

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Energetica e Nucleare

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Energetica e Nucleare**

Tesi di Laurea Magistrale

Simulazione dinamica e ottimizzazione delle prestazioni energetiche di un edificio rurale



Relatore

prof. Salvatore Mancò

Candidato

Anna Rita Cosi

Settembre 2018

Alla mia famiglia

Sommario

Premessa.....	1
CAPITOLO 1	3
LEGISLAZIONE E CONSUMI ENERGETICI.....	3
1.1 Quadro energetico Europeo.....	3
1.1.2 NEARLY ZERO ENERGY BUILDING.....	5
1.2 Quadro energetico Italiano	6
1.2.1 Legge 3 agosto 2013, n.90	9
1.2.2 Decreto Ministeriale 26 giugno 2015.....	10
1.3 PRESTAZIONI E COSTI CONNESSI ALLA REALIZZAZIONE DEGLI EDIFICI A ENERGIA QUASI ZERO	11
1.3.1 Il nuovo Conto Termico.....	15
1.3.2 ECOBONUS 2018.....	17
CAPITOLO 2	21
2.1 ENERGY PLUS.....	21
2.2 Descrizione dell'edificio.....	22
2.2.1 MODELLO GEOMETRICO	23
2.2.2 STRATIGRAFIE COMPONENTI.....	24
2.2.3 STRUMENTAZIONE E WEATHER FILE	27
2.3 CONFRONTI	34
CAPITOLO 3	37
3.1 RIDUZIONE FABBISOGNI DA STATO ATTUALE A FINALE.....	37
3.1.1 ISOLANTI PER CAPPOTTO INTERNO/ESTERNO.....	42
3.1.2 RIDUZIONE FABBISOGNI E SCELTA DELLO SPESSORE DELL'ISOLANTE DEL CAPPOTTO INTERNO/ESTERNO.....	43
3.2 PROBLEMA DELL'UMIDITA'	46
3.2.1 VERIFICA BARRIERA DEL VAPORE	47
CAPITOLO 4	55
MODELLAZIONE IMPIANTO DI RISCALDAMENTO	55
4.1 POMPA DI CALORE	55
4.1.1 Il COP.....	57
4.2 I PANNELLI RADIANTI.....	60
4.3 IL CASO STUDIO	62
4.3.1 DIMENSIONAMENTO PAVIMENTI RADIANTI.....	63
4.3.2 DIMENSIONAMENTO POMPA DI CALORE.....	65
4.3.3 DIMENSIONAMENTO IMPIANTO FOTOVOLTAICO	76
CAPITOLO 5	79

RISULTATI ECONOMICI	79
5.1 Costo dell'energia elettrica in Italia	79
5.2 Attualizzazione dei flussi di cassa.....	80
5.3 Calcolo del VALORE ATTUALE NETTO e del tempo di ritorno.....	81
5.4 SCENARI ANALIZZATI.....	83
5.4.1 Scenario standard: Caldaia a GPL	83
5.4.2 Caso 1: POMPA DI CALORE.....	84
5.4.3 Caso 2: POMPA DI CALORE + pannelli fotovoltaici.....	85
CONCLUSIONI	91
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	95

Premessa

Lo scopo principale di questo lavoro è stato quello di creare un modello dinamico di un edificio rurale che fosse in grado di simulare il comportamento attuale dello stesso, in modo da poter essere utilizzato come strumento base per prevedere, in relazione alle scelte inerenti la futura ristrutturazione, le riduzioni del fabbisogno energetico conseguibili e la taglia dell'impianto di climatizzazione.

Il fabbricato rurale oggetto di studio è situato in Rocca Canavese (TO). Nel contesto di una ristrutturazione importante che mira alla massima riduzione a livello passivo dei fabbisogni energetici invernali ed estivi, è stata valutata la fattibilità e la convenienza economica di inserire un impianto di climatizzazione a bassa entalpia che consenta di ottenere un risparmio energetico, affiancato dalla produzione *in loco* di energia da fonti rinnovabili.

Il primo passo di questo studio è consistito, dunque, nella creazione del modello energetico dell'edificio attuale su *Energy plus* e nel confronto sperimentale fra i dati di temperatura interna, temperatura superficiale del pavimento e quella superficiale interna della parete rivolta a est del locale cucina, ricavati sperimentalmente e ottenuti in output dalle simulazioni.

Non disponendo di consumi storici relativi alla climatizzazione, tale confronto è stato ritenuto essenziale per la validazione del modello costruito, in modo tale che questo potesse fornire una rappresentazione il più fedele possibile dell'edificio oggetto di studio, da utilizzare come punto di partenza valido per eseguire le successive modifiche.

Sono stati valutati i suoi fabbisogni energetici allo stato attuale, successivamente ridotti attraverso la sostituzione di infissi e l'isolamento dell'involucro edilizio.

Fatto ciò, è stata inserita nel modello la soluzione impiantistica proposta, valutata sull'idea di sfruttare le risorse presenti *in loco*, andando a ricavare il consumo energetico nelle nuove condizioni. Dal confronto tra i risultati ottenuti e quelli di riferimento della situazione esistente si è potuto evidenziare il risparmio energetico, tradotto a sua volta in un risparmio di tipo economico. Tramite un'indicazione sui costi di investimento necessari alla realizzazione degli impianti, è stato possibile infine valutare il tempo di ritorno economico dell'investimento.

CAPITOLO 1

LEGISLAZIONE E CONSUMI ENERGETICI

1.1 Quadro energetico Europeo

Il risparmio energetico e la produzione di energia da fonti rinnovabili sono, ai nostri giorni, argomenti di grande rilievo. La produzione di energia tramite l'utilizzo di combustibili fossili impatta pesantemente sull'ambiente e sul clima, a causa delle sostanze inquinanti e i gas serra da essi emessi in gran quantità, responsabili del surriscaldamento globale e dei cambiamenti ambientali. Risulta evidente, in questo contesto, come la riduzione dei consumi, l'impiego di risorse energetiche rinnovabili e l'impiego di tecnologie più efficienti siano temi centrali anche per gli anni futuri. L'Unione Europea ha definito da tempo una strategia sulle questioni energetiche, riassunta dal cosiddetto "20-20-20" che è l'insieme delle misure redatte per dare un seguito al Protocollo di Kyoto con il fine di contrastare i cambiamenti climatici in atto sul nostro pianeta. La Direttiva 2009/28/CE del 5 giugno 2009, poi ripresa dalla Direttiva 2012/27/UE, prevede di raggiungere entro il 2020[1]:

- una riduzione del 20% delle emissioni di gas serra rispetto al 1990;
- il raggiungimento della quota del 20% del fabbisogno di energia per usi finali da fonti rinnovabili;
- un aumento del 20% dell'efficienza energetica.

L'Italia è stata abbastanza virtuosa per quanto riguarda i primi due punti (riduzione delle emissioni e fonti rinnovabili), mentre vi è ancora un grande potenziale di miglioramento per quanto concerne il raggiungimento del terzo obiettivo.

Più recentemente, il 30 Novembre 2016, la Commissione europea ha presentato il pacchetto "Clean Energy for all Europeans" le cui disposizioni legislative vogliono condurre alla creazione di un sistema energetico che permette il transito libero di flussi di energia attraverso le frontiere, fondato sulla concorrenza e l'uso ottimale delle risorse e in grado di generare un'economia sostenibile, duratura e a basse emissioni di carbonio.

Questo pacchetto prevede il raggiungimento entro il 2030 dei seguenti target [2]:

- Una riduzione delle emissioni di gas serra almeno del 40% rispetto ai livelli del 1990;

- Il raggiungimento del target del 30% di efficienza energetica a livello europeo;
- L'incremento nell'utilizzo delle rinnovabili almeno del 27%;
- Il proseguimento nel miglioramento delle connessioni elettriche tra gli Stati Membri.

La Direttiva europea sull'efficienza energetica prevede che tutti gli Stati Membri si adeguino mettendo in atto una serie di misure che favoriscano l'uso efficiente dell'energia presso i consumatori, attraverso l'informazione e attività di sensibilizzazione per i dipendenti sul luogo di lavoro.

Bisogna infatti tener presente che l'uso efficiente dell'energia in un'industria, un ufficio o una casa non dipende solo dalla sostituzione degli impianti obsoleti con nuove tecnologie più performanti, ma anche dal comportamento di coloro i quali vivono e operano in tali contesti: questi, infatti, impattano sui consumi inducendo sprechi energetici tenendo luci, caldaie o macchinari accesi anche quando non ve n'è necessità e utilizzando in maniera non ottimale le apparecchiature (impianti o macchine regolati male). Per questo motivo, azioni di sensibilizzazione e formazione sono importanti per un'impresa quanto le proposte di impiego di nuove tecnologie. Anche i provvedimenti legislativi e regolatori iniziano a porre maggiore attenzione al tema dei comportamenti.

Secondo quanto stimato dall'Unione Europea, il settore edilizio è responsabile del 40% dei consumi energetici del nostro continente e gli edifici generano il 36% delle emissioni europee totali di gas serra[3].

Alla luce di questi dati, risulta auspicabile una riduzione dei consumi nel settore, riduzione che può essere vista come la fonte di energia meno inquinante e più immediatamente disponibile. Tutti concordano sul fatto che sia necessario diminuire i consumi di fonti fossili, ma ciò non comporta solo e necessariamente una prospettiva di sacrifici, ovvero operazioni economico-sociali come aumenti delle tariffe, razionamenti delle risorse e divieti di utilizzazione: si possono, infatti, ridurre i consumi di fonti fossili anche migliorando le efficienze d'uso, in base al concetto di ricavare di più dall'energia che si consuma o incrementando il ricorso alle fonti rinnovabili. Per queste vie, si può raggiungere l'obiettivo della riduzione offrendo agli utenti lo stesso servizio, sebbene a fronte di costi maggiori di sistemi e impianti.

Per far fronte a questa problematica, da qualche anno l'UE ha redatto una serie di normative rivolte al miglioramento del settore edilizio, che passi innanzitutto per la realizzazione di strutture energeticamente efficienti, in grado di ridurre al minimo i

consumi di energia, impiegando le fonti rinnovabili per coprire la gran parte del fabbisogno energetico e, di conseguenza, diminuendo il più possibile le emissioni di gas serra.

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.

1.1.2 NEARLY ZERO ENERGY BUILDING

La Direttiva europea 2010/31/UE [4] è volta al miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici all'interno dell'Unione Europea, tenendo conto delle condizioni interne e esterne e dell'efficacia dal punto di vista economico. Riguarda principalmente l'applicazione dei requisiti minimi e il rispetto di una metodologia per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici. I requisiti stabiliti sono da considerarsi minimi, non impediscono quindi la presenza di provvedimenti più rigorosi a livello dei singoli Stati, se conformi e notificati alla Commissione.

Viene, inoltre, introdotto sul piano normativo il concetto di Edifici a Energia Quasi Zero (Nearly Zero Energy Building, NZEB): secondo tale normativa, a partire dal 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione dovranno essere a Energia Quasi Zero, obbligo anticipato al 2018 per gli edifici pubblici.

Stando alla definizione fornita dalla Direttiva Comunitaria, un Edificio a Energia Quasi Zero è un *“edificio ad altissima prestazione energetica [...] Il fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili, compresa l'energia da fonti rinnovabili prodotta in loco o nelle vicinanze.”* L'UE non specifica quali sono i parametri esatti richiesti da un edificio affinché lo si possa considerare un NZEB, né chiarisce in che misura le fonti rinnovabili debbano contribuire a soddisfare il suo fabbisogno energetico.

Nella Direttiva in oggetto, l'UE demanda agli Stati membri la scelta dei requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e degli elementi edilizi, allo scopo di conseguire un equilibrio ottimale tra gli investimenti necessari e i risparmi energetici realizzati nel ciclo di vita di un edificio. In particolare, i piani nazionali degli Stati Membri devono comprendere: l'applicazione dettagliata nella pratica della definizione di edifici a energia quasi zero, tenuto conto delle rispettive condizioni nazionali, regionali o locali e con un indicatore numerico del consumo di energia primaria

espresso in kWh/m²/anno; gli obiettivi intermedi di miglioramento della prestazione energetica degli edifici di nuova costruzione entro il 2015; infine, le informazioni sulle politiche e sulle misure finanziarie adottate per promuovere gli edifici a energia quasi zero, compresi dettagli relativi all'uso di energia da fonti rinnovabili negli edifici di nuova costruzione e negli edifici esistenti sottoposti ad una ristrutturazione importante. Inoltre gli Stati membri devono promuovere l'introduzione di sistemi di misurazione intelligenti quando un edificio è in fase di costruzione o è oggetto di una ristrutturazione importante e possono promuovere l'installazione di sistemi di controllo attivo, come i sistemi di automazione, controllo e monitoraggio finalizzati al risparmio energetico.

1.2 Quadro energetico Italiano

La Strategia Energetica Nazionale (SEN) è stata presentata il 10 Novembre 2017 ed il suo programma è stato valutato in base all'evoluzione del contesto geopolitico internazionale, allo sviluppo delle tecnologie e la conseguente riduzione dei costi delle fonti rinnovabili e all'accordo sui cambiamenti climatici (COP21).

Essa istituisce un programma volto a superare gli obiettivi europei in materia di energia al 2020 e definisce i nuovi obiettivi al 2030, coerenti con quelli europei del *Clean Energy Package*, riguardo le cinque "dimensioni dell'energia", vale a dire decarbonizzazione (incluse rinnovabili), efficienza energetica, sicurezza energetica, mercato interno, innovazione e competitività.

Gli obiettivi cardine al 2030 sono [5]:

- migliorare la competitività del Paese, riducendo il gap di prezzo e di costo dell'energia rispetto all'Europa per tutti i consumatori. Ciò presuppone il completamento dei processi di liberalizzazione e strumenti per tutelare la competitività dei settori industriali energivori, prevenendo i rischi di delocalizzazione e tutelando l'occupazione.
- continuare a migliorare la sicurezza di approvvigionamento e la flessibilità dei sistemi e delle infrastrutture energetiche per integrare quantità crescenti di rinnovabili elettriche, gestire la variabilità dei flussi e i picchi di richiesta del gas.
- raggiungere e superare in modo sostenibile gli obiettivi ambientali e di decarbonizzazione dell'economia al 2030 definiti a livello europeo, in linea

con i futuri traguardi stabiliti nella COP21. Rinnovabili ed efficienza, dunque, contribuiscono non solo alla tutela ambientale, ma anche alla sicurezza e all'economicità in quanto riducono la dipendenza dall'estero e riducono i costi.

In termini numerici, si vuole raggiungere entro il 2030:

- il 28% di rinnovabili sui consumi complessivi, portando al 55% le rinnovabili elettriche, al 30% quelle termiche e al 21% quelle dei trasporti (Figura 1);

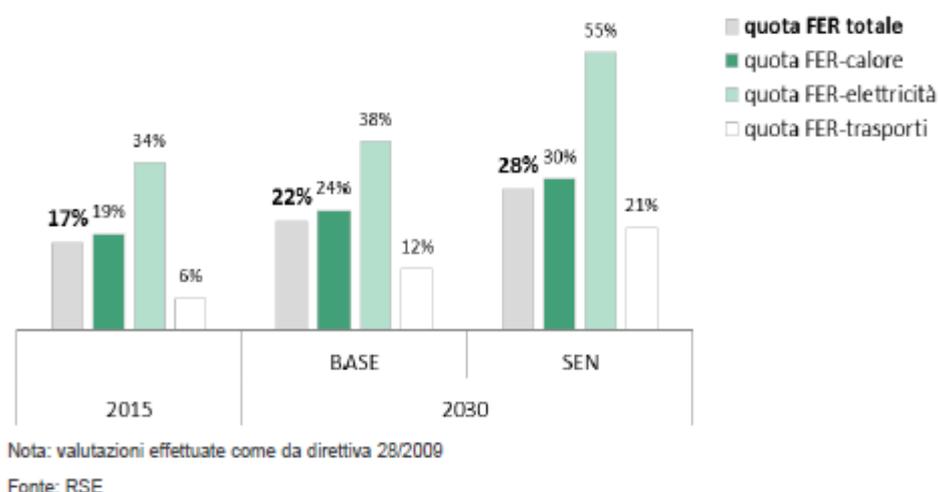


Figura 1: scenario nazionale SEN: quota FER sui consumi finali lordi per settore

- una riduzione dei consumi finali nel periodo 2021-30 pari all'1.5% annuo dell'energia consumata nel triennio 2016-18, ottenuta attraverso operazioni di efficienza energetica, in primo luogo su residenziale e trasporti, contribuendo positivamente alla riduzione della crescita di emissioni di CO₂.
- Un'accelerazione nel processo di chiusura degli impianti termoelettrici a carbone al 2025.
- Il raddoppiamento degli investimenti in ricerca e sviluppo tecnologico *clean energy*: da 222 Milioni nel 2013 a 444 Milioni nel 2021.

I dati riportati nella Strategia Energetica Nazionale mettono in evidenza le ottime performance del nostro Paese nel campo dell'efficienza energetica. Rispetto agli altri Paesi Europei, l'Italia ha raggiunto e superato anticipatamente alcuni tra i più importanti parametri stabiliti per il 2020. Il valore di intensità energetica italiana è pari a circa 100 tep per milione di euro di PIL, al di sotto della media europea (Figura 2).

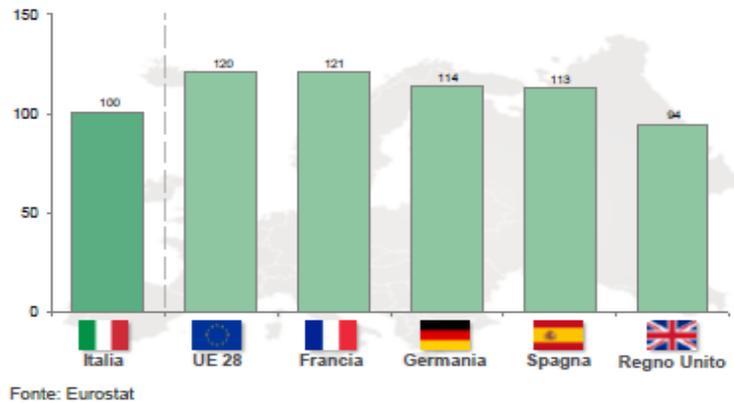


Figura 2: intensità energetica in Europa-2015 (tep/mlnPIL)

Le buone politiche sull'efficienza energetica adottate dal 2005 al 2016 hanno prodotto un risparmio di energia finale consumata di 10,7 milioni di tep all'anno di energia primaria e oltre 3,1 miliardi di euro di mancate importazioni che hanno alleggerito la bolletta energetica del Paese. Tale risultato è frutto degli strumenti di promozione che sono stati adottati: detrazioni fiscali per la riqualificazione energetica degli edifici, nuovo Conto termico, Certificati Bianchi e a programmi comunitari, nazionali e regionali.

In particolare, la SEN [5] fissa l'obiettivo di 15,5 Mtep di risparmio di energia finale al 2020, equivalente ad un risparmio del 24% rispetto allo scenario di riferimento europeo e conta di raggiungere nel 2030 il 30% di risparmio rispetto al tendenziale fissato nel 2030, e contestualmente si propone di dare impulso ai settori che si occupano di edilizia e produzione e installazione di impianti, puntando sul miglioramento di tecnologie e strumenti sempre più efficaci.

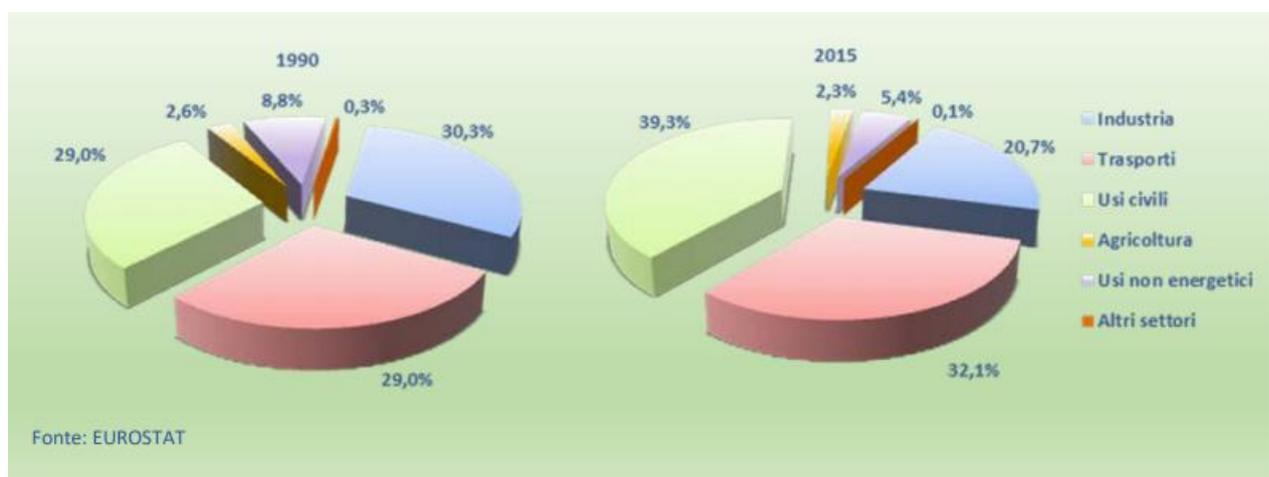


Figura 3: impieghi finali di energia per settore(%)

Dalla Figura 3 si può osservare la variazione dei consumi energetici settoriali nel periodo 1990-2015: il settore civile assorbe quasi il 40% degli impieghi finali contro il 29,0% del 1990, seguito dal settore trasporti, che con una quota di 32,1%

rappresenta il secondo settore per importanza. Il settore industria, che nel 1990 costituiva il primo settore per consumo energetico con una quota di 30%, ha ridotto il contributo ai consumi finali fino a 20,7% nel 2015.

Un elevato potenziale di risparmio energetico può essere ottenuto agendo sul parco immobiliare che ricopre circa il 39,7% del fabbisogno energetico nazionale negli usi finali. Dunque un importante contributo all'efficienza energetica deriverà dal rafforzamento degli standard minimi per l'edilizia e la transizione verso gli edifici a energia quasi zero (NZEB) costituisce un obiettivo prioritario per il Paese che viene perseguito grazie all'attivazione di un'ampia gamma di misure di regolazione e di incentivazione.

In questo ambito sarà migliorata l'integrazione tra le regole per l'efficienza energetica e le fonti rinnovabili negli edifici, e sarà valutata la possibilità di introdurre degli obblighi di efficientamento energetico in occasione delle ristrutturazioni, laddove giustificato in termini di rapporto tra costi e benefici.

Il decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, di recepimento della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia, aggiornato con il decreto legge n. 63 del 2013 per recepire la direttiva 2010/31/UE, il decreto legislativo 4 luglio 2014, n. 102 di recepimento della direttiva 2012/27/UE, come modificato dal d.lgs. 141/2016, nonché il decreto legislativo n. 115 del 2008 e il decreto legislativo n. 28 del 2011 di recepimento rispettivamente della direttiva 2006/32/CE e 2009/28/CE, hanno rappresentato negli anni un importante impulso del nostro Paese, verso una maggiore efficienza energetica degli edifici e la promozione delle fonti rinnovabili.

1.2.1 Legge 3 agosto 2013, n.90

La legge n.90 del 2013 [6], di recepimento della direttiva 2010/31/UE in aggiornamento al D.Lgs. 192/2005, stabilisce i nuovi criteri per l'aggiornamento degli standard prestazionali degli edifici di nuova costruzione e degli edifici soggetti a ristrutturazioni importanti (involucro, impianti e fonti rinnovabili). Nel decreto legislativo 192/2005, sono state definite le modalità di applicazione della metodologia di calcolo delle prestazioni energetiche e l'utilizzo delle fonti rinnovabili negli edifici, delle prescrizioni e dei requisiti. Con il suo aggiornamento, i parametri energetici e le caratteristiche termiche minime sono stati resi più sfidanti rimodulando le trasmittanze minime previste per gli elementi edilizi, abbassandole di circa il 15% per gli interventi eseguiti a partire dal 1° luglio 2015, e di un ulteriore 15% a partire dal 1°

gennaio 2021; inoltre è previsto un miglioramento per i rendimenti minimi degli impianti tecnici.

Rispetto al decreto del 2005 si sottolinea l'introduzione del concetto di edificio a energia quasi zero e un articolo relativo all'ambito finanziario, inerente agli incentivi per l'abbattimento delle barriere di mercato, con la conferma e l'estensione delle proroghe per le detrazioni fiscali relative a ristrutturazioni e riqualificazioni energetiche. Inoltre viene inserito l'obbligo di allegare l'attestato di prestazione energetica a tutti i contratti di vendita o affitto di un immobile.

1.2.2 Decreto Ministeriale 26 giugno 2015

Il DM 26/06/2015 [7], nell'ambito del calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, definisce una metodologia di calcolo e i requisiti minimi di prestazione energetica per gli edifici pubblici e privati, in accordo con quanto stabilito dal D.lgs n.192 del 19 agosto 2005; inoltre stabilisce i fattori di conversione di energia primaria rinnovabile e non rinnovabile per i diversi vettori energetici. I fattori di conversione si calcolano come segue:

$$f_{P,tot} = f_{P,nren} + f_{P,ren} \quad (1)$$

In cui $f_{P,tot}$ è il fattore di conversione di energia primaria totale, $f_{P,nren}$ è il fattore di conversione di energia primaria non rinnovabile e $f_{P,ren}$ è il fattore relativo alla componente rinnovabile. In figura 4 sono illustrati i valori dei fattori di conversione di energia primaria.

Vettore energetico	$f_{P,nren}$	$f_{P,ren}$	$f_{P,tot}$
Gas naturale ⁽¹⁾	1,05	0	1,05
GPL	1,05	0	1,05
Gasolio e Olio combustibile	1,07	0	1,07
Carbone	1,10	0	1,10
Biomasse solide ⁽²⁾	0,20	0,80	1,00
Biomasse liquide e gassose ⁽²⁾	0,40	0,60	1,00
Energia elettrica da rete ⁽²⁾	1,95	0,47	2,42
Teleriscaldamento ⁽⁴⁾	1,5	0	1,5
Rifiuti solidi urbani	0,2	0,2	0,4
Teleraffrescamento ⁽⁴⁾	0,5	0	0,5
Energia termica da collettori solari ⁽⁵⁾	0	1,00	1,00
Energia elettrica prodotta da fotovoltaico, mini-eolico e mini-idraulico ⁽⁵⁾	0	1,00	1,00
Energia termica dall'ambiente esterno – free cooling ⁽⁵⁾	0	1,00	1,00
Energia termica dall'ambiente esterno – pompa di calore ⁽⁵⁾	0	1,00	1,00

⁽¹⁾ I valori saranno aggiornati ogni due anni sulla base dei dati forniti da GSE.
⁽²⁾ Come definite dall'allegato X del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152.
⁽³⁾ I valori saranno aggiornati ogni due anni sulla base dei dati forniti da GSE.
⁽⁴⁾ Fattore assunto in assenza di valori dichiarati dal fornitore e asseverati da parte terza, conformemente al quanto previsto al paragrafo 3.2.
⁽⁵⁾ Valori convenzionali funzionali al sistema di calcolo.

Figura 4: fattori di conversione di energia primaria DM 26/06/2015

Inoltre, secondo il DM 26/06/15, in Italia un NZEB è per legge un edificio nuovo o esistente che presenta i valori degli indici elencati in seguito inferiori a quelli dei corrispondenti indici calcolati per l'edificio di riferimento, geometricamente equivalente a quello di progetto ma con i parametri energetici e le caratteristiche termiche minime vigenti (a partire dal 01/01/2019 per gli edifici pubblici e dal 01/01/2021 per le altre tipologie):

- H'_T : coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione per unità di superficie disperdente
- $A_{sol,est}/A_{sup,utile}$: area solare equivalente estiva per unità di superficie utile
- $EP_{H,nd}$, $EP_{C,nd}$, $EP_{gl,tot}$: indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale, estiva e globale espresso in energia primaria
- η_H , η_C , η_W : rendimenti dell'impianto di climatizzazione invernale, estiva e di produzione di acqua calda sanitaria.

Devono, infine, essere rispettati gli obblighi relativi all'utilizzo di fonti rinnovabili secondo il Decreto legislativo 28/11.

1.3 PRESTAZIONI E COSTI CONNESSI ALLA REALIZZAZIONE DEGLI EDIFICI A ENERGIA QUASI ZERO

Nel Piano d'Azione Nazionale per incrementare gli edifici ad energia quasi zero, sulla base della definizione di edificio NZEB [3], è stata effettuata una valutazione dell'indice di prestazione energetica per alcuni edifici di diversa tipologia, destinazione d'uso e zona climatica B ed E, di cui si riportano, in Figura 5, l'anno di costruzione, i principali dati dimensionali, caratterizzati da valori di trasmittanza termica conformi a quelli indicati nell'Appendice A del DM "Requisiti Minimi" per il 2019/2021 e i valori dell'indice di prestazione energetica globale totale (somma di rinnovabile e non rinnovabile) [8].

La soluzione impiantistica scelta consiste in una pompa di calore combinata per riscaldamento, ACS e raffrescamento, eventualmente affiancata da pannelli fotovoltaici nel caso in cui la percentuale minima di fabbisogno coperto da fonte rinnovabile non sia stata raggiunta mediante il solo utilizzo della pompa di calore.

	Epoca di costruzione	Superficie Utile	Volume lordo	Rapporto superficie involucro - Volume lordo	Rapporto superficie vetrata - superficie involucro	Indice di prestazione energetica globale totale			
						$A_{floor,n}$ [m ²]	V_l [m ³]	A_{env}/V_l [m ⁻¹]	A_w/A_{env} [-]
								Zona climatica B	Zona climatica E
Edifici residenziali									
● Monofamiliare	esistente	1946-76	162	584	0,75	0,05	113	168	
	nuovo	2015	98	371	0,99	0,03	99	120	
● Grande condominio	esistente	1946-76	1552	5949	0,46	0,07	100	114	
	nuovo	2015	1788	6662	0,43	0,09	99	95	
Edifici non residenziali									
● Ufficio	esistente	1946-76	363	1339	0,6	0,12	145	160	
	nuovo	2015	1536	6077	0,35	0,20	131	115	

Figura 5: edifici oggetto delle valutazioni energetiche

In Figura 6 e Figura 7 [3] è riportato l'indice di prestazione energetica globale totale rispettivamente per le zone climatiche B ed E, suddiviso in base agli usi finali nei gradienti di grigio, e tra quota non rinnovabile (rosso) e rinnovabile (verde). I consumi energetici per illuminazione sono stati considerati per i soli edifici ad uso ufficio, mentre la ventilazione solo per l'ufficio di nuova costruzione, unico tra quelli analizzati ad avere tale impianto.

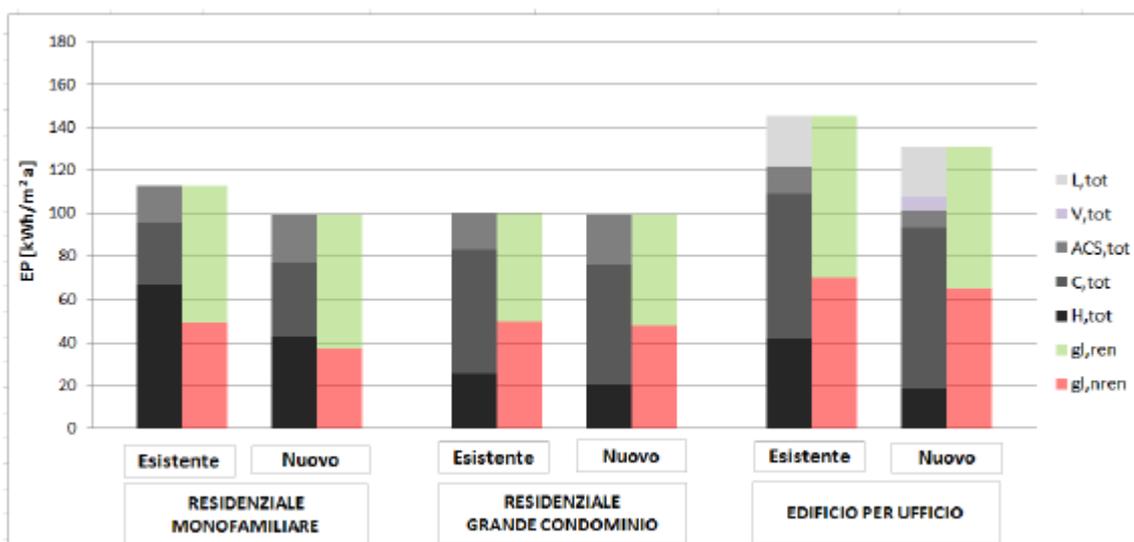


Figura 6: Zona climatica B, prestazione energetica

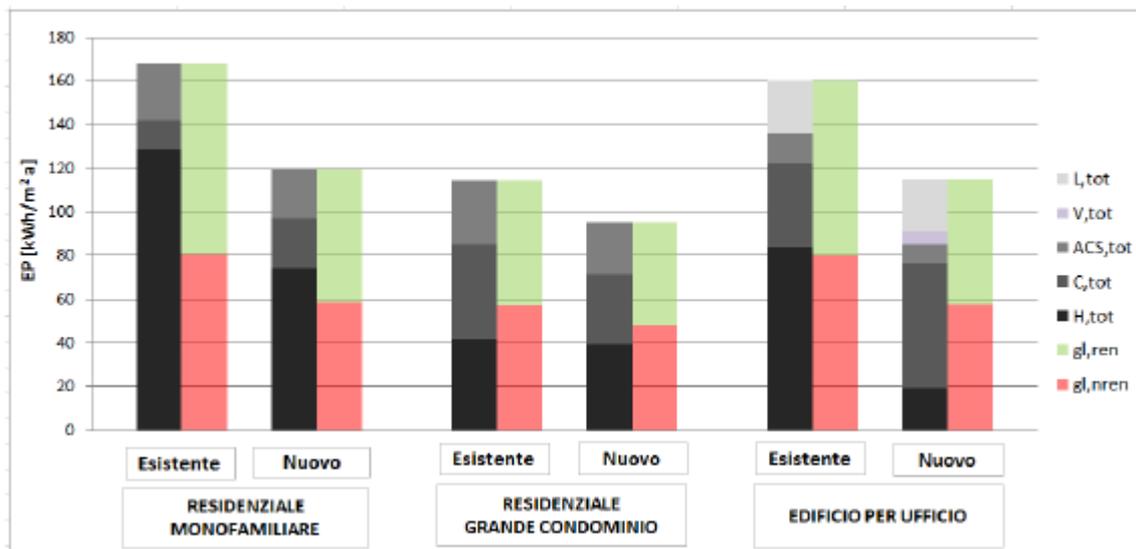


Figura 7: Zona climatica E, prestazione energetica

I risultati mostrano un fabbisogno energetico globale non rinnovabile tra i 35 e i 60 kWh/m² anno per entrambe le zone climatiche, fatta eccezione per l'edificio residenziale monofamiliare e l'ufficio esistenti in zona climatica E, con valori attorno agli 80 kWh/m² anno.

Le differenze di prestazione energetica riscontrabili tra gli edifici esistenti sottoposti a trasformazione in NZEB e gli edifici NZEB nuovi risiede nel fatto che gli edifici esistenti hanno un solaio su terreno sul quale non è possibile intervenire, mentre in quelli di nuova costruzione il solaio è isolato e garantisce una prestazione migliore, e le tipologie di impianto utilizzate hanno prestazioni differenti.

Il raggiungimento di alti valori prestazionali comporta dei sovracosti di investimento sia per gli edifici nuovi che per quelli esistenti. Perché un edificio venga considerato un NZEB è necessario che siano rispettati vari requisiti. Il primo passo consiste in un migliore isolamento termico dell'involucro edilizio, sia per la componente opaca, sia per quella trasparente: in termini pratici, per le componenti opache, la soluzione risiede nell'applicazione di strati isolanti affinché la normativa sia rispettata. Esso è in genere inferiore ai 15/20 cm nelle zone più fredde e ai 10 cm in quelle più calde in base al materiale utilizzato. In linea di massima, per i materiali più comuni, il costo legato allo strato isolante aggiuntivo si aggira tra 1.5÷3 €/cm per m² di superficie coibentata [3].

Per i serramenti, vi sono varie soluzioni tecniche la cui convenienza dipende dalla zona climatica (doppi o tripli vetri, gas nell'intercapedine, trattamenti superficiali). Il relativo aumento dei costi può variare dai 40 ai 70 €/m² di serramento[3].

Gli impianti termici devono essere progettati in modo da garantire la copertura del 50% dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria, il riscaldamento e il raffrescamento ricorrendo ad energia prodotta da impianti alimentati da fonti rinnovabili. Sul mercato è possibile trovare varie soluzioni: le pompe di calore elettriche o a gas nelle versioni aerotermiche, idrotermiche o geotermiche, le caldaie o i cogeneratori alimentati a biomassa, i micro/mini impianti eolici, il solar cooling, i sistemi solari termici e fotovoltaici, lo sfruttamento di giacimenti geotermici a media ed alta entalpia, ma la scelta della soluzione più appropriata non può prescindere né dal sito dell'intervento con le sue condizioni climatiche e la disponibilità di particolari risorse energetiche, né dai servizi assolti nell'edificio (riscaldamento, raffrescamento, umidificazione, deumidificazione, produzione acqua calda sanitaria, ventilazione, illuminazione) e i conseguenti carichi. Inoltre nelle ristrutturazioni si è spesso vincolati dalla situazione ex-ante che riduce le soluzioni adottabili, nell'ottica di evitare quelle troppo radicali, invasive ed onerose. Per quanto riguarda il costo si osservano differenze sostanziali tra le varie tecnologie in funzione sia delle prestazioni sia del grado di maturità e diffusione.

Per gli edifici precedentemente illustrati è stato stimato il sovra costo necessario per realizzare NZEB (da edifici nuovi o esistenti). Per edifici di nuova costruzione in Figura 8 [9] è riportato il costo aggiuntivo espresso in Euro al metro quadro di superficie utile dell'edificio. Si osserva che per gli edifici residenziali risulta importante l'aggravio dei costi legati agli impianti piuttosto che quelli legati alla coibentazione, mentre per gli uffici la situazione è ribaltata, e il peso maggiore è ricoperto dalle superfici vetrate, mentre soluzioni come pompe di calore sono considerate come uno standard e non compaiono nei costi addizionali.

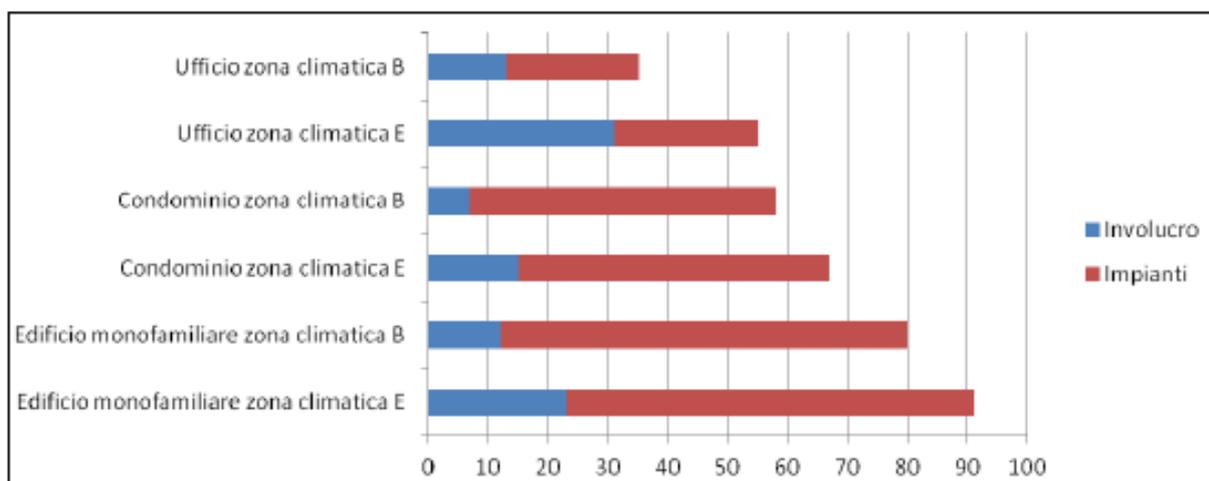


Figura 8: costo aggiuntivo per realizzare un nuovo NZEB

Per edifici esistenti e trasformati in NZEB, la percentuale di costo aggiuntivo rispetto a una ristrutturazione importante di primo livello è illustrato in figura 9.

Tipologia	Edificio monofamiliare	Edificio condominiale	Edificio adibito ad ufficio
Involucro	+ 4,2%	+ 4,6%	+ 5,3%
Impianti	+ 50,2%	+ 27,4%	+ 28,1%
Totale	+ 22,0%	+ 14,6%	+ 14,0%

Figura 9: Sovra costo medio per trasformare un edificio esistente in NZEB rispetto ad una ristrutturazione importante di primo livello [9]

Si sottolinea che, nel caso di ristrutturazione, il peso maggiore del costo è dovuto a opere ausiliarie come il nolo di un ponteggio, rifacimento di canne fumarie o interventi sul sistema di distribuzione. In termini numerici, complessivamente, il costo minimo per rendere un edificio esistente in NZEB è di circa 500÷600 €/m² [9]. Infine, si vuole rimarcare che gli attuali requisiti di prestazione energetica sono già frutto di un processo di ottimizzazione tra consumi energetici e costi, e che spingersi oltre tali requisiti comporta costi maggiori che non sono interamente recuperati attraverso i risparmi energetici conseguiti. Questi aspetti, nell'attesa di un'evoluzione del mercato che porti a una riduzione dei costi, possono essere opportunamente mitigati dalla presenza di adeguati incentivi.

1.3.1 Il nuovo Conto Termico

Dal 31 maggio 2016 è in vigore il DM 16 febbraio 2016 con il nuovo Conto Termico [10], che aggiorna il DM 28 dicembre 2012 [11], per l'incentivazione di interventi di piccole dimensioni per l'incremento dell'efficienza energetica e per la produzione di energia termica da fonti rinnovabili. I beneficiari sono le Pubbliche amministrazioni, imprese e privati che potranno accedere a fondi per 900 milioni di euro annui, di cui 200 destinati alle PA.

Nel Conto Termico del 2012 [12], per le pubbliche amministrazioni erano incentivabili gli interventi di:

- isolamento termico di superfici opache delimitanti il volume climatizzato;
- sostituzione di chiusure trasparenti comprensive di infissi delimitanti il volume climatizzato;
- sostituzione di impianti di climatizzazione invernale esistenti con caldaie a condensazione;

- installazione di sistemi di schermatura e/o ombreggiamento di chiusure trasparenti con esposizione di Est-sud-est a Ovest, fissi o mobili non trasportabili.

Con il nuovo meccanismo vengono aggiunti 3 nuovi interventi:

- trasformazione in “edifici a energia quasi zero” (NZEB);
- sostituzione dei sistemi per l’illuminazione con dispositivi efficienti;
- installazione di tecnologie di gestione e controllo automatico degli impianti termici ed elettrici degli edifici (building automation), di sistemi di termoregolazione e contabilizzazione del calore.

Per quanto riguarda i privati, sono incentivabili i seguenti interventi di piccole dimensioni di produzione di energia termica da fonti rinnovabili e di sistemi ad alta efficienza in edifici esistenti, parti di edifici esistenti o unità immobiliari esistenti di qualsiasi categoria catastale, dotati di impianto di climatizzazione:

- sostituzione di impianti di climatizzazione invernale esistenti con impianti di climatizzazione invernale dotati di pompe di calore, anche combinati per la produzione di acqua calda sanitaria;
- sostituzione di impianti di climatizzazione invernale esistenti o di riscaldamento delle serre e dei fabbricati rurali con impianti dotati di generatore di calore alimentato da biomassa;
- l’installazione di impianti solari termici per la produzione di acqua calda sanitaria e/o ad integrazione dell’impianto di climatizzazione invernale, anche abbinati a sistemi di solar cooling, per la produzione di energia termica per processi produttivi o immissione in reti di teleriscaldamento o teleraffrescamento;
- sostituzione di scaldacqua elettrici con scaldacqua a pompa di calore;
- sostituzione di impianti di climatizzazione invernale esistenti con sistemi ibridi a pompa di calore.

Le principali novità del nuovo Conto risiedono nella semplificazione delle procedure e dei tempi e nei seguenti punti:

- la taglia massima degli impianti per la produzione di energia termica da rinnovabili passa da 1 MW a 2 MW.

- L'incentivo, che nella maggior parte dei casi va a coprire il 40% dell'investimento, sale al 50% per gli interventi di isolamento termico nelle zone climatiche E/F e se l'isolamento è accompagnato dall'installazione di un nuovo impianto di climatizzazione invernale sale al 55% per entrambi gli interventi.
- L'incentivo è del 65% per la trasformazione in "edificio a energia quasi zero" e per la sostituzione dei sistemi di illuminazione con dispositivi efficienti.
- Le spese per le diagnosi energetiche e la redazione dell'Attestato di prestazione energetica (APE), richiesti per la trasformazione in edificio a energia quasi zero e l'isolamento termico delle superfici opache, sono incentivabili al 100% per le Pubbliche Amministrazioni e al 50% per i privati.
- Per importi fino a 5mila euro, sia per i privati che per le amministrazioni pubbliche, l'incentivo viene corrisposto in un'unica rata. L'incentivo in nessun caso può superare il 65% della spesa sostenuta.
- I termini per l'erogazione dell'incentivo dalla conclusione della procedura vengono dimezzati, passando da 180 giorni a 90.

1.3.2 ECOBONUS 2018

Sulla Gazzetta Ufficiale n.302 del 29.12.2017 [13], è stata pubblicata la legge di Bilancio 2018 (Legge 27.12.2017 n.205) che integra e in parte modifica le condizioni di accesso ai benefici fiscali per l'efficienza energetica degli edifici, in relazione alle spese sostenute dal 1° gennaio al 31 dicembre 2018.

L'Ecobonus 2018 [14] è un'agevolazione fiscale prevista per i contribuenti che sostengono spese per interventi di riqualificazione energetica nella propria casa, sugli edifici condominiali o sugli uffici, negozi, capannoni. Essa consiste in una detrazione dall'Irpef nel caso in cui la spesa viene sostenuta dal contribuente privato o dall'Ires in caso di impresa o società, che lo Stato riconosce quando vengono eseguiti lavori per aumentare l'efficienza energetica di edifici già esistenti.

Sono spese detraibili Ecobonus, e quindi agevolabili, quelle sostenute per ridurre il fabbisogno energetico per il riscaldamento, quindi per migliorare e mantenere il calore all'interno dell'edificio (ad esempio la pavimentazione, finestre e infissi o coibentazioni), l'installazione di pannelli solari e la sostituzione degli impianti di climatizzazione invernale esistenti.

Gli interventi che rientrano nell'agevolazione sono i seguenti:

- Interventi di riqualificazione energetica atti a una diminuzione del fabbisogno energetico annuo rispetto ai valori indicati nell'allegato A del D.M. 11/03/2008 [15] per gli interventi iniziati nel 2008 e anni successivi. La detrazione è del 65% su un tetto massimo di spesa di 100 mila euro.
- Interventi sull'involucro di edifici esistenti , compresi finestre e infissi, a patto che si realizzi una diminuzione o valori pari indicati dall'Allegato B, punto 2, del DM 11/3/2008 e DM 26/1/2010 [16]. Il tetto massimo di spesa detraibile in questo caso è di 60.000 euro. La sostituzione di infissi e schermature scende dal 65 al 50% dal 1° gennaio 2018.
- Installazione di pannelli solari per la produzione di acqua calda sia per uso domestico che industriale, e sia per l'acquisto di impianti termodinamici per la produzione di acqua calda ed energia elettrica, in questo caso però la detrazione spetta solo per la componente per l'acqua. Tetto di spesa massima è pari a 60 mila euro.
- Sostituzione impianti di climatizzazione invernale con impianti dotati di caldaia quindi anche per l'acquisto di pompe di calore ad alta efficienza e impianti a basso assorbimento di energia, e sostituzione dei vecchi scaldabagni con scaldacqua a pompa di calore. La detrazione 65% spetta entro un massimo di spesa di 30 mila euro. La detrazione inerenti le caldaie a condensazione dal 1° gennaio 2018, varia così:
 - detrazione 65%: se si installa una caldaia a condensazione di classe A con contestuale installazione di sistemi di termoregolazione evoluti;
 - detrazione 50% se si installa una caldaia a condensazione di classe A;
 - detrazione 0%: se si installa una caldaia di classe B.
- gli interventi di tipo condominiale, per le spese sostenute dal 1° gennaio 2017 al 31 dicembre 2021 con il limite di spesa di 40.000 euro moltiplicato per il numero di unità immobiliari che compongono l'edificio, per i quali restano confermate le detrazioni al 70% e al 75%. Qualora gli stessi interventi siano realizzati in edifici appartenenti alle zone sismiche 1, 2 o 3 e siano finalizzati anche alla riduzione del rischio sismico è prevista una detrazione dell'80%. Con la riduzione di 2 o più classi di rischio sismico la detrazione prevista passa all'85%. Il limite massimo di spesa consentito, in questo caso

passa a 136.000 euro, moltiplicato per il numero di unità immobiliari che compongono l'edificio.

Tra le spese per le quali è possibile richiedere l'Ecobonus rientrano anche quelle riguardanti l'acquisto di materiale per il risparmio energetico e le prestazioni professionali per l'installazione dei pannelli solari, opere murarie, eventuali lavori di deviazione e allacciamenti, smontaggio e prestazioni professionali per la redazione della certificazione energetica indispensabile per far fruire al contribuente la detrazione spettante.

CAPITOLO 2

2.1 ENERGY PLUS

Per valutare la prestazione energetica dell'edificio in condizioni di esercizio nelle diverse configurazioni è stato utilizzato *EnergyPlus*, un software *open source* per la simulazione energetica in regime dinamico, sviluppato negli Stati Uniti nel 2001 dal Department of Energy (DOE). Prima di *EnergyPlus*, il Department of Energy aveva sviluppato il DOE-2, mentre il Department of Defence aveva sviluppato il BLAST. Ma a differenza di questi ultimi che sono basati su una simulazione di tipo sequenziale, in cui l'informazione sui carichi termici determinati nella *thermal zone* viene inviata in cascata ai componenti impiantistici, *EnergyPlus* esegue simulazioni di tipo integrato tra ambiente e impianto, ovvero l'informazione relativa al carico, che l'impianto deve essere in grado di bilanciare, viene utilizzata per determinare le condizioni di temperatura dell'aria in ambiente, attraverso un processo iterativo.

Il software è programmato in Fortran 90 ed è strutturato in moduli. Il beneficio della modularità risiede nel fatto che i ricercatori possono migliorarli contemporaneamente senza interferire su altri moduli o aggiungerne facilmente di nuovi.

Il programma è suddiviso in 3 blocchi principali interconnessi: il Surface Heat Balance Manager che risolve il bilancio termico in corrispondenza delle superfici, l'Air Heat Balance Manager che risolve il bilancio dell'ambiente simulando gli scambi termici radiativi e convettivi, e il Building System Simulation Manager che si occupa della simulazione dei componenti impiantistici, siano essi sistemi idronici o ad aria (Figura 10).

Questi moduli principali, facenti parte dell'*Integrated Solution Manager*, interagiscono con altri moduli secondari in modo tale che tutti gli elementi del modello siano risolti simultaneamente, e non in maniera sequenziale, per ottenere una simulazione il più possibile realistica. [17]

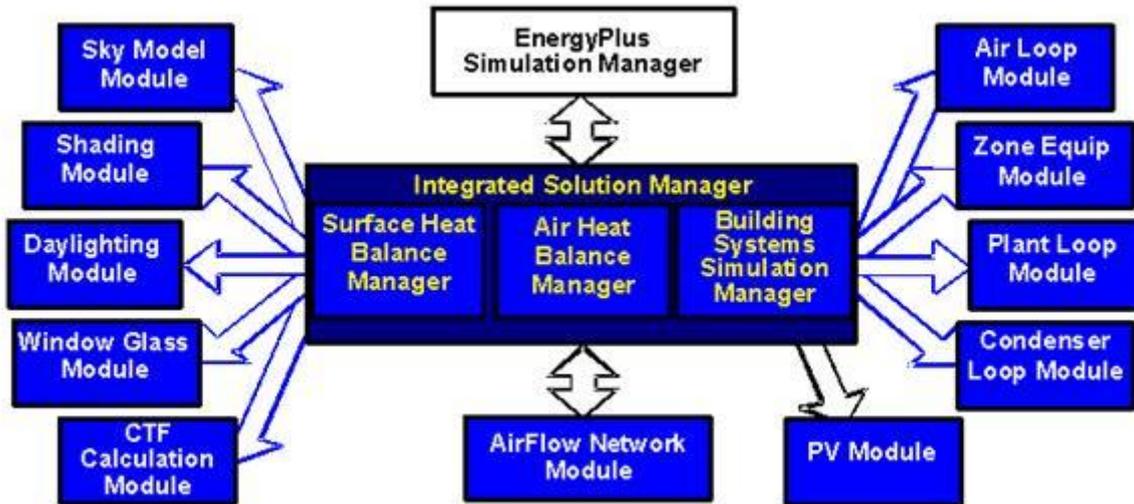


Figura 10: Integrated solution manager

2.2 Descrizione dell'edificio

L'edificio oggetto di studio è un edificio rurale, sito in Rocca Canavese (TO), costruito in epoche diverse, fra la fine dell'800 e inizio del '900.(Figura11)



Figura 11: Edificio allo stato attuale

I passaggi che precedono la simulazione sono:

1. creare il modello geometrico tridimensionale per individuare le zone termiche;
2. assegnare materiali e stratigrafie ai vari componenti;
3. creazione di un file meteorologico del luogo.

2.2.1 MODELLO GEOMETRICO

Il modello geometrico dell'edificio (Figura 12 e Figura 13) è stato realizzato con *SketchUp 2017*, software per la modellazione 3D che contiene un plugin per OpenStudio, interfaccia user-friendly di Energy Plus.

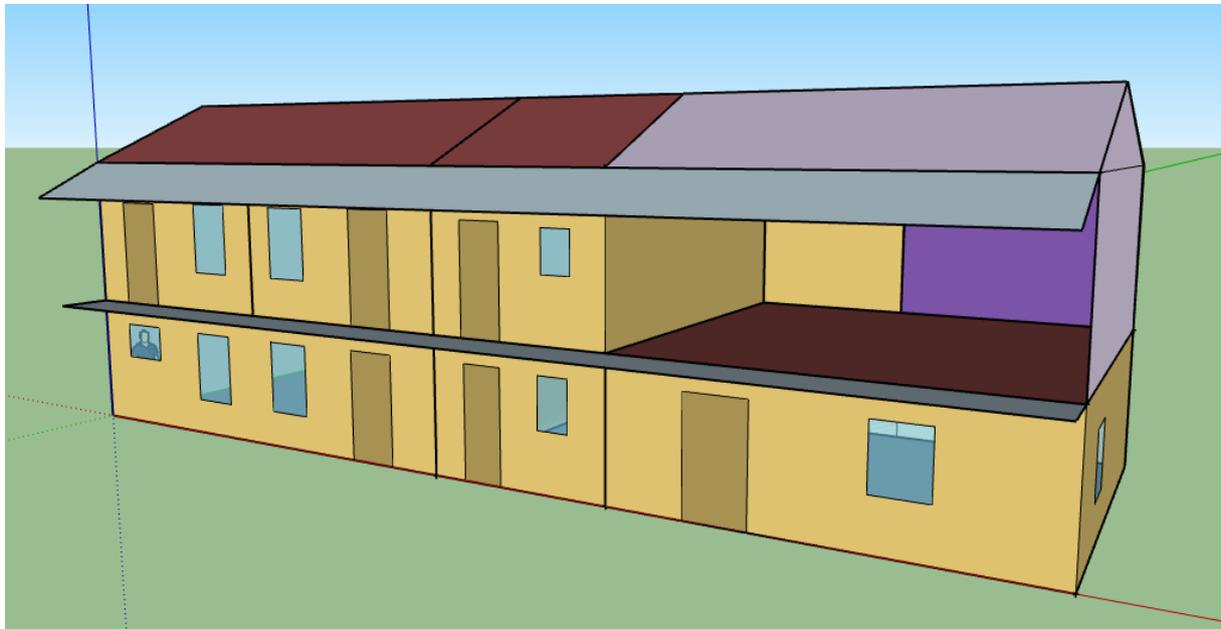


Figura 12: Modello geometrico-vista anteriore

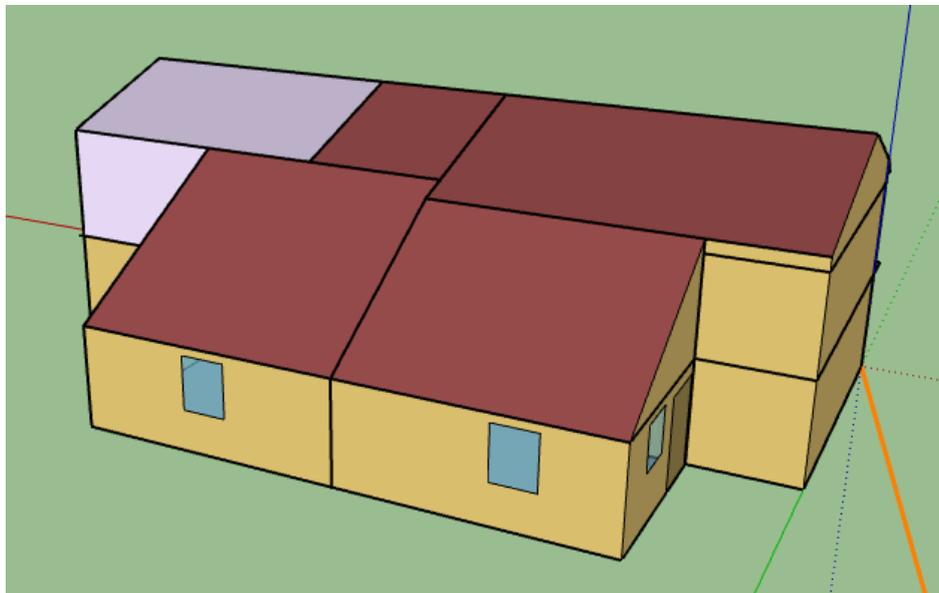


Figura 13: Modello geometrico-vista posteriore

L'edificio si compone di un piano terra costituito anteriormente da 3 locali e posteriormente da altri 2. Il primo piano invece è costituito da 3 locali chiusi e un quarto spazio delimitato solo da 3 pareti laterali e superiormente dal tetto. Poiché *EnergyPlus* modella solo ciò che è esplicitamente descritto, quindi non simula né aria

esterna né radiazione solare che attraversa una parete mancante, per ovviare al problema, le superfici delimitanti il locale aperto sono state definite sul software come *shading surfaces*.

Al di sopra dei locali chiusi al primo piano vi è il sottotetto. Finestre e porte sono state inserite come “*subsurface*” delle superfici dei suddetti locali.

Definita la geometria dell’edificio, è stata impostata l’orientazione rispetto al Nord di 15°, in modo che la facciata principale risulti orientata a Sud Sud-Est.

2.2.2 STRATIGRAFIE COMPONENTI

A questo punto, per ogni superficie sono state inserite le stratigrafie e i valori termofisici dei vari materiali che le costituiscono. Tali informazioni sono state reperite dalla normativa UNI/TR 11552:2014 “Abaco delle strutture costituenti l’involucro opaco degli edifici - Parametri termofisici” [18] che costituisce un valido strumento nel reperimento dei parametri necessari alle valutazioni energetiche degli edifici esistenti nel caso in cui non sia nota la stratigrafia delle strutture in esame.

Tutte le pareti esterne della parte anteriore del piano terra e del primo piano hanno la seguente stratigrafia:

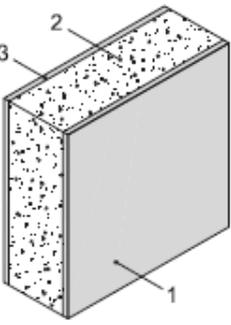
Strato	Spessore [cm]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [J/kg/K]	Conducibilità termica [W/m/K]
				
1 Intonaco interno	2	1400	1000	0.7
2 Mattoni e sassi	60	1500	1000	0.9
3 Intonaco esterno	2	1800	1000	0.9
Trasmittanza [W/m ² K]				1.18

Figura 14 Stratigrafia pareti esterne

Le pareti interne hanno spessori differenti, nei locali anteriori al pian terreno hanno spessore di 60 cm, mentre le pareti divisorie dei locali chiusi al primo piano hanno spessore di 40 cm.

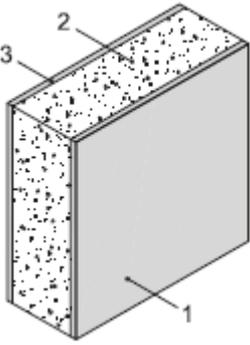
Strato	Spessore [cm]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [J/kg/K]	Conducibilità termica [W/m/K]
				
1 Intonaco interno	2	1400	1000	0.7
2 Mattoni e sassi	40-60	1500	1000	0.9
3 Intonaco interno	2	1400	1000	0.7
Trasmittanza [W/m ² K]				1.58-1.18

Figura 15 Stratigrafia pareti interne

La stratigrafia del pavimento in contatto con il terreno è:

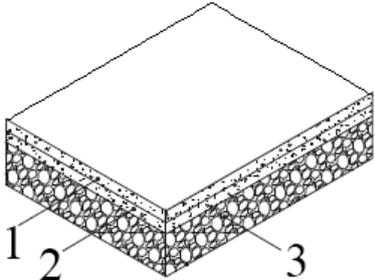
Strato	Spessore [cm]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [J/kg/K]	Conducibilità termica [W/m/K]
				
1 Malta di cemento	3	2000	1000	1.4
2 Calcestruzzo alleggerito	10	1200	1000	0.33
3 Ghiaione	30	1700	1000	1.2
Trasmittanza [W/m ² K]				1.53

Figura 16 Stratigrafia pavimento contro terra

La stratigrafia del pavimento del primo piano è:

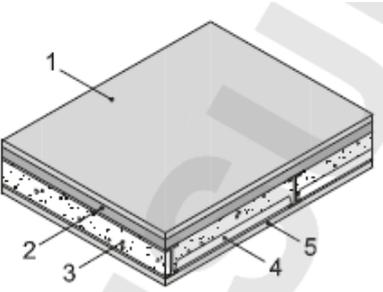
Strato	Spessore [cm]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [J/kg/K]	Conducibilità termica [W/m/K]
				
1 Pavimentazione interna	1.5	1700	710	1.47
2 Malta di cemento	2	2000	670	1.4
3 Vermiculite	9	400	1000	0.15
4 Tavelloni in laterizio	6	600	1000	0.24
5 Intonaco esterno	2	1800	910	0.9
Trasmittanza [W/m ² K]				0.98

Figura 17 Stratigrafia pavimento primo piano

La stratigrafia del solaio dei locali al primo piano, nonché pavimento del sottotetto è costituito da putrelle e voltini:

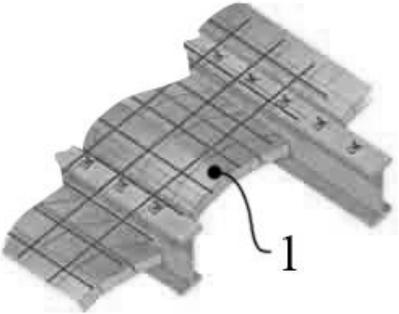
Strato	Spessore [cm]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [J/kg/K]	Conducibilità termica [W/m/K]
				
1 Mattoni pieni	6	1800	1000	0.72
Trasmittanza [W/m ² K]				4.53

Figura 18 Stratigrafia solaio primo piano

La stratigrafia del tetto attuale è:

Strato	Spessore [cm]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [J/kg/K]	Conducibilità termica [W/m/K]
				
1 Tegole	2	1200	840	0.575
Trasmittanza [W/m ² K]				6.11

Figura 19 Stratigrafia tetto

Infine, gli infissi hanno i seguenti valori di trasmittanza:

Infisso	Trasmittanza [W/m ² K]
Finestra vetro singolo 1mm	5.97
Porta in legno 2.5 cm	3.135

Figura 20 Trasmittanza termica infissi

2.2.3 STRUMENTAZIONE E WEATHER FILE

Successivamente alla definizione del modello dell'edificio, dal momento che non si dispone di consumi storici relativi alla climatizzazione, si è ritenuto essenziale, per la validazione dello stesso, un confronto sperimentale fra i dati ricavati *in loco* e gli stessi ottenuti dalle simulazioni.

Non disponendo di un numero elevato di strumenti di misura e non potendo inserire riscaldatori elettrici che fungessero da forzante in tutto l'edificio per via dell'impianto elettrico, il locale cucina (locale in basso a destra in Figura 12) è stato assunto come rappresentativo per l'intero edificio e sono state misurate la temperatura interna, la temperatura superficiale del pavimento e quella superficiale interna della parete rivolta a est. Queste sono poi state confrontate con le temperature analoghe ottenute in output dalla simulazione.

Affinchè il confronto potesse avere una base valida, per i giorni simulati è stato generato un Weather file del luogo [19], da fornire come input a Energy Plus.

Per la generazione del file con le condizioni atmosferiche del luogo è stato utilizzato il software ELEMENTS. Il primo passo è stato quello di inserire le coordinate geografiche del luogo, ricavate dal sito di Rocca Canavese [20]:

Latitudine	45,3107
Longitudine	7,5773
Altezza [m]	450

Sono poi state inserite la temperatura e l'umidità esterna rilevate all'inizio di ogni ora. Le rilevazioni sono state effettuate e collezionate con il datalogger EasyLog | EL-USB-2-LCD Temp & RH Data Logger with USB and Display [21], posizionato sotto la tettoia del fienile (locale aperto in alto a destra), per evitarne il contatto diretto con i raggi solari (Figura 21).

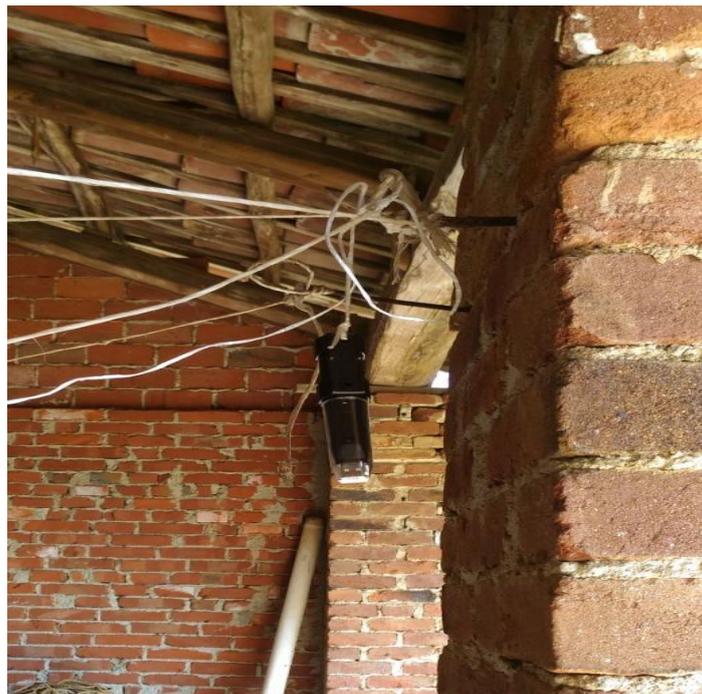


Figura 21: posizione sensore per temperatura e umidità esterna

Le altre grandezze da inserire nel file sono la Global Horizontal Radiation, Direct Normal Radiation e Diffuse Horizontal Radiation in $[Wh/m^2]$: esse indicano rispettivamente la quantità di radiazione solare ricevuta globalmente su una superficie orizzontale, la quantità di radiazione solare ricevuta direttamente dal disco solare su una superficie perpendicolare ai raggi solari e la quantità di radiazione

solare ricevuta dal cielo (escludendo il disco solare) su una superficie orizzontale, durante il numero di minuti che precedono il tempo indicato.

Lo strumento utilizzato per la misurazione della radiazione globale è stato un pannello fotovoltaico da 10 W [22] con i dati di targa in Figura 22:

Operating Voltage	16 V
Operating Current	0.6 A
Open Circuit Voltage	19.4 V
Short Circuit Current	0.63 A

Figura 22 Dati di targa pannello fotovoltaico da 10 W

E' stato collegato a un carico di 3 resistenze corazzate da 10 Ω ciascuna ed è stata rilevata la tensione ai capi delle resistenze con il data logger [23].

Il dispositivo fotovoltaico è stato infine situato su una tettoia orizzontale antistante l'edificio, come si vede in Figura 23.



Figura 23: posizione PV per misura radiazione solare

Nella Figura 24 è rappresentata la caratteristica di una cella fotovoltaica Corrente-Tensione, al variare della radiazione solare che investe la cella.

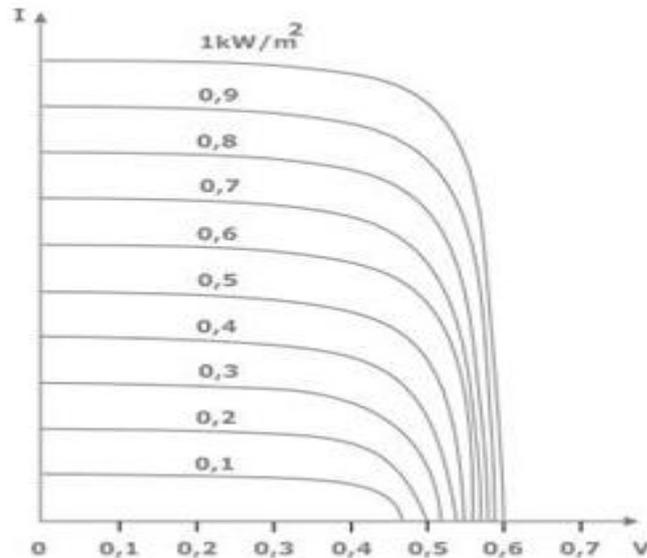


Figura 24: Caratteristica cella fotovoltaica Corrente-Tensione

Come si può osservare, al variare dell'irraggiamento incidente sulla cella, mentre la tensione V varia di poco, la corrente I assume un andamento proporzionale alla radiazione.

In base a questa considerazione e, trascurando l'effetto della temperatura della cella che influenza la tensione a vuoto provocando una diminuzione di circa $2.3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ e un'aumento della corrente di corto circuito dello 0.2% [24] (Figura 25), la corrente I_{ph} è stata correlata all'irraggiamento G secondo la seguente formula:

$$G = \frac{I_{ph}}{I_{sc}} 1000 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2)$$

Dove I_{sc} è la corrente di corto circuito del pannello fotovoltaico.

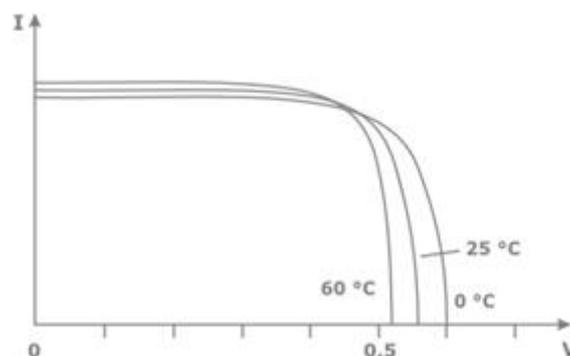


Figura 25: Influenza della temperatura sulla caratteristica I-V

A questo punto si ha la radiazione solare globale su una superficie orizzontale. Poiché Elements necessita di 2 dei 3 input di radiazione per poter calcolare il terzo in automatico, dalla radiazione globale è stata calcolata la radiazione diffusa usando il

modello semplice ma sufficientemente accurato in cui si assume che la radiazione diffusa sia isotropa. Di conseguenza essa non dipende dall'orientazione.

Questo metodo richiede l'uso del clearness index [25], ovvero il rapporto fra la radiazione media di una particolare ora di un dato giorno su una superficie orizzontale e la radiazione extraterrestre della stessa ora.

$$K_t = \frac{I}{I_o} \quad (3)$$

Dove I è ottenuta da misure di radiazione solare globale su una superficie orizzontale, mentre I_o è calcolata integrando l'equazione della radiazione extraterrestre su una superficie orizzontale calcolata per l' n -simo giorno dell'anno, in un periodo tra gli angoli orari ω_1 e ω_2 che definiscono un'ora (dove ω_2 è il maggiore):

$$I_o = \frac{12 * 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) [\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta] \quad (4)$$

dove:

G_{sc} = costante solare, W/m^2

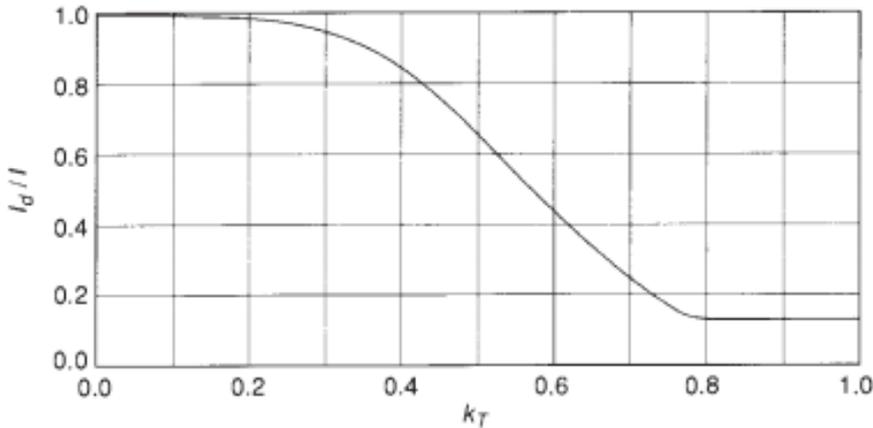
n = giorno dell'anno,

ϕ = latitudine,

δ = declinazione,

ω = angolo orario.

Per calcolare la radiazione diffusa da quella globale, l'approccio che si utilizza è di correlare $k_d = \frac{I_d}{I}$, ovvero la frazione della radiazione oraria su una superficie orizzontale che è diffusa, con il clearness index orario K_t (Figura 26).



: 2.10.3 The ratio I_d/I as a function of hourly clearness index k_T . From Erbs et al. (1982).

Figura 26: kd in funzione di kt orario

È stata usata la correlazione di Erbs et al. di seguito:

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.0 - 0.09k_T & \text{for } k_T \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604k_T + 4.388k_T^2 - 16.638k_T^3 + 12.336k_T^4 & \text{for } 0.22 < k_T \leq 0.8 \\ 0.165 & \text{for } k_T > 0.8 \end{cases} \quad (5)$$

Poiché i valori di tensione, e quindi di irraggiamento, sono stati misurati ogni 3 minuti, si è proceduto ad integrare tali valori in un'ora, calcolando i Wh/m² orari misurati di radiazione globale. Questi sono stati poi divisi per la radiazione extraterrestre I_0 , calcolando il K_t , e infine dalla correlazione di Erbs et al. è stata ricavata la frazione diffusa. Inserendo i dati di radiazione globale e diffusa su superficie orizzontale, Elements inserisce automaticamente il valore di radiazione diretta normale in base alla seguente formula:

$$Global\ Solar = Normal\ Solar * \cos(Z) + Diffuse\ Solar \quad (6)$$

dove Z è l'angolo zenith e dipende dalla longitudine e dalla latitudine.

A questo punto, si hanno tutti gli inputs per lanciare la simulazione del modello, a cui si richiede in output di ottenere la temperatura dell'aria e l'umidità interna al locale cucina, la temperatura superficiale del pavimento e quella superficiale interna della parete rivolta ad est.

Le stesse grandezze sono state misurate con strumenti posizionati come in Figura 27, Figura 28 e Figura 29:



Figura 27: sensore temperatura e umidità interna



Figura 28: sensore temperatura pavimento



Figura 29: sensore temperatura superficiale parete rivolta a Est

2.3 CONFRONTI

Si è osservato il comportamento dinamico dell'edificio sia in funzione delle sole condizioni esterne e sia in seguito all'inserimento, per una settimana, di una stufa elettrica da 1150 W, per conoscere il comportamento del locale cucina con l'aggiunta di una forzante termica.

Dal confronto fra l'andamento della temperatura reale durante tutto il periodo di acquisizione si è potuto notare quanto il pavimento (Figura 30) incida fortemente nell'ambiente considerato: si può notare infatti che la sua temperatura ha un andamento abbastanza costante nel tempo ed è più alta della temperatura ambiente in inverno e più bassa con l'alzarsi delle temperature stagionali, comportandosi in questo caso come un pozzo termico.

Si è riusciti ad ottenere dalle simulazioni un andamento di temperatura interna vicino a quella reale proprio ricercando un matching fra le temperature del pavimento, e insieme a questa anche dell'umidità (Figura 32) grazie a cui si è scelto un valore costante di infiltrazioni pari a 2 vol/h, dovuto al cattivo stato di conservazione degli infissi.

Dal grafico (figura 31) si può osservare nella settimana dall'8 al 14 aprile un andamento di temperatura decrescente, dovuto al fatto che è stata lasciata la finestra aperta: questo è stato modellato inserendo in quella settimana la ventilazione naturale di 4 vol/h di ricambi d'aria, valore ricercato in modo tale da ottenere le condizioni iniziali per il successivo andamento di temperatura con l'introduzione della forzante. A partire da queste condizioni iniziali, con l'inserimento della stufa si è ottenuto un aumento di temperatura nell'arco della giornata fino a 17 gradi, che è rimasta all'incirca costante durante la notte, nonostante l'abbassamento della temperatura esterna, ed ha ripreso a salire il giorno successivo. A partire dal 18 Aprile, la stufa è stata spenta e si è continuato a rilevare i dati fino al 10 giugno, che mostrano nuovamente il comportamento dinamico dell'edificio in funzione delle condizioni esterne.

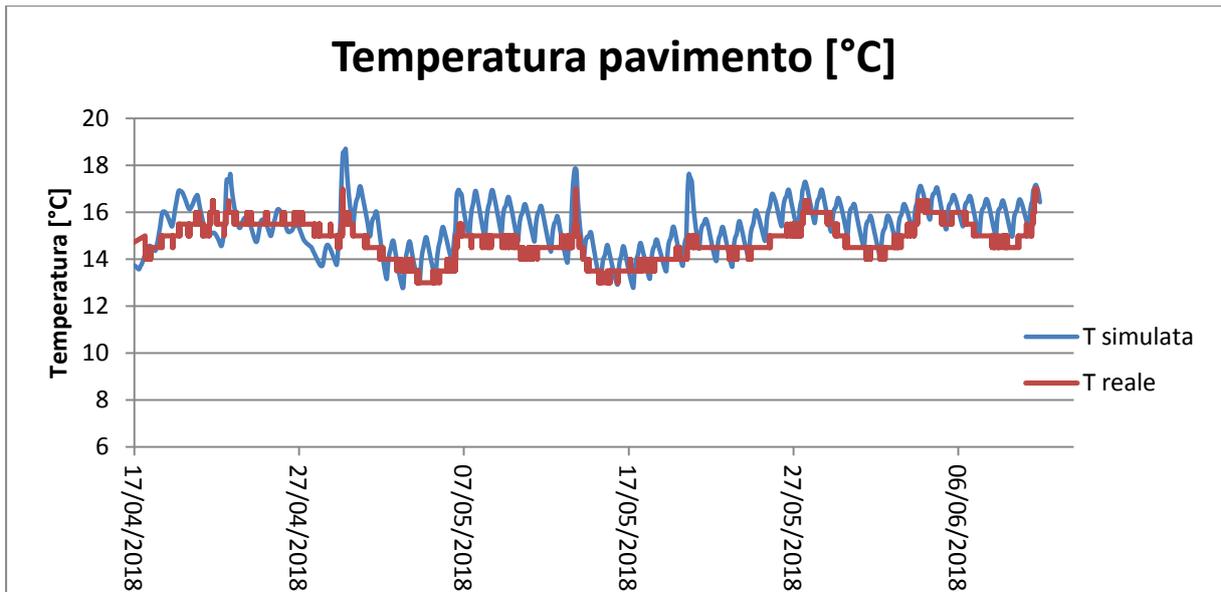


Figura 30: andamento temperatura pavimento

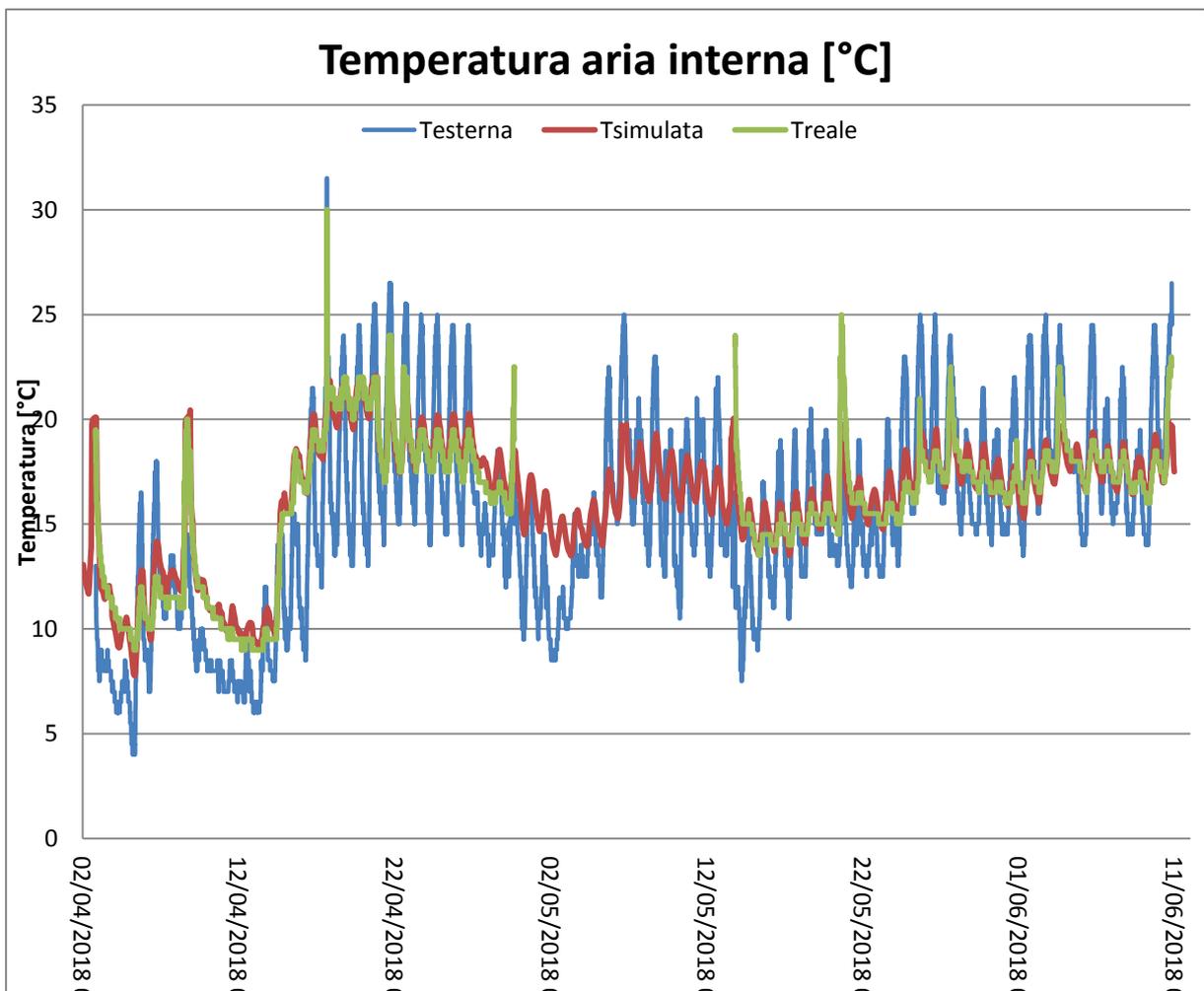


Figura 31: andamento temperatura aria interna cucina

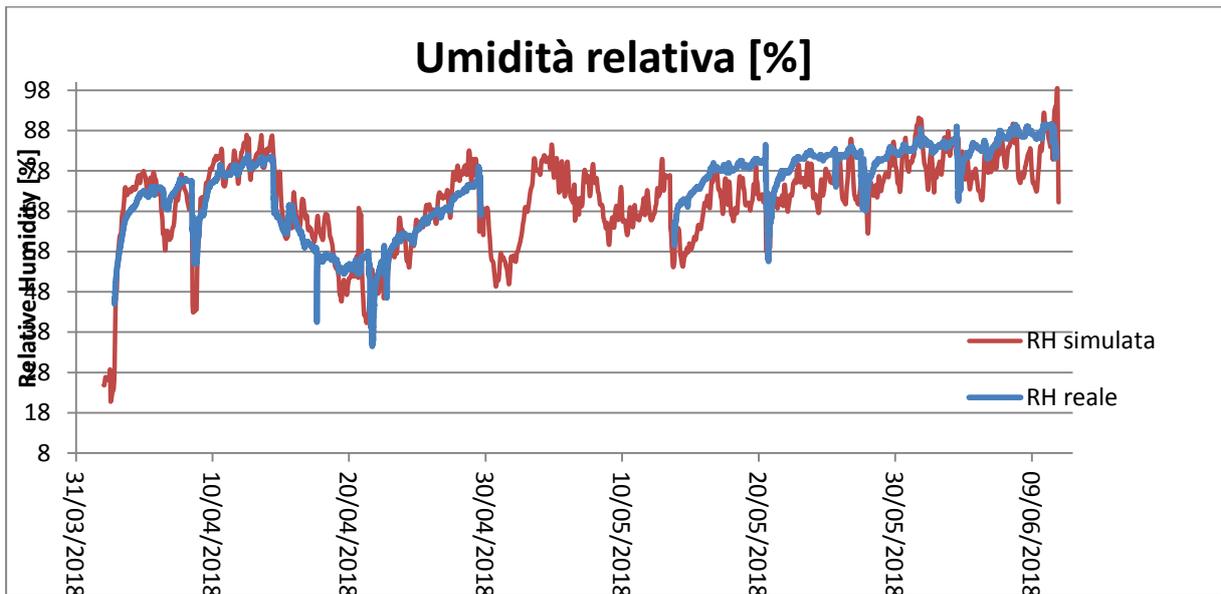


Figura 32: andamento umidità interna locale cucina

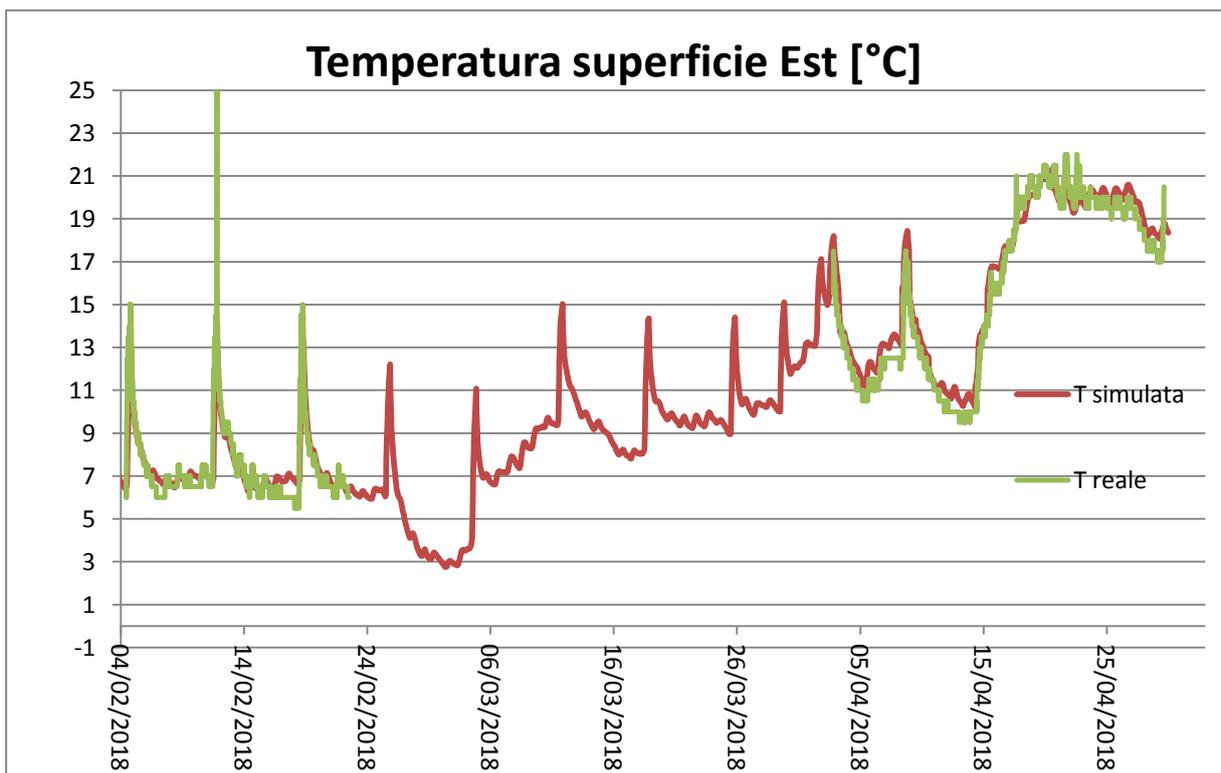


Figura 33: andamento temperatura superficiale parete della cucina rivolta ad Est

Dai grafici in Figure 30-31-32-33 si evince che gli andamenti delle grandezze ottenute dalla simulazione siano coerenti con gli andamenti reali.

Il modello conferma i valori termofisici di conducibilità termica, densità e calore specifico dei principali materiali da costruzione utilizzati in Piemonte verso la fine del 1800.

CAPITOLO 3

3.1 RIDUZIONE FABBISOGNI DA STATO ATTUALE A FINALE

Una volta riusciti a costruire un modello di partenza, che sia in grado di fornire una rappresentazione e un comportamento dinamico vicino a quello reale dell'edificio in oggetto, sono stati calcolati con *EnergyPlus* i fabbisogni invernale ed estivo ideali. *EnergyPlus* consente, infatti, un calcolo preliminare dei fabbisogni ideali, inserendo nelle *thermal zones* le *schedules* con le temperature di set-point invernale ed estiva richieste. Le temperature inserite sono, rispettivamente, 20°C in inverno e 26°C in estate.

Gli spazi dell'edificio per cui è stato richiesto il computo del fabbisogno sono l'intero piano superiore (con le 3 camere da letto e il fienile che è stato considerato chiuso) e il piano terra anteriore (sono escluse le parti posteriori quali autorimessa e cantina).

In Figura 34 la rappresentazione del modello nella nuova configurazione.

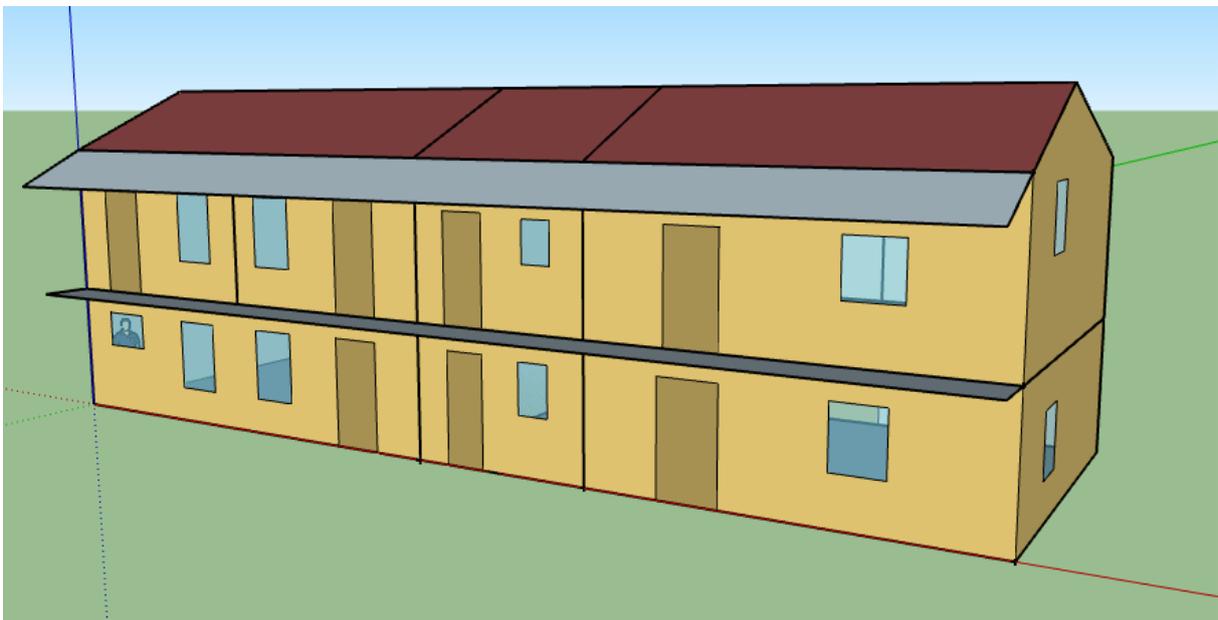


Figura 34: Modello edificio ristrutturato

Infine, le simulazioni annuali sono state lanciate inserendo nel *software* il *weather file* di Torino-Caselle, file scaricato dal sito di *EnergyPlus* della località più vicina al sito, in assenza di dati completi della località stessa [26].

I valori ottenuti in tali condizioni risultano: 364 kWh/m² in inverno e 4.4 kWh/m² in estate, quest'ultimo contributo si annulla con le successive modifiche. Risulta quasi

nullo il fabbisogno estivo sia per la presenza del pavimento contro terra non isolato che funge da pozzo termico in estate e blanda sorgente termica in inverno, sia per la località.

Il passo successivo è stato quello di inserire delle modifiche al modello per ridurre progressivamente il fabbisogno ed evidenziare l'entità della riduzione relativa alla modifica.

Innanzitutto è stato sostituito il tetto, che nel modello precedente era costituito da sole tegole, con un tetto isolato (Figura 35), i cui valori termofisici sono descritti in Figura 36, in modo da rispettare il valore di trasmittanza termica richiesta dal Decreto Ministeriale 26/06/2015 pari a $0.22 \text{ W/m}^2\text{K}$.

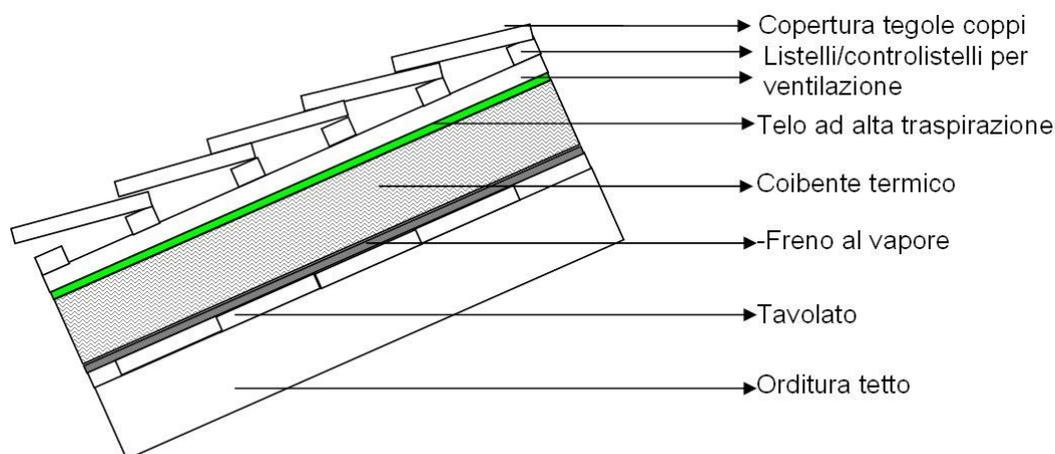


Figura 35: stratigrafia tetto isolato [27]

Strato	Spessore [cm]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [J/kg/K]	Conducibilità termica [W/m/K]	Resistenza termica [m ² K/W]
Manto in coppi	2	1200	840	0.575	-
Aria	5	-	-	-	0.08 ^[a]
Telo traspirante	0.06	242	1400	0.23	-
Isolante fibra di legno	16	140	2100	0.04	-
Tavolato	3	550	1600	0.15	-

Figura 36: valori termofisici stratigrafia tetto [28][29][18]

^[a] Resistenza termica ricavata secondo la norma UNI EN ISO 6946

In secondo luogo, sono stati sostituiti i serramenti attuali, costituiti da finestre e porte con vetro singolo dello spessore di 1 mm e telaio parzialmente rotto e deteriorato dal

tempo e dagli agenti atmosferici. I serramenti inseriti, invece, rispettano i requisiti di trasmittanza termica U delle chiusure trasparenti e opache del D.M. 26/06/2015, secondo cui i valori di trasmittanza termica non devono essere superiori a $1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Contestualmente a questa modifica, è stato ridotto il valore delle infiltrazioni d'aria da 2 vol/h a 0.5 vol/h , dal momento che gran parte delle infiltrazioni è dovuta al cattivo stato degli infissi.

Successivamente, è stato modificato il pavimento inserendo la stratigrafia di un pavimento a pannelli radianti, costituito essenzialmente dal getto su terra, dal materiale isolante, dal massetto e dal parquet. In Figura 37 vi è la stratigrafia di una soletta radiante tipo.

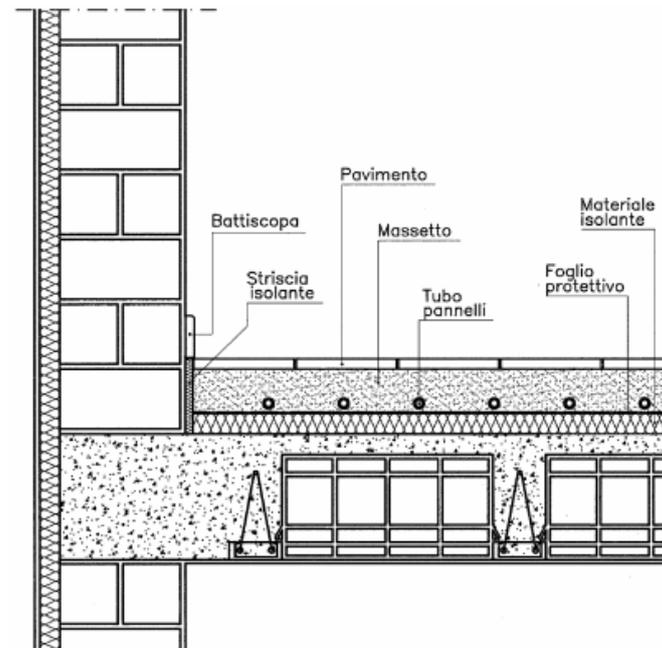


Figura 37 stratigrafia soletta radiante tipo [30]

Lo spessore del massetto è stato preso da “GLI IMPIANTI A PANNELLI RADIANTI” di Caleffi, con i valori dichiarati in figura 38:

Spessore [m]	0.045
Massa volumica [kg/m^3]	1.5
Conduttività termica λ [W/mK]	1.9
Capacità termica massica c [J/kgK]	1000

Figura 38 valori termofisici massetto

mentre lo spessore del materiale isolante è stato calcolato per ottenere un valore di trasmittanza termica di $0.26 \text{ W/m}^2\text{K}$, come imposto dal DM 26/06/2015.

In riferimento alla norma UNI EN ISO 13370, che fornisce la procedura di calcolo dei coefficienti di trasferimento del calore per pavimenti contro terra, si descrive la procedura adottata.

Per pavimenti ben isolati, la trasmittanza termica $U_{fg,sog}$ risulta dalla formula:

$$U_{fg,sog} = \frac{\lambda_g}{0.457 B + d_f} \quad (7)$$

dove:

- λ_g : conducibilità termica terreno pari a 2 W/mK (UNI 13370)
- B: dimensione caratteristica del pavimento

$$B = \frac{Area}{0.5 Perimetro} = \frac{121.7}{0.5 * 50.13} = 4.855 m \quad (8)$$

- d_f : spessore equivalente

$$d_f = d_{w,e} + \lambda_g (R_{si} + R_{f,sog} + R_{se}) \quad (9)$$

con:

- $d_{w,e}$: spessore pareti esterne, 0.65 m;
- $R_{f,sog}$: resistenza termica slab contro terra;
- R_{si} : resistenza termica superficiale interna, pari a 0.17 m²K/W ^[b];
- R_{se} : resistenza termica superficiale esterna, pari a 0 m²K/W ^[b];

^[b] Valori assunti da norma UNI EN ISO 6946

Ponendo nella (7) $U_{fg,sog}=0.26$ W/mK, si ricava $d_f=5.473$ m. Dalla (9) si ottiene $R_{f,sog}=2.2415$ m²K/W.

$$R_{f,sog} = \sum_i^{n \text{ strati}} \frac{S_i}{\lambda_i} = \frac{S_{cls}}{\lambda_{cls}} + \frac{S_{ins}}{\lambda_{ins}} + \frac{S_{massetto}}{\lambda_{massetto}} + \frac{S_{parquet}}{\lambda_{parquet}} \quad (10)$$

Dalla (10), assumendo di utilizzare un isolante con conducibilità pari a 0.03 W/mK, si ottiene uno spessore di isolante pari a 0.056 m. Affinchè il valore di trasmittanza totale del pavimento risulti inferiore a 0.26 W/m²K, è stato inserito in *EnergyPlus* un isolante di spessore pari a 6 cm.

Il solaio del primo piano, in contatto con il sottotetto non climatizzato è stato sostituito dalla seguente stratigrafia (Figura 39) per rispettare il valore di trasmittanza di 0.22 W/m²K per strutture opache orizzontali:

Strato	Spessore [m]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [J/kg/K]	Conducibilità termica [W/m/K]
Mattone pieno	0.06	1800	1000	0.72
Calcestruzzo alleggerito	0.15	400	1000	0.15
Isolante	0.1	43	1210	0.03
Malta di cemento	0.03	2000	670	1.4

Figura 39 valori termo fisici stratigrafia solaio primo piano

In Figura 40, il grafico a barre illustra la riduzione del fabbisogno energetico dell'edificio con le modifiche appena descritte.

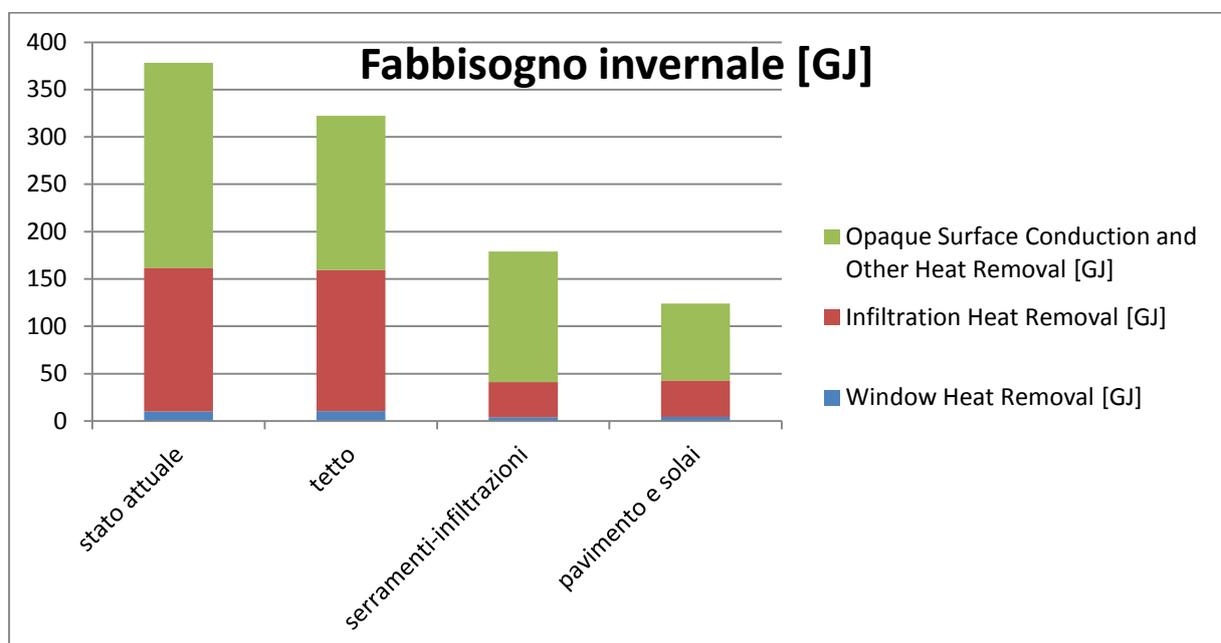


Figura 40 riduzione fabbisogno invernale in funzione delle modifiche apportate

Dal grafico si evince che la riduzione apportata dalla modifica del tetto è del 18%, si nota infatti che la quota di perdite per trasmissione attraverso componenti opachi sia diminuita a parità degli altri elementi.

L'entità della riduzione legata al cambiamento dei serramenti e della diminuzione delle infiltrazioni risulta molto importante: il fabbisogno termico è diminuito del 40% rispetto al caso precedente. Di questo contributo, l'entità legata alla riduzione attraverso i componenti vetrati risulta minima in quanto il rapporto fra la superficie vetrata e quella totale disperdente è del 4.71%.

Infine, si è ottenuto un ulteriore 30% di riduzione dall'isolamento del pavimento, a riprova del fatto che funge da pozzo termico, e in seguito all'isolamento del solaio dei

3 locali del primo piano a partire da sinistra, il quale era costituito solo da “voltini piemontesi” di mattoni.

In totale, in seguito alle varie modifiche, si è ottenuto un fabbisogno invernale di 125 kWh/m² e una percentuale di riduzione rispetto allo stato attuale del 65%.

3.1.1 ISOLANTI PER CAPPOTTO INTERNO/ESTERNO

Isolare termicamente una abitazione risulta fondamentale per ottenere maggior comfort ambientale e per ridurre il fabbisogno energetico per il riscaldamento, il che comporta minori spese di gestione e anche minori spese di investimento perché permette l'installazione di un impianto di taglia inferiore.

Le proprietà fondamentali che è importante considerare per la scelta di un materiale come isolante sono:

- la conducibilità termica λ : più piccolo è il valore della λ più l'isolante è efficace;
- lo sfasamento termico: le ore impiegate dal calore per attraversare un materiale e raggiungere l'interno dell'abitazione. I materiali ad elevato sfasamento termico fanno sì che il picco di calore esterno estivo giunga all'interno dell'abitazione solo nelle ore serali in modo da raffrescare l'ambiente attraverso la ventilazione naturale;
- la resistenza alla diffusione del vapore μ : tanto più piccolo è questo valore, tanto più il materiale è traspirante, cioè si comporta idealmente come l'aria (alla quale corrisponde il valore $\mu = 1$). Un materiale traspirante è in grado di ridurre la formazione di condensa migliorando così l'isolamento termico.

Infine, vanno considerate altre proprietà quali l'atossicità, la durevolezza (immuni da muffe o parassiti) e la resistenza al fuoco[31].

I materiali isolanti si possono suddividere in tre macro gruppi: gli isolanti sintetici, minerali e vegetali, ognuno con vantaggi e applicazioni specifiche.

Gli isolanti sintetici sono materiali che derivano dalla lavorazione del petrolio e dunque poco sostenibili come la fibra di poliestere, il polistirene espanso sinterizzato (EPS) o estruso, il poliuretano espanso, il polietilene espanso, le schiume e altri. Sono molti vantaggiosi dal punto di vista economico, per la bassa conducibilità termica ($\lambda < 0,034$) che dà luogo a un ottimo isolamento termico, per la facilità della messa in opera. Tuttavia, se non dovutamente trattati possono essere pericolosi in caso di incendio.

Tali materiali sono particolarmente indicati per l'isolamento a cappotto termico esterno, facciate ventilate e ponti termici nonché per l'isolamento di coperture e solai. Gli isolanti vegetali sono materiali di origine naturale provenienti da materie prime rinnovabili, non dannosi per l'ambiente e per l'uomo in tutto il ciclo di vita essendo anche riciclabili e biodegradabili. Si possono annoverare la fibra di legno, la fibra di cellulosa, la fibra di canapa, la fibra di lino, il sughero.

Essi hanno valori di λ più alti rispetto a quelli sintetici (λ 0,040 ÷ 0,043) e sono più costosi ma hanno un miglior sfasamento termico e una maggiore traspirabilità. Date le caratteristiche atossiche sono particolarmente indicati per i cappotti interni.

Gli isolanti minerali sono di origine naturale, rinnovabili e riciclabili. Derivano dalle rocce, forniscono un buon isolamento termico e presentano un'alta durezza anche in presenza di umidità in quanto materiali traspiranti.

Esempi di isolanti minerali sono lana di vetro, lana di roccia, argilla espansa, perlite espansa, vermiculite espansa, feltri. Tuttavia, sono più costosi degli isolanti sintetici ed, essendo derivati da rocce, alcuni di essi presentano bassi valori di radioattività naturale.

3.1.2 RIDUZIONE FABBISOGNI E SCELTA DELLO SPESSORE DELL'ISOLANTE DEL CAPPOTTO INTERNO/ESTERNO

A partire dal modello in cui è stato modificato il tetto, i serramenti e il pavimento, infine, sono state lanciate varie simulazioni con l'inserimento di uno strato di isolante nelle pareti perimetrali che separano le zone riscaldate dall'ambiente esterno e dagli ambienti non climatizzati. L'isolante è stato posto all'interno, per formare un cappotto interno all'edificio, e in un secondo momento sul lato esterno, per dar luogo a un cappotto esterno. Le varie simulazioni sono state lanciate per spessori via via crescenti, da 2 cm a 16 cm, allo scopo di trovare uno spessore ottimale.

Si è deciso di utilizzare il "Canaton", nome commerciale di un pannello isolante a base di fibre di canapa intrecciate e termo fissate tridimensionalmente a cui viene aggiunta una minima parte di fibre di rinforzo in poliestere. Non contiene additivi inquinanti, prodotto riciclabile e riutilizzabile. I valori termofisici in Figura 41:

Massa volumica [kg/m³]	36
Conduttività termica dichiarata λ_d [W/mK]	0.04
Resistenza alla diffusione del vapore d'acqua [μ]	1.9
Capacità termica massica c [J/kgK]	1600

Figura 41 valori termo fisici Canaton [32]

Nel caso del cappotto esterno la stratigrafia della parete è costituita da intonaco interno, strato di mattoni pieni e sassi presente attualmente, isolante e intonaco esterno.

Nel caso del cappotto interno, invece, la stratigrafia della parete è costituita da intonaco interno, isolante e strato di mattoni pieni e sassi. Con questa soluzione si preferisce lasciare la facciata di mattoni “a vista”.

La trasmittanza termica U delle pareti, nei due casi è pressoché uguale, poiché le stratigrafie sono costituite dagli stessi elementi costruttivi, con spessori uguali, eccezion fatta per l'assenza dell'intonaco esterno nel secondo caso che risulta trascurabile. Di conseguenza, come si evince dal grafico (Figura 42) i fabbisogni energetici non cambiano.

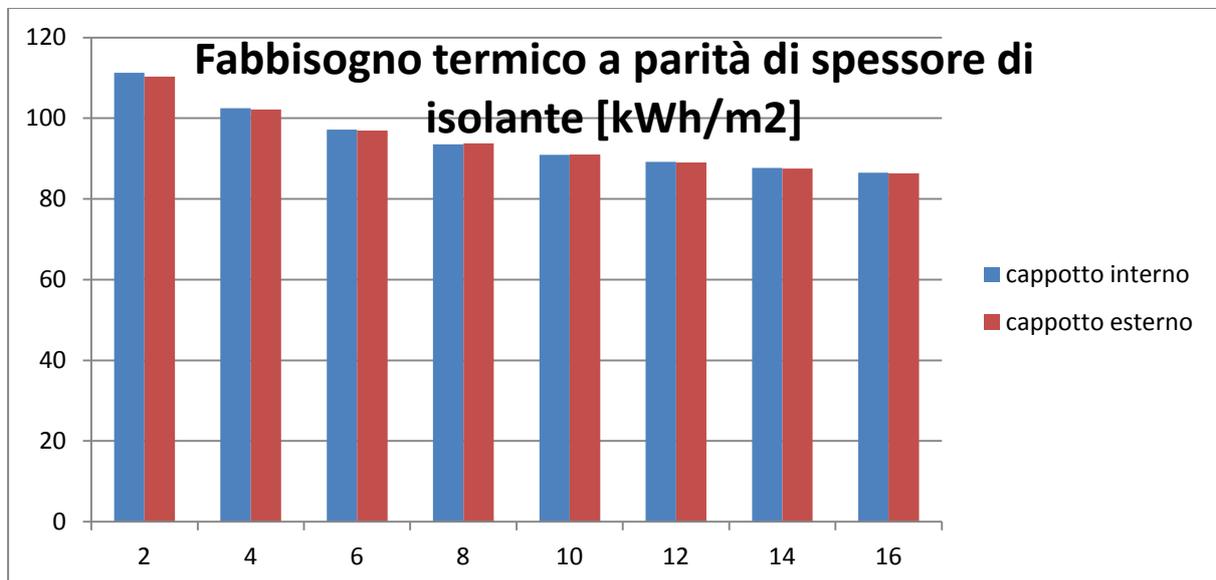


Figura 42 fabbisogno termico in funzione dello spessore di isolante

Ciò che cambierà nei due casi è la frequenza di accensione e spegnimento dell'impianto di riscaldamento per il raggiungimento della temperatura di set-point, che, nel caso di cappotto interno, sarà maggiore e la temperatura verrà raggiunta in meno tempo, nel caso di cappotto esterno, sarà minore ma l'impianto rimarrà acceso

per un tempo maggiore in quanto l'inerzia dell'edificio risulta molto più grande e l'impianto dovrà riscaldare i muri prima che venga raggiunto il set-point.

Si deve precisare, tuttavia, che *EnergyPlus* non tiene conto dei ponti termici che vengono ridotti con l'isolamento dall'esterno, mentre con un cappotto interno permangono perché questo non permette di isolare le connessioni tra le pareti e le altre parti della casa (soffitto, tramezzi, infissi, serramenti). Tali ponti termici sono zone in cui il flusso di calore risulta maggiore, di conseguenza il fabbisogno termico nel caso di cappotto interno dovrebbe essere maggiore rispetto all'altro caso.

Per la scelta dello spessore di isolante ritenuto ottimale è stata valutata la percentuale di riduzione del fabbisogno Q, rispetto a quello calcolato con la parete senza isolante Q_0 , secondo la seguente formula:

$$\%rid = \frac{Q - Q_0}{Q_0} 100 \quad (11)$$

E' stato ottenuto il seguente grafico (Figura 43):

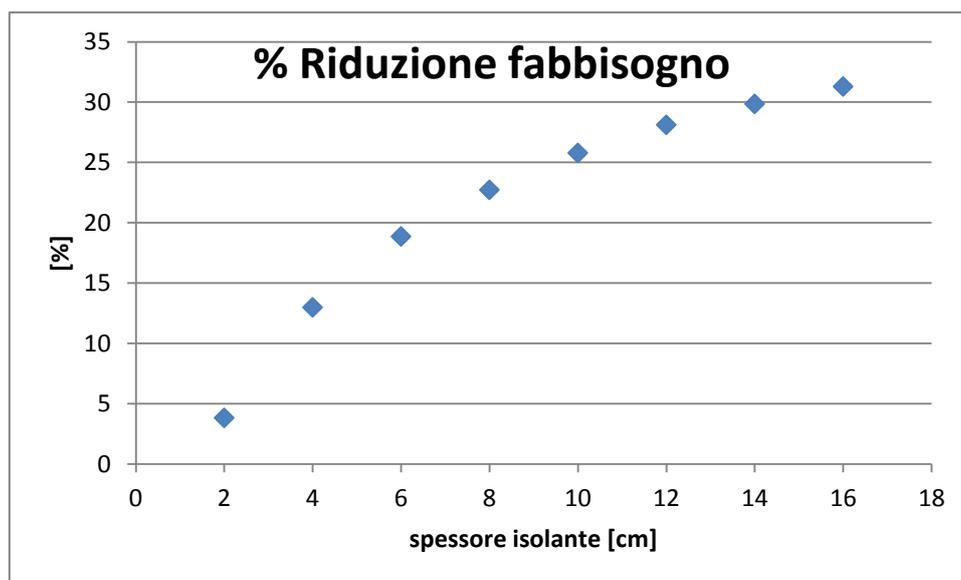


Figura 43: % di riduzione del fabbisogno termico in funzione dello spessore di isolante

Dalla Figura 43 si può notare come la riduzione risulti interessante fino ai 10 cm di spessore e oltre, a parità di aumento di spessore, tenda ad avere incrementi sempre meno influenti. E' stato preso come punto di ginocchio del grafico, dunque come spessore ottimale, quello di 12 cm. E' stata poi calcolata la trasmittanza termica della parete per verificare che rispettasse il valore di $0.26 \text{ W/m}^2\text{K}$, dettato dal DM 26/06/2015:

$$R_{muro} = R_{si} + R_{intonaco} + R_{isolante} + R_{mattoni} + R_{se} = \quad (12)$$

$$= 0.125 + \frac{0.12}{0.04} + \frac{0.02}{0.7} + \frac{0.63}{0.9} + 0.043 = 3.8966 \frac{m^2K}{W}$$

Da cui si ottiene:

$$U_{muro} = \frac{1}{R_{muro}} = \frac{1}{3.8966} = 0.256 \frac{W}{m^2K} < 0.26 \frac{W}{m^2K} \quad (13)$$

Il valore è dunque verificato, questo tipo di stratigrafia con cappotto interno sarà utilizzata per le successive simulazioni.

Il grafico in Figura 44 riassume la riduzione del fabbisogno termico relativo alle modifiche strutturali inserite nel modello secondo le direttive per le ristrutturazioni importanti effettuate a partire dal 2019.

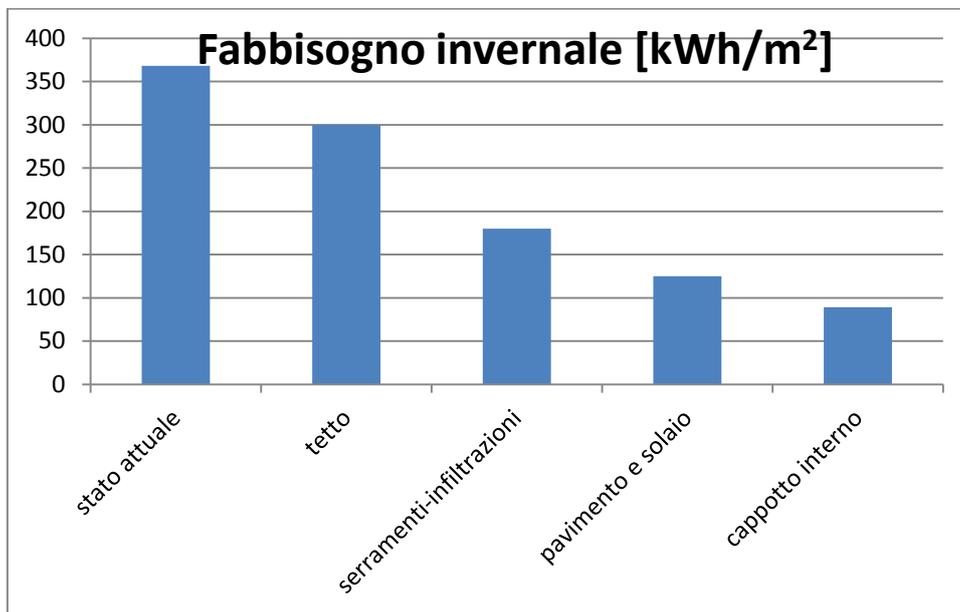


Figura 44 riduzione fabbisogno invernale in funzione delle modifiche apportate al modello

La riduzione legata all'inserimento del cappotto è di un ulteriore 28%, mentre la riduzione totale rispetto alle condizioni attuali è del 75%.

3.2 PROBLEMA DELL'UMIDITA'

Un problema molto comune in edifici antichi è che i muri poggiano direttamente sul terreno senza isolamento orizzontale (es. vecchie case di mattone pieno, tufo, pietra). A causa del fenomeno della capillarità, l'acqua presente nel terreno risale dalle fondamenta dell'edificio lungo le pareti, danneggiando l'intonaco e le strutture murarie e generando discomfort termo-igrometrico. Questo problema dell'umidità di risalita è stato riscontrato nell'edificio studiato, ma esula dalla presente tesi.

Poiché si è optato per il successivo studio dell'edificio con cappotto interno delle pareti, risulta necessario considerare la generazione di condensa interstiziale dovuta alla differenti condizioni termo igrometriche interne ed esterne alla struttura e, eventualmente, valutare la necessità di inserire la barriera del vapore.

3.2.1 VERIFICA BARRIERA DEL VAPORE

La procedura per valutare il rischio di condensa interstiziale ha seguito i seguenti passaggi:

1. Si è calcolato il profilo di temperatura sia nel caso di parete non isolata, sia nel caso di parete con cappotto interno:

Dalla legge di Fourier si calcola il flusso termico in condizioni stazionarie:

$$\frac{\Phi}{A} = U_{\text{tot}}\Delta T \quad (14)$$

dove:

- U_{tot} : trasmittanza termica globale della parete
- ΔT : differenza delle temperature interna ed esterna di progetto

Ricordando che per una parete piana multistrato considerata indefinita le resistenze di ogni singolo strato si sommano, avremo la tabella (Figura 45) per parete non isolata e la tabella (Figura 46) per parete isolata:

layer	thickness [m]	conductivity [W/mK]	Rt [m ² K/W]
Resistenza superf. interna	-	-	0.125
Intonaco interno	0.02	0.7	0.029
Mattoni e sassi	0.63	0.9	0.700
Resistenza superf.esterna	-	-	0.044
Rtot [m²K/W]	0.8971		
Utot [W/m²K]	1.1147		

Figura 45 Resistenza termica e trasmittanza termica parete non isolata

layer	thickness [m]	conductivity [W/mK]	Rt [m ² K/W]
Resistenza superf. interna	-	-	0.125
Intonaco interno	0.02	0.7	0.029
Isolante canapa	0.12	0.04	3.000
Mattoni e sassi	0.63	0.9	0.700
Resistenza superf. esterna	-	-	0.044
Rtot [m²K/W]	3.8971		
Utot [W/m²K]	0.2566		

Figura 46 Resistenza termica e trasmittanza termica parete isolata

Il flusso termico che attraversa la parete (potenza termica per unità di superficie) è pari a:

$$\frac{\Phi_1}{A} = U_{\text{tot1}} \Delta T = 1.1147(20 - (-8)) = 31.21 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (15)$$

$$\frac{\Phi_2}{A} = U_{\text{tot2}} \Delta T = 0.2566(20 - (-8)) = 7.18 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (16)$$

In condizione stazionarie, il flusso termico che attraversa ogni singolo strato rimane invariato, per cui si ricavano i profili di temperatura nelle due configurazioni di parete oggetto di studio in base alla (17), riportati in Figura 47:

$$\frac{\Phi}{A} = \frac{T_i - T_j}{R_j} \quad \text{con} \quad R_j = \frac{1}{h_i} + \sum_{z=1}^j \frac{s_z}{\lambda_z} \quad (17)$$

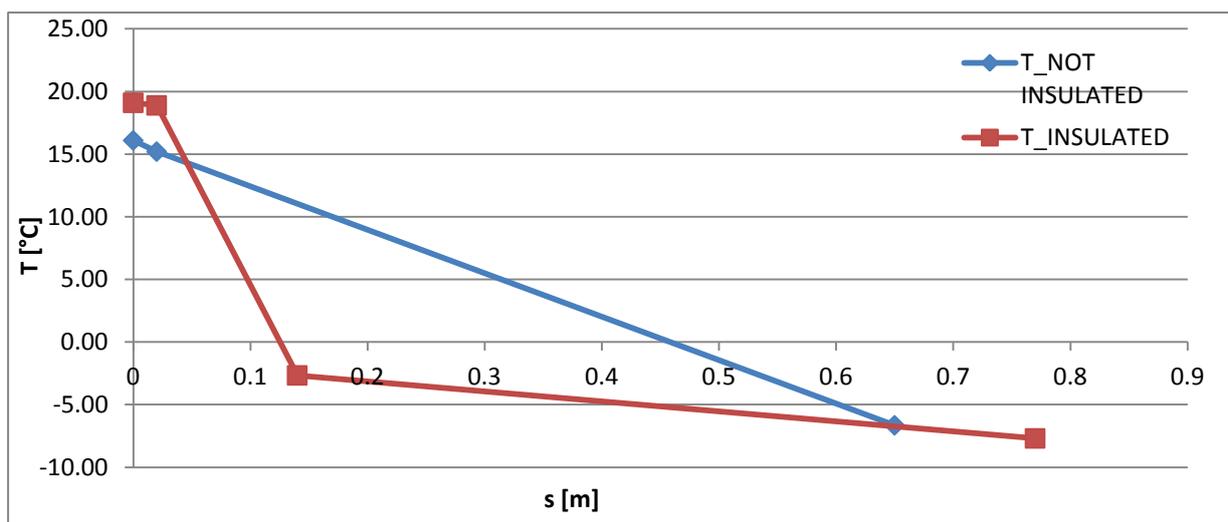


Figura 47 profilo di temperatura in funzione dello spessore delle pareti

In Figura 47 si nota come il salto termico agli estremi dello strato isolante sia significativo nel caso di parete con cappotto interno, mentre per la parete non isolata il profilo di temperatura risulta omogeneo lungo lo spessore.

2. Si è calcolata la pressione di saturazione corrispondente alle temperature del grafico in Figura 47, con le seguenti formule:

$$\begin{aligned} \text{for } -30 < T < 0^\circ\text{C} \quad p_{vs} &= 611e^{82.9 \cdot 10^{-3}T - 288.1 \cdot 10^{-6}T^2 + 4.403 \cdot 10^{-6}T^3} \\ \text{for } 0 < T < 40^\circ\text{C} \quad p_{vs} &= 611e^{72.5 \cdot 10^{-3}T - 288.1 \cdot 10^{-6}T^2 + 0.79 \cdot 10^{-6}T^3} \end{aligned} \quad (18)$$

ed è stato ottenuto il seguente profilo della pressione di saturazione rispetto allo spessore (Figura 48) sia nel caso di parete non isolata, sia nel caso di parete con cappotto interno:

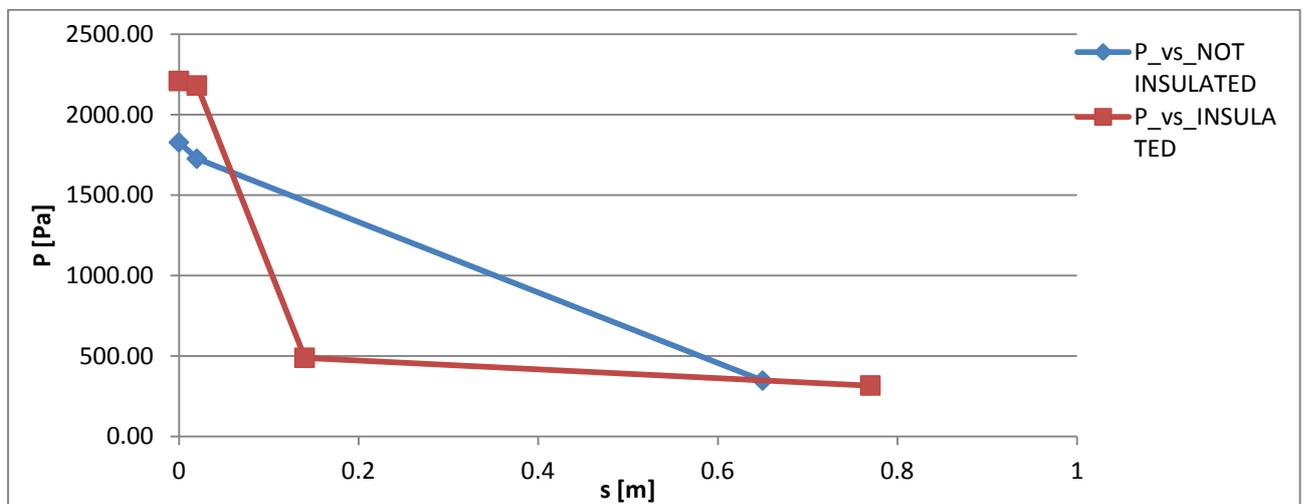


Figura 48 profilo di pressione di saturazione in funzione dello spessore delle pareti

3. Si sono calcolate le resistenze alla diffusione del vapore per ogni strato:

La legge che modella la diffusione del vapor d'acqua attraverso i materiali è la legge di Fick:

$$G = -\delta A \frac{\partial p_v}{\partial x} \quad (19)$$

Il flusso di massa del vapor d'acqua G [kg/s] attraverso uno strato di materiale poroso, come quello di cui è costituita una parete, è proporzionale al gradiente della pressione parziale del vapore e all'area della superficie normale A al gradiente. La costante di proporzionalità è chiamata PERMEABILITA' al vapore δ [kg/(msPa)].

Per un singolo strato in condizioni stazionarie:

$$\frac{G}{A} = \frac{\delta}{s} (p_{v1} - p_{v2}) = \frac{(p_{v1} - p_{v2})}{R_v} \quad (20)$$

dove $R_v = s/\delta$ è la resistenza alla diffusione del vapore d'acqua [$\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa} / \text{kg}$].

Un'espressione differente è usata riferendosi alla permeabilità dell'aria al vapore d'acqua: $\delta_a = 2 \cdot 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$.

$$\frac{G}{A} = -\frac{\delta_a}{\mu s} (p_{v1} - p_{v2}) = \frac{\delta_a (p_{v1} - p_{v2})}{s_{eq}} \quad (21)$$

Dove μ è detto fattore di resistenza al vapore [-].

Invece per una parete multistrato in condizioni stazionarie:

$$\frac{G}{A} = M(p_{vi} - p_{ve}) \quad (22)$$

Dove: M è la permeanza [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$] che si calcola come in (23):

$$M = \frac{1}{\frac{1}{\beta_i} + \sum_{j=1}^n \frac{s_j}{\delta_i} + \frac{1}{\beta_e}} \quad (23)$$

Poiché $1/\beta_i$ e $1/\beta_e$ può essere trascurato, M diventa:

$$M = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{s_j}{\delta_i}} = \frac{1}{R_{v, \text{tot}}} \quad (24)$$

I valori delle resistenze alla diffusione del vapore sono le R_v presenti nella tabella (Figura 49) per parete non isolata e la tabella (Figura 50) per parete isolata:

layer	thickness [m]	permeability [kg/smPa]	Rv [m ² sPa/kg]
Resistenza superf. interna	-	-	0
Intonaco interno	0.02	1.80E-11	1.11E+09
Mattoni e sassi	0.63	3.60E-11	1.75E+10
Resistenza superf. esterna	-	-	0
Rvtot [m ² sPa/kg]	18611111111		
M [kg/(m ² ·s·Pa)]	5.37313E-11		

Figura 49 resistenza al vapore e permeabilità parete non isolata

layer	thickness [m]	permeability [kg/smPa]	Rv [m ² sPa/kg]
Resistenza superf. interna	-	-	0
Intonaco interno	0.02	1.80E-11	1.11E+09
Isolante canapa	0.12	1.05E-10	1.14E+09
Mattoni e sassi	0.63	3.60E-11	1.75E+10
Resistenza superf. esterna	-	-	0
Rvtot [m ² sPa/kg]	1.98E+10		
M [kg/(m ² ·s·Pa)]	5.06E-11		

Figura 50 resistenza al vapore e permeabilità parete isolata

I valori di δ utilizzati per la verifica di Glaser sono quelli di δ in campo asciutto, ricavati dalla normativa UNI 10351 e per i pannelli di canapa dal datasheet del produttore [32].

4. Si è disegnato il diagramma di Glaser che riporta sulle y le pressioni del vapore di saturazione e le pressioni parziali e sulle x le resistenze alla diffusione del vapore. Si confronta il valore di pressione parziale del vapore con quello di saturazione.

Il diagramma di Glaser è un metodo grafico che permette lo studio del fenomeno della condensa all'interno di una parete costituita da uno o più strati. La formazione della condensa in uno strato può essere facilmente dedotta grazie a tale diagramma quando il valore di pressione parziale risulta maggiore di quello della pressione di saturazione.

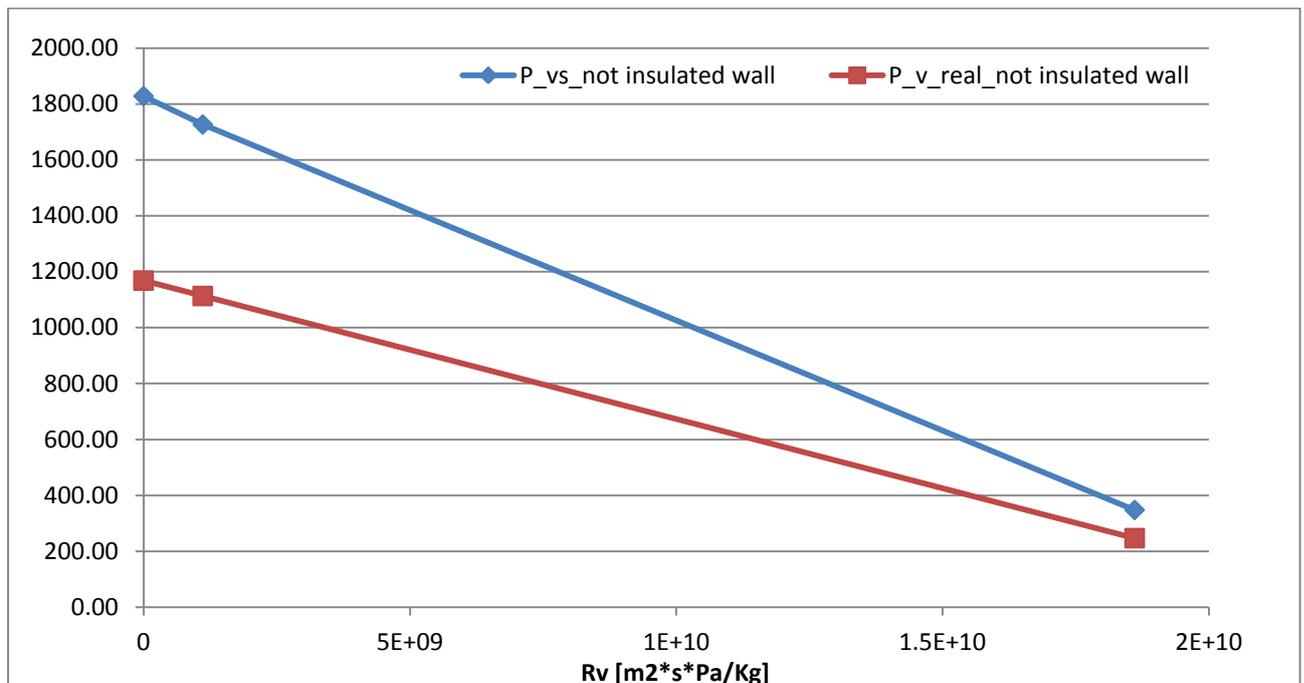


Figura 51 Diagramma di Glaser parete non isolata

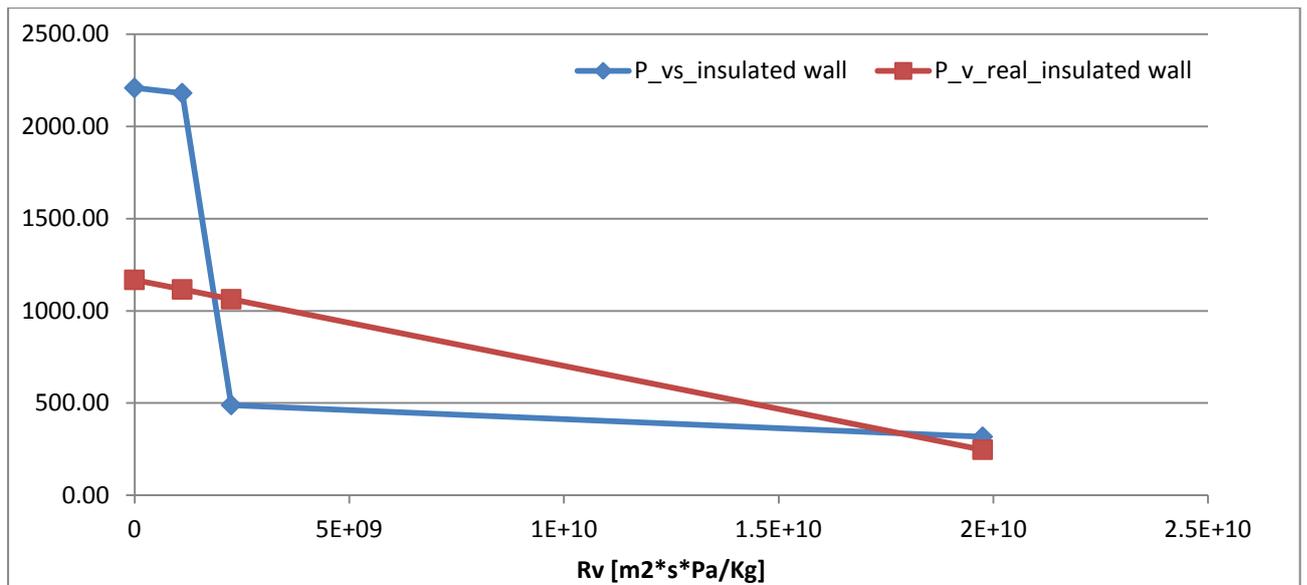


Figura 52 Diagramma di Glaser parete isolata

Dal diagramma di Glaser relativo alla parete non isolata (Figura 51), le due curve non hanno punti di intersezione e la pressione di saturazione risulta in ogni strato superiore alla corrispondente pressione parziale. Di conseguenza non c'è rischio di formazione di condensa.

Nel secondo grafico (Figura 52), invece, si è nel caso di formazione di condensa in quanto il valore di pressione parziale risulta maggiore di quello della pressione di saturazione.

5. In caso di formazione di condensa interstiziale, per risolvere il problema si introduce nella parte calda dell'isolante una barriera al vapore.

La barriera del vapore è tipicamente un materiale caratterizzato da un valore di permeabilità molto basso come plastica o foglio sottile che resiste alla diffusione dell'umidità attraverso pareti, tetti e pavimenti.

A partire dal punto della pressione parziale p_e esterna, si disegna la retta tangente alla linea della pressione satura finché raggiunge la pressione parziale interna p_i , come si evince dal grafico (Figura 53).

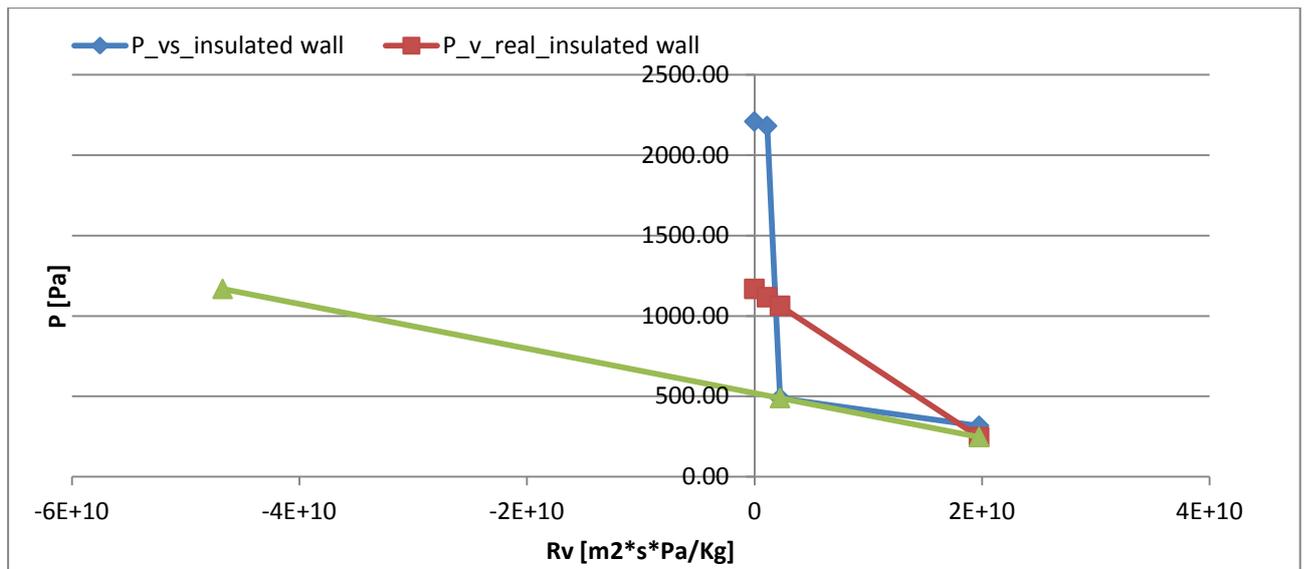


Figura 53 Determinazione del valore resistenza al vapore minima

La distanza orizzontale dal punto trovato con l'interpolazione dall'asse delle ordinate è la resistenza al vapore minima da aggiungere per evitare la formazione di condensa.

Nel caso specifico è di $4.67 \cdot 10^{10}$.

E' stato scelto un valore approssimato pari a $5 \cdot 10^{10}$, una barriera di spessore 1mm, a cui corrisponde un valore di permeabilità pari a $2 \cdot 10^{-14}$.

- Ridisegnando il grafico di Glaser con l'aggiunta della barriera del vapore sul lato caldo dell'isolante, si può constatare come anche nel caso di parete isolata non ci sia più rischio di formazione di condensa (Figura 54).

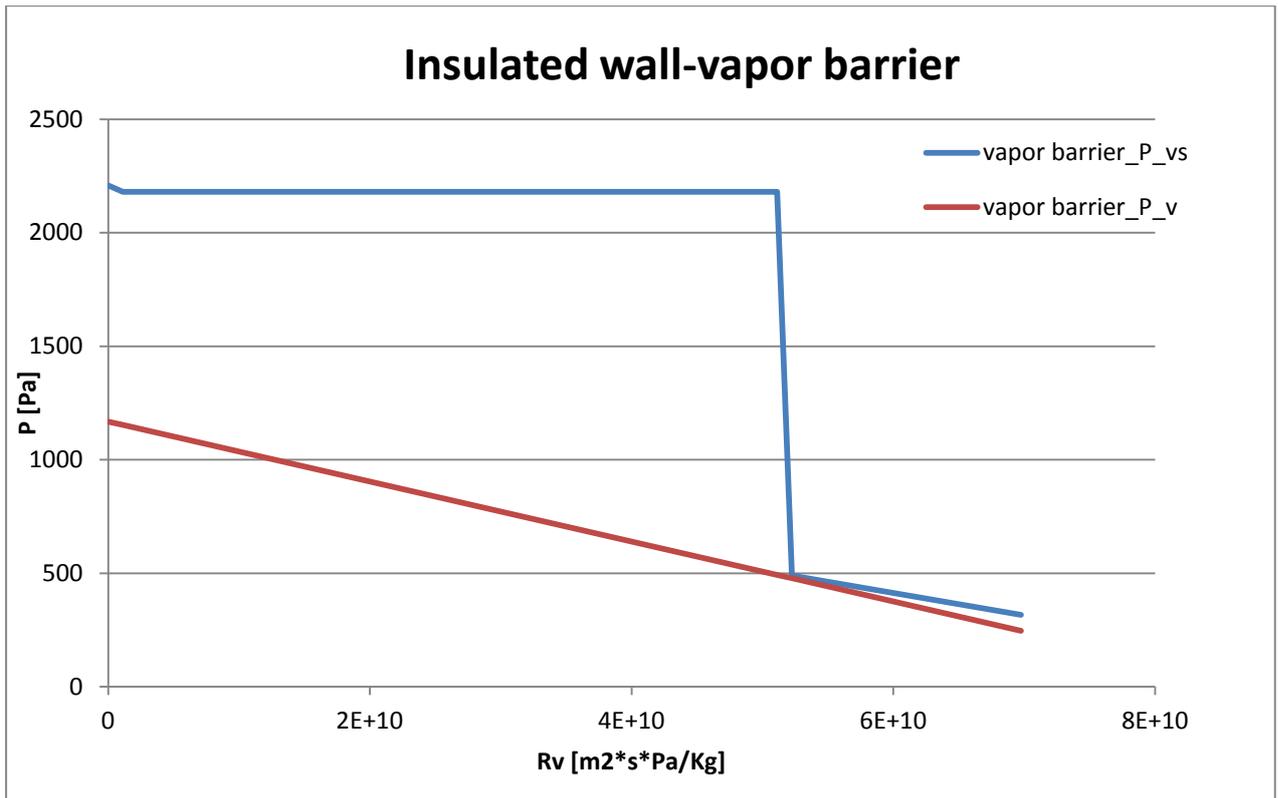


Figura 54 Diagramma di Glaser parete con isolamento interno e barriera di vapore

CAPITOLO 4

MODELLAZIONE IMPIANTO DI RISCALDAMENTO

4.1 POMPA DI CALORE

I sistemi in grado di produrre calore a partire da una fonte gratuita quali suolo, aria e acqua richiedono l'adozione di una pompa di calore (PDC) a ciclo inverso: una macchina in grado di trasferire calore da una sorgente a bassa temperatura ad una a più alta temperatura.

Ad oggi, le PDC sono comunemente diffuse come macchine frigorifere; la possibilità di utilizzare questa tecnologia come riscaldamento si è sviluppata solo di recente a seguito di decreti legislativi come il D. Lgs. 28/211 e successive modifiche [33] che introducono l'obbligo di generazione di energia rinnovabile negli edifici nuovi o sottoposti a ristrutturazione importante. Le PDC che si stanno diffondendo più facilmente sono di tipo reversibile, sono cioè in grado di generare calore d'inverno e rinfrescare l'ambiente nel periodo estivo. Questo genere di tecnologia sta facendo abbandonare progressivamente l'installazione delle caldaie convenzionali.

Il secondo principio della termodinamica sancisce la regola per cui il calore viene trasferito spontaneamente solo da una sorgente più calda ad una più fredda, dunque, una PDC per funzionare richiede del lavoro meccanico (Figura 55).

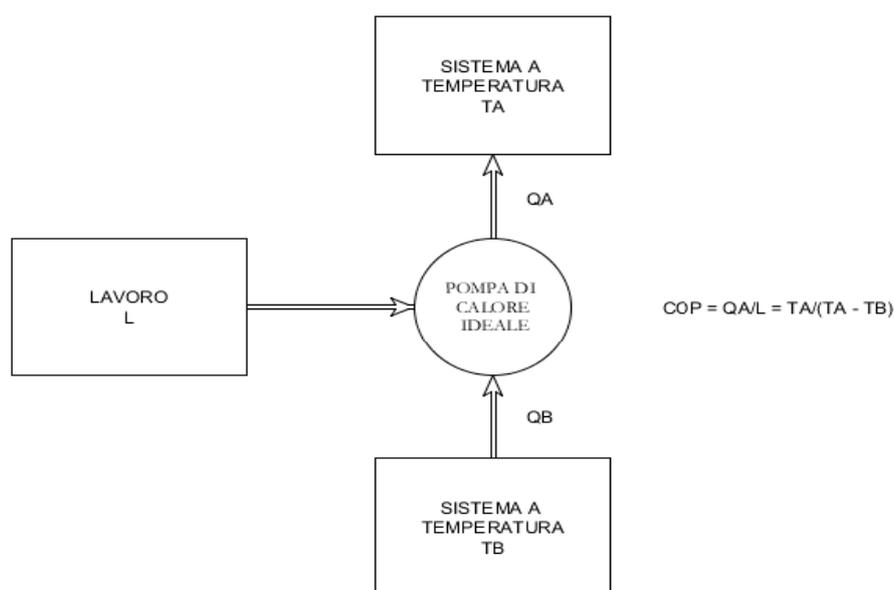


Figura 55 Diagramma del funzionamento di una PDC ideale

Questo genere di macchine utilizzano fluidi frigoriferi per trasferire calore da una sorgente più fredda ad una più calda: tale fluido, all'interno di un ciclo termodinamico inverso, viene prima compresso (attraverso un compressore o una pompa) e poi espanso (attraverso una valvola di laminazione generando un processo irreversibile) in modo da assorbire calore dalla sorgente fredda e cederlo all'ambiente caldo [34]. Se sufficientemente compresso il fluido frigorifero è in grado di bollire a temperature anche inferiori agli 0°C e assorbire/cedere una quantità di calore maggiore ad ogni ciclo. I fluidi frigoriferi più comuni sono R410A, R407C e simili, o fluidi naturali come il propano, ammoniaca e CO₂ (che sono andati a sostituire i CFC in seguito al Protocollo di Montreal[35]).

Durante il periodo invernale, la sorgente di calore si raffredderà, mentre in estate si scalderà.

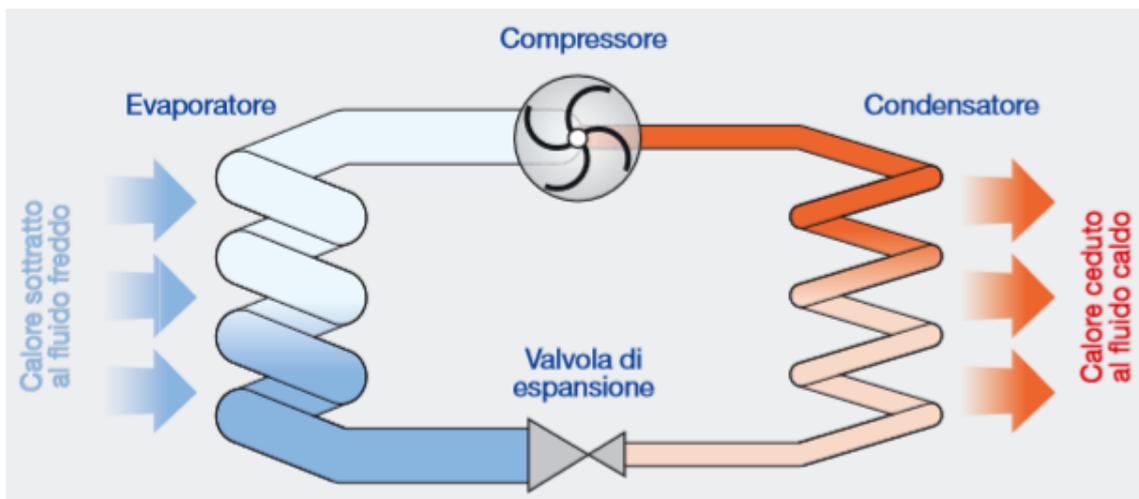


Figura 56 Schema funzionale PDC [36]

Nel caso in cui la PDC venga sfruttata come terminale di climatizzazione sotto forma di impianto a pavimenti radianti, è plausibile assumere che possano essere riscontrate delle temperature come quelle riportate nella Figura 57.

	Sorgente	Carico
Ciclo invernale	10°C	35°C
Ciclo estivo	14°C	22°C

Figura 57 Livelli termici esemplificativi di funzionamento PDC acqua-acqua

Il fluido refrigerante, si troverà, dunque a lavorare su due livelli di pressione. Tali livelli di pressione e relativa temperatura sono caratteristici di ciascun fluido refrigerante ed il comportamento di quest'ultimo è descritto nel diagramma T-s come mostrato in Figura 58.

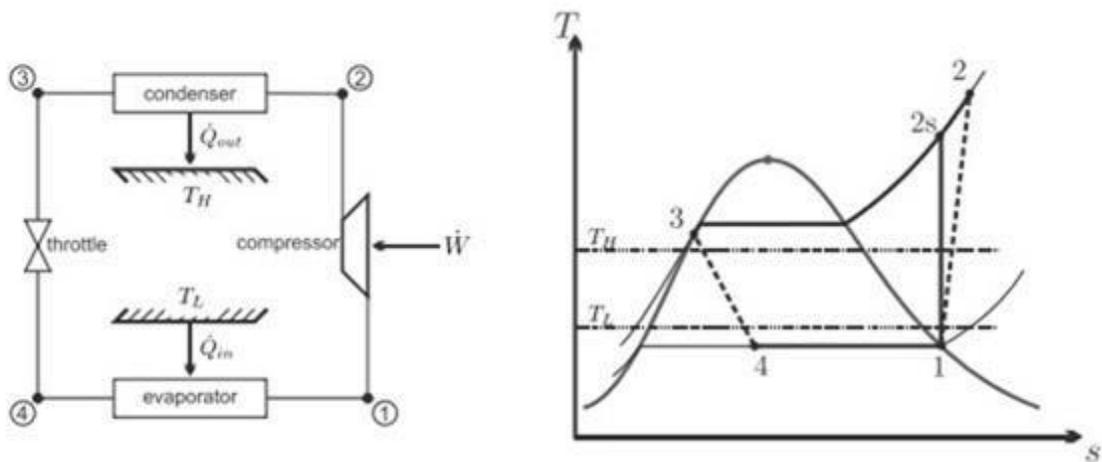


Figura 58 Schema funzionale e relativo diagramma entropico di una PDC elettrica a compressione di vapore[37]

Il grafico a destra sopra riportato mostra come il ciclo sia caratterizzato da 4 trasformazioni che hanno luogo nei vari componenti della macchina [38]:

- Compressione adiabatica (1-2) in un compressore che in macchine medio-piccole è di tipo alternativo;
- Cessione di calore isobara (2-3) nel condensatore in cui il fluido si raffredda fino alla temperatura di condensazione T_c e subisce il cambiamento di fase vapore-liquido;
- Laminazione adiabatica irreversibile (3-4), caratterizzata da entalpia finale e iniziale uguali;
- Assorbimento di calore isobaro (4-1) nell'evaporatore in cui il fluido si riscalda fino alla temperatura di evaporazione T_e e subisce il cambiamento di fase liquido-vapore;

4.1.1 Il COP

Uno degli elementi fondamentali per definire la prestazione dell'impianto e, così, determinare qualora si possa accedere agli incentivi statali, è il coefficiente di prestazione (COP- coefficient of performance).

Poichè la PDC richiede l'utilizzo di un compressore è, prima di tutto, necessario definire l'efficienza relativa al compressore:

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{W_{compressore}} \quad (25)$$

dove:

- Q_c : energia utile fornita dal compressore;
- $W_{\text{compressore}}$: lavoro meccanico assorbito dal compressore.

Il COP è definito dalla norma EN 255 come *“il rapporto tra il calore ceduto al fluido caldo e l’energia richiesta sia dal compressore sia dai mezzi ausiliari integrati nella pompa di calore”* [39].

$$COP = \frac{Q_c}{W_{\text{compressore}} + W_{\text{ausiliari}}} \quad (26)$$

Come è possibile notare, al denominatore, viene inserito anche il lavoro necessario a far funzionare gli ausiliari collegati alla PDC, dispositivi antigelo, apparecchiature di regolazione e controllo, circolatori, ventilatori.

Il COP varia in base al funzionamento invernale e quello estivo.

Nell’assetto refrigeratore, in cui l’effetto utile è l’asportazione di calore a una temperatura minore di quella ambiente, il coefficiente di effetto utile è (in riferimento alla Figura 58):

$$COP_c = \frac{Q_{41}}{|L_{12}|} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (27)$$

Nell’assetto riscaldatore, in cui l’effetto utile è la fornitura di calore a una temperatura maggiore di quella ambiente, il coefficiente di effetto utile è:

$$COP_H = \frac{|Q_{23}|}{|L_{12}|} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} = \frac{h_2 - h_1 + h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = 1 + COP_c \quad (28)$$

Il limite massimo del COP si può calcolare utilizzando il teorema di Carnot ricorrendo alle sole due temperature della sorgente T_1 e dell’ambiente da scaldare/raffrescare T_2 (Figura 59).

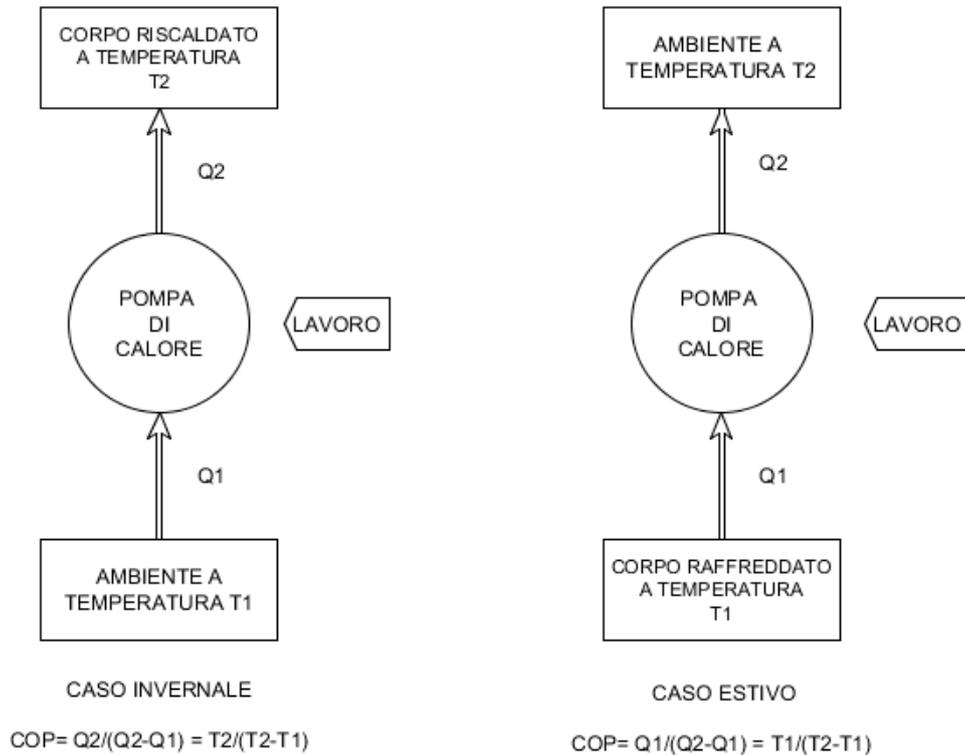


Figura 59 Calcolo COP per caso invernale ed estivo

Le irreversibilità del ciclo termodinamico, dovute principalmente a compressione e laminazione, fanno sì che qualunque PDC lavori ad un COP minore rispetto a quello ideale.

Il COP dipende principalmente dalle condizioni in cui l'impianto si trova ad operare: più le temperature di sorgente e serbatoio sono vicine, maggiore è l'efficienza (Figura 60). Come è possibile immaginare, il COP varia tra il transitorio e la situazione di regime, pertanto, è necessario progettare l'impianto in modo che il salto di temperatura garantisca di lavorare a COP ottimali.



Figura 60 Dipendenza del COP dal salto di temperatura[40]

4.2 I PANNELLI RADIANTI

L'impianto a pannelli radianti, grazie alla loro elevata superficie disperdente, è il miglior esempio di terminale di climatizzazione che conviene abbinare a sorgenti di calore la cui resa aumenta al diminuire della temperatura richiesta, come le pompe di calore, il teleriscaldamento o i pannelli solari: tale impianto permette di riscaldare o raffreddare l'ambiente scambiando calore per irraggiamento e convezione [30]. L'irraggiamento è proporzionale alla differenza di temperatura tra la superficie radiante e le superfici dell'ambiente e segue la legge di Stefan-Boltzman, mentre la convezione è proporzionale alla differenza di temperatura tra la superficie radiante e l'aria (Figura 61).

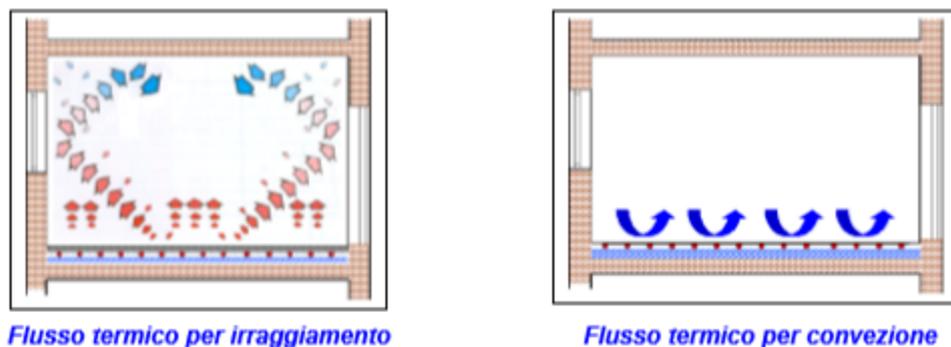


Figura 61 Flussi termici generati da un pavimento radiante

Il pavimento è costituito da tubazioni affogate nel massetto (Figura 62): questo gli permette di restare caldo/freddo anche dopo aver spento l'impianto, a seguito dell'inerzia termica dell'impianto stesso.

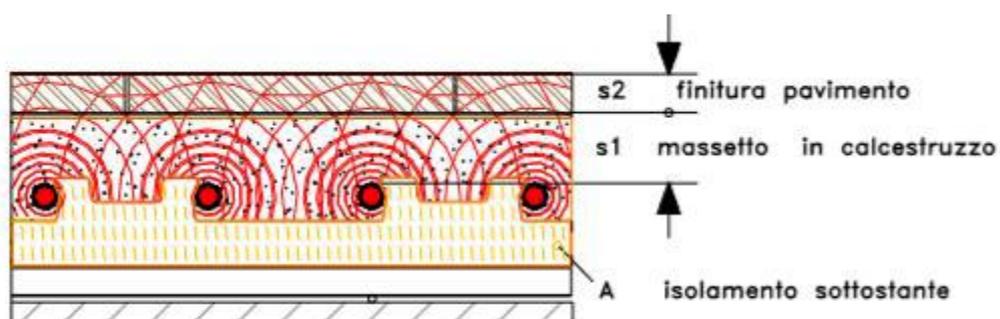


Figura 62 Flusso termico per conduzione

Si noti dall'immagine sopra riportata (Figura 62) come sia inserito uno strato di isolante termico (in genere di polistirene o poliuretano) al fine di ridurre le perdite verso il basso e a limitare l'inerzia termica dell'impianto.

La scelta di pavimenti radianti ad un sistema di riscaldamento a radiatori porta notevoli vantaggi:

- I pannelli garantiscono una copertura dell'intera area calpestabile. In più, scambiando calore per irraggiamento ed, essendo collocati nella zona più bassa della stanza, sono in grado di garantire un comfort termico ideale (mantenendo zone leggermente più calde a pavimento e più fredde a soffitto): si noti, infatti, in Figura 63 come la curva dell'andamento termico, utilizzando pannelli radianti a pavimento, si discosti solo di poco dalla curva ideale di benessere termico.

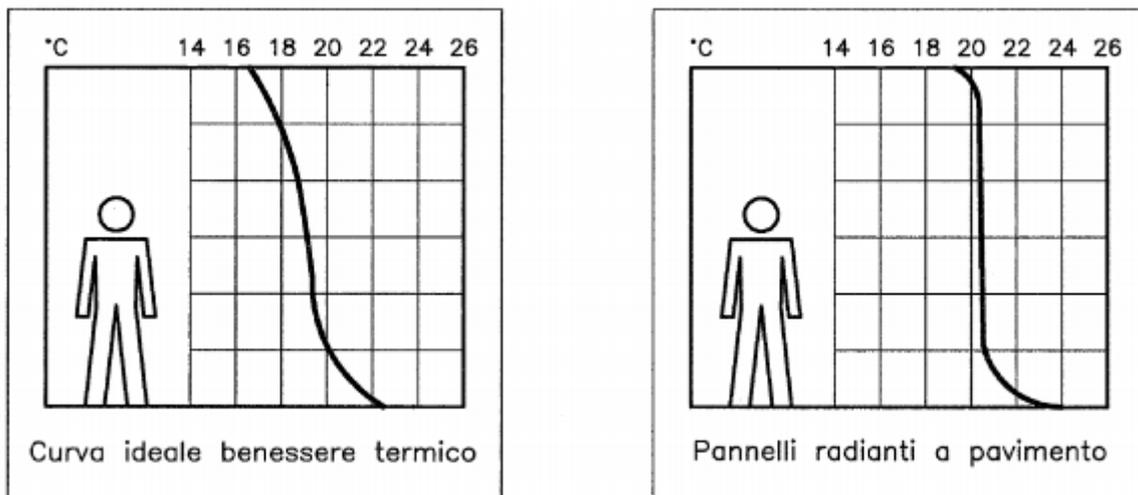


Figura 63 Curva ideale di T per il benessere termico e T ottenuta da pannelli radianti a pavimento

- I pannelli radianti, sfruttando il principio termodinamico dell'irraggiamento, non movimentano l'aria e non spostano polveri prevenendo allergie e difficoltà respiratorie. Si evita, inoltre, la formazione di zone umide prevenendo il proliferarsi di batteri e muffe.
- Non ponendo limiti di natura estetica, sono ideali per climatizzare edifici storici, dove la presenza di radiatori potrebbe compromettere l'armonia degli ambienti e non limitano lo spazio disponibile.
- I pannelli radianti garantiscono degli ottimi livelli di efficienza se combinati a PDC, sistemi di recupero di calore, teleriscaldamento.
- La possibilità di lavorare a basse temperature garantisce un risparmio energetico che si aggira nell'intorno di 10-15% rispetto ai convenzionali sistemi di riscaldamento. Si hanno, infatti, minori dispersioni termiche lungo le tubazioni oltre che al risparmio dovuto alla maggiore uniformità del calore ceduto all'ambiente e il non surriscaldamento delle pareti poste in prossimità dei radiatori.

E' possibile installare i pannelli radianti in 2 configurazioni: a serpentina o spirale (Figura 64). Quest'ultima configurazione è generalmente più utilizzata perché garantisce una temperatura più omogenea e maggiore facilità di installazione, sebbene la quantità di calore erogato sia lo stesso.

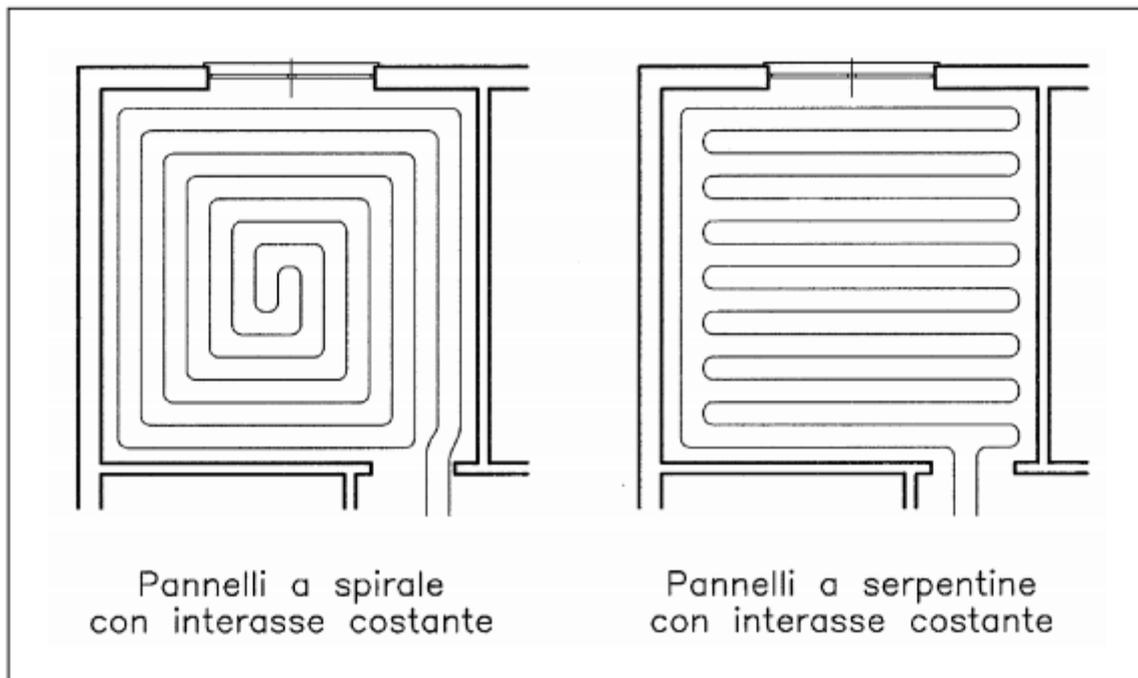


Figura 64 Configurazione pannelli radianti a serpentina e a spirale

Se accoppiati ad una PDC di tipo reversibile, i pannelli radianti, possono anche permettere di rinfrescare l'ambiente in cui sono collocati, tuttavia, non potendo lavorare come deumidificatori, sarebbe opportuno installare un impianto di trattamento dell'aria in modo da garantire condizioni igrometriche ottimali durante la stagione estiva.

4.3 IL CASO STUDIO

Una volta coibentato l'edificio, è stato inserito in *EnergyPlus* il *Design day file*, un file contenente le condizioni di progetto, generato a partire dai dati meteorologici forniti dal World Meteorological Organization per la località di Torino-Caselle [26]. Il *Design day file* descrive i giorni di progetto, in base alle condizioni di progetto annuali definite da ASHRAE. Per il riscaldamento è stata scelta la condizione di temperatura di bulbo secco corrispondente al 99,6 % di frequenza cumulata annuale di occorrenza.

Per il calcolo della taglia degli impianti, con carichi interni azzerati, è stata inizialmente richiesta al software la potenza termica necessaria per il raggiungimento

del set-point di 20°C facendo uso dell'opzione *ideal load*. Si è così ottenuto il valore di 7.35 kW di potenza termica che sarà utilizzato per il dimensionamento dei pannelli radianti e della pompa di calore.

Successivamente nel modello sono stati inseriti i dati relativi agli apporti interni, ovvero il carico termico generato dalla presenza di persone ed elettrodomestici nei locali.

Tali valori sono stati ricavati dalla UNI TR 11300-1 secondo il seguente prospetto:

Profili temporali degli apporti termici dagli occupanti e dalle apparecchiature (edifici residenziali)

Giorni	Ore	Soggiorno e cucina $(\Phi_{\text{int, Oc}} + \Phi_{\text{int, A}}) / A_f$ [W/m ²]	Altre aree climatizzate (per esempio stanza da letto) $(\Phi_{\text{int, Oc}} + \Phi_{\text{int, A}}) / A_f$ [W/m ²]
Lunedì – Venerdì	Dalle ore 07:00 alle ore 17:00	8,0	1,0
	Dalle ore 17:00 alle ore 23:00	20,0	1,0
	Dalle ore 23:00 alle ore 07:00	2,0	6,0
	Media	9,0	2,67
Sabato – Domenica	Dalle ore 07:00 alle ore 17:00	8,0	2,0
	Dalle ore 17:00 alle ore 23:00	20,0	4,0
	Dalle ore 23:00 alle ore 07:00	2,0	6,0
	Media	9,0	3,83
Media		9,0	3,0

$(\Phi_{\text{int, Oc}} + \Phi_{\text{int, A}})$ è il flusso termico dalle persone e dalle apparecchiature, in W;
 A_f è la superficie utile di pavimento.

Figura 65 Profili temporali degli apporti termici interni [70]

Infine si introduce nel software l'impianto scelto per soddisfarne il fabbisogno.

E' stato studiato il caso in cui i pannelli radianti sono alimentati da una pompa di calore acqua-acqua e sono stati poi confrontati i consumi energetici e i costi rispetto a un impianto a pannelli radianti alimentato da una caldaia a condensazione a GPL.

4.3.1 DIMENSIONAMENTO PAVIMENTI RADIANTI

Come già precedentemente accennato, gli impianti a pannelli radianti possono riscaldare con basse temperature del fluido termovettore, per cui il loro abbinamento con una caldaia a condensazione a GPL non permette di sfruttarne a pieno le potenzialità.

Si vuole verificare che la potenza richiesta dai locali dell'edificio sia inferiore alla potenza massima cedibile da un pannello, ovvero quella che determina una temperatura massima superficiale di 29°C. Tale temperatura non deve essere

superata in ambienti in cui ci si sofferma, per evitare condizioni di malessere fisiologico[30].

$$Q_{installabile,max} = q_{max} * S = 184 \text{ m}^2 * 100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 18.4 \text{ kW} \quad (29)$$

Tale potenza risulta molto più alta di quella richiesta che è pari a 7.35 kW.

Dalla dispersione di picco pari a 7.35 kW si calcola la resa specifica necessaria, dal rapporto tra dispersione di picco ed area del pavimento.

La resa unitaria necessaria risulta essere:

$$q_{des} = \frac{Q_{des}}{A} = \frac{7350}{184} = 40 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (30)$$

Poiché i tubi sono affogati in: 4.5 cm di massetto e 0.8 cm di finitura in faggio, che generano una resistenza complessiva di 0.0901 m²K/W, e la scelta delle tubazioni utilizzate è ricaduta su quelle standard Pex 17x2, a partire dalle tabelle fornite da Watt Industries [41] si è trovato che, considerando una temperatura di mandata di 38°C, la resa unitaria è soddisfatta con un interasse pari a 25 cm e un salto di temperatura fra mandata e ritorno di 9 K. La temperatura superficiale del pavimento con questa configurazione raggiunge i 24°C e rientra nei limiti.

La lunghezza totale dei tubi dell'intero edificio è stata calcolata dal software in base alla seguente formula [42]:

$$Tube \text{ length} = \frac{TotalSurfaceArea}{TubeSpacing} \quad (31)$$

ed è stato ottenuto un valore di 607.75 m per l'intero edificio.

La massima portata volumetrica di acqua calda è stata calcolata in base alla seguente formula [42]:

$$V_h = \frac{DesHeatLoad_{zone}}{\Delta T_h c_p \rho_h} \quad (32)$$

dove:

- V_h è la massima portata volumetrica, m³/s;

- c_p è il calore specifico dell'acqua calda a 60°C, J/kg/K
- ρ_h è la densità dell'acqua calda a 60°C, kg/m³

La portata necessaria ad ottenere la potenza termica richiesta con un salto di temperatura di 9 K tra ingresso e uscita è di $1.46 \cdot 10^{-4}$ m³/s ovvero di 525.6 l/h.

4.3.2 DIMENSIONAMENTO POMPA DI CALORE

Si è optato per un impianto con pompa di calore acqua-acqua che fornisce il calore di condensazione ai pannelli radianti posti sotto il pavimento e che riceve il calore utile all'evaporatore dall'acqua di una sorgente che, anche in pieno inverno, mantiene una temperatura intorno ai 10°C, piuttosto che scegliere una pompa di calore aria-acqua che riceve calore utile dall'aria a temperature anche inferiori allo zero, diminuendo in questo modo il gap fra temperatura di condensazione ed evaporazione. Ne consegue un COP più elevato e, a parità di potenza da fornire al carico, una potenza elettrica richiesta inferiore.

Poiché dalla funzione *ideal load* di *EnergyPlus* si è ottenuta una potenza termica di picco di 7.35 kW, è stata scelta una pompa di calore presente sul mercato con taglia prossima a questo valore.

Dalle precedenti simulazioni è stato valutato che non risulta necessario inserire una pompa di calore reversibile in quanto il fabbisogno estivo risulta nullo, tuttavia verranno utilizzati i dati di una pompa di calore reversibile la cui taglia sarà scelta in base al riscaldamento.

Per il dimensionamento della pompa di calore si sono utilizzati i dati di progetto precedentemente calcolati e su un catalogo fornito da EMMETI è stato scelto il componente in grado di soddisfare la potenza richiesta [43], i cui dati sono visibili in Figura 66.

Potenza nominale [kW]	7.4
Temperatura sorgente fredda [°C]	10
Temperatura di mandata [°C]	35
COP nominale	5.1

Figura 66 Dati di targa PDC [43]

Questo tipo di pompa di calore è provvista di un compressore rotativo di tipo Scroll e di scambiatori a piastre e utilizza il liquido frigorifero R410 A.

Per poter modellare la pompa di calore, EnergyPlus richiede 5 *heating capacity coefficients* and 5 *compressor power coefficients*, che sono stati ricavati inserendo i dati catalogati dal produttore alle varie condizioni di funzionamento nell' Auxiliary Program [44] fornito con il software (Figura 67).

TABLE 1: GENERAL HEAT PUMP HEATING CATALOG DATA							
Source Side Entering Water Temp	Source Side Water Flow Rate	Load Side Entering Water Temp	Load Side Water Flow Rate	Heating Capacity	Power Input	Heat Absorption	
(°F)	(GPM)	(°F)	(GPM)	(MBtuh)	(KW)	(MBtuh)	(IP)
(°C)	(m³/s)	(°C)	(m³/s)	(KW)	(KW)	(KW)	(SI)
-6	0.00017	30	0.00023	4.9	1.5	3.5	(1)Generate Input from catalog data
-6	0.00016	35	0.00023	4.9	1.7	3.3	(1)Generate Input from catalog data
-2	0.0002	30	0.00025	5.3	1.4	4.1	(1)Generate Input from catalog data
-2	0.00018	35	0.00025	5.2	1.6	3.8	(1)Generate Input from catalog data
-2	0.00017	40	0.00025	5.2	1.9	3.5	(SI)
1	0.00022	30	0.00027	5.7	1.4	4.5	
1	0.00021	35	0.00027	5.7	1.6	4.3	
1	0.00019	40	0.00026	5.5	1.8	3.9	Clear Previous Catalog Data
1	0.00017	45	0.00026	5.5	2.1	3.6	
1	0.00015	50	0.00026	5.4	2.4	3.2	
4	0.00025	30	0.00031	6.4	1.4	5.2	

Figura 67 Dati input richiesti dall'auxiliary program

Questo Auxiliary program altro non è che un file excel contenente una macro in grado di ricavare dei coefficienti che, inseriti insieme alle grandezze di riferimento nelle equazioni (33 e 34), generano output coerenti con i dati del catalogo, dimostrando la funzionalità operativa del modello "EquationFit". [45]

$$\frac{Q_h}{Q_{h,ref}} = C1 + C2 \left[\frac{T_{L,IN}}{T_{ref}} \right] + C3 \left[\frac{T_{S,IN}}{T_{ref}} \right] + C4 \left[\frac{\dot{V}_L}{\dot{V}_{L,ref}} \right] + C5 \left[\frac{\dot{V}_S}{\dot{V}_{S,ref}} \right] \quad (33)$$

$$\frac{Power_h}{Power_{h,ref}} = D1 + D2 \left[\frac{T_{L,IN}}{T_{ref}} \right] + D3 \left[\frac{T_{S,IN}}{T_{ref}} \right] + D4 \left[\frac{\dot{V}_L}{\dot{V}_{L,ref}} \right] + D5 \left[\frac{\dot{V}_S}{\dot{V}_{S,ref}} \right] \quad (34)$$

dove:

- Q_h è l'heating output ottenuto dal modello EquationFit
- $Power_h$ è la power input ottenuto dal modello EquationFit
- T_L è la temperatura di ingresso dell'acqua lato carico [°C];
- T_S è la temperatura di ingresso dell'acqua lato sorgente [°C];
- V_L è la portata del carico [m³/s];
- V_S è la portata della sorgente [m³/s];

I coefficienti generati, da inserire nel software sono illustrati nella seguente Figura 68.

	HeatQLoadCoeff	HeatPowerCoeff
Coefficient 1	-0.00000076	-1.62559427
Coefficient 2	-0.00000322	3.37362139
Coefficient 3	0.00000459	-1.84002682
Coefficient 4	1.04022782	3.57707435
Coefficient 5	-1.23258E-06	-2.708847984

Figura 68 Coefficienti C1-C5 (colonna a destra) e D1-D5 (colonna a sinistra)

In figura 69 e figura 70 si può osservare come è stato modellato l'HVAC su Openstudio.

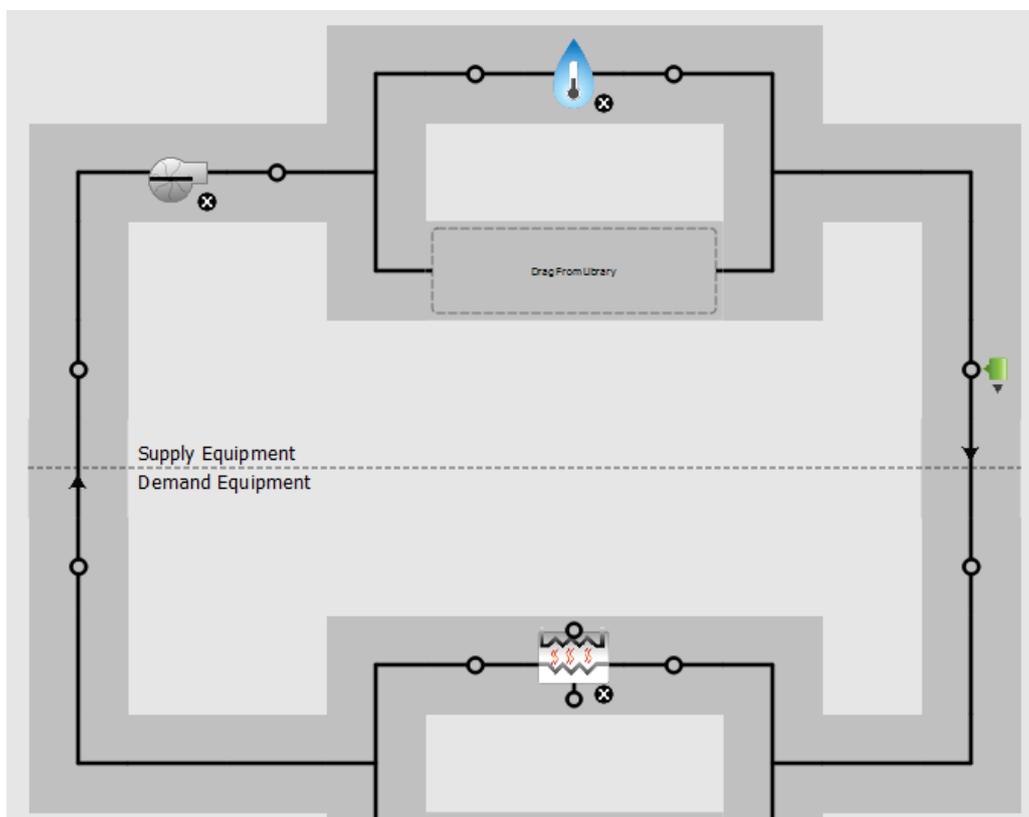


Figura 69 Schema impianto-lato evaporatore

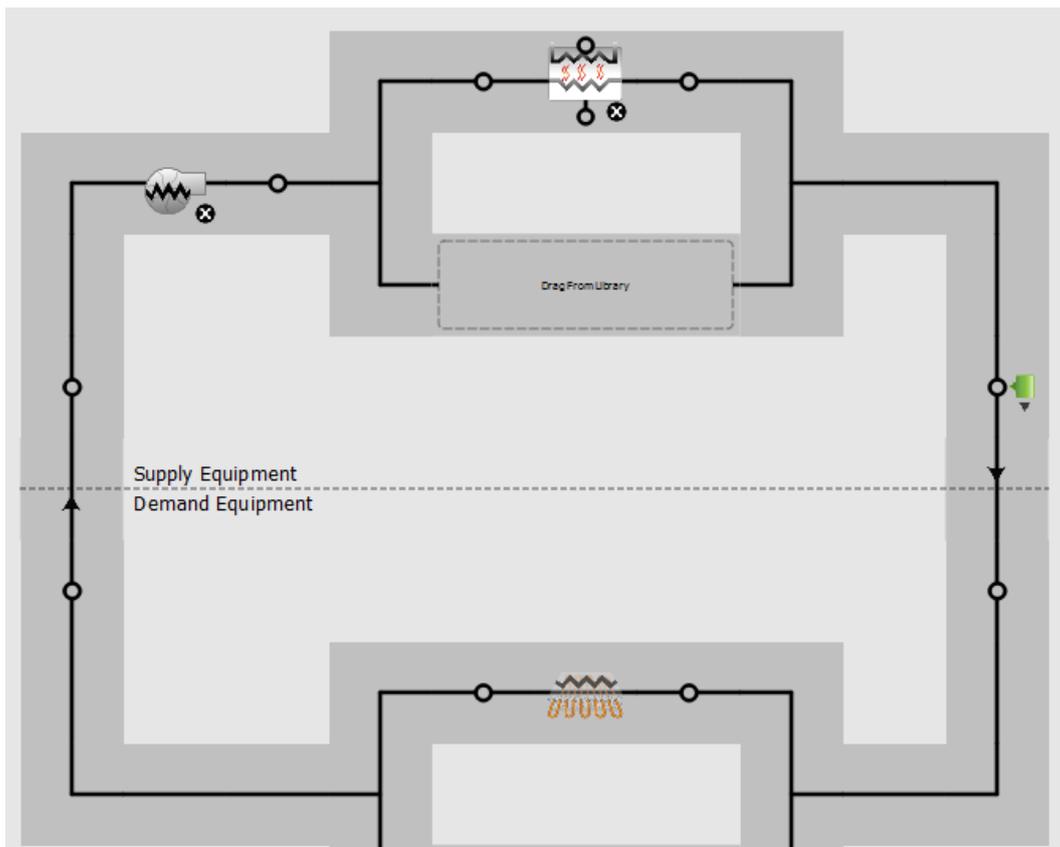


Figura 70 Schema impianto-lato condensatore

L'impianto è costituito da pavimento a pannelli radianti, alimentati dalla potenza termica rilasciata dal condensatore della pompa di calore (Figura 70). L'evaporatore della pompa di calore invece scambia flusso termico con un flusso d'acqua proveniente da una sorgente (Figura 69). La sorgente è stata modellata con un *Plant Component Temperature Source* a temperatura costante di 10°C, ottenuta da rilievi effettuati *in loco*. Poiché essa non ha una portata costante durante l'anno, ma può variare considerevolmente, ci si è posti nella condizione peggiore ed è stato inserito il valore più basso rilevato di 0.0682 l/s.

Dalle simulazioni si è constatato che una portata così bassa, a contatto con il fluido refrigerante dell'evaporatore, durante il funzionamento della pompa di calore, entra a una temperatura di 10°C e fuoriesce a temperature inferiori allo zero (Figura 71), fuoriuscendo anche dai limiti di salto termico di funzionamento della macchina dichiarati dal costruttore (Figura 72). È necessario imporre una temperatura di ritorno minima della fonte fredda pari a 5°C per prevenire fenomeni di formazione di ghiaccio, tuttavia per ottenere un salto termico inferiore sarebbe necessario aumentare la portata della sorgente.

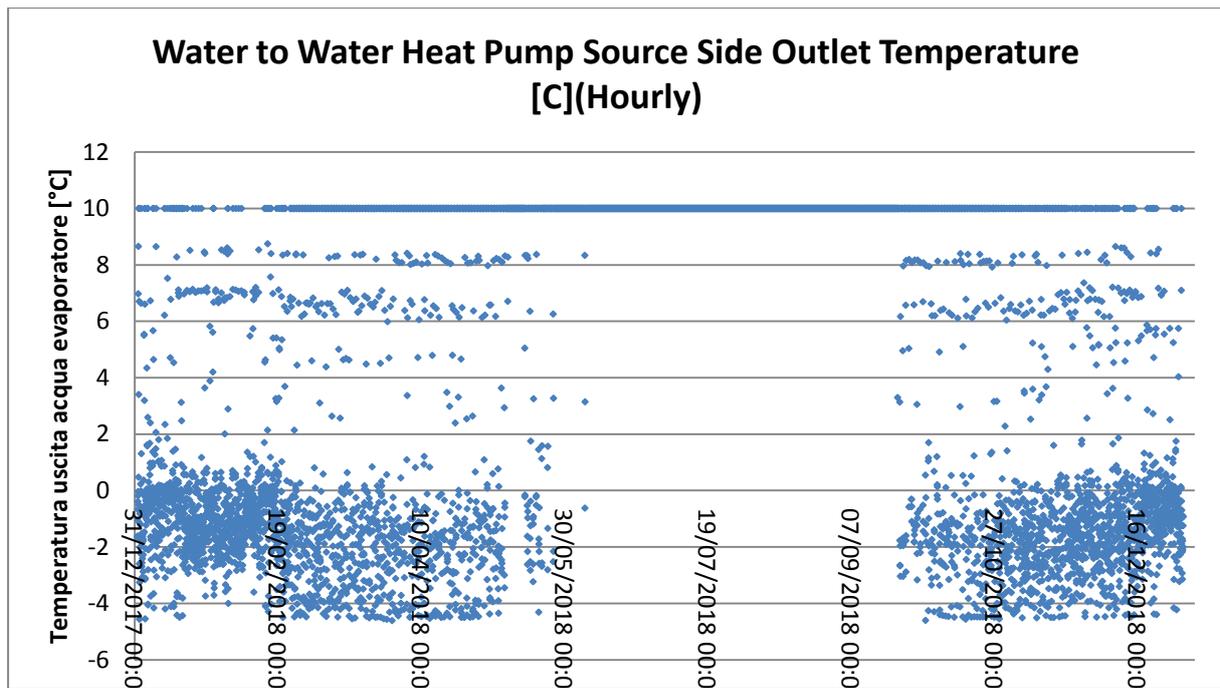


Figura 71 Temperatura dell'acqua in uscita dall'evaporatore-oraria

Limiti di funzionamento	Temp. uscita	Differenza temp.	Temp. max ingresso
Condensatore	30 ÷ 52 °C	5 ÷ 18 °C	47 °C
Evaporatore	-6 ÷ 23 °C	3 ÷ 8 °C	28 °C

Pressione acqua: minima 0,5 Barg - massima 6 Barg.

Figura 72 Limiti di funzionamento dichiarati dal costruttore [43]

Per evitare i problemi su esposti, si è deciso di introdurre un serbatoio per raccogliere l'acqua proveniente dalla sorgente, con lo scopo di garantire una temperatura di evaporazione di almeno 5°C. L'impianto è stato, dunque, modificato come in Figura 73-74 e 75.

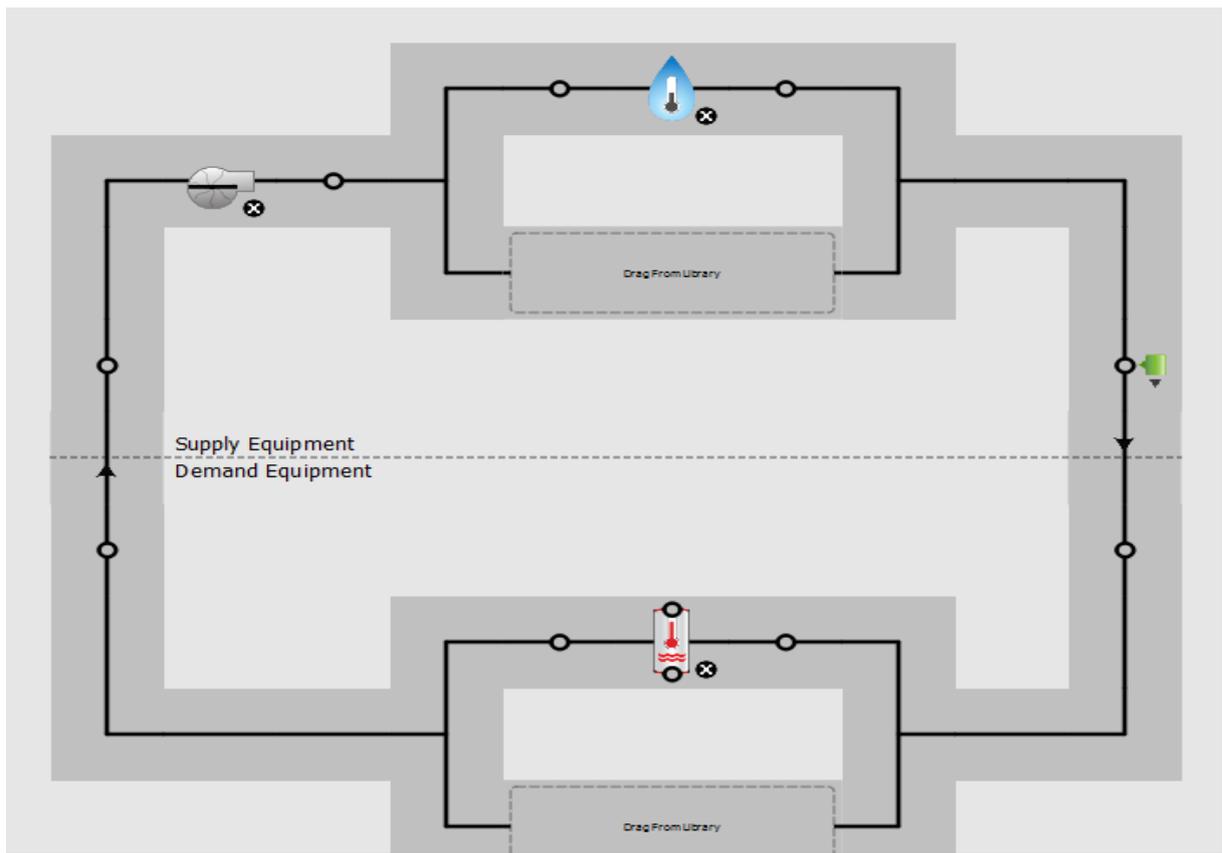


Figura 73 Schema impianto2-sorgente serbatoio

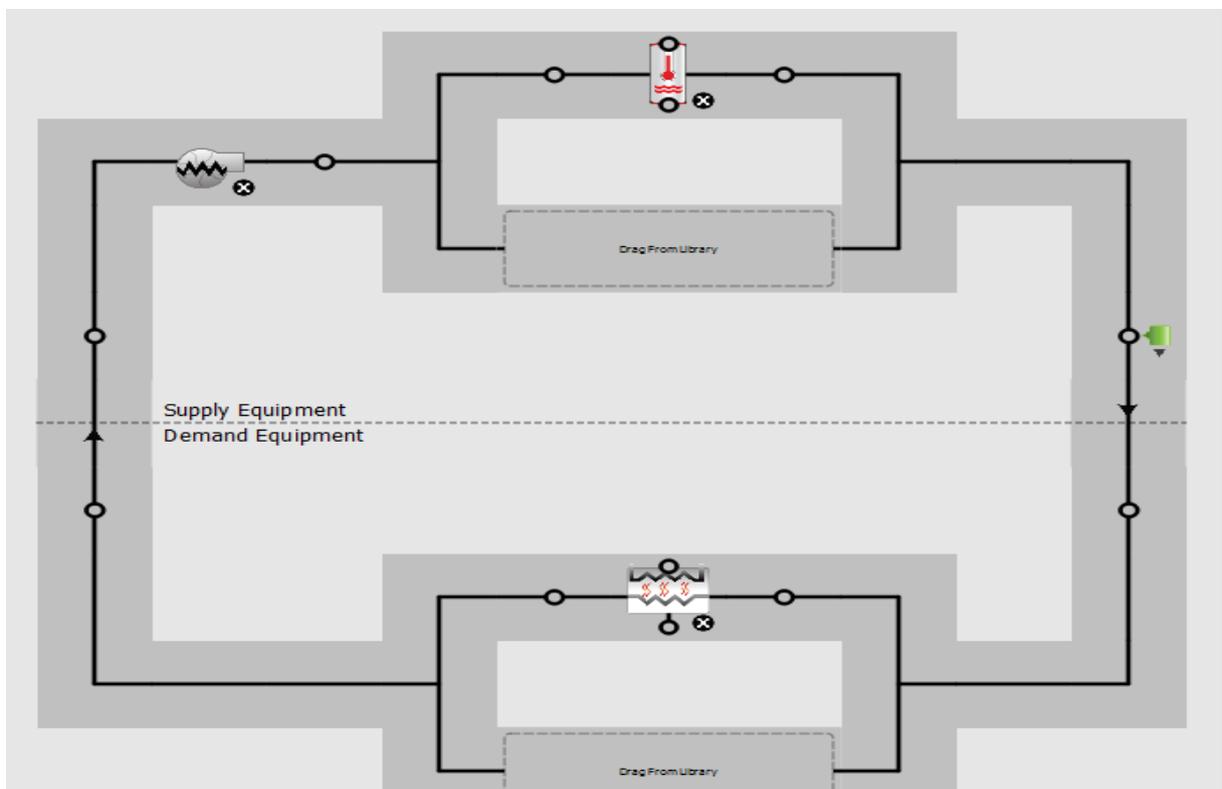


Figura 74 Schema impianto2-lato evaporatore

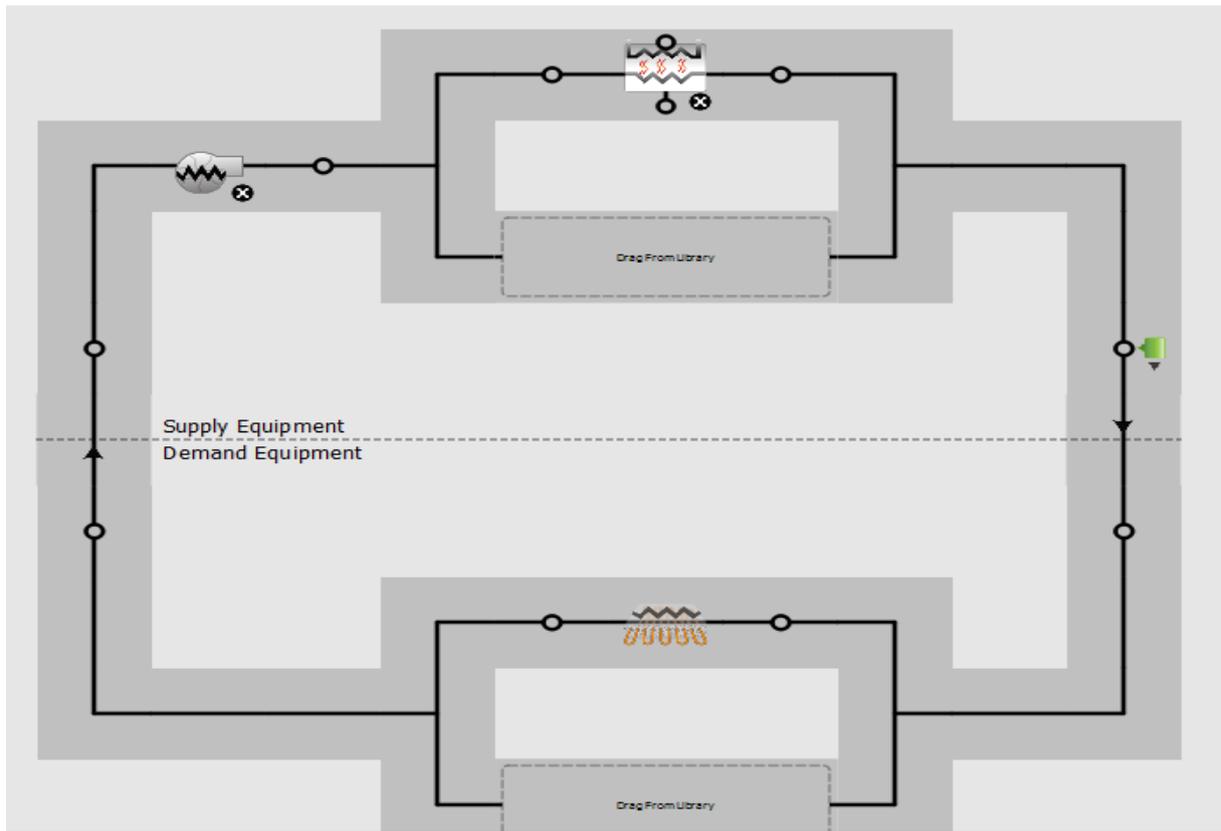


Figura 75 Schema impianto2-lato condensatore

Il serbatoio è stato modellato con un *Water Heater* (Figura 76) con capacità termica nulla, che dal lato “source” riceve costantemente durante l’anno la portata d’acqua, e dal lato “use” scambia energia termica con un fluido termovettore che a sua volta scambia energia nell’evaporatore della pompa di calore.

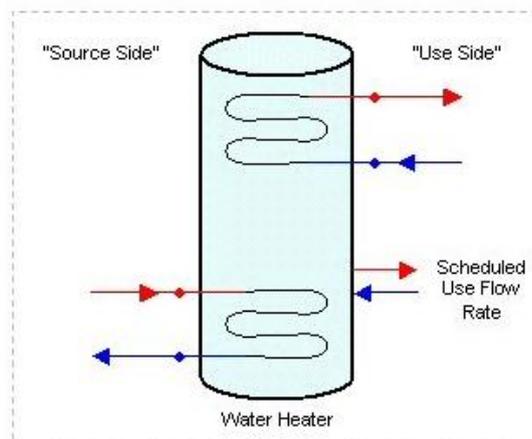


Figura 76 Water heater configuration[46]

Sono state condotte varie simulazioni, inserendo volumi crescenti da 0.5 m^3 a 3 m^3 .

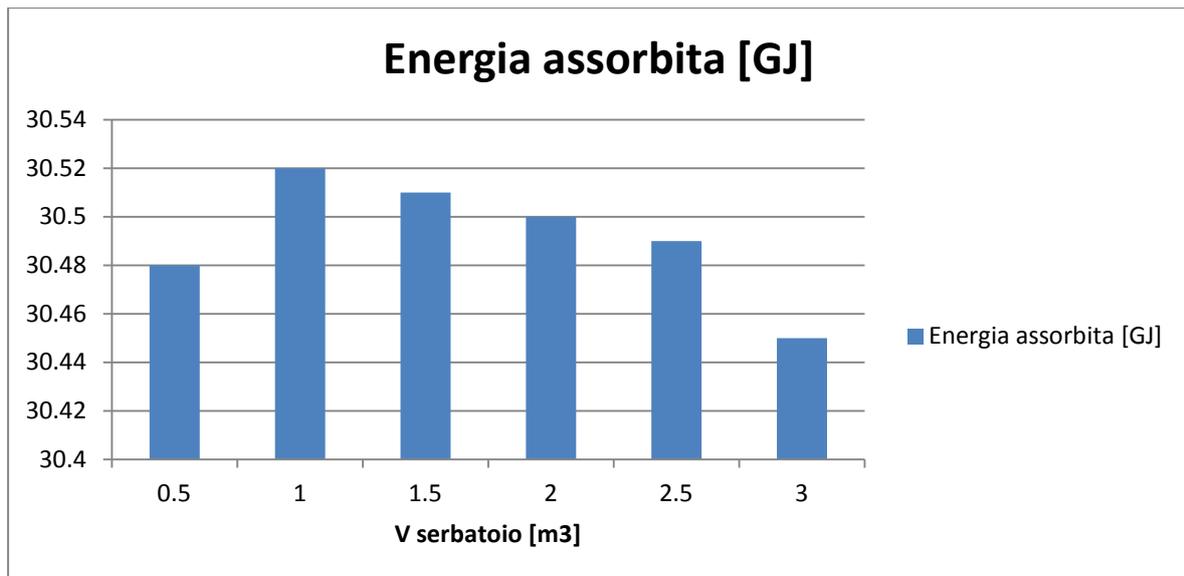


Figura 77 Energia assorbita dall'impianto al variare del volume del serbatoio

Come si può notare dalla Figura 77, l'impianto necessita di una minore quantità di energia elettrica con volumi di serbatoio di 0.5 m³ e 3 m³, rispetto ai casi intermedi.

Una giustificazione di questo andamento si può ottenere dall'osservazione dei grafici di temperatura dell'acqua del serbatoio nei 2 casi estremi (Figura 78 e 79).

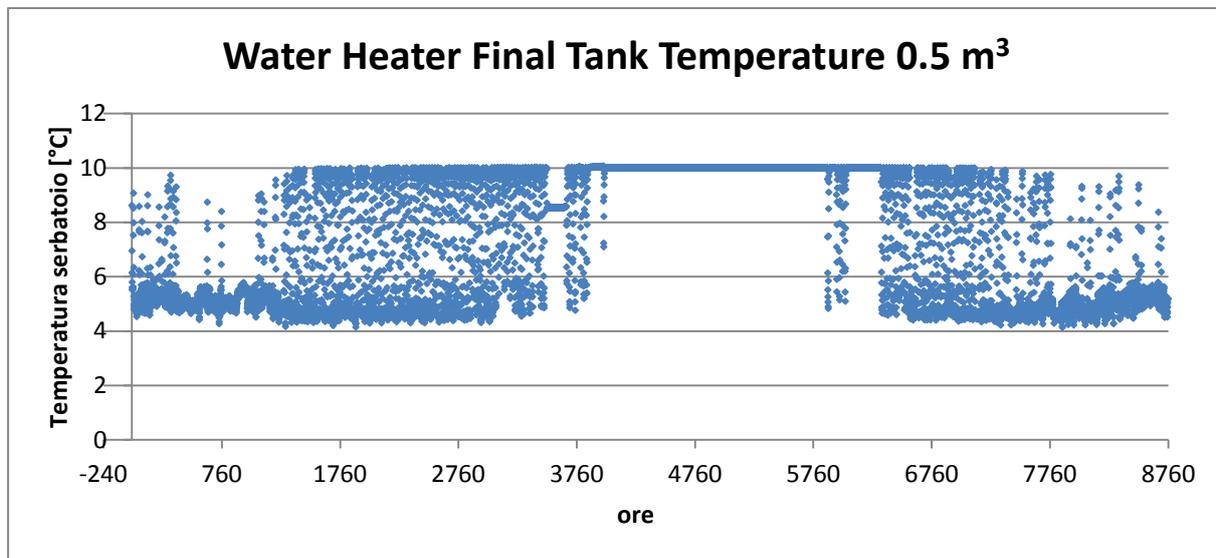


Figura 78 Temperatura oraria del serbatoio da 0.5 m³

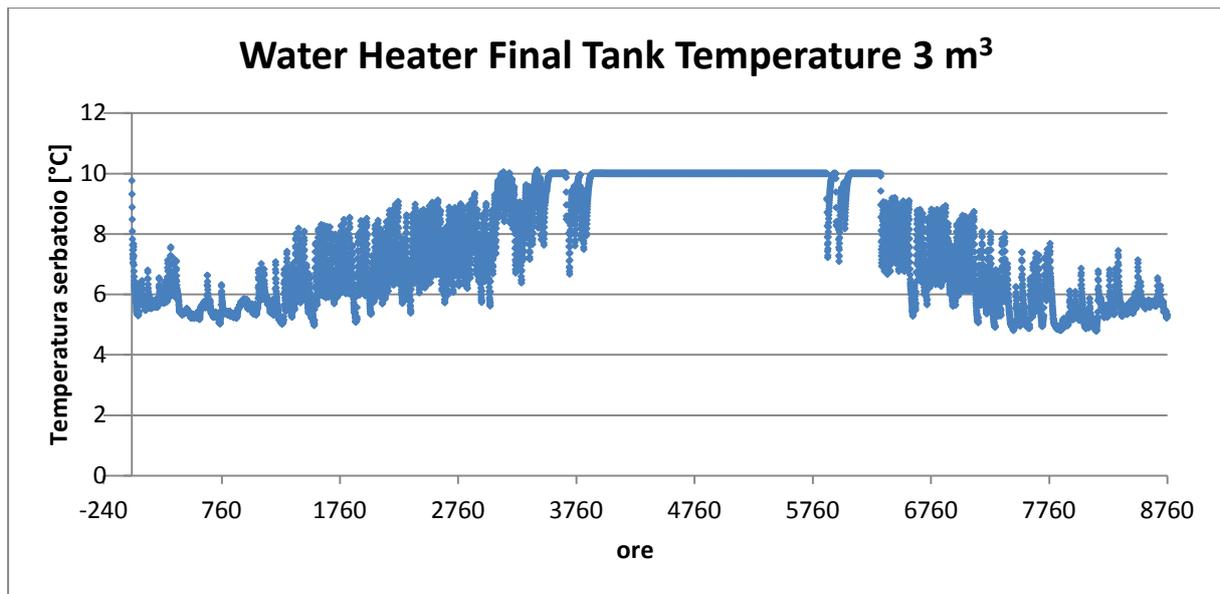


Figura 79 Temperatura oraria del serbatoio da 3 m³

Benché i valori medi siano prossimi l'uno all'altro, nel primo grafico si nota una maggiore dispersione dei dati rispetto al secondo. Questo andamento è giustificato dal fatto che un volume piccolo, avendo una bassa inerzia termica, tende a raffreddare velocemente durante il funzionamento dell'impianto di riscaldamento e a ristabilire altrettanto velocemente una temperatura prossima ai 10°C nelle ore in cui la pompa di calore è spenta e il serbatoio è irrorato dalla sorgente. Questo comportamento non si verifica con il serbatoio da 3 m³ che, con la sua maggiore inerzia termica, subisce variazioni di temperatura meno repentine, raggiungendo temperature minime più alte, 4.9°C, rispetto ai 4°C del volume da 0.5 m³ e a mantenere nel tempo una temperatura più costante. Per queste ragioni, fra i due volumi si è optato per quello maggiore e che garantisce un dispendio energetico minore.

Dai dati forniti dalla simulazione, è stato ricavato il valore massimo di potenza termica richiesta all'evaporatore che è pari a 1588 W. A partire da questo dato, è stata ricavata la portata di fluido termovettore necessaria per garantire un salto termico massimo di 8°C (Eq. 35).

$$\Phi = \dot{m}c_p\Delta T \Rightarrow \dot{m} = \frac{\Phi}{c_p\Delta T} = \frac{1588}{1016 * 8} = 0.19 \text{ kg/s} \quad (35)$$

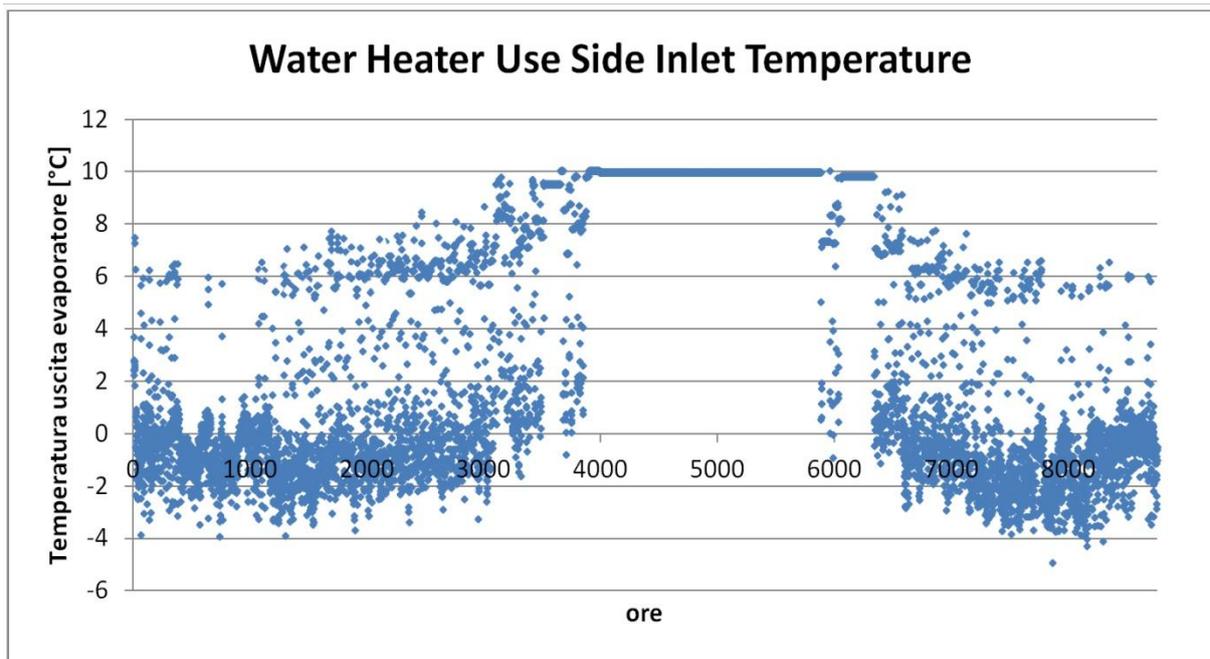


Figura 80 Temperatura oraria di ritorno dall'evaporatore

Poiché dalle simulazioni risulta che l'acqua di ritorno dall'evaporatore, durante il funzionamento, ha una temperatura compresa fra 0 e -3°C (Figura 80), fino a raggiungere punte di -4°C, è necessario far circolare una miscela di acqua e glicole etilenico al 20% in volume per evitarne il congelamento negli scambiatori[47].

Dai dati forniti dal produttore della pompa di calore si può ricavare il grafico dell'andamento del COP della pompa di calore in riscaldamento in funzione della temperatura di ingresso all'evaporatore e al variare della temperatura di mandata al condensatore (Figura 81). Come si può notare, esso cresce al diminuire della differenza fra le temperature di mandata all'utilizzatore e di sorgente all'evaporatore.

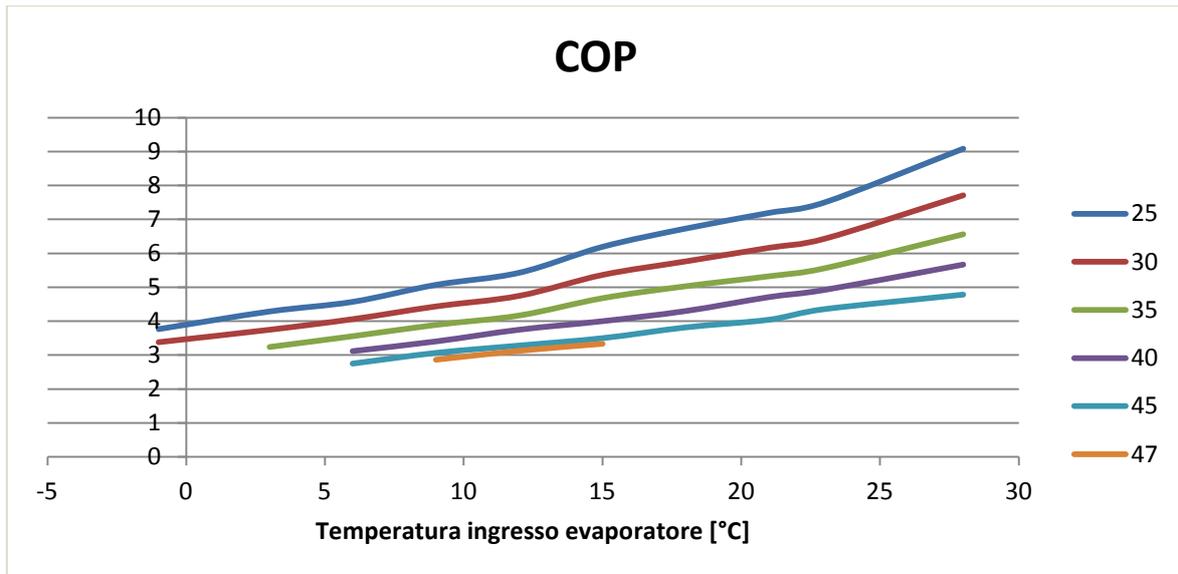


Figura 81 Andamento del COP in riscaldamento in funzione della temperatura di mandata e della temperatura di sorgente

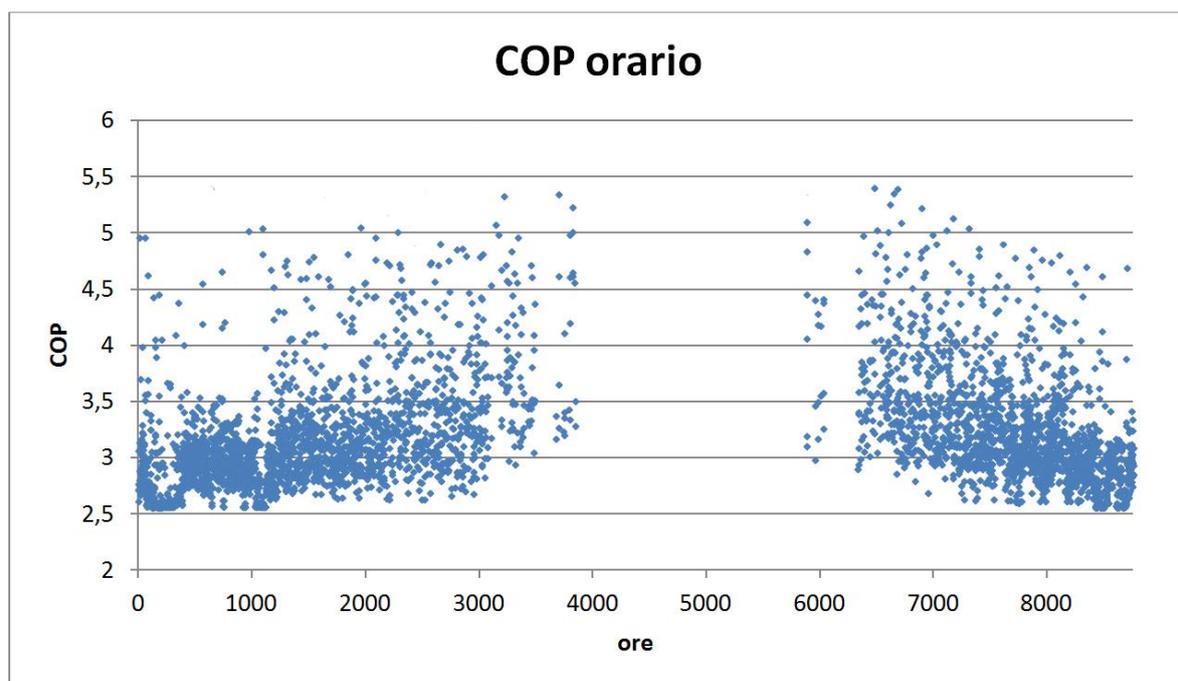


Figura 82 Andamento del COP orario

Il grafico del COP orario (Figura 82) presenta un andamento simile a quello della temperatura del serbatoio, aumenta cioè in prossimità dei mesi più caldi, perché le temperature di serbatoio e di mandata si avvicinano, e decresce nei mesi più rigidi quando la pompa di calore funziona a regime e la temperatura della sorgente è inferiore. Il COP medio stagionale calcolato risulta pari a 2.97, con una quantità di energia elettrica assorbita dall'intero impianto di riscaldamento a 30.45 GJ.

4.3.3 DIMENSIONAMENTO IMPIANTO FOTOVOLTAICO

Integrare sistemi per la produzione di energia rinnovabile negli edifici, oltre ad essere un obbligo di legge per le nuove costruzioni e per le ristrutturazioni importanti, è volto ad ottenere un significativo risparmio energetico per l'edificio, ricorrendo alla fonte energetica rinnovabile rappresentata dal Sole. Ricorrere a tale tecnologia significa evitare inquinamento acustico, ottenere un risparmio di combustibile fossile e dunque evitare la generazione di sostanze inquinanti o ad effetto serra come quelle che invece derivano dalla produzione tradizionale di energia elettrica da centrali termoelettriche.

Il principio progettuale normalmente utilizzato per un impianto fotovoltaico è quello di massimizzare la captazione della radiazione solare annua disponibile: per conseguire questo obiettivo, il generatore fotovoltaico deve essere esposto alla luce solare in modo ottimale, scegliendo prioritariamente l'orientamento a Sud, evitando fenomeni di ombreggiamento che causerebbero perdite di energia incidendo sul costo del kWh prodotto e sul tempo di ritorno dell'investimento [48].

In funzione degli eventuali vincoli architettonici dell'edificio che ospita i pannelli fotovoltaici, nel caso di applicazioni su coperture a falda, è necessario tenere in considerazione che è opportuno mantenere il piano dei moduli parallelo o complanare a quello della falda stessa per non alterare la forma dell'edificio e non aumentare l'azione del vento sui moduli stessi. Per questo motivo la scelta dell'orientazione e dell'inclinazione del generatore risulta obbligata dall'esposizione solare dell'edificio; inoltre, nel caso di applicazioni su coperture a falda, con lo scopo di ridurre il più possibile le perdite per temperatura, è utile disporli in modo che circoli aria fra la parte posteriore dei moduli e la superficie dell'edificio.

Nel caso oggetto di studio, la potenza dell'impianto fotovoltaico è stata determinata in modo tale che la sua producibilità sia in grado di soddisfare il fabbisogno elettrico legato all'impianto di climatizzazione a cui sono stati sommati i kWh mediamente consumati da una famiglia di 4 persone [49]. Ne consegue che i kWh annui su cui si è dimensionato l'impianto sono:

$$E_{\text{impianto}} + E_{\text{elettrodomestici}} = 8458 + 3000 = 11458 \frac{\text{kWh}}{\text{anno}} \quad (36)$$

In base a questo dato, mediante il software PVgis [50], inserendo i dati di latitudine e longitudine dell'edificio, è possibile conoscere le stime delle medie mensili di

irraggiamento su piano orizzontale, sul piano ad inclinazione ottimale e sul piano con inclinazione pari a 25°, che è quello della falda del tetto esposta a sud. I valori ottenuti si possono osservare in Figura 83.

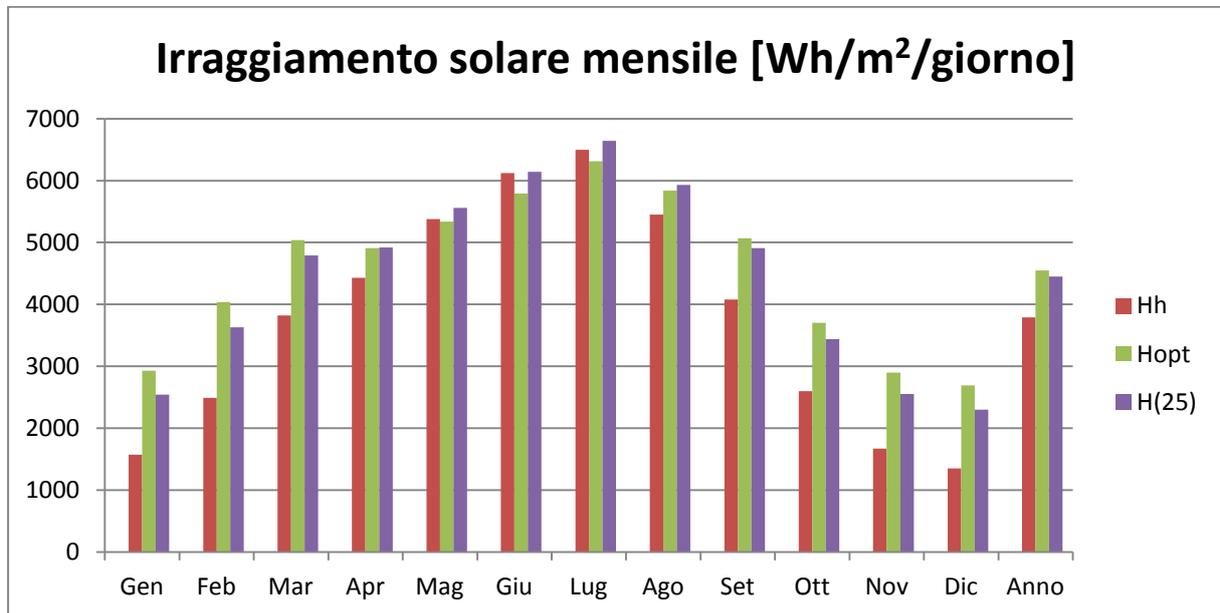


Figura 83 Stima media mensile di irraggiamento su piano orizzontale (Hh), piano ottimale (Hopt) e piano a 25° (H(25))

L'angolo ottimale, ovvero quello che massimizza la producibilità annuale, è di 39°. Si può notare infatti che la radiazione incidente su tale superficie risulta maggiore in inverno, quando l'altezza del sole è bassa, mentre diminuisce nei mesi estivi, in cui è preferibile un'inclinazione inferiore. Tuttavia, nel computo annuale, il valore medio di irraggiamento su una superficie inclinata di 25° rispetto ad una con inclinazione ottimale si discosta solo dello 0.2%, con un massimo del 14.5% nel mese di dicembre. Questa considerazione risulta necessaria nel caso in cui si volesse dimensionare l'impianto in modo da riuscire a soddisfare almeno il 50% del fabbisogno elettrico anche nei mesi invernali: in tal caso, si potrebbe proporre, in sede di ristrutturazione, il rifacimento del tetto con falde aventi inclinazione maggiore di quella attuale.

Per il soddisfacimento del fabbisogno elettrico annuale, dai valori ricavati con PVgis, è necessario installare un impianto di 10 kW di picco che è in grado di fornire rispettivamente 11700 kWh e 12000 kWh per inclinazioni di 25° e 39°, con una produzione elettrica media mensile nel mese di Dicembre pari a 559 kWh e 643 kWh nei due casi specificati.

L'energia elettrica prodotta mensilmente nei due casi è riportata in Figura 84.

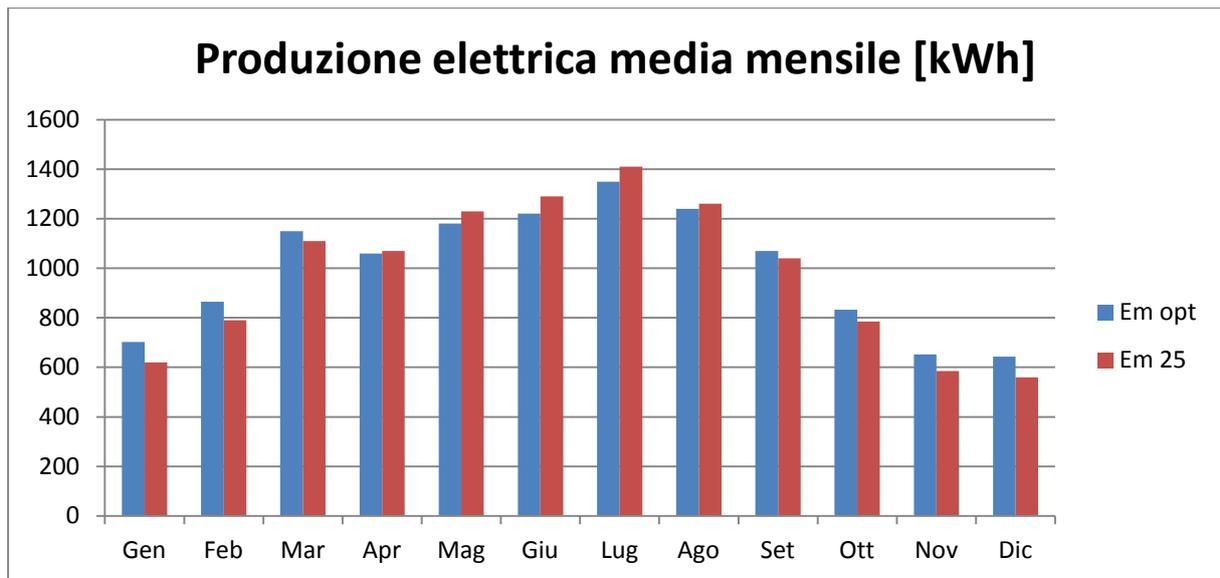


Figura 84 Energia elettrica prodotta mensilmente per pannelli con inclinazione ottimale (Em opt) e di 25°(Em 25)

Questi valori si riferiscono a pannelli in silicio cristallino e tengono conto di una stima di perdite totali del sistema fotovoltaico pari al 27% che considera sia le perdite causate da temperatura e irradianza bassa, sia quelle causate da effetti di riflessione, sia quelle dovute alla resistenza dei cavi, all'inverter, ecc.

Poiché per ogni kW_p sono necessari circa 7 m² di area, la superficie del tetto che sarà occupata dal generatore fotovoltaico è di 70 m², ove la superficie della falda esposta a Sud è di 80 m².

Dalla simulazione lanciata per il solo mese di dicembre, risulta che solo il sistema di riscaldamento, costituito da pompa di calore e gli ausiliari, assorbe una quantità di energia elettrica pari a 1350 kWh, il cui 50% è 675 kWh, valore che poco differisce dalla stima della producibilità dell'impianto fotovoltaico nel mese di Dicembre con pannelli inclinati di 39° (inclinazione ottimale). L'impianto fotovoltaico da 10 kW_p, dunque, non risulta, in ogni caso, capace di soddisfare il 50% della domanda elettrica del mese di Dicembre, considerando anche il consumo relativo all'illuminazione e agli elettrodomestici. Tuttavia esso è stato dimensionato per il soddisfacimento del fabbisogno elettrico annuale.

CAPITOLO 5

RISULTATI ECONOMICI

L'analisi economica affrontata in questa tesi non ha come obiettivo la valutazione dei costi complessivi della ristrutturazione importante a cui verrà sottoposto l'edificio, ma i calcoli che seguono saranno focalizzati sulla componente impiantistica descritta nel precedente capitolo.

Si vuole infatti dimostrare che, al contrario di ciò che si immagina, un investimento economico così importante, raffrontato con quello minimo costituito da una caldaia a GPL, abbia un tempo di ritorno in grado di giustificare ampiamente l'investimento stesso, oltre ai benefici ambientali che si ottengono grazie all'utilizzo di sorgenti rinnovabili.

Il confronto è stato effettuato per la sola stagione invernale, poiché l'edificio non necessita di un impianto per la climatizzazione estiva, a cui si è sommata la componente elettrica legata al fabbisogno di una famiglia tipo, dal momento che si è scelto di dimensionare l'impianto fotovoltaico anche in base a quest'ultima.

Per affrontare questa analisi si è partiti dal costo dell'energia elettrica in Italia con lo scopo di giustificare il risparmio economico e il ritorno dell'investimento.

5.1 Costo dell'energia elettrica in Italia

Nel territorio nazionale, per un contratto per abitazione di residenza, con potenza impegnata di 3 kW, il costo della corrente elettrica varia su 3 fasce orarie e i prezzi calcolati da ARERA (Autorità per Energia Reti e Ambiente) aggiornata al terzo trimestre del 2018 sono riportati nella Figura 85.

1 luglio - 30 settembre 2018	Materia energia			Trasporto e gestione del contatore	Oneri di sistema
	Monorario	Biorario			
Quota energia (euro/kWh)	fascia unica	fascia F1	fascia F2 F3		
kWh/anno: da 0 a 1800	0.09059	0.09945	0.08610	0.00786	0.020626
oltre 1800	0.09475	0.10361	0.09026		0.055465
Quota fissa (euro/anno)	34.7998			19.3200	-
Quota potenza (euro/kW/anno)	-			21.2934	-

Figura 85 Componenti di prezzo energia elettrica

La divisione in fasce orarie (Figura 86) scaturisce dal fatto che il costo dell'energia varia in base alla richiesta, perciò ha lo scopo di disincentivarne l'uso nelle ore di punta a favore delle ore in cui la domanda è più bassa.

F1	Ore di punta	8-19 lun-ven
F2	Ore intermedie	7-8 e 19-23 lun-ven 7-23 del sabato
F3	Ore fuori punta	00-7 e 23-24 lun-sab Tutte le ore della domenica e dei festivi

Figura 86 Fasce di prezzo energia elettrica

Il prezzo finale dell'energia elettrica è dunque composto dalla quota energia che dipende dall'effettivo consumo, dalla quota fissa che si paga per avere un punto di consegna attivo e dalla quota potenza che è proporzionale alla potenza impegnata, anche in assenza di consumo di energia. Infine bisogna calcolare le accise pari a 0.0277 €/kWh sui kWh consumati e applicare l'IVA pari al 10%[51].

5.2 Attualizzazione dei flussi di cassa

Per valutare la fattibilità economica legata all'installazione dell'impianto è necessario:

- quantificare il fabbisogno di energia elettrica;
- stimare la produzione annua di energia con la tecnologia prescelta;
- ricavare le voci di investimento iniziale;
- determinare i flussi di cassa annui in funzione dei parametri economico-finanziari: tassi di sconto, costi di esercizio, incentivi;
- valutare l'economicità dell'investimento attraverso il calcolo del valore attuale netto e del tempo di ritorno.[52]

Una volta calcolate le spese totali annue, si prende come riferimento il valore della situazione standard e si valuta il risparmio economico derivante dalla situazione proposta. Nel caso in cui viene installato l'impianto fotovoltaico, bisogna considerare come risparmio anche il fatto che una parte dell'energia elettrica non viene acquistata dalla rete ma prodotta e direttamente utilizzata.

I flussi di cassa annuali, vale a dire il risparmio annuo, devono poi essere attualizzati per poter confrontare le diverse soluzioni. Il tasso di attualizzazione è quel tasso d'interesse da impiegare per trasferire al tempo 0, cioè "ad oggi", un capitale finanziario disponibile ad una certa data futura, in modo che quel capitale attualizzato, disponibile oggi, sia finanziariamente equivalente al capitale disponibile in data futura. Per l'attualizzazione del costo del denaro, il tasso di interesse r è stato preso pari a 2.18% (valore a maggio 2018) [53], dato con cui si è calcolato il tasso di sconto annuale i con Eq. 37, tramite cui i benefici annui vengono "trasportati" al momento dell'investimento.

$$i = (1 + r)^{-n} \quad (37)$$

Dove n indica l'anno considerato. Tale tasso di interesse viene utilizzato per l'attualizzazione delle rate degli incentivi. Per quanto concerne l'ammontare in € risparmiato rispetto al caso con la caldaia a GPL, il tasso di interesse deve tener conto anche del tasso di aumento del costo dell'energia. Il nuovo tasso di interesse i' si calcola come nell'Eq. 38 :

$$i' = \frac{r - e}{1 + e} \quad (38)$$

Dove e indica il tasso di aumento del costo dell'energia. La stima di tale valore è una previsione ottenuta in base sull'aumento del prezzo dell'energia degli ultimi 10 anni ed è pari al 4%[54].

5.3 Calcolo del VALORE ATTUALE NETTO e del tempo di ritorno

Dopo aver attualizzato i flussi di cassa relativi agli incentivi e ai risparmi conseguiti con la nuova tecnologia, è stato considerato un periodo n di 20 anni come periodo di vita utile dell'impianto ed è stato calcolato il VAN, il valore attuale netto,

cioè il guadagno di denaro che la nuova tecnologia fornirà durante la sua vita utile in confronto a quella presa come riferimento, in base all' Eq.39:

$$VAN = -I + \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} R + \frac{(1+r)^{ni} - 1}{r(1+r)^{ni}} INC \quad (39)$$

Dove:

- I è l'investimento iniziale;
- R è il risparmio annuale;
- ni sono gli anni in cui è erogato l'incentivo;
- INC è la rata annuale degli incentivi.

Il tempo di ritorno dell'investimento è infine il tempo necessario affinché la somma dei valori attuali generati dall'investimento sia sufficiente a ripagare l'investimento iniziale, è cioè il numero di anni necessari per azzerare il VAN.

Per accedere agli incentivi si precisa la definizione di impianto di climatizzazione invernale come definito dalla legge n. 90/2013 che ha modificato il D.lgs 192/05 che recita [55]:

"impianto termico": impianto tecnologico destinato ai servizi di climatizzazione invernale o estiva degli ambienti, con o senza produzione di acqua calda sanitaria, indipendentemente dal vettore energetico utilizzato, comprendente eventuali sistemi di produzione, distribuzione e utilizzazione del calore nonché gli organi di regolarizzazione e controllo. Sono compresi negli impianti termici gli impianti individuali di riscaldamento. Non sono considerati impianti termici apparecchi quali: stufe, caminetti, apparecchi di riscaldamento localizzato ad energia radiante; tali apparecchi, se fissi, sono tuttavia assimilati agli impianti termici quando la somma delle potenze nominali del focolare degli apparecchi al servizio della singola unità immobiliare e' maggiore o uguale a 5 kW. Non sono considerati impianti termici i sistemi dedicati esclusivamente alla produzione di acqua calda sanitaria al servizio di singole unità immobiliari ad uso residenziale ed assimilate."

Poiché sono presenti camini aperti e una stufa per una somma che supera i 5 kW di potenze nominali del focolare, si può accedere all'Ecobonus o al Conto Termico 2018 in base alla voce: sostituzione di impianti di climatizzazione invernale esistenti con impianti di climatizzazione invernale dotati di pompe di calore, elettriche o a gas, utilizzanti energia aerotermica, geotermica o idrotermica [10].

5.4 SCENARI ANALIZZATI

5.4.1 Scenario standard: Caldaia a GPL

Il caso standard è simulato da una caldaia a gas GPL che funziona solamente come generatore di calore nella stagione di riscaldamento a cui sono state aggiunte le spese per il fabbisogno elettrico annuale. Nel modello sono stati inseriti i dati di targa forniti dal datasheet di una caldaia presente in commercio[56], presentati in Figura 87:

Combustibile	GPL	
Potenza termica nominale	24	kW
Rendimento nominale	90.3	%
Portata nominale in riscaldamento	1032	l/h
Temperatura di regolazione andata	35-80	°C

Figura 87 Grandezze di targa caldaia a GPL

Inserendo questi dati nel software, è stato ottenuto in output un valore di 79243 MJ di energia da propano consumata, che tiene già conto del rendimento di conversione. In base al potere calorifico inferiore del GPL [57], si calcolano i litri annui necessari:

$$V = \frac{E_{GPL}}{PCI} = \frac{79243 [MJ]}{26.1 \left[\frac{MJ}{l}\right]} = 3036 [l] \quad (40)$$

Considerando un costo del GPL per riscaldamento pari a 1.25 €/l [58], in base ai dati forniti dalla Camera di Commercio di Torino, non essendo il GPL tra i prodotti petroliferi rilevati a livello nazionale dal Ministero dello Sviluppo Economico, la spesa annuale per il combustibile risulta di 3795 €, a cui bisogna sommare la spesa per l'elettricità assorbita dalle pompe, pari a 100 kWh/anno e quella relativa agli elettrodomestici ipotizzata pari a 3000 kWh/anno.

Assumendo il prezzo dell'energia elettrica pari a 0.206 €/kWh [59], comprese accise e quote fisse, la spesa relativa all'energia elettrica risulta di 639 €.

I costi operativi totali, nel caso standard, sono pari a 4434 €/anno.

I costi di investimento invece sono in Figura 88:

Costo caldaia	580 €
Costo installazione	340 €
Costo accessori	110.25 €
Costi di manutenzione	140 €
Totale costi di investimento	1030.25 €

Figura 88 Costi di investimento caldaia a GPL [55]

I valori di costo di investimento, di costi operativi e costi di manutenzione calcolati nel caso standard, saranno necessari per valutare i risparmi conseguibili nei due casi seguenti.

5.4.2 Caso 1: POMPA DI CALORE

Le varie componenti di costo relativi alla pompa di calore, secondo quanto indicato dai produttori sono in Figura 89:

Costo pompa di calore	7700 €
Costo installazione+accessori	2000 €
Costo serbatoio	1312 €
Costi di manutenzione	200 €
Totale costi di investimento	11012 €

Figura 89 Costi di investimento pompa di calore [61][62]

In questo caso, la quantità di energia elettrica necessaria per il sistema di riscaldamento risulta di 8458 kWh/anno a cui si aggiunge la quota consumata dagli elettrodomestici, ottenendo dei costi operativi pari a 2360 €.

A fronte di un investimento maggiore, si ottiene un risparmio annuo in termini di energia paria a 2073 €, a cui aggiungere gli incentivi relativi all'installazione di una pompa di calore.

Considerando l'Ecobonus 2018, in seguito all'installazione di una pompa di calore, si ottiene il bonus Irpef che consiste in una detrazione fiscale pari al 65% dell'importo delle spese sostenute, erogato in 10 anni.

In base alle considerazioni appena fatte, è stato calcolato il VAN dell'impianto con pompa di calore che risulta positivo, indice che l'operazione crea profitto nel periodo di tempo considerato, e pari a 45530 € e 39260 € nel caso in cui non fosse possibile rientrare negli incentivi.

5.4.3 Caso 2: POMPA DI CALORE + pannelli fotovoltaici

In questo secondo caso, viene valutata la convenienza economica dell'accoppiamento dell'impianto con pompa di calore del caso precedente con un impianto fotovoltaico in grado di coprire l'intero fabbisogno elettrico annuale.



Figura 90 Pannelli fotovoltaici non ventilati CONERGY PowerPlus 250P [63]

Si è ipotizzato di installare 40 pannelli fotovoltaici non ventilati CONERGY PowerPlus 250P in silicio policristallino (Figura 90) con potenza di picco pari a 250 W_p . La potenza di picco totale installata è pari a 10 kW_p e la falda del tetto scelta è quella orientata verso sud (orientamento 15°).

I costi di investimento relativi a questo caso sono costituiti da quelli della pompa di calore a cui vanno sommati quelli dell'impianto fotovoltaico presentati in Figura 91:

Costo pannelli	13000 €
Costo inverter *	1000 €
Costo manodopera e materiale per posa in opera	2000 €
Costo manutenzione	150 €
Totale costi di investimento PDC+PV	26912 €
*l'inverter è da sostituire ogni 10 anni	

Figura 91 Costi di investimento pannelli fotovoltaici [64][65][66]

Il fabbisogno di energia elettrica, in questo caso, è lo stesso di quello calcolato nel caso precedente perché non cambia la tipologia di impianto. Quello che cambia è la fonte di approvvigionamento dell'energia elettrica, che viene coperta mediante la produzione dell'impianto fotovoltaico.

Oggi, anche se il sistema di incentivazione statale non è più attivo, installare il fotovoltaico conviene ancora in quanto i pannelli di ultima generazione hanno rendimenti sempre migliori e il loro costo si è abbassato notevolmente negli anni. Inoltre, fino al 31 dicembre 2018 è possibile usufruire della detrazione fiscale del 50% sul costo di investimento[67].

Inoltre è possibile stipulare un contratto col GSE chiamato Scambio sul posto (SSP) il quale permette di immettere in rete l'energia elettrica prodotta dal proprio impianto e che non viene auto consumata [68]. Il GSE permette quindi di utilizzare il sistema elettrico nazionale per immagazzinare l'energia in eccesso vendendola e poi ricomprandola a tariffe agevolate successivamente.

Dal software si è potuto conoscere la quantità di energia immessa in rete, quella prelevata dalla rete e la quota auto consumata, da cui si sono calcolati i costi e i risparmi annui che ne derivano, come suddiviso nelle tabelle in Figura 92 e Figura 93.

Energia prelevata [kWh/anno]	Energia immessa [kWh/anno]	Energia netta dalla rete [kWh/anno]	Autoconsumo [kWh/anno]
8708	10198	1490	2750

Figura 92 Quote di energia scambiata con la rete elettrica e prodotta dall'impianto

Costi energia prelevata [€/anno]	Rimborso SSP [€/anno]	Ricavi vendita [€/anno]	Risparmio autoconsumo [€/anno]
1742	1219	149	550

Figura 93 Costi energia elettrica prelevata rimborsi SSP e risparmi autoconsumo

In conclusione, i costi operativi in tal caso risultano di 404 €/anno, comprensivi della tariffa a copertura degli oneri di gestione, verifica e controllo da versare al GSE di 30 €/anno [69].

In base a tutte queste considerazioni, è stato calcolato il VAN dell'impianto costituito da pompa di calore e pannelli fotovoltaici che risulta pari a 84000 € e 70612 € nel caso in assenza di incentivi.

Avendo stimato i costi iniziali di investimento per le alternative proposte a partire dalla situazione standard, e i rispettivi costi annui, è possibile calcolare il tempo di ritorno economico delle diverse soluzioni attualizzando i flussi di cassa.

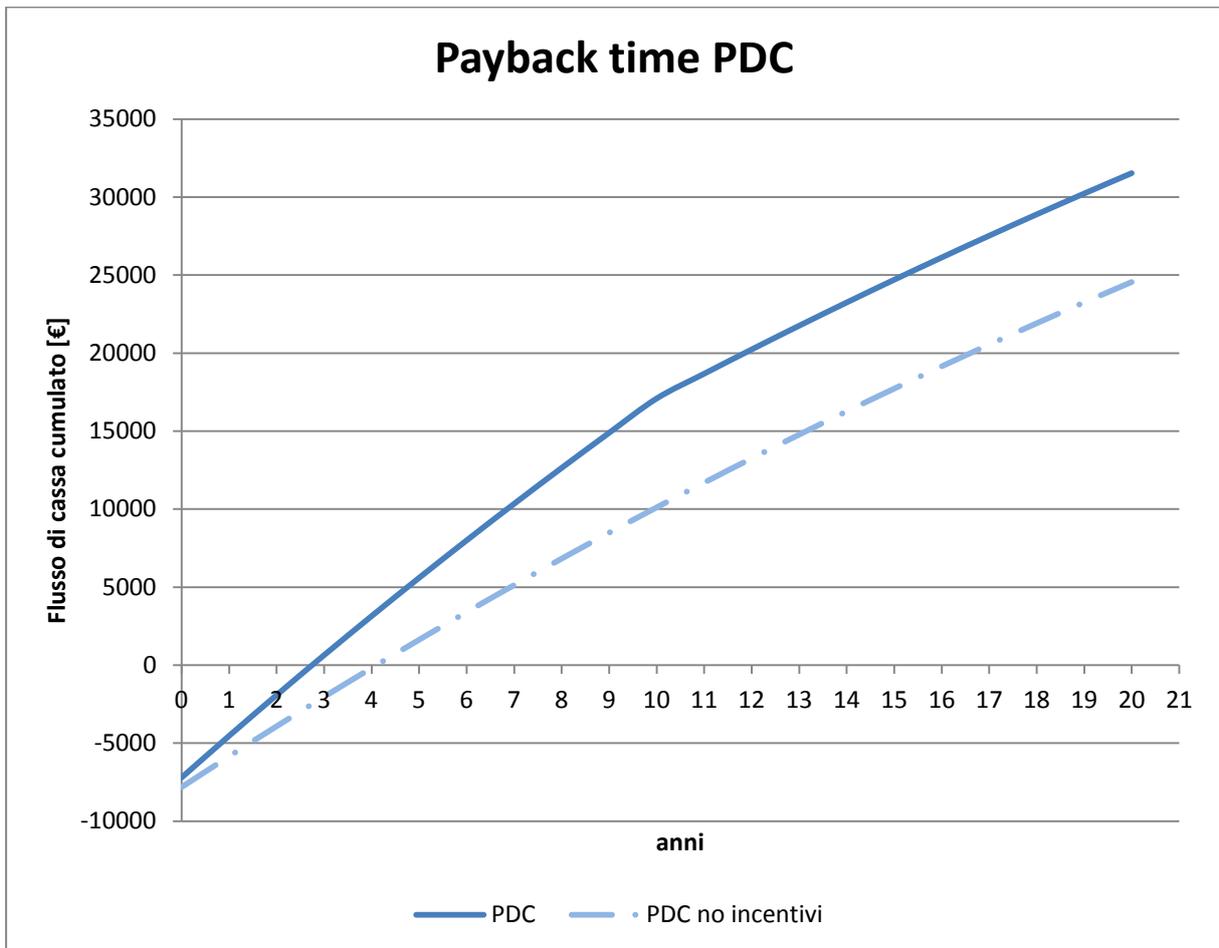


Figura 94 Payback time impianto pompa di calore

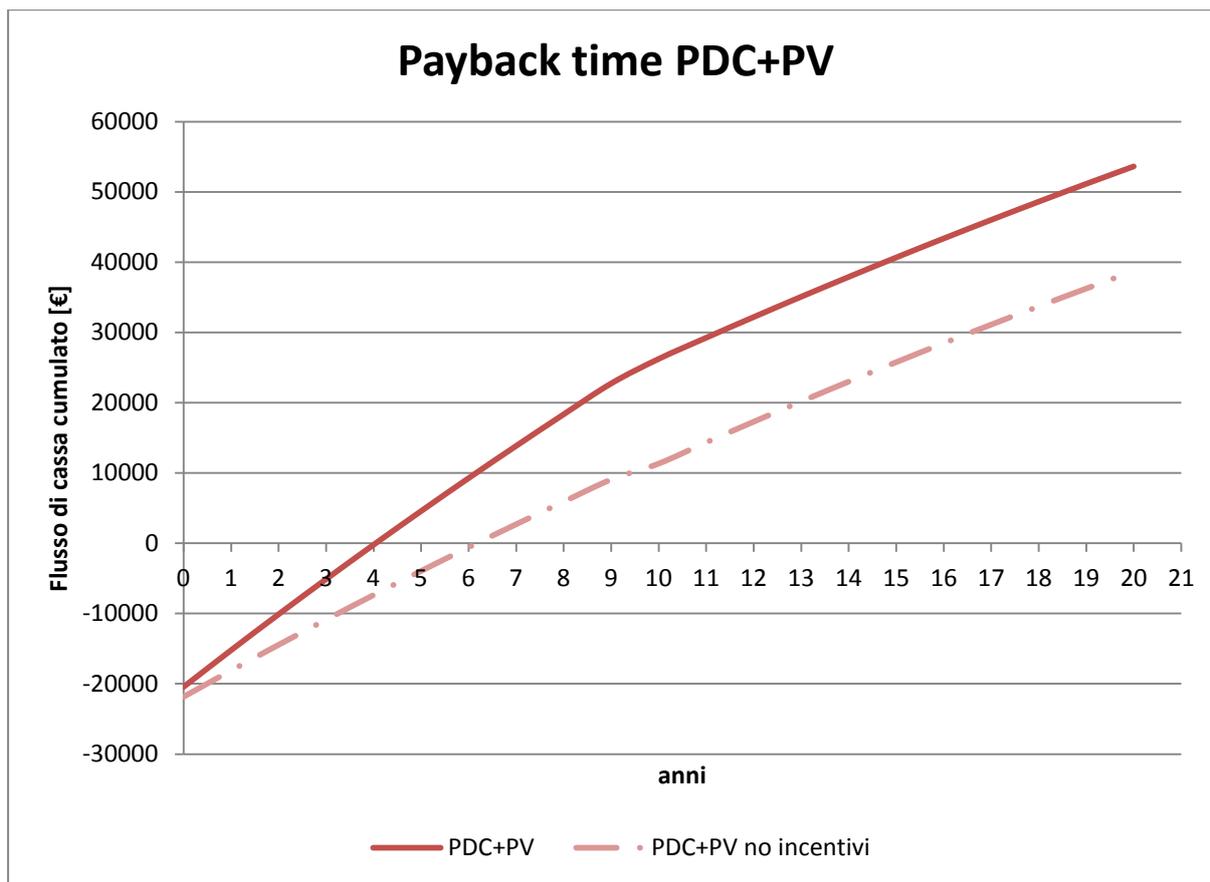


Figura 95 Payback time impianto pompa di calore e pannelli fotovoltaici

Nei grafici in Figura 94 e Figura 95 sono stati inseriti i flussi di cassa relativi all'impianto costituito solo dalla pompa di calore e quelli relativi alla combinazione di pompa di calore e impianto fotovoltaico, sia nel caso di accesso agli incentivi fiscali (linea continua) sia in caso di assenza di incentivi (linea tratteggiata).

Come si può osservare il tempo di ritorno economico dell'investimento risulta di poco meno di 3 anni per la sola pompa di calore e di 4 anni con la sua combinazione con la tecnologia fotovoltaica considerando gli incentivi, mentre aumenta rispettivamente a 4 e 6 anni nel caso in cui non fosse possibile accedervi o se nel futuro prossimo venissero eliminati.

Poiché la differenza nel tempo di ritorno dell'investimento non risulta eccessiva, è in generale conveniente investire su queste tecnologie ad alta efficienza, piuttosto che risparmiare nell'investimento iniziale per poi avere dei costi operativi elevati. Si nota infatti che l'investimento in queste tecnologie non solo viene recuperato in breve tempo ma genera anche un sostanzioso profitto nel corso della vita dell'impianto.

In particolare, per l'impianto considerato nel Caso 2, a fronte di un investimento di 27000 euro e un tempo di ritorno maggiore, abbia un VAN quasi raddoppiato rispetto al Caso 1. Confrontando questa situazione rispetto alla sola pompa di calore, piuttosto che rispetto al caso standard di caldaia a GPL, dal grafico in Figura 96, dall'intersezione fra la linea blu e quella rossa si ottiene il tempo di ritorno dei soli pannelli fotovoltaici che risulta di 5.5 e 9 anni rispettivamente con e senza incentivi.

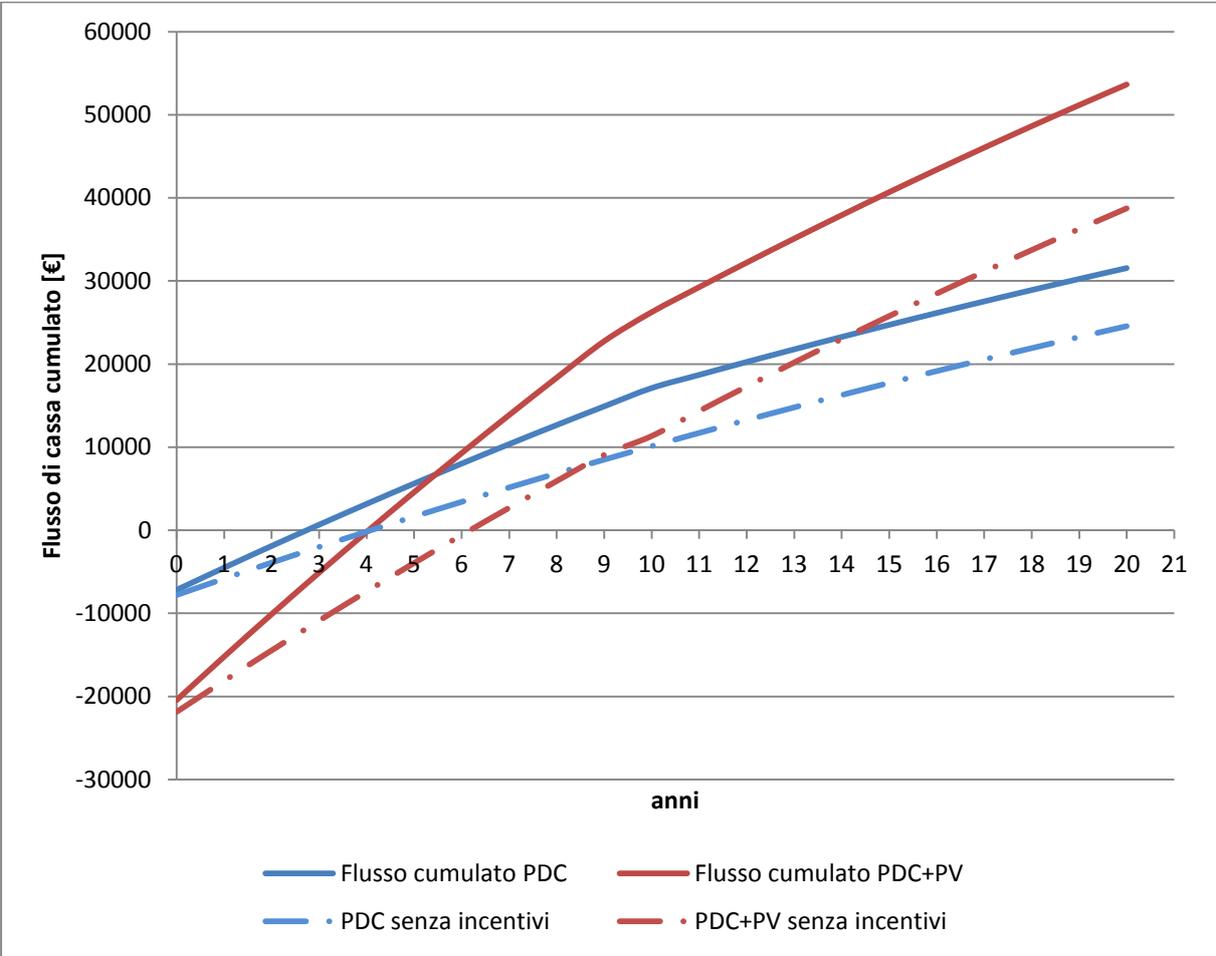


Figura 96 Payback time Caso 1 e Caso 2 a confronto

CONCLUSIONI

L'Unione Europea ha constatato che il settore edilizio è responsabile del 40% dei consumi energetici del nostro continente e, nella misura del 36% delle emissioni europee totali di gas serra. A partire da questi dati, si stima un elevato potenziale di miglioramento, conseguibile attraverso l'approvazione di normative volte alla realizzazione di strutture energeticamente efficienti in termini di riduzione dei consumi di energia, di impiego di fonti rinnovabili per coprire gran parte del fabbisogno energetico, diminuendo quindi sostanzialmente le emissioni di gas serra. Nel presente elaborato è stata condotta l'analisi energetica di un edificio rurale situato in Rocca Canavese. A seguito dello studio dello stato di fatto, condotto attraverso la costruzione di un modello in *EnergyPlus* in grado di fornire un andamento delle temperature prossimo a quelle rilevate *in loco*, si è partiti da una condizione valida del modello dell'edificio, da cui si è potuto ricavare il fabbisogno termico allo stato attuale, non disponendo di dati di consumi storici.

A partire da questo modello sono state progressivamente apportate delle modifiche alla struttura e ai serramenti, valutando di volta in volta il beneficio che ne deriverebbe in termini di risparmio energetico. Le modifiche sono state apportate seguendo le indicazioni del DM 26/06/2015 che fornisce le trasmittanze termiche massime consentite per le ristrutturazioni importanti. Non ci si è spinti troppo al di sotto di questi valori, dato che sono stati definiti come compromesso fra sovra costi e risparmio energetico.

In particolare si è partiti da un fabbisogno termico invernale pari a 364 kWh/m², a cui è stato sostituito il tetto ottenendo una riduzione del 18%, i serramenti e relative infiltrazioni d'aria che hanno procurato un risparmio del 40%, il pavimento e il solaio del primo piano adiacente al sottotetto con un ulteriore 30% e infine l'isolamento delle componenti verticali opache che garantiscono un risparmio del 28%.

Si è partiti da un valore iniziale di 364 kWh/m² e si è ottenuto un valore finale pari a 89 kWh/m², con un abbattimento dei consumi del 75%.

Con un fabbisogno ridotto, è stato possibile pensare di introdurre un sistema di riscaldamento a bassa entalpia, costituito da pannelli radianti alimentati da una pompa di calore acqua-acqua, che sfrutta l'energia termica di una sorgente d'acqua presente in prossimità dell'edificio, per alimentare l'evaporatore della macchina. Dal

momento che la portata di tale sorgente non è elevata ed è ben al di sotto dei valori consigliati dalle case produttrici, dalle simulazioni sono state ottenute temperature di output al di sotto dello 0. Questo, inevitabilmente, provocherebbe problemi allo scambiatore.

Per ovviare al problema è stato inserito un serbatoio in grado di collezionare l'acqua proveniente dalla sorgente e in cui è immerso lo scambiatore di calore. Il serbatoio, con la sua inerzia termica, permette alla pompa di calore di lavorare con una sorgente a temperatura circa costante e maggiore di 5°C.

Successivamente, è stato dimensionato un impianto fotovoltaico da disporre sulla falda del tetto esposta a Sud, in modo tale da soddisfare il fabbisogno elettrico dell'impianto di riscaldamento e del consumo medio di una famiglia tipo, e si è constatato che nel mese più critico di Dicembre (in termini di producibilità dell'impianto) il 50% del fabbisogno elettrico non è soddisfatto né con inclinazione dei pannelli pari a 25° (inclinazione attuale della falda del tetto), né con un'inclinazione ottimale di 39°, sebbene la stima di energia elettrica prodotta nel mese in considerazione risulti maggiore in quest'ultimo caso. La scelta quindi dipenderà essenzialmente dall'entità dei costi legati al rifacimento del tetto.

Infine, è stata condotta un'analisi economica con calcolo del VAN e del tempo di ritorno relativi all'installazione del solo impianto con pompa di calore e della combinazione di pompa di calore e impianto fotovoltaico, rispetto all'installazione di una caldaia a condensazione a GPL che comporterebbe, invece, un basso costo di investimento iniziale. Da questa analisi si è constatato che l'utilizzo della pompa di calore, a fronte di un investimento iniziale rilevante, dà luogo a costi operativi nettamente inferiori rispetto al caso standard con caldaia a GPL, oltre all'accesso agli incentivi, con un tempo di ritorno dell'investimento iniziale pari a 3 anni. Con l'installazione dell'impianto fotovoltaico, che genera un abbattimento sostanziale dei costi operativi, il tempo di ritorno aumenta a 4 anni, se si accede alle detrazioni al 50% per il fotovoltaico, ancora validi fino a Dicembre 2018, mentre sarà di 6 anni nel caso in cui non venissero riconfermati negli anni futuri.

In ogni caso, nella peggiore ipotesi, un tempo di ritorno di 6 anni, a fronte di un periodo di vita utile dell'impianto di 20 anni, rende l'installazione di questo impianto appetibile e consigliata. Attraverso il calcolo del Valore Attuale Netto, infatti, si stima che il guadagno di denaro ottenuto in 20 anni di periodo di monitoraggio sarà intorno a 40000 € per il solo impianto con pompa di calore e intorno a 75000 € per la sua

combinazione con il fotovoltaico, fra risparmi derivanti dalla riduzione dei costi operativi e incentivi ottenuti.

Un'ultima considerazione può essere fatta se si dovesse decidere di utilizzare dei pannelli solari per la produzione di acqua calda sanitaria. In tal caso si potrebbe procedere con uno studio sulla fattibilità di inviare l'energia termica, prodotta in eccesso nei momenti della giornata in cui c'è bassa richiesta, al serbatoio con cui scambia calore l'evaporatore della pompa di calore. Questo fa sì che la sorgente termica all'evaporatore si trovi a una temperatura maggiore, consentendo alla macchina di operare con un COP maggiore e di conseguenza di ridurre ulteriormente l'assorbimento di energia elettrica.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] Parlamento europeo e del Consiglio, *Direttiva 2012/27/UE* [25 ottobre 2012]]; Disponibile all'indirizzo: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A32012L0027>
- [2] ENEA, *Analisi e Risultati delle Policy di Efficienza Energetica del Nostro Paese* [2017]; Disponibile all'indirizzo: <http://www.enea.it/it/seguici/pubblicazioni/pdf-volumi/raee-2017.pdf>
- [3] ENEA, RSE e CTI, con il coordinamento del Ministero dello sviluppo economico, *Piano d'Azione Nazionale per incrementare gli edifici ad energia quasi zero* [Dicembre 2016]; Disponibile all'indirizzo: www.sviluppoeconomico.gov.it/.../all_decreto_interm...no_2017_panzeb.pdf
- [4] Parlamento europeo e del Consiglio, *Direttiva 2010/31/UE* [19 Maggio 2010]; Disponibile all'indirizzo: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/ALL/?uri=CELEX:32010L0031>
- [5] Ministero dello sviluppo economico e Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare, *Strategia Energetica Nazionale* [10 Novembre 2017]; Disponibile all'indirizzo: <http://www.sviluppoeconomico.gov.it/images/stories/documenti/Testo-integrale-SEN-2017.pdf>
- [6] *Gazzetta Ufficiale - LEGGE 3 agosto 2013, n. 90* [3 Agosto 2013]; Disponibile all'indirizzo: <http://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2013/08/03/13G00133/sg>
- [7] Ministro dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare e Ministro delle infrastrutture e dei trasporti, *Decreto 26 giugno 2015* [26 Giugno 2015]; Disponibile all'indirizzo: <http://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2015/07/15/15A05198/sg>
- [8] Ministero dello sviluppo economico, *DECRETO 26 giugno 2015*; Disponibile all'indirizzo: <http://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2015/07/15/15A05198/sg>

- [9] Voltimum Italia S.r.l., *Guida agli edifici a energia quasi zero (NZEB): Definizione, requisiti, costi e incentivi* [citato nel 2018]; Disponibile all'indirizzo: <https://www.voltimum.it/content/nzeb-edifici-energia-quasi-zero>
- [10] GSE - Gestore Servizi Energetici, *Conto Termico* [citato nel 2018]; Disponibile all'indirizzo: <https://www.gse.it/servizi-per-te/efficienza-energetica/conto-termico>
- [11] Ministro dello sviluppo economico, Ministro dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare e Ministro delle politiche agricole alimentari e forestali, *Decreto 28 Dicembre 2012* [28 Dicembre 2012]; Disponibile all'indirizzo: <http://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2013/01/02/12A13721/sg>
- [12] *Art.4 - Tipologia di interventi incentivabili* [citato nel 2018]; Disponibile all'indirizzo:
http://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaArticolo?art.progressivo=0&art.idArticolo=4&art.versione=1&art.codiceRedazionale=16A01548&art.dataPubblicazioneGazzetta=2016-03-02&art.idGruppo=0&art.idSottoArticolo1=10&art.idSottoArticolo=1&art.flagTipoArticolo=0
- [13] *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n.302 del 29.12.2017* [29 Dicembre 2017]; Disponibile all'indirizzo:
<http://www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/2017/12/29/302/sg/pdf>
- [14] ENEA - Agenzia Nazionale Efficienza Energetica, *Detrazioni fiscali per l'efficienza energetica* [citato nel 2018]; Disponibile all'indirizzo:
<http://www.acs.enea.it/>
- [15] ENEA Ministro dello sviluppo economico Detrazioni, *Decreto 11 marzo 2008* [11 Marzo 2008]; Disponibile all'indirizzo:
http://efficienzaenergetica.acs.enea.it/doc/dm_11-03-08_coordinato_%20con_dm_26-1-10.pdf
- [16] ENEA Ministro dello sviluppo economico Detrazioni, *Decreto 26 gennaio 2010* [26 Gennaio 2010]; Disponibile all'indirizzo:
http://www.acs.enea.it/doc/dm_26-1-10.pdf
- [17] U.S. Department of Energy, *EnergyPlus Version 8.9.0 Documentation-Getting Started*; Disponibile all'indirizzo:

- https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel_custom/pdfs/pdfs_v8.9.0/GettingStarted.pdf
- [18] UNI/TR 11552:2014 Abaco delle strutture costituenti l'involucro opaco degli edifici - Parametri termofisici [2014]
- [19] Descrizione grandezze di un weather file, disponibile all'indirizzo:
<https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-3/auxiliary-programs/energyplus-weather-file-epw-data-dictionary.html#field-dry-bulb-temperature>
- [20] Coordinate Rocca Canavese disponibili all'indirizzo: <http://www.comuni-italiani.it/001/221/clima.html>
- [21] Datasheet data logger di temperatura e umidità disponibile all'indirizzo:
<https://www.lascarelectronics.com/easylog-data-logger-el-usb-2-lcd/>
- [22] Datasheet pannello PV 10W disponibile all'indirizzo:
<https://www.marlec.co.uk/product/spectralite/?v=cd32106bcb6d>
- [23] Datasheet data logger della tensione disponibile all'indirizzo:
<https://www.lascarelectronics.com/easylog-data-logger-el-usb-3/>
- [24] Simona Di Dio e Prof. Diego Colombo, *Celle Fotovoltaiche* [A.A 2007-2008], disponibile all'indirizzo:
<http://www.ing.unitn.it/~colombo/Celle%20fotovoltaiche/Relazione%20simona11.htm>
- [25] Duffie JA, Beckman WA (1991), *Solar Engineering of Thermal Processes* 2nd edition, Wiley, New York, NY
- [26] Weather data-design day disponibile all'indirizzo:
<https://energyplus.net/weather>
- [27] Stratigrafia tetto disponibile all'indirizzo:
<http://risponde.promolegno.com/domanda/data/quale-puo-essere-un-pacchetto-di-copertura-adatto-ad-evitare-le-condense-interstiziali/>
- [28] Caratteristiche telo traspirante disponibili all'indirizzo:
https://www.kloeber.it/prodotti/Linea_di_Colmo/brochure/brochure.Manuale_tecnico_Kloeber.pdf
- [29] Caratteristiche fibra di legno disponibili all'indirizzo:
<https://www.gruppoivas.com/txt/tecnico/it/FIBRA%20DI%20LEGNO.PDF>
- [30] Doninelli, M., *Gli impianti a pannelli radianti. Quaderni Caleffi*

- [31] Dettagli isolanti per cappotto interno/esterno disponibili all'indirizzo:
https://www.edilportale.com/news/2015/11/focus/il-miglior-isolante-termico-per-la-tua-casa-la-guida-per-sceglierlo_48846_67.html
- [32] Caratteristiche canapa disponibili all'indirizzo:
http://www.abitaremediterraneo.eu/catalogo/uploaded_files/componenti/alllegato_01_050412195150.pdf
- [33] Presidente della Repubblica, Decreto Legislativo 3 marzo 2011, n. 28, Attuazione della direttiva 2008/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE, 2011: Gazzetta Ufficiale della Repubblica italiana.
- [34] Cali M. e Gregorio P., 2006, Termodinamica, Progetto Leonardo, Bologna, Italia
- [35] Velders, G.J., et al., The importance of the Montreal Protocol in protecting climate. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2007. 104(12): p. 4814-4819.
- [36] Doninelli, *Pompe di calore*. Quaderni Caleffi 2007.
- [37] Machinery equipment online. Basic Open System Cycles: Vapor Refrigeration/Heat Pump Cycle. 2015; Disponibile all'indirizzo:
<http://machineryequipmentonline.com/hvac-machinery/basic-open-system-cyclesvapor-refrigerationheat-pump-cycle/>.
- [38] Comini G., Croce G., Savino S., 2011, Energetica Generale, SGEEditoriali, Padova, Italia
- [39] UNI EN, 255-1: Condizionatori, refrigeratori di liquido e pompe di calore con compressore elettrico - Riscaldamento - Terminologia, definizioni e designazione. 1998.
- [40] Green Technology Store. Climatizzazione con pompa di calore elettrica. 2015; Disponibile all'indirizzo: <http://www.greentecstore.it/joomla/link-per-climatizzazioni/climatizzazione-con-pompa-di-calore-elettrica.html>
- [41] Tavole dei parametri precalcolati di pavimenti radianti caldi disponibili all'indirizzo:
http://www.idronicaline.net/admin/tiny_mce/plugins/filemanager/files/pdf/letteratura/Resa_termica_pavimenti_radianti_caldi_-_Tavole_parametri_precalcolati.pdf

- [42] EnergyPlus Documentation disponibili all'indirizzo:
https://www.energyplus.net/sites/default/files/docs/site_v8.3.0/EngineeringReference/10-Sizing/index.html#plant-loop-sizing
- [43] Catalogo pompe di calore disponibili all'indirizzo:
<http://www.emmeti.com/rest/jcr/repository/collaboration/sites%20content/live/default/categories/documenti/clima/documenti-commerciali/scheda-tecnica/990057100.pdf>
- [44] EnergyPlus Documentation- Auxiliary EnergyPlus Programs, disponibile all'indirizzo:
https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs_v8.3.0/AuxiliaryPrograms.pdf
- [45] EquationFit model disponibile all'indirizzo:
<https://www.designbuilder.co.uk/helpv5.2/Content/CreatingHeatPumpManufacturersData.htm>
- [46] <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-3/input-output-reference/group-water-heaters.html>
- [47] Tabelle glicole etilenico: http://www.nextrend.it/images/documenti/103-10-FI.002.14%20Glicole_%20densit%C3%A0%20e%20punto%20di%20congelamento.pdf
- [48] Realizzazione di quattro impianti fotovoltaici connessi alla rete elettrica di distribuzione-Relazione Tecnica.
https://www.regione.sardegna.it/documenti/1_17_20090901154034.pdf
- [49] Consumo kWh famiglia media: <http://www.consulente-energia.com/af-quant-kwh-consuma-una-famiglia-di-corrente-elettrica-consumo-annuo-di-elettricita-di-una-famiglia-media-italiana-di-2-3-4-persone.html>
- [50] PVGIS fotovoltaico - Il simulatore online gratuito:
<https://www.edilizialavoro.com/energie-alternative/pvgis-fotovoltaico.html>
- [51] ARERA. dall'Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente 2018, disponibile presso l'indirizzo:
<https://bolletta.arera.it/bolletta20/index.php/guida-voci-di-spesa/elettricita>
- [52] Murgia L., Valutazione economica degli investimenti energetici, disponibile all'indirizzo:

https://iaassassari.files.wordpress.com/2012/07/11_valutazione_economica.pdf

- [53] tasso di interesse, disponibile all'indirizzo:
http://www.ecb.europa.eu/stats/financial_markets_and_interest_rates/long_term_interest_rates/html/index.en.html
- [54] Energysage, "Is residential electricity price going up or down?", disponibile all'indirizzo: <https://news.energysage.com/residential-electricity-prices-going-up-or-down/>
- [55] D.lgs 3 agosto 2010 n.90, disponibile all'indirizzo:
<http://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2013/08/03/13G00133/sg>
- [56] Datasheet caldaia vaillant, disponibile all'indirizzo:
<https://www.vaillant.it/downloads/vgoa-vaillant-it-doc/schede-tecniche/murali-standard-4/scheda-tecnica-atmotec-pro-vmw-2015-539288.pdf>
- [57] PCI GPL, disponibile all'indirizzo:
http://www.fiper.it/fileadmin/user_upload/area_utenti/vita_associativa/2009/assemblea2009/Relazione_Riva.pdf
- [58] Prezzo GPL, disponibile all'indirizzo:
<https://www.to.camcom.it/consultazione-listini-prezzi>
- [59] Prezzi al kWh per cliente tipo servito in maggior tutela - aggiornamento trimestrale - secondo trimestre, disponibili all'indirizzo:
<https://www.arera.it/it/elettricita/prezzirif.htm>
- [60] Costi di investimento di una caldaia a GPL, disponibili all'indirizzo:
<https://www.caldaiemurali.it/caldaia-vaillant-atmotec-pro-vmw-240-5-3-metano-new-erp-2015.html>
- [61] Costo pompa di calore vaillant , disponibile all'indirizzo:
https://www.tavolla.com/vaillant-0020237947-flexocompact-exclusive-w-w-8-kw-230v-pompa-di-calore-acqua-acqua-combinata/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=assente&gclid=CjwKCAjwrNjcBRA3EiwAII0vq5O4bxzo_-meb-n1-jwyDIEp_V_nd-vSNQT6T2AN-InfPnTfQIHKARoCkXcQAvD_BwE
- [62] Stima costi di installazione e accessori , disponibili all'indirizzo:
<https://www.geotherm.it/blog/quanto-costa-installare-una-pompa-di-calore/>

- [63] Pannello fotovoltaico, disponibile all'indirizzo:
<https://www.vpsolar.com/conergy-power-plus-made-germany/>
- [64] Costo pannelli fotovoltaici, disponibili all'indirizzo:
<https://www.scribd.com/document/105488489/Conergy-Italia-SpA-Listino-05-2012>
- [65] Stima costi di installazione e accessori , disponibili all'indirizzo:
<https://www.geotherm.it/blog/quanto-costa-installare-una-pompa-di-calore/>
- [66] Costi accessori PV, disponibili all'indirizzo:
<https://drive.google.com/drive/folders/15LRlcmfyshz5PLXEgwVlzQj2TE2x0jA?ogsrc=32>
- [67] Detrazioni fotovoltaico, disponibili all'indirizzo:
<http://www.incentivifotovoltaico.name/detrazione-50-fotovoltaico.php>
- [68] Descrizione tariffa scambio sul posto, disponibile all'indirizzo:
<https://www.gse.it/servizi-per-te/fotovoltaico/scambio-sul-posto>
- [69] Tariffa a copertura degli oneri di gestione, verifica e controllo, disponibile all'indirizzo: <https://www.gse.it/servizi-per-te/fotovoltaico/scambio-sul-posto/tempistiche-e-pagamenti>
- [70] UNI TS, 11300-1: 2008. Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva e invernale, 2008.