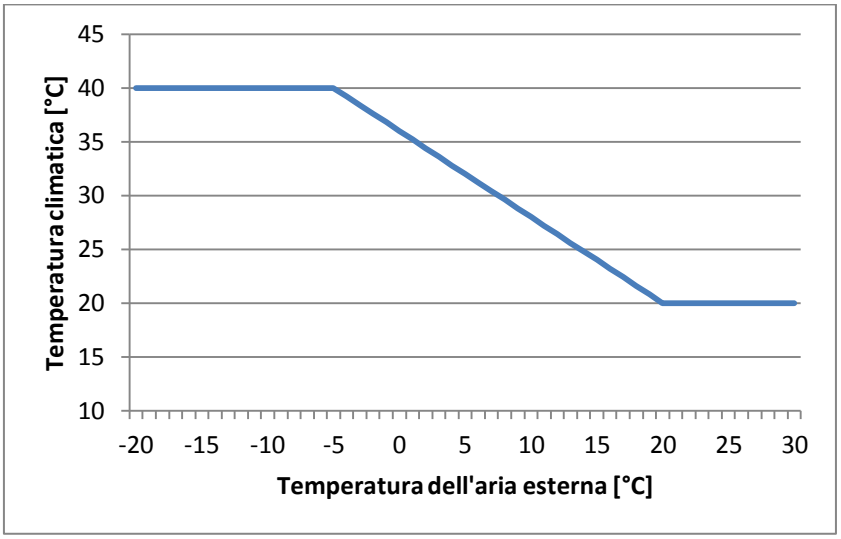


Fig. 4.19. Andamento della temperatura climatica.

Quando la temperatura di mandata richiesta dall'impianto radiante è superiore a 20 °C, è stato ritenuto ragionevole mantenere la temperatura media del serbatoio di cinque gradi superiore rispetto alla temperatura di mandata necessaria. Quando la temperatura scende al di sotto di tale valore, quindi, la funzione di controllo impone alla pompa di calore di accendersi. Quando invece la temperatura di mandata richiesta è inferiore a 20 °C, la pompa di calore deve comunque accendersi quando la temperatura media del serbatoio scende al di sotto della temperatura climatica.

I valori di potenza termica al condensatore, potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore, coefficiente di effetto utile e portata in uscita dalla macchina sono perciò quelli ricavati precedentemente moltiplicati per la funzione di controllo *f* pari a 0 se la macchina è spenta e pari a 1 se è accesa.

Al lato utenza sono state inserite due valvole (*type 11b* e *type 11h*) che, in funzione della temperatura dell'acqua in uscita dal serbatoio, miscelano la stessa con una parte della portata di ritorno dall'impianto radiante per garantire la corretta temperatura all'utenza.
Il consumo totale di energia elettrica durante la stagione di riscaldamento è pari a 9902 kWh di cui 9481 kWh dovuti alla pompa di calore e 421 kWh al circolatore, considerando che l'impianto funziona per circa 600 ore.
Inizialmente sono state analizzate 4 ipotesi differenti per questa simulazione. Indicando con V il volume del serbatoio e con ΔT la differenza di temperatura, utilizzata per il controllo sull'accensione e lo spegnimento della pompa di calore, tra la temperatura media del serbatoio e quella di mandata necessaria, le ipotesi possono essere riassunte come segue:

- $V = 1000\ l$ e $\Delta T = 3\ °C$;
- $V = 1000\ l$ e $\Delta T = 5\ °C$;
- $V = 1500\ l$ e $\Delta T = 3\ °C$;
- $V = 1500\ l$ e $\Delta T = 5\ °C$.

L'ultima ipotesi è preferibile rispetto alle altre in quanto comporta un minore assorbimento elettrico della pompa di calore e un maggiore coefficiente di prestazione. Ciò comporta chiaramente un minor consumo di energia elettrica.

4.2.2.3. CONFRONTO TRA LE DUE SIMULAZIONI

In Fig. 4.20 sono confrontati i consumi elettrici nei due casi analizzati (con e senza accumulo). Si nota come nel modello senza accumulo il consumo sia maggiore a causa del più elevato consumo della pompa di circolazione. Il caso con accumulo, tuttavia, è caratterizzato da un funzionamento on/off della pompa di calore. Questo può comportare un più rapido peggioramento delle prestazioni della macchina stessa rispetto al caso senza accumulo in cui la pompa di calore funziona in modo continuativo durante il giorno.

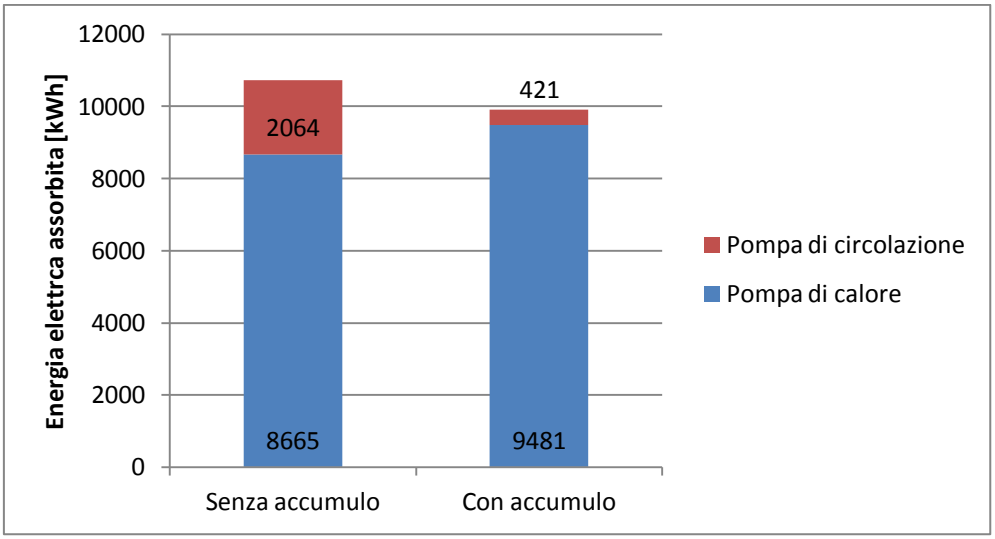


Fig. 4.20. Confronto tra i consumi elettrici del modello senza accumulo e di quello con accumulo.

4.3. IMPIANTO CENTRALIZZATO CON CALDAIA A CONDENSAZIONE

La caldaia per gli impianti di riscaldamento è una macchina attraverso la quale un fluido (generalmente l'acqua) si scalda venendo a contatto con l'aria calda prodotta attraverso un processo di combustione. Per le caldaie a gas naturale il combustibile è il metano (CH_4). La reazione di combustione semplificata è la seguente:

$$CH_4 + 2.6O_2 + 9.8N_2 \rightarrow CO_2 + 9.8N_2 + 0.6O_2 + 2H_2O$$

Le principali tipologie di perdite per le caldaie di uso domestico sono:

- perdite per dispersione che dipendono dalla qualità dell'isolamento termico del mantello della caldaia;
- perdite di combustione che dipendono dal tipo di combustibile e dalle temperature dei fumi e dell'aria comburente;
- perdite al camino a bruciatore spento che si verificano ad ogni spegnimento della caldaia e sono più evidenti in funzionamento on-off;
- perdite per prelavaggio, anch'esse evidenti nel caso di funzionamento on-off poiché si verificano durante la fase di accensione della caldaia.

Nel corso degli anni le tecnologie si sono notevolmente evolute. Dalle caldaie a temperatura costante si è passati a quelle a temperatura scorrevole che permettono una variazione della temperatura di mandata in funzione del carico richiesto dall'impianto e quindi delle condizioni climatiche. Ciò permette una notevole riduzione delle perdite per dispersione, combustione e prelavaggio. Nel corso degli ultimi anni, tuttavia, si è sempre più diffusa la caldaia a condensazione. Questa permette un raffreddamento spinto dei prodotti di combustione fino a condensare il vapore acqueo presente nei fumi. Ciò permette di recuperare il calore latente che diversamente andrebbe disperso al camino. Questa caldaia funziona correttamente in impianti a bassa temperatura in quanto il suo rendimento migliora notevolmente al diminuire della temperatura dell'acqua di ritorno dall'impianto. Il suo costo iniziale è maggiore di quello delle caldaie tradizionali ma può essere facilmente ammortizzato grazie alla riduzione dei consumi di combustibile. Se non fatta funzionare correttamente, tuttavia, la caldaia a condensazione potrebbe non dare i risultati sperati.
In generale i generatori di calore sono classificati in tre tipologie:

- generatori di calore atmosferici ** (2 stelle);
- generatori di calore a camera stagna *** (3 stelle);
- generatori di calore a condensazione **** (4 stelle).

La norma *UNI/TS 11300-2 (2008) – Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria* fornisce dei valori di rendimento in funzione della tipologia di caldaia nei prospetti 23 (a, b, c, d, e). La norma dà anche dei fattori correttivi del rendimento in funzione di alcuni parametri caratteristici della caldaia.

4.3.1. CARATTERISTICHE DELLA CALDAIA SCELTA

Per il caso in esame è stata scelta una caldaia a metano a condensazione da 45 kW di potenza nominale (Fig. 4.21).

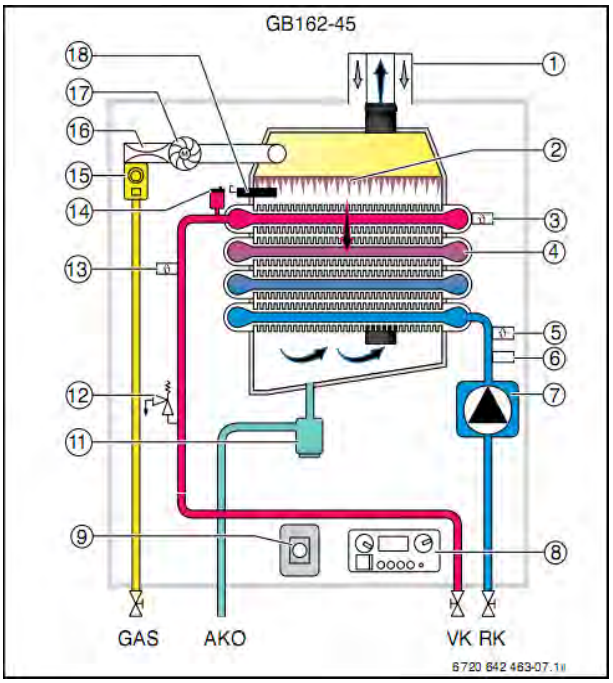


Fig. 4.21. Schema di funzionamento della caldaia.

1	Pezzo di raccordo caldaia (tronchetto dei gas combusti)
2	Bruciatore a piastra in ceramica
3	Sonda di sicurezza della temperatura
4	Scambiatore di calore
5	Sonda della temperatura di ritorno
6	Sonda pressione
7	Pompa ad alta efficienza modulante, classe di efficienza energetica A
8	Regolatore di base
9	Automatismo del bruciatore
11	Sifone
12	Valvola di commutazione a 3 vie
13	Sonda temperatura di mandata
14	Disaeratore automatico
15	Valvola del gas
16	Venturi
17	Ventilatore
18	Elettrodo accensione ad incandescenza e di controllo

Il bruciatore è ceramico a premiscelazione completa. L'accensione avviene attraverso un elettrodo ad incandescenza. Ciò permette un'accensione ottimale e silenziosa della miscela di gas. L'elettrodo rileva anche la presenza di combustibile: quando il bruciatore non si accende o si spegne accidentalmente, invia un segnale che interrompe immediatamente l'alimentazione alla valvola del gas. È presente un ventilatore che aspira l'aria comburente necessaria per il processo di combustione creando una sovrapressione che a sua volta trasporta i gas combusti fino allo scarico. Anche in questo caso sono presenti sistemi di controllo che riducono o bloccano l'afflusso di gas nel caso di malfunzionamento. L'unità di premiscelazione è composta da un ventilatore a

giri variabili, una valvola del gas e un ugello di Venturi ed è montata direttamente sul bruciatore. A seconda della portata d'aria elaborata si crea una depressione nel Venturi che permette di dosare opportunamente la quantità di gas garantendo una miscelazione completa tra aria comburente e gas stesso. A seconda della temperatura esterna e della curva climatica impostata, la regolazione del sistema calcola un valore nominale per la temperatura di mandata. In base alla differenza tra questa temperatura e la temperatura di mandata letta dal sensore dell'acqua di caldaia, la potenza erogata viene adeguata per mezzo del bruciatore modulante.
Le principali caratteristiche tecniche della caldaia sono riassunte nella Tab.4.4.

Potenza termica nominale (modulante)	Pieno carico	[kW]	44.9
	Carico parziale	[kW]	10.4
Assorbimento elettrico	Pieno carico	[W]	76
	Carico parziale	[W]	53
Rendimento	Pieno carico	%	103.2
	Carico parziale	%	109.9

Pieno carico: 100%
Carico parziale: 30%

Tab. 4.4. Caratteristiche tecniche della caldaia per le condizioni di pieno carico e di carico parziale.

4.3.2. SIMULAZIONE

Di seguito viene spiegato il modello utilizzato per descrivere il funzionamento del sistema con la caldaia a condensazione. A partire dalla potenza termica richiesta dall'edificio, ricavata dalla simulazione dinamica fatta con Simulation Studio a step di 15 minuti, sono stati calcolati i valori di rendimento η per ogni step temporale assumendo che esso variasse in maniera lineare al variare del carico (dal 100% al 30%):

$$\eta = \eta_{100\%} - \left(\frac{P_i}{P_{nom}} - 1\right) * \frac{\eta_{30\%} - \eta_{100\%}}{1 - 0.3}$$

dove $\eta_{100\%}$ e $\eta_{30\%}$ sono i rendimenti della caldaia al 100% e al 30% del carico, riportati nella scheda tecnica, P_i è la potenza richiesta dall'edificio all'istante i-esimo e P_{nom} è la potenza nominale della caldaia.
È stata quindi calcolata la potenza in kW che il combustibile deve fornire come segue:

$$P_{comb} = \frac{P_i}{\eta}$$

Si è ipotizzato che anche l'assorbimento elettrico P_{el} vari in maniera lineare al variare del carico come segue:

$$P_{el} = P_{el,30\%} + \left(\frac{P_i}{P_{nom}} - 1\right) * \frac{P_{el,100\%} - P_{el,30\%}}{0.3 - 1}$$

dove $P_{el,100\%}$ e $P_{el,30\%}$ sono gli assorbimenti elettrici della caldaia al 100% e al 30% del carico, riportati nella scheda tecnica.
Il consumo totale di combustibile durante la stagione di riscaldamento è pari a 27929 kWh. Considerando un potere calorifico inferiore del gas naturale pari a 9.59 kWh/SMC, il consumo ricavato corrisponde a 2911 SMC di gas naturale. Il consumo elettrico della caldaia nella stagione di riscaldamento, invece, è pari a circa 170 kWh.

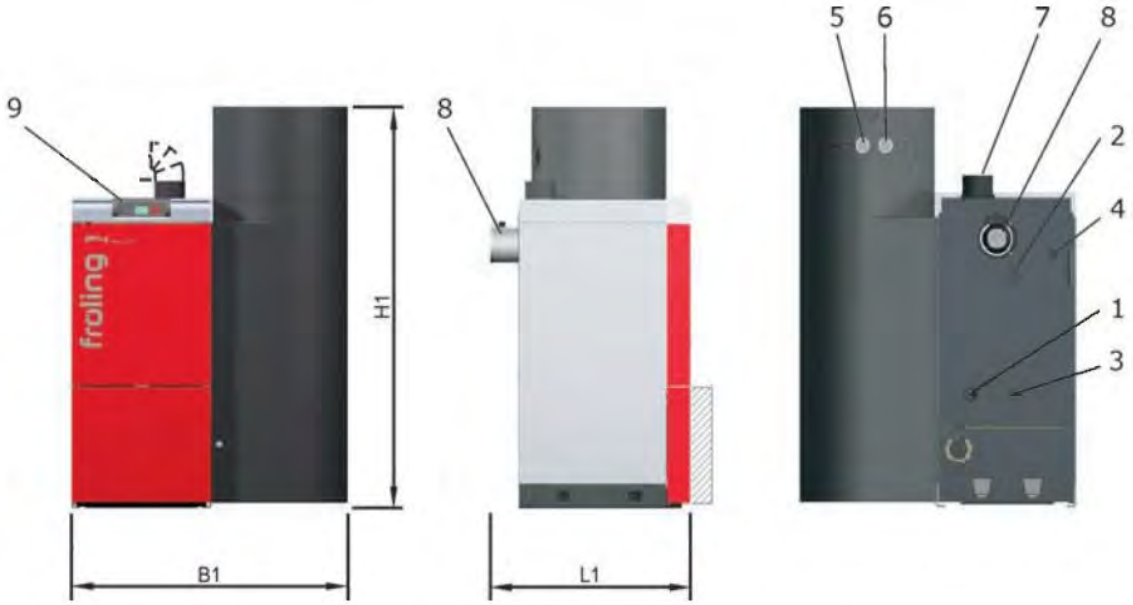
4.4. IMPIANTO CENTRALIZZATO CON CALDAIA A PELLET

Il principio di funzionamento è lo stesso della caldaia a metano. Il combustibile utilizzato per il funzionamento di questa tipologia di caldaia, tuttavia, è il pellet: piccoli cilindri in segatura di legno vergine essiccato e pressato. A seconda della tipologia di legno utilizzata, le caratteristiche del pellet possono variare anche in modo significativo. La sua densità va da 600 a 700 kg/m^3, mentre il potere calorifico inferiore va da 4.7 a 5.3 kWh/kg.
La norma *UNI/EN 14961 (2011) – Biocombustibili solidi. Specifiche e classificazione del combustibile* ha classificato diverse tipologie di biocombustibili. In particolare nella Parte 2 della norma *Pellet di legno per uso non-industriale* essa identifica tre tipi di pellet: A1, A2 e B. La classe A1 e la classe A2 identificano il pellet derivante da legna vergine o da residui legnosi

non trattati chimicamente. Queste ultime differiscono tra loro principalmente per il contenuto di cenere, mentre la classe B consentirebbe anche l'utilizzo di residui legnosi trattati chimicamente.
Il pellet è disponibile commercialmente in sacchetti da 15 kg, in sacconi fino a 1000 kg oppure sfuso, a seconda delle esigenze. La caldaia a pellet deve quindi prevedere anche uno stoccaggio, la cui grandezza può variare a seconda del caso: per le caldaie di grandi dimensioni si può pensare ad una stanza collocata in un ambiente non troppo distante dal locale caldaia. In ogni caso, comunque, il pellet viene prelevato per mezzo di una coclea e/o di un sistema di aspirazione e inviato alla caldaia.

4.4.1. CARATTERISTICHE DELLA CALDAIA SCELTA

Per il caso in esame è stata scelta la caldaia a pellet da 38 kW di potenza nominale rappresentata in Fig. 4.22. Si tratta di una caldaia per la combustione di pellet di legna di tipo A1 a bassa temperatura ad accensione automatica con ventilatore a tiraggio indotto a velocità variabile e controllata per la regolazione della potenza. L'alimentazione è automatica con ciclone di aspirazione e turbina di aspirazione. La camera di combustione è provvista di griglia autopulente. Anche la pulizia dello scambiatore di calore è automatica. La caldaia è provvista di un dispositivo di sicurezza contro il ritorno di fiamma tramite serranda verso il bruciatore e serranda verso il deposito. Il corpo caldaia è isolato e la rumorosità bassa. Le principali caratteristiche tecniche della caldaia sono riassunte nella Tab.4.5.



1	Mandata caldaia e accumulatore
2	Ritorno caldaia e accumulatore
3	Scarico
4	Ventilazione
5	Collegamento tubo aspirante
6	Collegamento tubo aria di ritorno
7	Raccordo tubo fumi
8	Ventilatore a tiraggio indotto
9	Pannello di controllo P3200

H1	1900	mm
B1	1445	mm
L1	940	mm

Fig. 4.22. Caldaia a pellet.

Potenza termica nominale	kW	38
Potenza elettrica a carico nominale	W	110
Rendimento	%	92.6

Tab. 4.5. Caratteristiche tecniche della caldaia alle condizioni nominali.

4.4.2. SIMULAZIONE

Si è ipotizzato di collegare la caldaia a pellet ad un serbatoio di accumulo. Il serbatoio preso in considerazione è lo stesso del caso con la pompa di calore illustrato nel paragrafo 4.2.2.2. Per il calcolo della potenza termica totale P_{tot} che la caldaia deve garantire, quindi, in aggiunta alla potenza richiesta dall'edificio a step di 15 minuti P_i, sono state aggiunte le perdite del serbatoio di accumulo P_{loss}:

$$P_{tot} = P_i + P_{loss}$$

A partire poi dalla potenza necessaria, sono stati calcolati i consumi di combustibile e quelli elettrici attraverso lo stesso procedimento utilizzato per il caso della caldaia a metano.

Il consumo totale di combustibile durante la stagione di riscaldamento è pari a 33234 kWh. Considerando un potere calorifico inferiore del pellet pari a 5.3 kWh/kg, il consumo ricavato corrisponde a 6271 kg di pellet, corrispondenti a circa 9.5 m^3. Il consumo elettrico della caldaia nella stagione di riscaldamento, invece, è pari a 316 kWh.

4.5. CALDAIE SINGOLE A METANO

Per questa ipotesi si è considerato che l'impianto di distribuzione ed emissione sia autonomo con radiatori. Dalla norma *UNI/TS11300-2 (2008), Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria* sono stati ricavati i valori di rendimento raccolti nella Tab. 4.6.

$\eta_{emissione}$	92.0%
$\eta_{regolazione}$	93.0%
$\eta_{distribuzione}$	99.0%

Tab. 4.6. Rendimenti di emissione, regolazione e distribuzione.

Per questa ipotesi è stata considerata una caldaia a camera stagna come quelle installate dall'AEEP negli appartamenti nati a seguito dell'intervento di sdoppiamento. Le caratteristiche tecniche di questi impianti sono riportante in Tab. 4.7. La caldaia è provvista di una pompa di circolazione interna.

Potenza termica nominale	kW	25.8
Assorbimento elettrico	W	125
Rendimento	%	89.0

Tab. 4.7. Caratteristiche tecniche della caldaia alle condizioni nominali.

Sono stati considerati due casi distinti:

- senza intervento di isolamento dell'involucro edilizio;
- con intervento di isolamento dell'involucro edilizio.

In entrambi i casi, a partire dal fabbisogno energetico netto di ogni appartamento dell'edificio, sono stati calcolati i consumi di combustibile e di energia elettrica.

Nel caso in cui non venisse realizzato l'isolamento dell'involucro edilizio, il consumo totale di combustibile durante la stagione di riscaldamento sarebbe pari a 171547 kWh, che corrispondono a 17882 SMC di gas naturale. Il consumo elettrico dell'impianto nella stagione di riscaldamento, invece, sarebbe di 7352 kWh.

Nel caso in cui, invece, venisse realizzato l'isolamento dell'involucro, il consumo totale di combustibile durante la stagione di riscaldamento sarebbe pari a 38300 kWh che corrisponde a 3992 SMC di gas naturale. Il consumo elettrico dell'impianto nella stagione di riscaldamento, invece, sarebbe di circa 2579 kWh.

4.6. CONFRONTO DEI RISULTATI

Si confrontano ora i risultati ottenuti per le singole ipotesi di intervento a seguito dell'intervento di isolamento termico dell'involucro edilizio.

Per poter confrontare tra loro i risultati ottenuti, tutti i consumi sono stati convertiti in energia primaria attraverso i fattori di conversione raccolti nella Tab. 4.8.

Energia elettrica	**[kWh_p/kWh_{el}]**	2.17
Gas naturale	**[kWh_p/kWh_{th}]**	1.00
Pellet	**[kWh_p/kWh_{th}]**	0.30

Tab. 4.8. Fattori di conversione in energia primaria.

Viene di seguito riportata l'energia primaria totale che ogni intervento richiede, distinguendo i singoli contributi dell'energia primaria elettrica da distribuzione, elettrica da generazione e termica (Fig. 4.23).

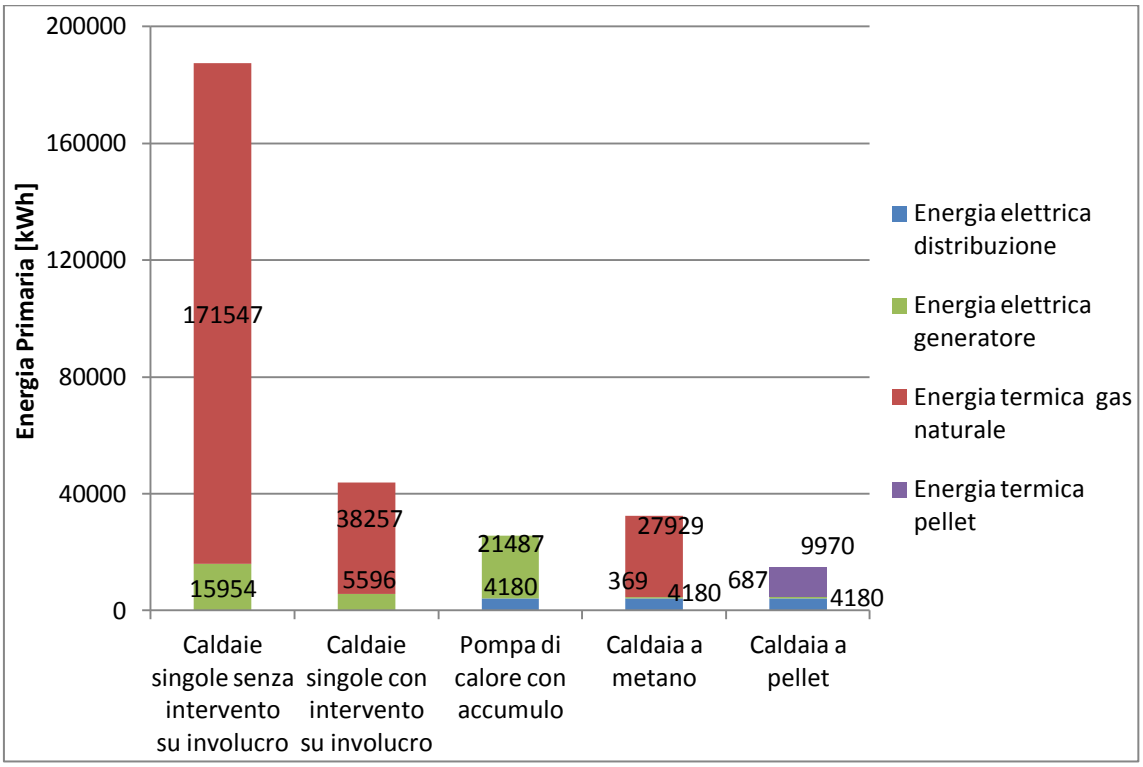


Fig. 4.23. Confronto tra le singole ipotesi di intervento.

Prendendo come riferimento la situazione esistente, nella Tab. 4.9 sono raccolte l'energia primaria totale e specifica nonché la riduzione percentuale del consumo di energia primaria per le ipotesi considerate.

	Caldaie singole con intervento su involucro	**Pompa di calore con accumulo**	**Caldaia a metano**	**Caldaia a pellet**
Energia primaria [kWh]	43853	25667	32479	14837
Energia primaria specifica [kWh/m^2]	51.33	30.05	38.02	17.37
Riduzione energia primaria [%]	-77%	-86%	-83%	-92%

Tab. 4.9. Energia primaria totale, energia primaria specifica e riduzione percentuale del consumo di energia primaria rispetto alla situazione esistente.

Si nota come gli impianti di generazione centralizzati affiancati ad un impianto radiante comportino una riduzione del fabbisogno energetico primario maggiore rispetto all'ipotesi di singole caldaie autonome. L'impianto che garantisce un minor consumo di energia primaria è la caldaia a pellet perché, trattandosi di biomassa, il fattore di conversione è basso, pari a 0.3 [kWh_p/kWh_{th}]. Tale valore è giustificato dal fatto che il pellet, come tutte le biomasse è considerata una fonte di energia rinnovabile. Dopo la caldaia a pellet, la tecnologia che garantisce il minor consumo di energia primaria è la pompa di calore. L'energia consumata in questo caso è tutta elettrica. Questo consente di ipotizzare l'istallazione di un impianto fotovoltaico allo scopo di coprire il fabbisogno elettrico dell'edificio. Nel capitolo seguente verrà sviluppata questa ipotesi.

4.7. CLASSI ENERGETICHE

È stata individuata la classe energetica del condominio precedente e successiva al retrofit.

La definizione della classe energetica di un edificio viene data in funzione di un parametro, l'indice di energia primaria globale $EPgl$. Tale indice viene calcolato come segue:

$$EPgl = EPi + EPacs$$

dove EPi è l'indice di energia primaria per il riscaldamento invernale ed $EPacs$ è l'indice di energia primaria per la produzione di acqua calda sanitaria.

EPi rappresenta l'energia primaria che si consuma in un anno per scaldare un metro quadro dell'edificio:

$$EPi = \frac{Q_{p,i}}{S_n} \qquad \left[{kWh}/{m^2 anno}\right]$$

dove $Q_{p,i}$ è l'energia primaria utilizzata in un anno e S_n è la superficie netta dell'edificio. Il valore di EPi trovato per l'edificio in esame deve essere confrontato con il valore di EPi limite imposto dalla legge. L' EPi limite viene fornito in funzione della fascia climatica in cui l'edificio si colloca (quindi dei gradi giorno) e del rapporto S/V tra la superficie disperdente (somma di tutte le superfici che separano gli ambienti riscaldati dall'esterno o da ambienti non riscaldati) e il volume lordo riscaldato. In Fig. 4.24 sono raccolti i valori di EPi limite stabiliti dalla legge.

Rapporto di forma dell'edificio S/V	Zona climatica									
	A	B		C		D		E		F
	fino a 600 GG	a 601 GG	a 900 GG	a 901 GG	a 1400 GG	a 1401 GG	a 2100 GG	a 2101 GG	a 3000 GG	oltre 3000 GG
<= 0,2	7,7	7,7	11,5	11,5	19,2	19,2	27,5	27,5	37,9	37,9
>= 0,9	32,4	32,4	43,2	43,2	61,2	61,2	71,3	71,3	94	94

Fig. 4.24. Valori di EPi limite in funzione dei gradi giorno (GG) e del rapporto S/V (superficie su volume).

Nei casi specifici l' EPi limite si calcola per interpolazione o estrapolazione lineare dei valori limite di legge riportati in Fig. 4.24: interpolazione se S/V è compreso tra 0.2 e 0.9 e per gradi giorno intermedi a quelli di legge, estrapolazione solo per valori di gradi giorno maggiori di 3001. Se il valore S/V è maggiore di 0.9 o minore di 0.2 si effettuano interpolazioni lineari utilizzando i limiti rispettivamente di 0.9 e 0.2. Attraverso il confronto tra l' EPi calcolato e una scala di valori forniti in funzione di EPi limite (Fig. 4.25) viene individuata la classe energetica per il riscaldamento invernale dell'edificio.

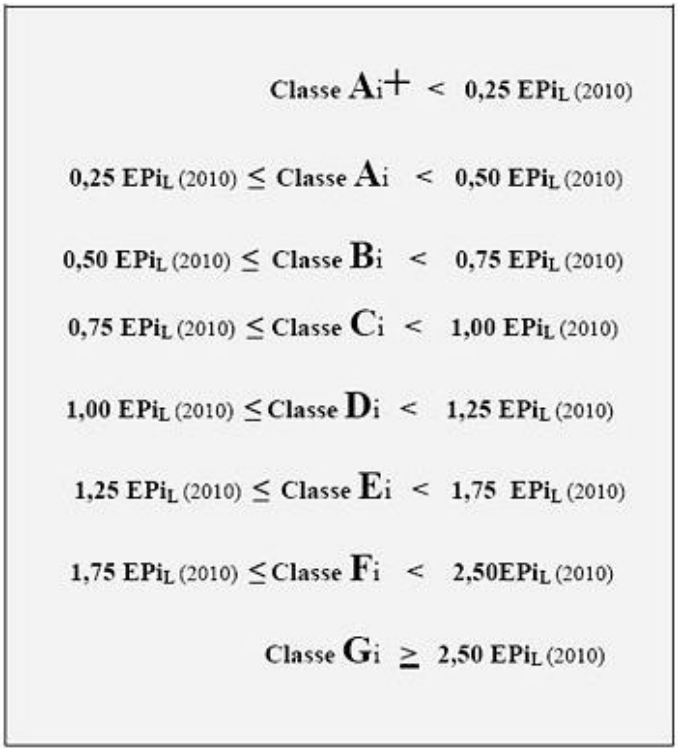


Fig. 4.25. Valori limite di EPi per le diverse classi energetiche per il riscaldamento invernale.

$EPacs$ rappresenta l'energia che si consuma in un anno per la produzione di acqua calda sanitaria rapportata alla superficie utile dell'appartamento:

$$EPacs = \frac{Q_{p,acs}}{S_n} \qquad \left[{kWh}/{m^2 anno}\right]$$

dove $Q_{p,acs}$ è l'energia primaria utilizzata in un anno e S_n è la superficie netta dell'edificio. Anche in questo caso, per individuare la classe energetica per la produzione di acqua calda sanitaria, è necessario confrontare il valore ricavato con i valori di soglia indicati dalla legge (Fig. 4.26).

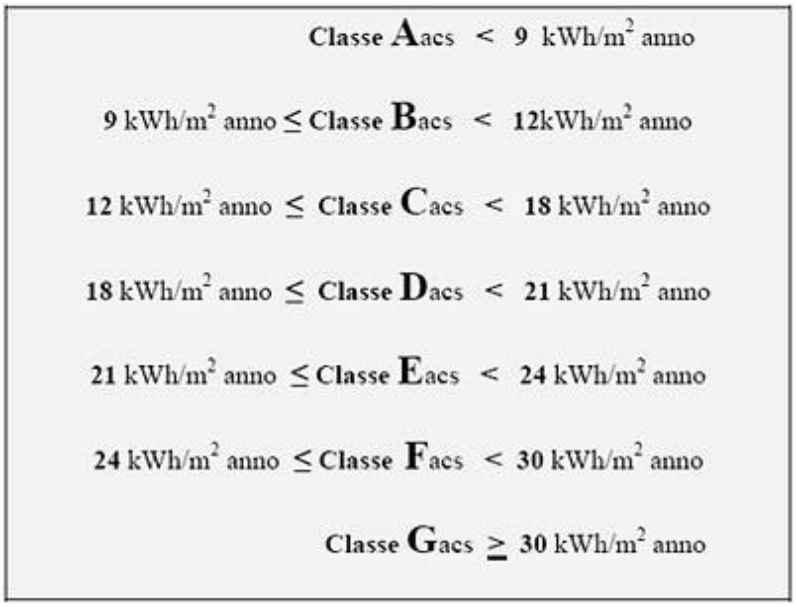


Fig. 4.26. Valori limite per le diverse classi energetiche per la produzione di acqua calda sanitaria.

In generale, quindi, per poter individuare la classe energetica a cui l'edificio appartiene, si dovrà confrontare il valore di $EPgl$ calcolato con i valori di soglia riportati in Fig. 4.27 comprendenti il fabbisogno sia per il riscaldamento invernale sia per la produzione di acqua calda sanitaria. In Tab. 4.10 sono quindi riportati i valori di soglia per l'edificio in esame.

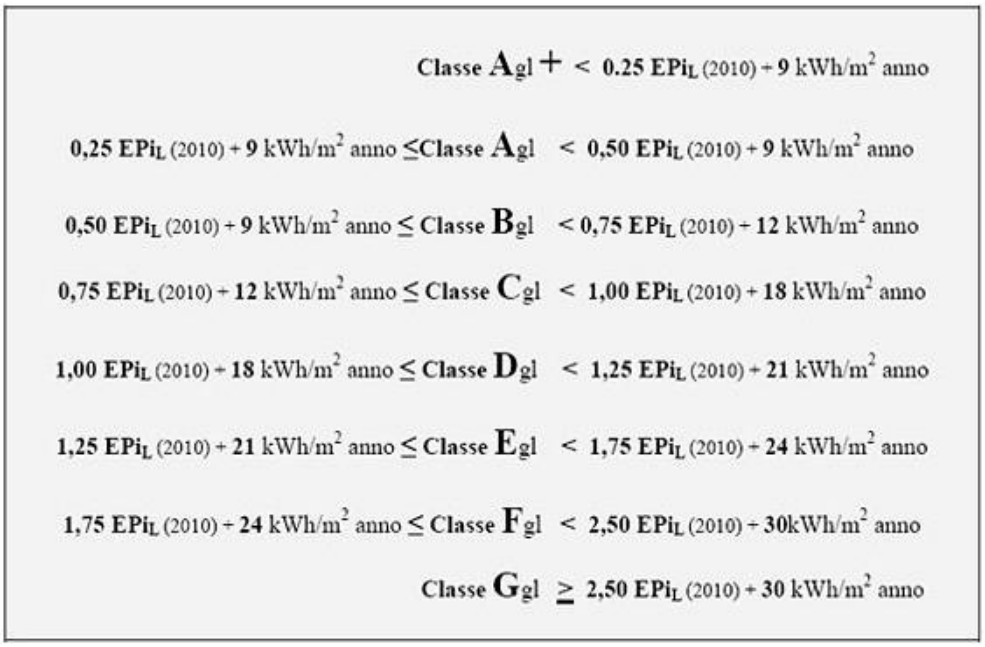


Fig. 4.27. Valori limite per le diverse classi energetiche degli edifici.

Valori di soglia [kWh_p/m^2]		Valori di soglia [kWh_p/m^2]
	Classe A_{gl}+ <	26
26	≤ Classe A_{gl} <	44
44	≤ Classe B_{gl} <	64
64	≤ Classe C_{gl} <	88
88	≤ Classe D_{gl} <	108
108	≤ Classe E_{gl} <	146
146	≤ Classe F_{gl} <	204
	Classe G_{gl} ≥	204

Tab. 4.10. Valori limite per l'edificio in esame per l'individuazione delle classi energetiche.

Per il caso in esame, essendo 2429 i gradi giorno di Castelfranco Veneto e considerando un rapporto S/V pari a circa 0.56, una superficie netta pari a 854 m^2, i consumi di energia primaria per il riscaldamento riportati in Tab. 4.11 e quelli per la produzione di acqua calda sanitaria riportati in Tab. 4.12, sono state individuate le diverse classi energetiche a cui l'edificio apparterrebbe a seconda del tipo di intervento considerato (Tab. 4.13).

Tipologia di intervento	Consumo di energia primaria [kWh_p]	Consumo specifico di energia primaria [kWh_p/m^2]
Caldaie singole senza isolamento dell'involucro edilizio	187502	219.5
Caldaie singole con isolamento dell'involucro edilizio	43853	51.3
Riscaldamento centralizzato con pompa di calore aria-acqua	25667	30.0
Riscaldamento centralizzato con caldaia a condensazione	32479	38.0
Riscaldamento centralizzato con caldaia a pellet	14837	17.4

Tab. 4.11. Consumi di energia primaria in funzione della tipologia di intervento.

Tipologia di impianto per la produzione di acqua calda sanitari	Consumo di energia primaria [kWh_p]	Consumo specifico di energia primaria [kWh_p/m^2]
Caldaie singole a metano	18070	21.2
Scalda acqua a pompa di calore	10906	12.8

Tab. 4.12. Consumi di energia primaria per l'acqua calda sanitaria.

Tipologia di intervento	Classe energetica
Caldaie singole senza isolamento dell'involucro edilizio	**G**
Caldaie singole con isolamento dell'involucro edilizio	**C**
Riscaldamento centralizzato con pompa di calore aria-acqua e pompe di calore singole per l'ACS	**A**
Riscaldamento centralizzato con caldaia a condensazione e pompe di calore singole per l'ACS	**B**
Riscaldamento centralizzato con caldaia a pellet e pompe di calore singole per l'ACS	**A**

Tab. 4.13. Classi energetiche dell'edificio in funzione della tipologia di intervento.

In primo luogo bisogna specificare che è stato preso come riferimento il caso di caldaie autonome in ogni appartamento, anche se la situazione impiantistica allo stato di fatto è molto più complessa, come più volte specificato.
Dai risultati ottenuti si può notare come l'intervento di isolamento energetico dell'involucro edilizio possa portare l'edificio dall'attuale classe G alla classe C, senza intervenire sugli impianti di riscaldamento e di produzione di acqua calda sanitaria. L'installazione della pompa di calore aria-acqua con accumulo o della caldaia centralizzata a pellet, inoltre, può portare l'edificio in classa A. Attraverso l'installazione della caldaia centralizzata a metano, invece, è possibile raggiungere la classe B.

CAPITOLO 5. ANALISI DEI CONSUMI ELETTRICI

Sono stati analizzati i consumi elettrici del condominio per valutare la possibilità di installare un impianto fotovoltaico sul tetto. A tale scopo è stato considerato il caso di installazione della pompa di calore con accumulo.
Sono state quindi considerate tre tipologie di consumi elettrici:

- illuminazione ed elettrodomestici;
- pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria;
- impianti di generazione di calore e di distribuzione.

Nei paragrafi successivi sono descritti più nello specifico i singoli profili di consumo considerati. Vengono infine analizzati l'installazione dell'impianto fotovoltaico e i risultati ottenuti.

5.1. ILLUMINAZIONE ED ELETTRODOMESTICI

Per i consumi elettrici legati ad illuminazione ed elettrodomestici sono stati considerati i dati raccolti per il progetto MICENE (Misure dei Consumi di Energia Elettrica). Si tratta di un progetto finanziato dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio realizzato dal Politecnico di Milano nei primi anni duemila durante il quale sono state monitorate 110 abitazioni (62 in Lombardia, 18 in Lazio, 12 in Piemonte, 8 in Puglia, 8 nelle Marche e 2 in Emilia Romagna). Ciò ha permesso la creazione di una banca dati sullo stato dei consumi di energia elettrica del settore domestico in Italia.
In particolare sono stati realizzati dei profili di consumo giornaliero a step di 10 minuti per ogni tipologia di elettrodomestico (lavatrice, lavastoviglie, frigorifero, PC, televisore, apparecchi video, illuminazione, ecc.) per diversi periodi dell'anno (inverno, estate, primavera e autunno) e per diversi giorni della settimana (feriali e festivi).
Per il caso in esame sono stati presi in considerazione due profili standard di consumo, riportati a step di 15 minuti, in base alla superficie netta degli appartamenti (Fig. 2.7). Per gli appartamenti A, B ed E (circa 70 m^2) è stata

considerata la presenza di una lavatrice, una lavastoviglie, un frigorifero, un PC, un televisore e un apparecchio video. Per gli appartamenti C e D (circa 25 m^2 e 46 m^2 rispettivamente), invece, sono stati considerati soltanto una lavatrice, un frigorifero e un televisore. In entrambi i casi, inoltre, è stato preso in considerazione il consumo per l'illuminazione.

In Fig. 5.1 sono riportati i profili del fabbisogno elettrico dell'edificio per la settimana tipo delle stagioni estiva, invernale e primaverile e autunnale.

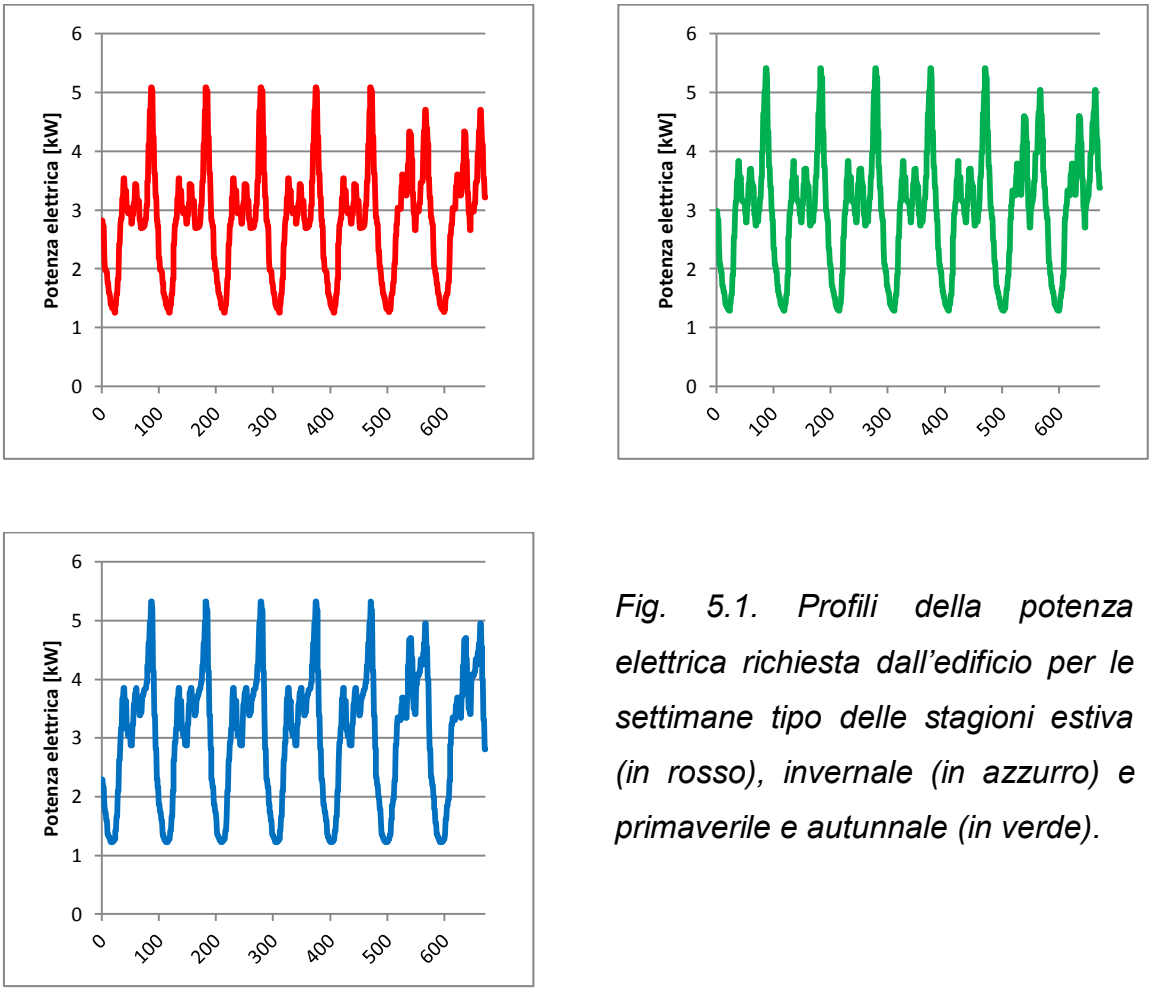


Fig. 5.1. Profili della potenza elettrica richiesta dall'edificio per le settimane tipo delle stagioni estiva (in rosso), invernale (in azzurro) e primaverile e autunnale (in verde).

Per gli appartamenti A, B ed E il consumo annuo risultante è di 1967 Wh mentre per gli appartamenti C e D è pari a 1365 Wh. Il fabbisogno elettrico annuo per illuminazione ed elettrodomestici dell'intero edificio risulta di circa 26 kWh.

5.2. POMPA DI CALORE PER LA PRODUZIONE DI ACQUA CALDA SANITARIA

Per la produzione di acqua calda sanitaria è stata ipotizzata l'installazione di una pompa di calore per ogni appartamento (Fig. 5.2). Le caratteristiche tecniche della pompa di calore utilizzata sono riassunte nella Tab. 5.1.

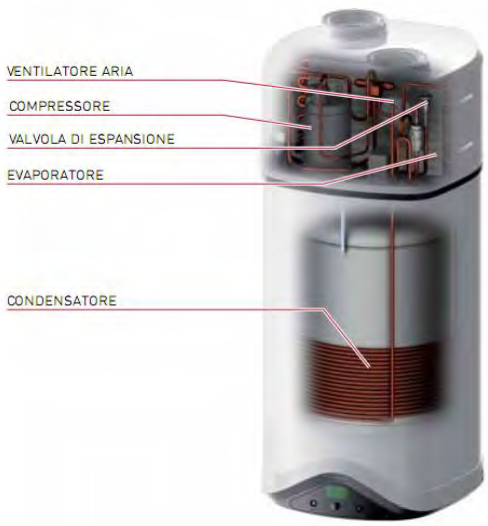


Fig. 5.2. Pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria.

Capacità accumulo	[l]	110
Potenza termica *	[W]	850
Potenza elettrica assorbita media *	[W]	250
COP medio *	-	3.2

* Temperatura dell'aria 20 °C e temperatura dell'acqua 15-55 °C.

Tab. 5.1. Caratteristiche tecniche della pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria.

Per calcolare il consumo di energia elettrica per la produzione di acqua calda sanitaria sono state considerate singolarmente le tre tipologie di appartamento a seconda della superficie netta (Fig. 2.7):

- appartamenti A, B, E;
- appartamenti C;
- appartamenti D.

La portata giornaliera V_w necessaria agli appartamenti è stata calcolata in base a quanto previsto dalla norma *UNI/TS11300-2 (2008), Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria*.

$$V_w = 1.8 * S_u \qquad \left[{}^{l}/_{giorno}\right]$$

$$V_w = 4.514 * S_u^{(1-0.2356)} \qquad \left[{}^{l}/_{giorno}\right]$$

dove S_u, espressa in m^2, è la superficie netta dell'appartamento considerato. La prima relazione è stata utilizzata per gli appartamenti con superficie inferiore a 50 m^2 (C e D), la seconda invece per quelli con superficie superiore a 50 m^2 (A, B ed E). Con lo stesso criterio, per il calcolo del fabbisogno energetico netto (FEN), sono state utilizzate rispettivamente le seguenti equazioni:

$$FEN = 19.09 \qquad \left[{}^{kWh}/_{m^2 anno}\right]$$

$$FEN = 47.9 * S_u^{(-0.2356)} \qquad \left[{}^{kWh}/_{m^2 anno}\right]$$

È stato poi considerato un rendimento del 95% che comprende i rendimenti di erogazione, distribuzione ed accumulo (η_{erog}, η_{distr}, η_{acc}). Il rendimento di generazione η_{gen} è stato considerato pari all'88% prima dell'intervento, mentre per le pompe di calore è stato considerato un COP pari a 3.2, come indicato nella Tab. 5.1. Il fabbisogno elettrico lordo FEL dell'intero edificio a seguito dell'installazione delle pompe di calore è stato quindi calcolato come:

$$FEL = \frac{FEN}{(\eta_{erog}\eta_{distr}\eta_{acc}COP)} \qquad \left[{}^{kWh_{el}}/_{m^2 anno}\right]$$

È stato poi determinato il fabbisogno di energia elettrica Q_{el} come segue:

$$Q_{el} = FEL * S_u \qquad [kWh]$$

dove S_u è la superficie utile totale dell'intero condominio, in m^2. Il fabbisogno annuo di energia elettrica risultante è di 5026 kWh contro i 18275 kWh richiesti prima dell'intervento, che convertiti in energia primaria portano ad un risparmio di circa il 40%.

È stato quindi considerato il profilo di consumo giornaliero di acqua calda sanitaria di 100 l/giorno riportato nel *Final Annex 42 Domestic Hot Water Profiles* dell'International Energy Agency (IEA) e da questo è stato calcolato il profilo giornaliero di consumo di energia elettrica.

5.3. IMPIANTI DI GENERAZIONE DI CALORE E DI DISTRIBUZIONE

Il procedimento utilizzato per ricavare i consumi elettrici dell'impianto di distribuzione e dell'impianto di generazione di calore con pompa di calore centralizzata è stato descritto nel capitolo 4. In questa sede, perciò, ci si limita solo a riassumere brevemente i risultati ottenuti (Tab. 5.2).

	Distribuzione [kWh]	Generazione [kWh]	**Totale [kWh]**
Pompa di calore con accumulo	1926	9902	**11828**

Tab. 5.2. Consumi elettrici per la distribuzione, per la generazione e totali nel caso di pompa di calore con accumulo.

5.4. IMPIANTO FOTOVOLTAICO

È stata ipotizzata l'installazione di un impianto fotovoltaico sul tetto del condominio in esame. Sono stati considerati moduli in silicio policristallino, 156.5 mm x 156.5 mm, caratterizzati da 60 celle in serie (Fig. 5.3). Il vetro frontale è di 3 mm, temperato e antiriflesso per aumentare l'assorbimento della luce. La cornice è in lega di alluminio anodizzata. Le principali caratteristiche tecniche del modulo fotovoltaico sono riassunte nelle Tab. 5.3 e Tab. 5.4.

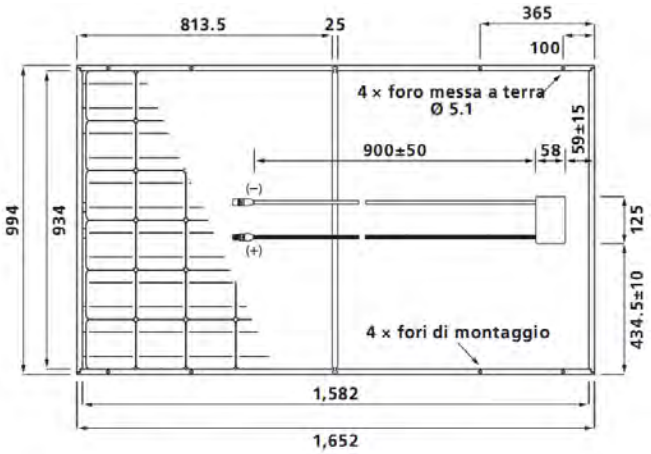


Fig. 5.3. Schema e dimensioni dei moduli fotovoltaici.

Dati elettrici (STC)		
Potenza di picco	[W_p]	250
Tensione a circuito aperto	[V]	37.6
Corrente di corto circuito	[A]	8.68
Tensione alla massima potenza	[V]	30.9
Corrente alla massima potenza	[A]	8.10
Efficienza del modulo	[%]	15.2
STC = Standard Test Conditions: irradiazione 1000 W/m^2, AM 1.5, temperatura delle celle 25 °C.		

Tab. 5.3. Caratteristiche tecniche di un modulo fotovoltaico nelle condizioni standard (STC).

Dati elettrici (NOCT)		
Potenza di picco	[W_p]	180.2
Tensione a circuito chiuso	[V]	36.7
Corrente di corto circuito	[A]	7.00
Tensione alla massima potenza	[V]	27.7
Temperatura operativa nominale della cella (NOCT)	[°C]	47.5

NOCT: Temperatura operative del modulo a 800 W/m^2 di irradiazione, temperature dell'aria di 20 °C, velocità del vento di 1 m/s.

Tab. 5.4. Caratteristiche tecniche di un modulo fotovoltaico nelle condizioni NOCT.

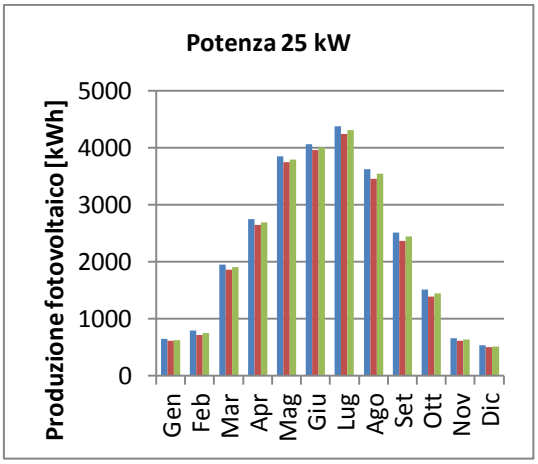
Le due falde del tetto sono inclinate di 13° rispetto al piano orizzontale e gli azimut delle due falde sono di 290° (falda est) e di 110° (falda ovest). Sono state fatte quindi tre ipotesi per l'installazione dell'impianto fotovoltaico:

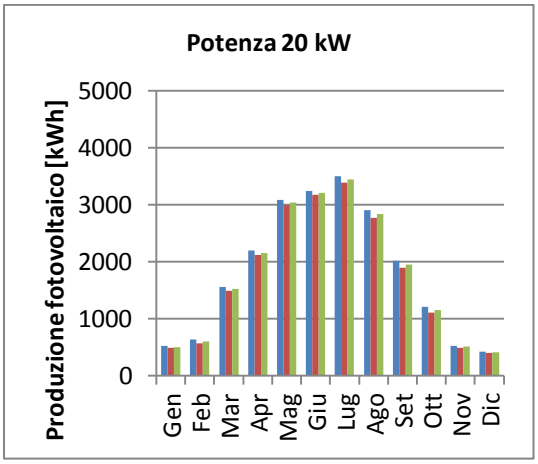
- impianto posizionato interamente sulla falda est del tetto;
- impianto posizionato interamente sulla falda ovest del tetto;
- impianto posizionato sia sulla falda est sia su quella ovest del tetto.

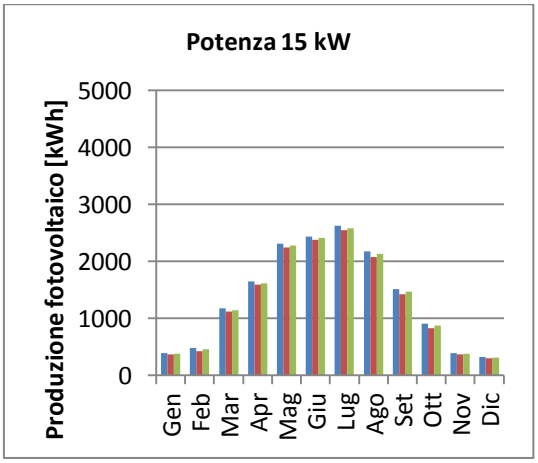
Sono stati inoltre considerati tre casi di potenza installata dell'impianto:

- 25 kW;
- 20 kW;
- 15 kW.

È stata quindi fatta una simulazione dinamica con Simulation Studio per ricavare la producibilità dell'impianto per ciascuno dei casi considerati.
Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti. Nella Fig. 5.4 è confrontata l'energia prodotta a seconda della potenza installata (25 kW, 20 kW e 15 kW) per le tre ipotesi di collocazione dell'impianto sulla falda del tetto (sud-est, nord-ovest e in parte sud-est e in parte nord-ovest).
In Tab. 5.5 sono infine raccolti i valori di energia prodotta dall'impianto fotovoltaico nelle diverse ipotesi formulate.







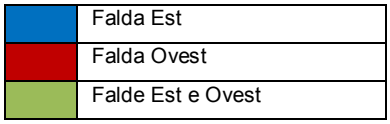


Fig. 5.4. Produzione del fotovoltaico a seconda della potenza installata per le tre collocazioni sul tetto.

Collocazione / Potenza	Est	Ovest	Est-Ovest
25 kW	27319 kWh	26123 kWh	26721 kWh
20 kW	21856 kWh	20899 kWh	21377 kWh
15 kW	16392 kWh	15674 kWh	16033 kWh

Tab. 5.5. Energia prodotta dall'impianto fotovoltaico in un anno per le diverse ipotesi formulate.

5.5. CONFRONTO TRA LA PRODUZIONE DELL'IMPIANTO FOTOVOLTAICO E I CONSUMI ELETTRICI

Come precedentemente specificato l'impianto di generazione considerato è quello con pompa di calore con accumulo.

La produzione di energia elettrica dell'impianto fotovoltaico è stata confrontata con i consumi dei seguenti casi:

Caso 1: consumi della sola pompa di calore con accumulo per il riscaldamento;

Caso 2: consumi della pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria;

Caso 3: consumi di elettrodomestici ed illuminazione;

Caso 4: consumi di pompa di calore con accumulo per il riscaldamento, pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria, elettrodomestici ed illuminazione.

Nelle seguenti tabelle sono raccolti, per i quattro casi studiati e per le tre orientazioni dell'impianto considerate, i valori di produzione dell'impianto fotovoltaico, il fabbisogno elettrico, la quota di autoconsumo sulla produzione totale dell'impianto e quella sul consumo elettrico totale del condominio. In Tab. 5.6 i dati sono riferiti ad un impianto da 15 kW, in Tab. 5.7 da 20 kW e in Tab. 5.8 da 25 kW di potenza installata.

Si nota che l'installazione dell'impianto fotovoltaico sulla falda est del tetto, nonostante una percentuale di autoconsumo leggermente inferiore rispetto agli altri due casi, garantisce una produzione di energia elettrica superiore, tale da risultare l'opzione più conveniente. Sono infine riportate le percentuali di autoconsumo nel caso 4 rispetto alla produzione dell'impianto fotovoltaico (Tab. 5.9) e la quota di fabbisogno elettrico coperta dal fotovoltaico (Tab. 5.10) per le tre potenze considerate, nel caso di installazione sulla falda est del tetto.

Orientazione	Produzione fotovoltaico [kWh]	Caso	Fabbisogno elettrico [kWh]	Autoconsumo su produzione [%]	Autoconsumo su consumo [%]
Est	16392	Caso 1	9485	2.8	4.9
		Caso 2	5026	7.8	25.6
		Caso 3	25895	55.8	35.3
		Caso 4	40461	59.6	24.1
Est-Ovest	16033	Caso 1	9485	2.7	4.6
		Caso 2	5026	8.0	25.4
		Caso 3	25895	57.6	35.7
		Caso 4	40461	61.3	24.3
Ovest	15674	Caso 1	9485	2.7	4.5
		Caso 2	5026	8.0	25.1
		Caso 3	25895	58.6	35.5
		Caso 4	40461	62.2	24.1

Tab. 5.6. Produzione dell'impianto fotovoltaico, fabbisogno elettrico, quota di autoconsumo ed energia prelevata dalla rete per i quattro casi studiati e per le tre orientazioni dell'impianto di potenza installata 15 kW.

Orientazione	Produzione fotovoltaico [kWh]	Caso	Fabbisogno elettrico [kWh]	Autoconsumo su produzione [%]	Autoconsumo sul consumo [%]
Est	21856	Caso 1	9485	2.8	6.5
		Caso 2	5026	6.6	28.8
		Caso 3	25895	45.4	38.3
		Caso 4	40461	49.4	26.7
Est-Ovest	21377	Caso 1	9485	2.7	6.1
		Caso 2	5026	6.7	28.6
		Caso 3	25895	46.9	38.7
		Caso 4	40461	50.9	26.9
Ovest	20899	Caso 1	9485	2.6	5.8
		Caso 2	5026	6.7	28.1
		Caso 3	25895	48.0	38.8
		Caso 4	40461	51.8	26.8

Tab. 5.7. Produzione dell'impianto fotovoltaico, fabbisogno elettrico, quota di autoconsumo ed energia prelevata dalla rete per i quattro casi studiati e per le tre orientazioni dell'impianto di potenza installata 20 kW.

Orientazione	Produzione fotovoltaico [kWh]	Caso	Fabbisogno elettrico [kWh]	Autoconsumo su produzione [%]	Autoconsumo sul consumo [%]
Est	27319	Caso 1	9485	2.8	8.1
		Caso 2	5026	5.8	31.3
		Caso 3	25895	38.2	40.3
		Caso 4	40461	42.4	28.6
Est-Ovest	26721	Caso 1	9485	2.7	7.6
		Caso 2	5026	5.8	31.0
		Caso 3	25895	39.5	40.8
		Caso 4	40461	43.6	28.8
Ovest	26123	Caso 1	9485	2.6	7.2
		Caso 2	5026	5.9	30.5
		Caso 3	25895	40.5	40.9
		Caso 4	40461	44.4	28.7

Tab. 5.8. Produzione dell'impianto fotovoltaico, fabbisogno elettrico, quota di autoconsumo ed energia prelevata dalla rete per i quattro casi studiati e per le tre orientazioni dell'impianto di potenza installata 25 kW.

Potenza installata [kW]	Percentuale di autoconsumo sulla produzione del fotovoltaico [%]
15	59.6
20	49.4
25	42.4

Tab. 5.9. Percentuali di autoconsumo dell'edificio rispetto alla produzione dell'impianto fotovoltaico per i tre casi 15 kW, 20 kW e 25 kW di potenza installata, nel caso di impianto collocato interamente sulla falda est del tetto.

Potenza installata [kW]	Percentuale di autoconsumo sul consumo totale del condominio [%]
15	24.1
20	26.7
25	28.6

Tab. 5.10. Quota del fabbisogno elettrico coperta dal fotovoltaico per i tre casi 15 kW, 20 kW e 25 kW di potenza installata, nel caso di impianto collocato interamente sulla falda est del tetto.

Dai risultati ottenuti si nota che, in tutti i casi, circa un quarto del fabbisogno elettrico viene coperto dal fotovoltaico (24.1% per 15 kW, 26.7% per 20 kW e 28.6% per 25 kW installati).

Analizzando la percentuale di autoconsumo, invece, le differenze sono più evidenti: per il caso da 15 kW di potenza installata l'autoconsumo è pari al 59.6%, mentre per 20 kW e 25 kW di potenza installata la percentuale si riduce notevolmente (49.4% e 42.4% rispettivamente).

Essendo oggi più conveniente l'installazione di un impianto che copra le esigenze di consumo elettrico dell'edificio senza eccedere nella produzione di energia elettrica, risulta quindi più conveniente l'installazione dell'impianto da 15 kW.

CAPITOLO 6. ANALISI ECONOMICA

L'analisi economica svolta per il caso in esame analizza tre aspetti principali:

- i costi degli interventi;
- il risparmio in bolletta;
- gli incentivi cui è possibile accedere.

Inizialmente sono state considerate le ipotesi di isolamento termico dell'involucro edilizio e di retrofit dell'impianto di riscaldamento. L'ipotesi di installazione dell'impianto fotovoltaico è stata invece analizzata separatamente.

6.1. COSTO DEGLI INTERVENTI

Il costo dei singoli interventi è stato ricavato da diverse fonti. In primo luogo sono stati visionati i prezziari delle regioni Veneto e Lombardia. Come indicato nel prezziario della regione Lombardia, "i prezzi riportati […] sono ottenuti mediante analisi ricavate dalla composizione delle risorse elementari (mano d'opera e materiali), dei noli e dei semilavorati (malta ed impasti di calcestruzzo) e comprendono l'uso di ponteggi, trabattelli o scale […]. Inoltre si intendono incluse nei prezzi tutte quelle dotazioni che l'impresa specializzata nell'esecuzione della attività di lavoro deve necessariamente avere nella propria organizzazione di cantiere. Le voci relative alle opere compiute, comprendono […] la fornitura e la posa in opera dell'articolo descritto e di eventuali accessori di montaggio necessari. Il costo della mano d'opera del settore edile è una media calcolata sulla base di rilevamenti effettuati presso le Associazioni di categoria […]. Il costo della mano d'opera del settore impiantistico è rilevato presso ASSISTAL – Associazione Nazionale Costruttori di Impianti e si riferisce sia al settore elettrico che a quello meccanico. I costi dei materiali sono una media rilevata della elaborazione dei listini forniti dalle maggiori case produttrici […]. I prezzi, quindi, si intendono informativi e medi per forniture e lavori di una certa consistenza".

I prezzi riportati in questi documenti sono quindi stati confrontati con i listini resi disponibili da diverse ditte specializzate per verificare che fossero coerenti con il mercato attuale. Per ciò che riguarda gli impianti di riscaldamento e di produzione di acqua calda sanitaria e l'impianto fotovoltaico, i prezziari non riportano prezzi riferiti alle potenze considerate. Essi sono perciò stati ricavati dal confronto tra i listini prezzi di diverse ditte specializzate al fine di ottenere dei valori il più coerenti possibili con lo stato del mercato attuale.
In Tab. 6.1 sono riportati i costi relativi ai diversi interventi: per ogni tipologia di intervento sono stati riportati i prezzi unitari e la spesa totale, comprensivi di IVA.

Involucro	**Prezzo [€/m^2]**	**Spesa totale [€]**
Cappotto in polistirene espanso da 15 cm	84.17	82507
Isolamento del sottotetto in lana di roccia da 10 cm	9.03	3499
Isolamento del piano seminterrato con isolante multistrato da 5 cm	16.01	2807
Sostituzione delle finestre	285	31874
Totale		120687

Sistema di emissione	**Prezzo [€/m^2]**	**Spesa totale [€]**
Impianto radiante a soffitto	100	85700
Totale		85700

Impianto di generazione con pompa di calore	**Spesa totale [€]**
Pompa di calore	19408
Accumulo da 1500 l	1185
Locale caldaia prefabbricato	3200
Totale	23793

Impianto di generazione con caldaia a condensazione	Spesa totale [€]
Caldaia a condensazione	4605
Locale caldaia prefabbricato	3200
Condotto della canna fumaria	626
Totale	8431

Impianto di generazione con caldaia a pellet	Spesa totale [€]
Caldaia a pellet	10401
Locale caldaia prefabbricato	3200
Camera di stoccaggio del pellet prefabbricata	1800
Sistema di estrazione ed aspirazione del pellet	1430
Accumulo da 1500 l	1185
Condotto canna fumaria	626
Totale	18642

Impianto per la produzione di acqua calda sanitaria	Prezzo [€/unità]	Spesa totale [€]
15 scalda acqua a pompa di calore	1200	18000
Totale		18000

Impianto fotovoltaico	Spesa totale [€]
Impianto fotovoltaico da 15 kW	27500
Totale	27500

Tab. 6.1. Prezzi unitari e spesa totale dei diversi interventi.

6.2. RISPARMIO IN BOLLETTA

Per calcolare il risparmio conseguibile in bolletta sono state considerate diverse tariffe per l'energia elettrica e il gas (Tab. 6.2).

In particolare il prezzo dell'energia elettrica varia in funzione del consumo e del numero di contatori. Per il caso con caldaie autonome a gas è stato considerato il prezzo di un'utenza con 3 kW di potenza contrattuali e 2700 kWh di consumo annuo. Per il caso di pompa di calore, verificato che la tariffa agevolata non può essere applicata ad un condominio, è stata considerata la tariffa BTA6 con 15 kW di potenza installata e un consumo annuo di 13000 kWh. Per le caldaie a gas e a pellet, infine, è stata considerata la tariffa BTA2 con 3 kW di potenza installata e 3500 kWh di consumo annuo.

Anche per il prezzo del gas metano è stata considerata la tariffa del mercato di maggior tutela a seconda delle diverse fasce di consumo annuo.

Per il pellet è stato considerato un prezzo medio di mercato.

Prendendo come riferimento per tutte le ipotesi di intervento il caso di caldaie autonome a metano senza intervento di isolamento termico sull'involucro e considerando i consumi evidenziati nel capitolo 4, è stata quindi calcolata la spesa annuale di riscaldamento per ogni tipologia di impianto (Fig. 6.1).

In Tab. 6.3 è riportato il risparmio sulla spesa annua rispetto al caso di caldaie autonome senza intervento di isolamento sull'involucro edilizio.

Si nota come il maggior risparmio si ottenga con l'installazione della caldaia a pellet (84%), subito seguita dall'ipotesi con pompa di calore (83%). Si può tuttavia notare come l'intervento di retrofit dell'involucro comporti la maggior quota di riduzione dei costi (75%) e come gli eventuali interventi sulla parte impiantistica comportino meno di un ulteriore 10% di risparmio.

Tipologia impianto	Prezzo energia elettrica [€/kWh]	Prezzo metano [€/SMC]	Prezzo pellet [€/kg]
Caldaie autonome senza retrofit dell'involucro	0.19	0.83	-
Caldaie autonome con retrofit dell'involucro	0.19	0.90	-
Retrofit dell'involucro + riscaldamento centralizzato con pompa di calore aria-acqua	0.24	-	-
Retrofit dell'involucro + riscaldamento centralizzato con caldaia a condensazione	0.30	0.79	-
Retrofit dell'involucro + riscaldamento centralizzato con caldaia a pellet	0.30	-	0.30

Tab. 6.2. Prezzi di energia elettrica, gas metano e pellet a seconda della tipologia di impianto considerata, calcolati sulla base della fascia di consumo.

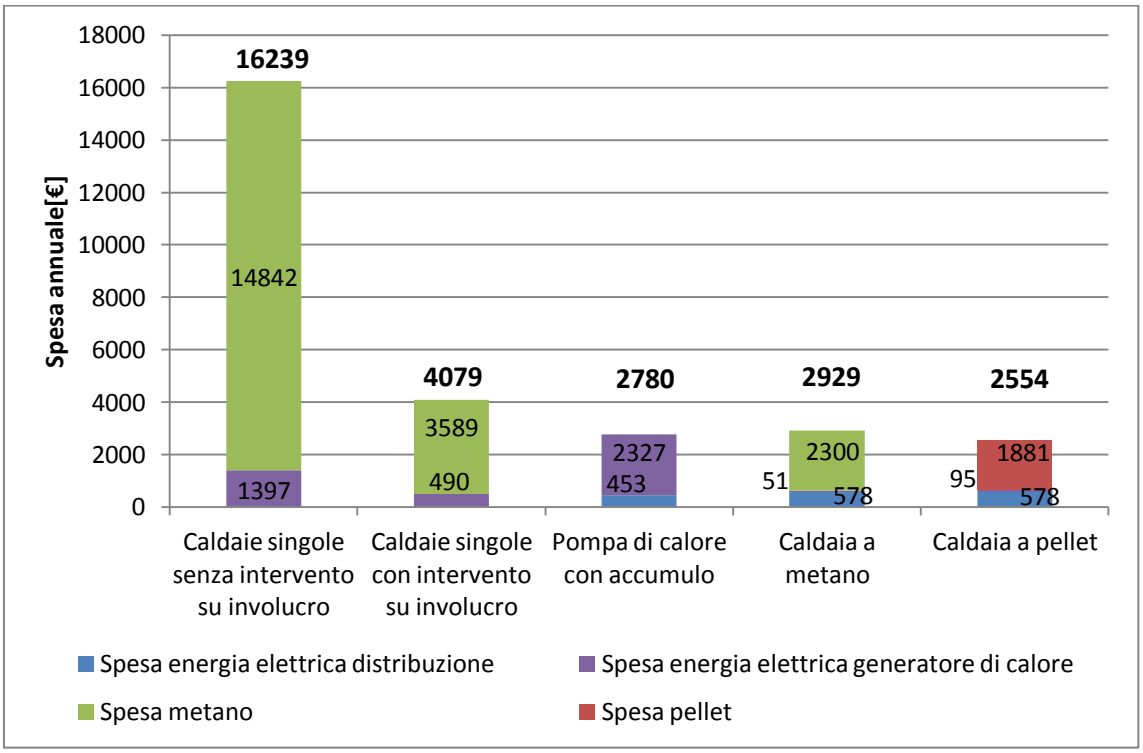


Fig. 6.1. Spesa annuale per tipologia di impianto di riscaldamento.

Tipologia di intervento	Risparmio [€/anno]	Risparmio percentuale
Solo retrofit dell'involucro	12160	-75%
Retrofit dell'involucro + pompa di calore aria-acqua	13460	-83%
Retrofit dell'involucro + caldaia a condensazione	13310	-82%
Retrofit dell'involucro + caldaia a pellet	13685	-84%

Tab. 6.3. Risparmio totale e percentuale sulla spesa annua per i diversi tipi di intervento rispetto al caso di caldaie autonome senza isolamento termico dell'involucro edilizio.

6.3. INCENTIVI

Sono state considerate due tipologie di incentivi:

- certificati bianchi;
- conto termico.

Come riportato nel sito del Gestore Sevizi Energetici (GSE) "i certificati bianchi, anche noti come "Titoli di Efficienza Energetica" (TEE), sono titoli negoziabili che certificano il conseguimento di risparmi energetici negli usi finali di energia attraverso interventi e progetti di incremento di efficienza energetica", mentre il "DM 28/12/12, il c.d. decreto "Conto Termico", […] dà attuazione al regime di sostegno […] per l'incentivazione di interventi di piccole dimensioni per l'incremento dell'efficienza energetica e per la produzione di energia termica da fonti rinnovabili".
Vengono ora analizzate separatamente le due forme di incentivazione.

6.3.1. CERTIFICATI BIANCHI

Sono previsti tre metodi di valutazione dei risparmi:

- standard: la valutazione viene effettuata sulla base di schede tecniche in cui i risparmi associati allo specifico intervento sono determinati esclusivamente in funzione del numero di unità fisiche di riferimento (UFR) oggetto dell'intervento stesso;
- analitici: la valutazione viene effettuata sulla base di schede tecniche in cui i risparmi sono determinati attraverso un algoritmo specifico alimentato da pochi parametri caratterizzanti lo stato di funzionamento e di assorbimento energetico dell'apparecchiatura oggetto dell'intervento e misurati almeno una volta l'anno;
- a consuntivo: non essendo predisposta alcuna scheda tecnica i risparmi sono calcolati attraverso un completo piano di monitoraggio.

Per il caso in esame sono state considerate quattro schede tecniche (Tab. 6.4). Ogni scheda tecnica fornisce il procedimento per il calcolo dei titoli annuali il cui valore varia a seconda del mercato. Per il caso in esame è stato considerato pari a 115 €/tep, che corrisponde al valore medio dei titoli durante il primo semestre del 2014. Le schede tecniche forniscono anche il numero di anni durante i quali l'incentivo può essere percepito (vita utile U), pari a 8 e 5 anni per interventi sull'involucro e sull'impianto rispettivamente. In Tab. 6.5 sono riportate, per ogni tipologia di intervento, la scheda tecnica di riferimento, la vita utile, il valore annuale e quello totale dell'incentivo.

Tipologia intervento	Scheda tecnica
Isolamento delle pareti e delle coperture	6T
Isolamento termico delle pareti e delle coperture per il raffrescamento estivo in ambito domestico e terziario	20T
Sostituzione di vetri semplici con doppi vetri	5T
Installazione di sistemi centralizzati per la climatizzazione invernale e/o estiva ad uso civile	26T

Tab. 6.4. Tipologie di intervento incentivabili nel caso in esame e schede tecniche corrispondenti.

Tipologia di intervento	Scheda tecnica	Vita utile [anni]	Incentivo annuo [€/anno]	Incentivo totale [€]
Isolamento delle pareti e delle coperture	6T	8	2576	20609
Isolamento delle pareti e delle coperture	20T	8	261	2088
Sostituzione di vetri semplici con doppi vetri	5T	8	477	3818
Installazione della pompa di calore centralizzata	26T	5	626	3130
Installazione della caldaia a condensazione centralizzata	26T	5	421	2105
Installazione della caldaia centralizzata a pellet	26T	5	1154	5770

Tab. 6.5. Scheda tecnica, vita utile e valori annuale e totale dell'incentivo per ogni tipologia di intervento considerata.

Oltre agli incentivi per gli interventi di isolamento termico dell'edificio e di sostituzione degli impianti di riscaldamento è possibile ottenere degli incentivi anche per l'installazione di pompe di calore per la produzione di acqua calda sanitaria e per l'installazione dell'impianto fotovoltaico.

Per il primo caso la scheda tecnica di riferimento è la numero 27T "Installazione di pompa di calore elettrica per produzione di acqua calda sanitaria in impianti nuovi ed esistenti". La vita utile è di cinque anni e l'incentivo annuo percepibile per l'installazione delle quindici pompe di calore è di 402 €. L'incentivo totale che è possibile ottenere, quindi, è pari a 2011 €.

Per il secondo caso, invece, la scheda tecnica di riferimento è la 7T "Impiego di impianti fotovoltaici di potenza elettrica inferiore a 20 kW". L'incentivo annuo percepibile è di 1543 €, per un totale di 7715 € in cinque anni.

6.3.2. CONTO TERMICO

Il Decreto ministeriale 28 dicembre 2012 regolamenta l'accesso agli incentivi, specificando le tipologie di interventi incentivabili (Fig. 6.2 e Fig. 6.3). Viene poi fatta distinzione tra Soggetti ammessi, cioè i Soggetti beneficiari degli interventi oggetto di incentivazione, e i Soggetti responsabili, quei Soggetti che hanno sostenuto direttamente le spese per l'esecuzione degli interventi. In Tab. 6.6 vengono specificati i diversi Soggetti ammessi e i relativi interventi per cui essi possono richiedere gli incentivi. È utile specificare che in questo ambito i gestori di immobili pubblici ex IACP sono equiparati alle Amministrazioni pubbliche e possono quindi richiedere gli incentivi per i relativi interventi indicati in tabella. Per il caso in esame si è considerato che l'intero edificio sia di proprietà dell'AEEP. Questa ipotesi non rispecchia la realtà in quanto cinque dei quindici appartamenti sono privati; non si è tuttavia a conoscenza di quali appartamenti siano privati e quali di proprietà dell'ente pubblico. I risultati ottenuti sono quindi solo indicativi. Sia le Amministrazioni pubbliche che i Soggetti privati, inoltre, ai fini dell'accesso agli incentivi, possono avvalersi di contratti di prestazione/servizio energetico, recanti l'eventuale finanziamento tramite terzi, anche tramite l'intervento di una ESCO.
Il calcolo degli incentivi si basa sulla spesa sostenuta per i singoli interventi. Sono inoltre previsti dei limiti massimi sugli incentivi percepibili.

Categoria	Sigla (*)	Tipologia di intervento	Riferimenti Decreto
1 - interventi di incremento dell'efficienza energetica in edifici esistenti	1.A	Isolamento termico di superfici opache delimitanti il volume climatizzato	Art. 4, comma 1, lettera a)
	1.B	Sostituzione di chiusure trasparenti comprensive di infissi delimitanti il volume climatizzato	Art. 4, comma 1, lettera b)
	1.C	Sostituzione di impianti di climatizzazione invernale con generatori di calore a condensazione di qualsiasi potenza	Art. 4, comma 1, lettera c)
	1.D	Installazione di sistemi di schermatura e/o ombreggiamento di chiusure trasparenti con esposizione da ESE a O, fissi o mobili, non trasportabili	Art. 4, comma 1, lettera d)

(*) La sigla identifica la tipologia dell'intervento ai fini delle comunicazioni tra GSE e Soggetto Responsabile.

Fig. 6.2. Interventi incentivabili con il conto termico. Categoria 1: interventi di incremento dell'efficienza energetica in edifici esistenti (art. 4, comma 1).

Categoria	Sigla (*)	Tipologia di intervento	Riferimenti Decreto
2 - interventi di piccole dimensioni di produzione di energia termica da fonti rinnovabili e di sistemi ad alta efficienza	**2.A**	Sostituzione di impianti di climatizzazione invernale esistenti con impianti di climatizzazione invernale utilizzanti pompe di calore elettriche o a gas, anche geotermiche (con potenza termica utile nominale fino a 1000 kW_t)	Art. 4, comma 2, lettera a)
	2.B	Sostituzione di impianti di climatizzazione invernale o di riscaldamento delle serre esistenti e dei fabbricati rurali esistenti con generatori di calore alimentati da biomassa (con potenza termica nominale fino a 1000 kW_t)	Art. 4, comma 2, lettera b)
	2.C	Installazione di collettori solari termici, anche abbinati a sistemi di *solar cooling* (con superficie solare lorda fino a 1000 m^2)	Art. 4, comma 2, lettera c)
	2.D	Sostituzione di scaldacqua elettrici con scaldacqua a pompa di calore	Art. 4, comma 2, lettera d)

(*) La sigla identifica sinteticamente la tipologia dell'intervento ai fini delle comunicazioni tra GSE e Soggetto Responsabile.

Fig. 6.3. Interventi incentivabili con il conto termico. Categoria 2: interventi di piccole dimensioni di produzione di energia termica da fonti rinnovabili e di sistemi ad alta efficienza (art. 4, comma 1).

Soggetti ammessi	Categorie di interventi incentivabili
Amministrazioni pubbliche (compresi i gestori degli immobili ex IACP)	Categorie 1 e 2
Soggetti privati	Categoria 2

Tab. 6.6. Soggetti ammessi e corrispettive categorie di intervento incentivabili.

Per il caso in esame sono stati considerati i seguenti interventi:

- isolamento delle pareti esterne degli appartamenti;
- isolamento del pavimento del sottotetto;
- isolamento del soffitto del piano seminterrato;
- sostituzione delle finestre;
- installazione della pompa di calore centralizzata;
- installazione della caldaia a condensazione centralizzata.

Non è previsto alcun incentivo per l'installazione della caldaia centralizzata a pellet. Per gli interventi di isolamento del pavimento del sottotetto e del soffitto del piano seminterrato non è rispettato il limite imposto dal decreto sulla trasmittanza termica e quindi non possono percepire alcun incentivo.
In Tab. 6.7 sono riportate, per ogni tipologia di intervento incentivabile, il valore annuale dell'incentivo, il numero di anni per i quali viene percepito e il valore complessivo dell'incentivo stesso.

Tipologia di intervento	Incentivo annuo [€/anno]	Durata incentivo [anni]	Incentivo totale [€]
Isolamento delle pareti	5365	5	26827
Sostituzione degli infissi	2550	5	12750
Installazione della pompa di calore centralizzata	1244	5	6220
Installazione della caldaia a condensazione centralizzata	418	5	2092

Tab. 6.7. Valore annuale, durata e valore totale dell'incentivo per ogni tipologia di intervento considerata.

Attraverso il conto termico è possibile ottenere degli incentivi anche per l'installazione di pompe di calore per la produzione di acqua calda sanitaria per la durata di due anni. L'incentivo annuo percepibile è di 400 €/anno per macchina, per un totale di 12000 € in 2 anni.

6.4. RITORNO DELL'INVESTIMENTO

Tenendo conto dei costi degli interventi, del risparmio in bolletta e degli eventuali incentivi percepibili, è stato valutato il tempo di ritorno degli investimenti. Il calcolo è stato svolto considerando l'inflazione al 2.5% e un tasso d'interesse del 7%. Per ogni intervento è stato inoltre considerato che l'intero investimento venga fatto durante il primo anno.
Sono stati quindi considerate le seguenti ipotesi di intervento:

- isolamento dell'involucro edilizio e sostituzione degli infissi;
- isolamento dell'involucro edilizio, sostituzione degli infissi ed installazione della pompa di calore centralizzata;
- isolamento dell'involucro edilizio, sostituzione degli infissi ed installazione della caldaia centralizzata a condensazione;
- isolamento dell'involucro edilizio, sostituzione degli infissi ed installazione della caldaia centralizzata a pellet.

Per ogni ipotesi sono stati confrontati i tempi di ritorno nei seguenti casi:

- senza incentivi;
- con i certificati bianchi (TEE);
- con il conto termico.

Poiché la condizione impiantistica degli appartamenti è molto varia e alcuni appartamenti del quartiere sono sprovvisti di impianto di riscaldamento, tuttavia, si è reso necessario analizzare gli investimenti in due ipotesi differenti: una in cui i costi dell'impianto radiante sono inclusi nell'investimento iniziale per l'installazione dell'impianto di riscaldamento e una in cui sono esclusi.
Dalla Fig. 6.4 alla Fig. 6.7 sono visibili i tempi di ritorno degli investimenti per le singole ipotesi formulate.

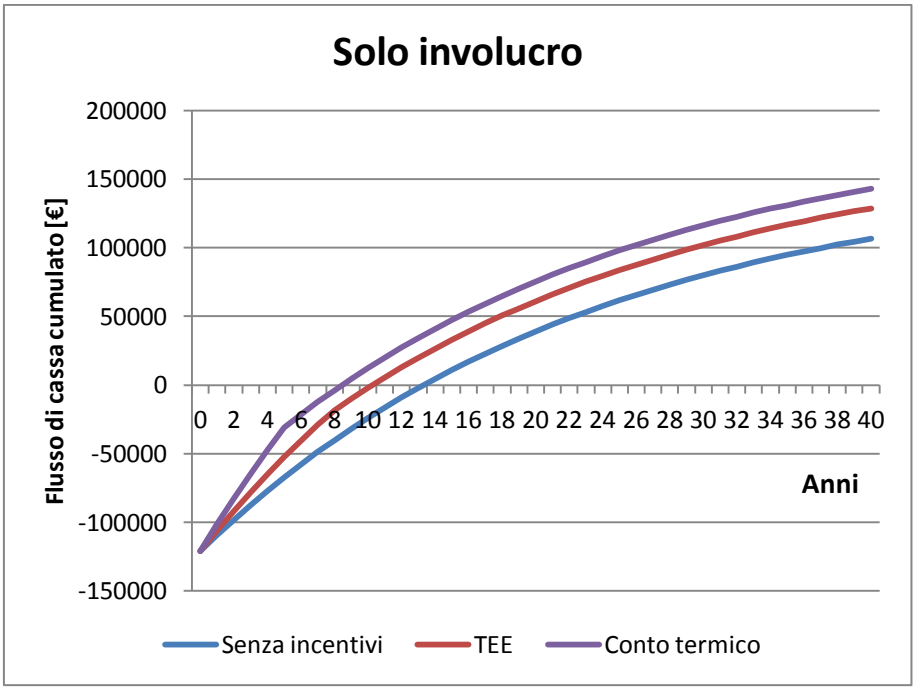


Fig. 6.4. Ritorno dell'investimento per il caso di isolamento termico dell'involucro edilizio e sostituzione degli infissi.

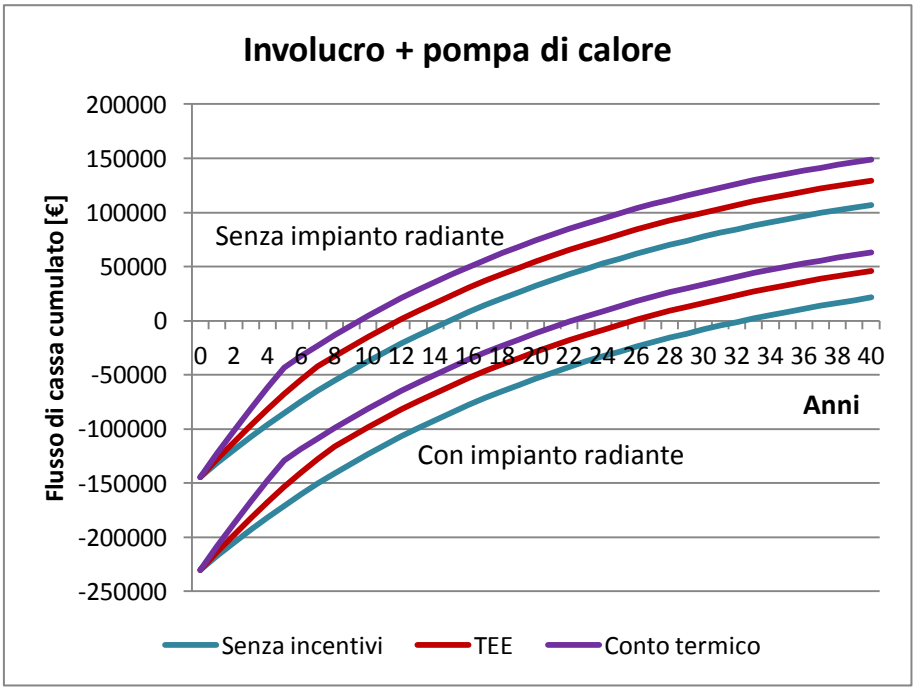


Fig. 6.5. Ritorno dell'investimento per il caso di isolamento termico dell'involucro edilizio, sostituzione degli infissi e installazione della pompa di calore centralizzata.

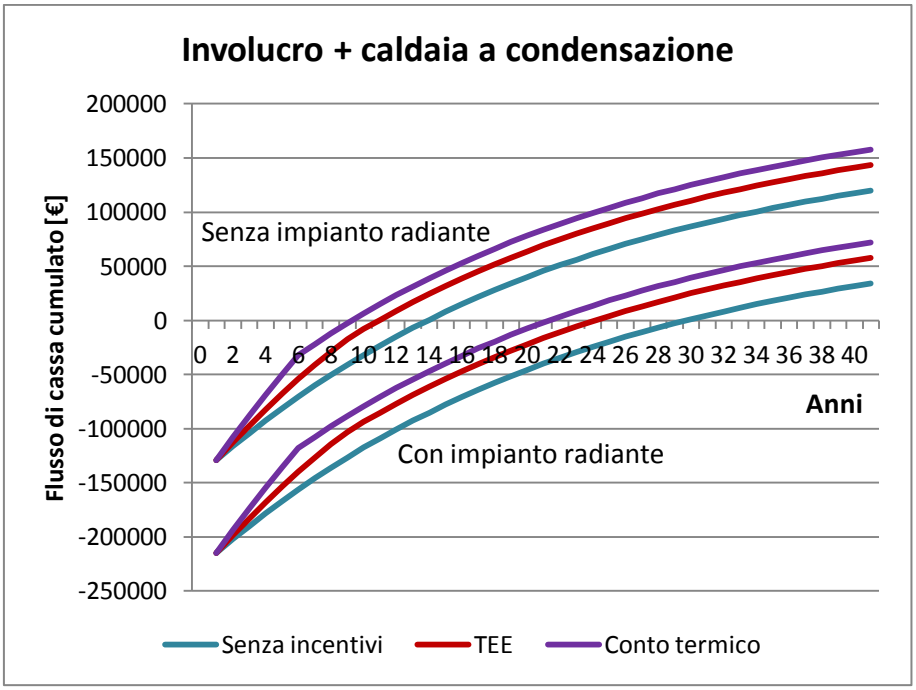


Fig. 6.6. Ritorno dell'investimento per il caso di isolamento termico dell'involucro edilizio, sostituzione degli infissi e installazione della caldaia centralizzata a condensazione.

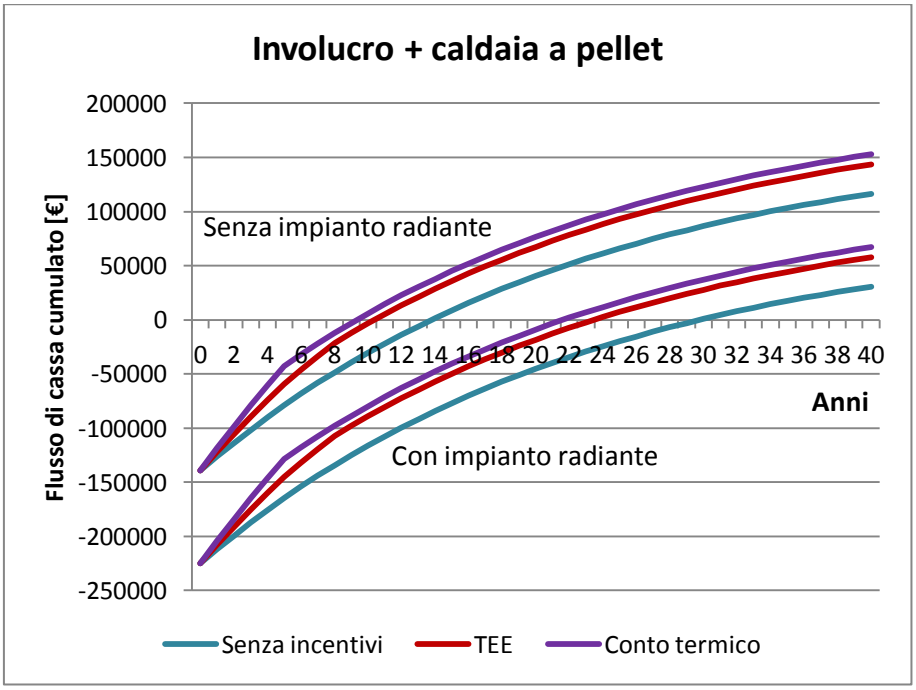


Fig. 6.7. Ritorno dell'investimento per il caso di isolamento termico dell'involucro edilizio, sostituzione degli infissi e installazione della caldaia centralizzata a pellet.

È stato considerato anche il caso in cui non sia possibile percepire gli incentivi derivanti dai certificati bianchi per le schede 6T e 5T. In queste schede infatti pur non essendo indicato alcun limite durante la spiegazione per il calcolo degli incentivi, nella descrizione della tipologia dell'incentivo viene specificato che i titoli sono "tipo II per risparmi ottenuti con isolamenti effettuati in edifici con impianto di riscaldamento a gas" e "tipo III per risparmi ottenuti con isolamenti in edifici con impianto di riscaldamento a gasolio". In questo caso i tempi di ritorno si discostano da quelli del caso senza incentivi al massimo del 6.6%.

In Fig. 6.8 sono riportati i valori del valore attuale netto (VAN) a 25 anni dall'investimento. In Fig. 6.9, invece, sono riportati i valori dell'indice di profittabilità (IP) sempre riferiti a 25 anni dall'investimento.

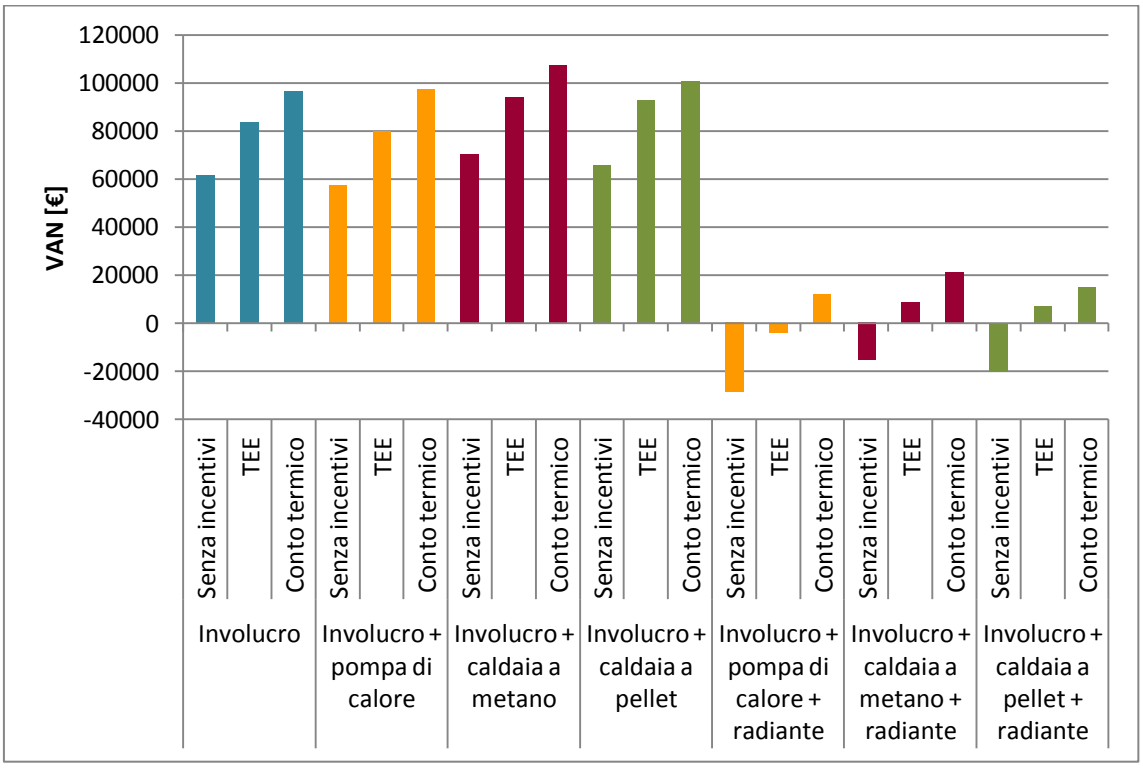


Fig. 6.8. Valore attuale netto (VAN) a 25 anni.

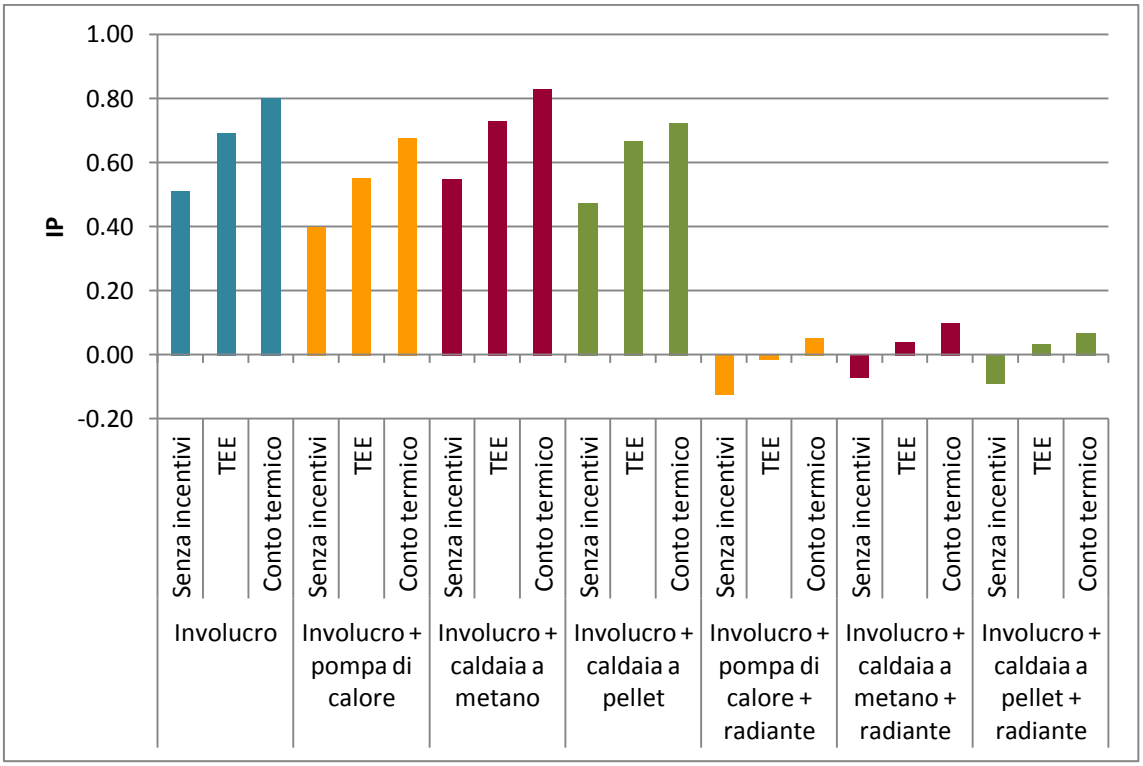


Fig. 6.9. Indice di profittabilità (IP) a 25 anni.

Dai risultati ottenuti si nota come l'intervento di isolamento termico abbia un tempo di ritorno ragionevole in tutti i casi considerati con un indice di profittabilità che varia da 0.51 a 0.80. Percependo gli incentivi del conto termico si può recuperare l'investimento in circa 8 anni.

Per quanto riguarda la parte impiantistica, invece, i tempi di ritorno sono più lunghi. È determinante il costo dell'impianto radiante, considerando il quale gli interventi risultano essere non competitivi in molti casi. Senza incentivi l'indice di profittabilità è negativo a prescindere dalla tipologia di generatore di calore considerata. Considerando i certificati bianchi l'IP resta negativo nel caso di impianto con pompa di calore centralizzata mentre per gli altri due casi è di 0.04 e 0.03 per la caldaia a condensazione e per quella a pellet rispettivamente. Con il conto termico l'IP aumenta rimanendo comunque nell'intorno di 0.1.

Se non si considera il costo dell'impianto radiante, invece, gli investimenti risultano essere più competitivi. L'ipotesi più vantaggiosa risulta essere quella di installazione di una caldaia centralizzata a condensazione per la quale l'IP va da 0.55 nel caso senza incentivi a 0.83 nel caso con conto termico. Il caso con

pompa di calore centralizzata risulta essere ancora il meno conveniente, con un IP comunque non molto più basso: 0.40 nel caso senza incentivi e 0.68 nel caso con conto termico.
In generale si nota come il conto termico sia più vantaggioso rispetto ai certificati bianchi. Bisogna tuttavia ricordare che i risultati sono stati ottenuti ipotizzando che l'intero edificio sia di proprietà dell'ente pubblico. In realtà cinque dei quindici appartamenti sono privati. L'incentivo che è possibile ottenere con il conto termico, quindi, sarebbe inferiore.

6.5. FOTOVOLTAICO

L'ipotesi di installazione di un impianto fotovoltaico da 15 kW di potenza sul tetto del condominio è stata analizzata separatamente. Anche in questo caso a partire dal costo dell'intervento, dal risparmio in bolletta e dai possibili incentivi percepibili, considerando l'inflazione al 2.5% e un tasso di interesse del 7%, sono stati calcolati il tempo di ritorno dell'investimento, il valore attuale netto a 25 anni dall'investimento stesso e l'indice di profittabilità, sempre a 25 anni.
Per ciò che riguarda il costo dell'intervento si rimanda al paragrafo 6.1.
Sono stati considerati i consumi elettrici degli appartamenti dovuti a elettrodomestici ed illuminazione, quelli degli scalda acqua a pompa di calore e quelli della pompa di calore per il riscaldamento dell'intero edificio. Nel caso senza fotovoltaico sono stati considerati un contatore per la pompa di calore e un contatore per ogni appartamento. Per la pompa di calore è stata considerata la tariffa BTA6 mentre per i consumi elettrici dei singoli appartamenti è stata considerata la tariffa BTA2, come meglio specificato nel paragrafo 6.2. Per il caso con fotovoltaico è stato considerato un contratto di tipo scambio sul posto. Il contributo per lo scambio sul posto Cs è stato calcolato attraverso la seguente formula (Allegato A alla delibera 570/2012/R/efr):

$$Cs = min[Oe; Cei] + CUsf * Es$$

dove Oe è la parte di energia convenzionale dell'onere annualmente sostenuto per l'acquisto dell'energia elettrica espressa in €, Cei è la valorizzazione dell'energia elettrica annualmente prodotta e immessa in rete dall'impianto

espressa in €, $CUsf$ è il corrispettivo unitario di scambio forfettario annuale espresso in c€/kWh, Es è l'energia elettrica annualmente scambiata con la rete espressa in kWh. Per la quota di energia elettrica assorbita dalla rete, a partire dalla tariffa BTA6 è stato calcolato il prezzo medio dell'energia per quella fascia di consumo che è risultato pari a 0.27 €/kWh.

La spesa annuale è risultata pari a 8114 € senza impianto fotovoltaico e a 6505 € con il fotovoltaico per un risparmio di 1609 €/anno.

Per il calcolo degli incentivi sotto forma di titoli di efficienza energetica (scheda tecnica 7T) si rimanda al paragrafo 6.3.1.

Nella Fig. 6.10 sono visibili i tempi di ritorno dell'investimento nel caso senza incentivi e con i certificati bianchi. In Fig. 6.11 e in Fig. 6.12 sono riportati il valore attuale netto (VAN) a 25 anni dall'investimento e l'indice di profittabilità (IP) dello stesso.

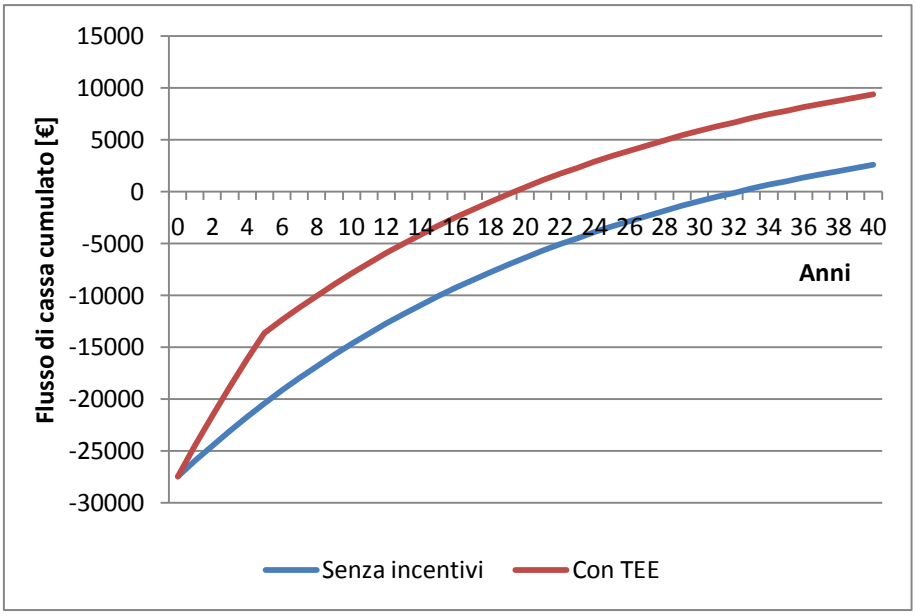


Fig. 6.10. Ritorno dell'investimento per l'installazione dell'impianto fotovoltaico da 15 kW di potenza.

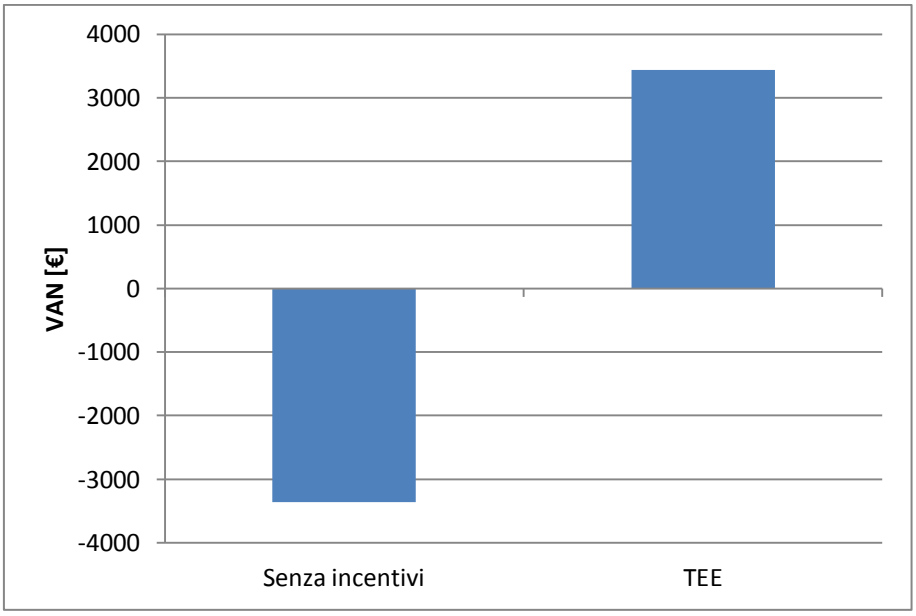


Fig. 6.11. Valore attuale netto (VAN) a 25 anni.

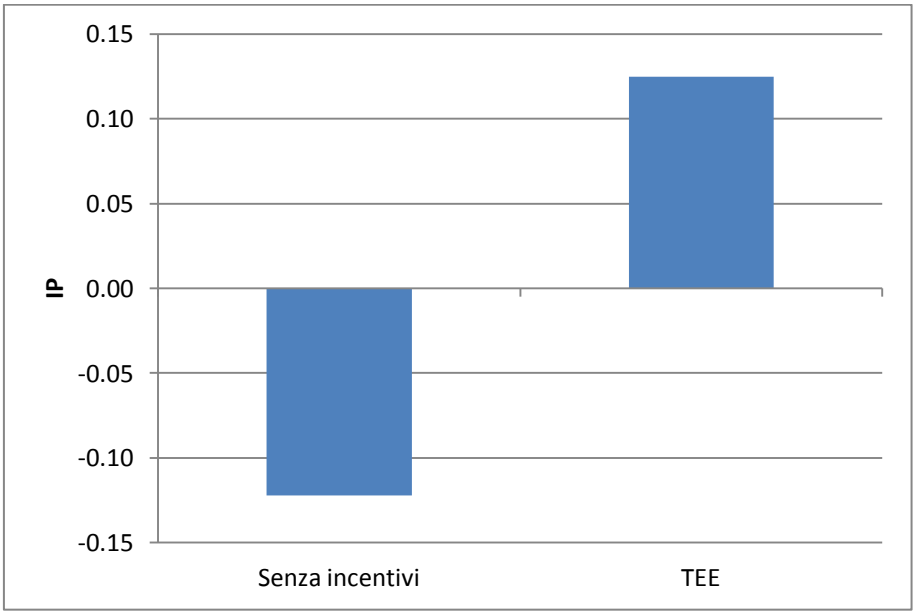


Fig. 6.12. Indice di profittabilità (IP) a 25 anni.

Dai risultati si nota che l'investimento per l'installazione dell'impianto fotovoltaico è remunerativo solo con gli incentivi derivati dai certificati bianchi. Senza incentivi il tempo di ritorno dell'investimento è pari a circa 32 anni e l'indice di profittabilità a 25 anni è perciò negativo.

CONCLUSIONI

La riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente è un tema cruciale se si pensa agli anni cui risale lo stock edilizio italiano e al basso tasso di crescita di nuovi edifici altamente performanti.

L'analisi energetica condotta sull'edificio di edilizia residenziale pubblica oggetto del presente lavoro di tesi ha rilevato valori di fabbisogno energetico netto di riscaldamento elevati (151.4 kWh/m^2), compatibili con l'epoca di costruzione dell'edificio, cui conseguono notevoli potenzialità di miglioramento. Viste le scarse performance dell'involucro, nella prima parte della tesi sono stati analizzati i seguenti interventi: sostituzione delle finestre con vetro singolo con infissi con doppio vetro con trattamento basso emissivo e argon nell'intercapedine, isolamento a cappotto, isolamento del solaio del sottotetto e isolamento del solaio degli appartamenti sopra il piano seminterrato non riscaldato. Tra gli interventi proposti quello che comporta una maggiore riduzione del fabbisogno energetico netto, pari al 43%, è l'isolamento a cappotto. Gli interventi analizzati nel loro complesso garantiscono una riduzione del 70% del fabbisogno di energia primaria rispetto allo stato di fatto, portando l'edificio dalla classe energetica G alla classe C.

Si è quindi passati ad analizzare la parte impiantistica, allo stato attuale anch'essa abbastanza problematica, in quanto parte degli appartamenti del condominio sono riscaldati da stufe a gas. Il basso fabbisogno energetico netto ottenuto dalle ipotesi di retrofit dell'involucro (34.2 kWh/m^2) ha permesso di considerare l'installazione di un sistema di emissione a bassa temperatura. In particolare è stato scelto un impianto radiante a soffitto, in quanto l'eventuale installazione, non invasiva dal punto di vista delle opere murarie necessarie, non comporta particolari disagi per gli inquilini. Per il generatore di calore dell'impianto di riscaldamento centralizzato sono state analizzate le seguenti possibilità: pompa di calore aria-acqua, caldaia a condensazione e caldaia a pellet. Per l'acqua calda sanitaria è stata preferita la soluzione autonoma, con l'installazione di uno scalda acqua a pompa di calore in ogni unità abitativa. Il

fabbisogno di energia primaria che ne risulta è del 79% inferiore a quello dello stato di fatto nel caso della caldaia a condensazione, dell'82% nel caso della pompa di calore aria-acqua e dell'87% nel caso della caldaia a pellet. La prima soluzione porta l'edificio in classe B, le altre due consentono il raggiungimento della classe A.

È stata quindi analizzata la possibilità di installare un impianto fotovoltaico da 15 kW sulla falda est del tetto. È stato costruito il profilo dei consumi elettrici del condominio tenendo conto della pompa di calore per il riscaldamento, degli scalda acqua a pompa di calore e dei consumi elettrici delle diverse tipologie di appartamenti. La quota di autoconsumo che ne risulta è pari al 60% e garantisce la copertura del 24% del fabbisogno elettrico del condominio. L'installazione di un impianto di potenza superiore a 15 kW non è giustificata dai consumi.

Come ultimo step del lavoro è stato analizzato l'aspetto economico degli interventi ipotizzati. È stata fatta innanzitutto una stima della spesa che gli inquilini si troverebbero a sostenere per il riscaldamento nelle diverse ipotesi. Il solo retrofit dell'involucro porta ad un risparmio del 75% rispetto allo stato attuale, risparmio che sale all'82%, 83% e 84% per le soluzioni che prevedono, oltre all'efficientamento dell'involucro, il ricorso ad un impianto di riscaldamento centralizzato alimentato da una caldaia a condensazione, da una pompa di calore aria-acqua e da una caldaia a pellet rispettivamente. È stata quindi fatta una stima dei costi di investimento che le diverse soluzioni comportano, per poi passare ad analizzare due tipologie di incentivazione cui è possibile accedere nel caso degli edifici pubblici: il conto termico e il meccanismo dei certificati bianchi. Il tempo di ritorno dei diversi interventi varia in maniera significativa a seconda della forma di incentivazione considerata.

L'intervento di riqualificazione completa dell'involucro edilizio ha, con gli incentivi, tempi di ritorno tutto sommato ragionevoli: dai 13 anni senza incentivi si scende a 10 anni con i certificati bianchi e 8 anni con il conto termico. Diverso è il discorso quando si interviene congiuntamente anche sulla parte impiantistica: il tempo di ritorno va, a seconda della soluzione e della forma di incentivazione scelta, dai 9 ai 12 anni circa, che includendo nell'investimento

iniziale l'esborso per l'impianto radiante diventano 21-26 anni. Si può quindi concludere che per l'edificio in esame l'intervento di retrofit del solo involucro edilizio sia, tra le soluzioni analizzate, quella che coniuga i migliori risultati in termini di riduzione del fabbisogno energetico con il minor tempo di ritorno dell'investimento.

APPENDICE: TRNSYS

TRNSYS (Transient System Simulation Tool) è un software commerciale che viene utilizzato per la simulazione dinamica del comportamento di diversi sistemi. Si va dalla modellazione dei sistemi solari termici e fotovoltaici allo studio del comportamento del sistema edificio-impianto, con la possibilità di tenere conto di una molteplicità di fattori, come ad esempio il comportamento degli occupanti e l'utilizzo di sistemi multi energia, con l'eventuale ricorso a fonti energetiche alternative (eolico, solare termico e fotovoltaico, sistemi ad idrogeno).

Gli aspetti più vantaggiosi di questo software sono la struttura modulare e l'architettura, basata su file di estensione "*.ddl*", fatto che permette di modificare i moduli preesistenti per meglio adattarli alle proprie esigenze e di crearne di nuovi, utilizzando i più comuni linguaggi di programmazione (C, C++, Pascal, Fortran). Trnsys può anche essere facilmente connesso ad altri software di uso comune (Microsoft Excel, Matlab, Fluent, EES, Comis, ecc.).

Degli applicativi presenti nel pacchetto di TRNSYS sono stati utilizzati *TRNBuild* e *Simulation Studio* che verranno ora rapidamente descritti.

1. TRNBUILD

L'applicativo *TRNBuild* consente di modellizzare edifici anche complessi in modo abbastanza semplice e intuitivo. Il file "*.bui*" prodotto da *TRNBuild* viene poi elaborato all'interno di *Simulation Studio* in uno dei moduli (*type*) predefiniti di TRNSYS, la *type56*.

La schermata iniziale del programma è visibile nella Fig. 1.

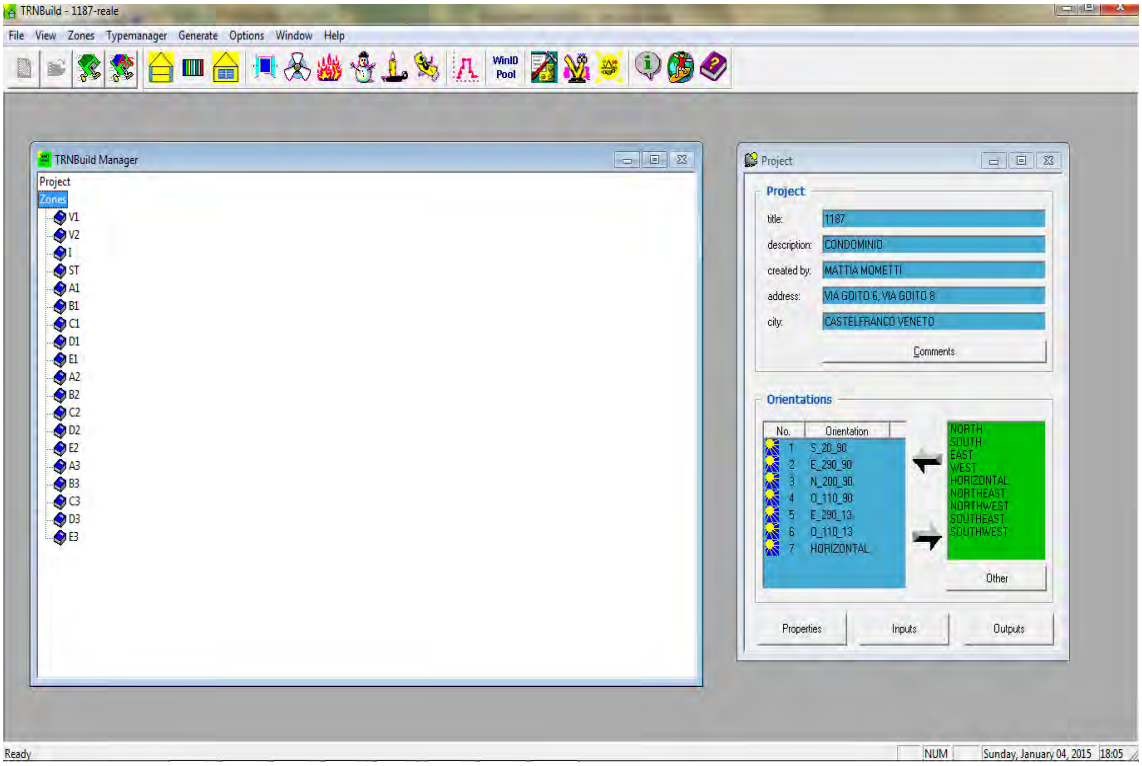


Fig. 1. Schermata iniziale di TRNBuild.

Sulla finestra a destra ("Project") è possibile nominare il progetto, indicare l'orientazione delle diverse superfici che compongono l'edificio, visualizzare gli input necessari e scegliere gli output desiderati. Dal menù principale sulla parte superiore della schermata è possibile creare, cancellare o modificare i parametri dell'edificio quali per esempio le strutture vetrate e opache, le caratteristiche di ventilazione, i carichi interni, ecc. Nella finestra a sinistra invece vengono indicate le diverse zone termiche dell'edificio.

Dall'icona di ogni zona termica è possibile accedere ad una finestra in cui assegnare o modificare le caratteristiche della zona termica stessa (Fig. 2).

È possibile indicare i seguenti dati:

- volume della zona termica;
- valori iniziali di temperatura e umidità;
- infiltrazione, ventilazione meccanica, riscaldamento, raffrescamento, carichi interni, parametri di comfort;
- tipologia di superfici opache, area e loro caratteristiche;
- tipologia di superfici vetrate, area e loro caratteristiche.

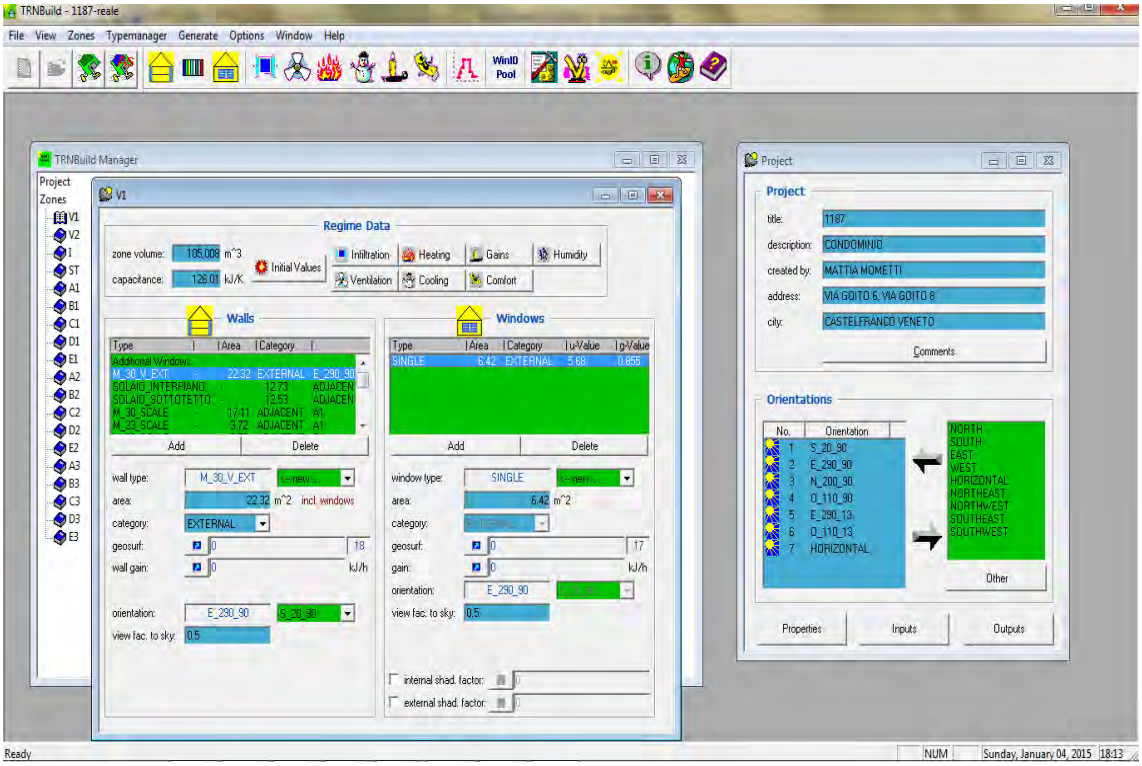


Fig. 2. Finestra di comando di una zona termica.

Nella descrizione delle zone termiche è indispensabile indicarne i confini, designando la categoria di ogni superficie opaca. Esistono quattro categorie di superfici:

- EXTERNAL: la superficie divide la zona termica dall'ambiente esterno;
- INTERNAL: la superficie è interna alla zona termica;
- ADJACENT: la superficie divide la zona termica considerata da un'altra zona termica del modello;
- BOUNDARY: la superficie confina con un ambiente le cui caratteristiche termiche vengono definite dall'utente (stessa temperatura della zona termica considerata, temperatura costante fissata, temperatura variabile secondo un input che verrà fornito).

TRNBuild, inoltre, mette a disposizione un elenco di tipologie di superfici opache e di materiali con caratteristiche predefinite da cui poter attingere per la creazione della zona termica. È tuttavia possibile creare nuove tipologie sia di materiali sia di superfici. Per definire un nuovo materiale è sufficiente indicarne

la conduttività, il calore specifico e la densità. Per definire una nuova superficie opaca è necessario indicare i materiali utilizzati nei diversi strati nonché lo spessore degli stessi. Nella Fig. 3 sono visibili le due finestre attraverso le quali è possibile compiere queste operazioni.

Per le superfici vetrate il discorso è analogo: esiste un elenco di superfici vetrate reso disponibile di default da *TRNBuild* ma è anche possibile crearne di nuove specificando i singoli parametri richiesti.

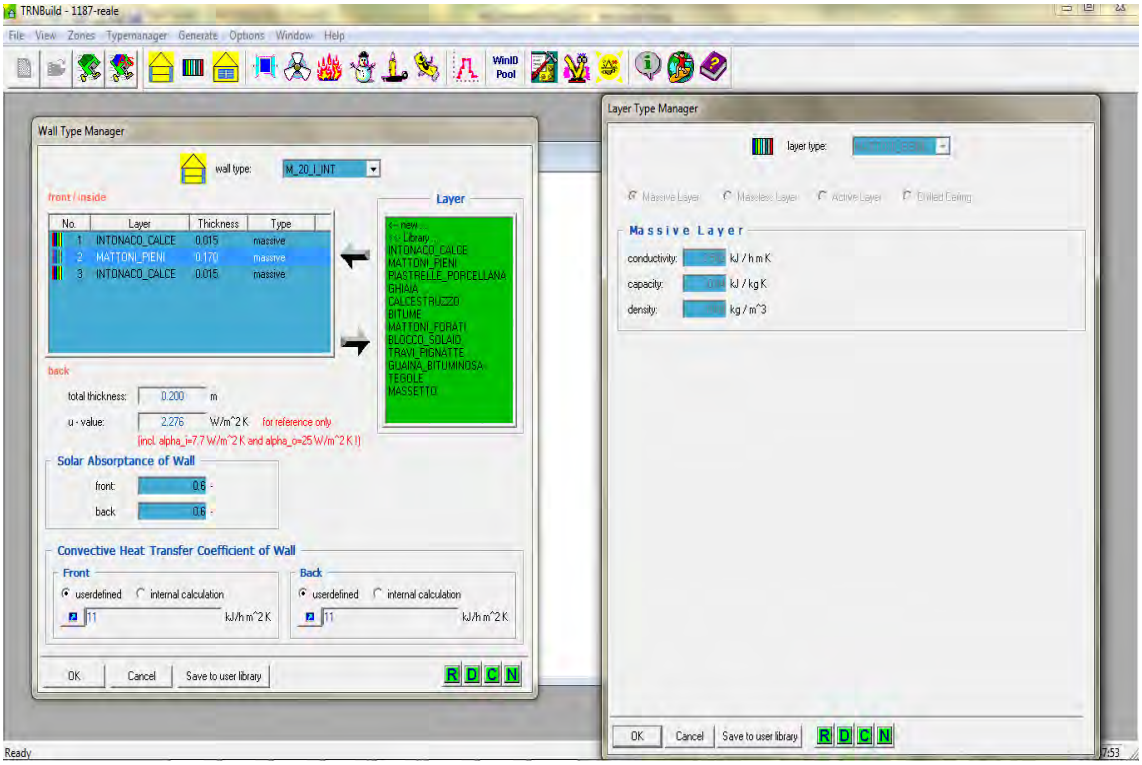


Fig. 3. Finestre per la creazione di nuove superfici opache e di nuovi materiali.

2. Simulation Studio

Con *Simulation Studio* è possibile realizzare una simulazione dinamica inserendo nel piano di lavoro i singoli componenti (*type*) e collegandoli opportunamente tra loro.

Esistono due categorie principali di *type*. La prima comprende tutte quelle *type* che rappresentano, attraverso un modello matematico, il comportamento reale di un componente (pompa, accumulo, pannello solare, ecc.). La seconda invece comprende tutte le *type* che permettono un'interfaccia con l'utente (plotter,

printer, data reader, ecc.). Da ogni *type* è possibile accedere ad una finestra attraverso la quale si devono impostare tutti i parametri caratteristici del componente e, per le *type* che lo consentono, richiamare file esterni. Un esempio è quello della *type56a* con la quale è possibile richiamare il file "*.bui*" creato con *TRNBuild*.

Ogni *type* è provvista di input ed output che devono essere connessi alle altre *type*. La connessione viene fatta attraverso delle semplici frecce di collegamento. In Fig. 4 è mostrato l'esempio di un semplice modello con le relative connessioni.

Una volta specificate tutte le caratteristiche delle *type* presenti nel foglio di lavoro e le connessioni necessarie e dopo aver specificato durata e step temporale di simulazione, è possibile lanciare la simulazione.

I risultati possono essere stampati su file di testo esterni e possono anche essere visualizzati a video durante la simulazione stessa sotto forma di grafici.

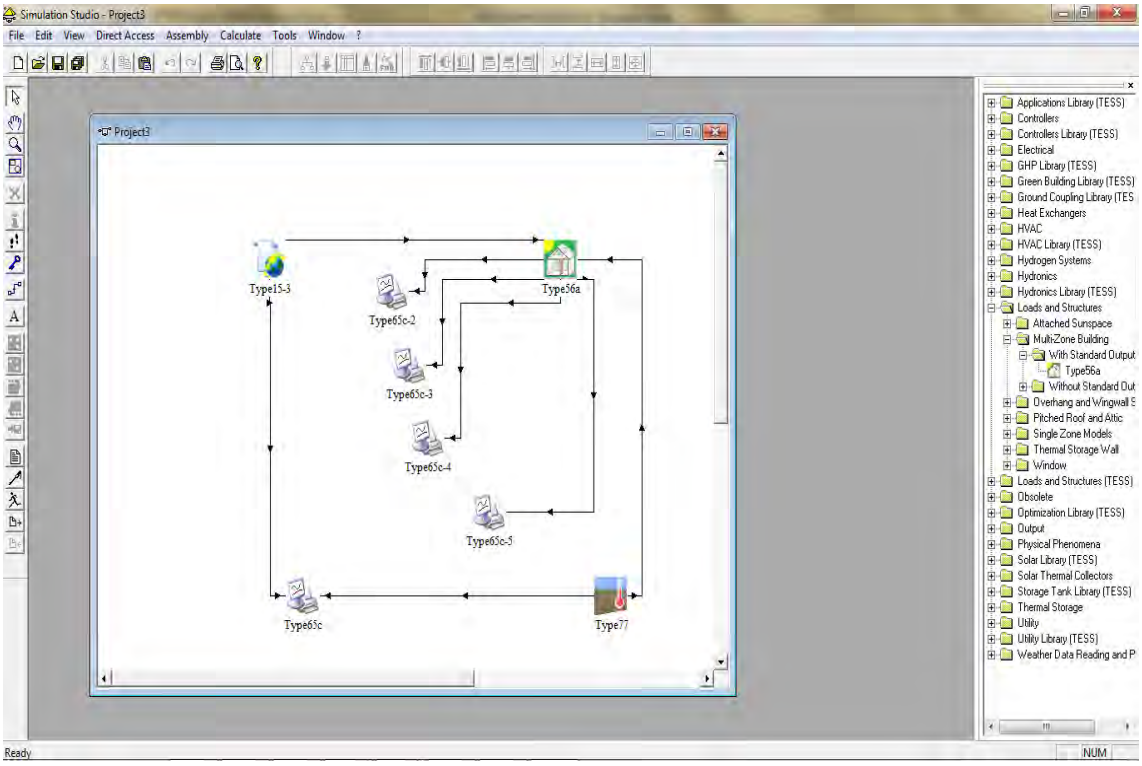


Fig. 4. Schermata di Simulation Studio del modello dell'edificio.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- Federcasa, "*I numeri della casa*", a cura di Anna Maria Pozzo.
- Federcasa, "*Edilizia sociale ieri, oggi e … Domani?*", presentazione di Virginia Giardelli, 2010
- Paolo Melis, "La valutazione della qualità globale degli edifici residenziali della programmazione degli interventi di riqualificazione alla scala del patrimonio edilizio", tesi di dottorato di ricerca, Università di Cagliari, 2009-2010
- WITPress, S. Brunoro, "*Sustainable strategies and methods for the energetic improvement of social housing stock in Italy*", University of Ferrara, Department of Architettura Energia Research Centre, Italy
- Alberto Cavallini, Lino Mattarollo, "*Termodinamica applicata*", Cleup Editore, 1992.
- "MICENE – MIsure dei Consumi di ENergia Elettrica in 110 abitazioni Italiane – Curve di carico dei principali elettrodomestici e degli apparecchi di illuminazione", Dipartimento di Energetica, Politecnico di Milano, 2004
- Final Annex 42 Domestic Hot Water Profiles
- Prezziario delle opera pubbliche, regione Lombardia, 2011
- ENEA, "Ottenere i titoli di efficienza energetica – Guida operativa", 2012
- GSE, "Incentivazioni della produzione di energie termica da impianti a fonti rinnovabili ed interventi di efficienza energetica di piccole dimensioni, 2013
- GSE, "Disciplina dello scambio sul posto – Regole tecniche", 2013
- Michele De Carli, appunti di lezione di "*Impianti termici e frigoriferi*", Padova, 2013-2014
- Michele De Carli, appunti di lezione di "*Energetica degli edifici*", Padova, 2013-2014
- Alberto Cavallini, appunti di lezione di "*Energie rinnovabili*", Padova, 2013-2014
- Arturo Lorenzoni, appunti di lezione di "*Economia dell'energia*", Padova, 2013-2014

NORME E DECRETI

- Decreto del Ministro delle Infrastrutture Prot. n. 3904, "*Definizione di alloggio sociale ai fini dell'esenzione dall'obbligo di notifica degli aiuti di Stato, ai sensi degli articoli 87 e 88 del trattato istitutivo della comunità europea*"
- Direttiva 2010/31/UE del parlamento europeo e del consiglio del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia
- Norma UNI/TS11300-1 (2008) – Prestazioni energetiche degli edifici – Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale
- Norma UNI 10355 (1994) – Murature e solai – Valori della resistenza termica e metodo di calcolo
- Norma UNI/EN1264-3 (1999) – Riscaldamento a pavimento – Impianti e componenti – Dimensionamento
- Norma UNI/TS11300-2 (2008) – Prestazioni energetiche degli edifici – Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria
- Norma UNIENISO7730 (2006) – Ergonomia degli ambienti termici – Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale
- Norma UNI/EN14961-2 (2011) – Biocombustibili solidi. Specifiche e classificazione del combustibile – Pellet di legno per uso non-industriale

SITI

- Sito dell'Unione Europea, http://europa.eu/
- Sito dello sportello energia del comune di Castelfranco Veneto, http://comunecastelfrancovenetosportelloenergia.it/
- Sito Comuni italiani, http://www.comuni-italiani.it/026/012/clima.html
- Dati climatici di Energy Plus, http://www.energy.gov/
- Sito dell'agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA), http://www.enea.it/
- Sito del Gestore Servizi Energetici (GSE), http://www.gse.it/

RINGRAZIAMENTI

Per prima cosa volevo ringraziare il Prof. Michele De Carli, relatore di questa tesi, per il supporto offertomi in questi mesi.
Ringrazio in modo particolare l'Ing. Giulia Alessio per avermi guidato durante la realizzazione della tesi in modo preciso ed accurato e per essere stata sempre disponibile per ogni problema e dubbio, ai quali ha risposto sempre con grande professionalità e tempestività. Grazie davvero.
Grazie alla mia famiglia che in questi anni mi ha sostenuto sempre nel mio percorso universitario e di vita.
Grazie infine a parenti e amici per tutti i momenti trascorsi insieme.