Allegato 06

SCENARIO DI PENETRAZIONE DELLE POMPE DI CALORE PER IL RISCALDAMENTO E LA PRODUZIONE ACQUA CALDA SANITARIA

ing. Alessandro Prada | DICAM UNITN

dott. ing. Clara Ceccolini | DICAM UNITN

dott. ing. Nicola Franzoi | DICAM UNITN

prof. ing. Paolo Baggio | DICAM UNITN

UNIVERSITÀ DI TRENTO
Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica

UNIVERSITÀ
DI TRENTO
Dipartimento di
Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica

Scenario di penetrazione delle pompe di calore per il riscaldamento e la produzione acqua calda sanitaria

ing. Alessandro Prada, DICAM-UNITN
dott. ing. Clara Ceccolini, DICAM-UNITN
dott. ing. Nicola Franzoi, DICAM-UNITN
prof. ing. Paolo Baggio, DICAM-UNITN

Ottobre 2020

Riassunto 3
Analisi delle prestazioni delle pompe di calore nei comuni Trentini 4
Metodo di calcolo 4
Ipotesi di calcolo 5
Risultati 6
Scenario di sostituzione dei generatori esistenti con pompe di calore 11
Analisi dettagliata degli impianti con pompa di calore 14
Metodo di calcolo adottato 14
Ipotesi di calcolo 17
Comuni rappresentativi 18
Presentazione e commento dei risultati 19
Analisi dettagliata degli impianti con pompa di calore con gestione avanzata 23
Bibliografia 25

Riassunto

Basandosi sui dati esposti nel report "*Analisi tecnico-economica di interventi di riqualificazione energetica"* (A. Capozza et al.), pubblicato da RSE e allo "*Scenario di riqualificazione energetica degli edifici residenziali in Trentino"* si stimano i consumi per riscaldamento e acqua calda sanitaria per gli edifici residenziali tipo nei diversi comuni del Trentino. Successivamente, si valutano le prestazioni delle pompe di calore aria-acqua considerando una potenziale sostituzione del generatore ma senza l'intervento sull'involucro esistente.

Più in dettaglio, l'approccio seguito è quello degli "edifici tipo" – individuati per classi di vetustà e tipologie di edificio – il cui fabbisogno di energia primaria è calcolato da RSE utilizzando il metodo orario secondo norma UNI EN ISO 13790:2008 (alla quale le norme italiane della serie UNI/TS 11300 fanno ancora riferimento anche se nel frattempo è stata sostituita dalla norma UNI EN ISO 52016-1:2018) e la simulazione degli impianti come da UNI/TS 11300-2:2019. Nel presente lavoro, i risultati vengono scalati in base ai gradi giorno di ogni comune del Trentino. Per quanto concerne i consumi di acqua calda sanitaria, il consumo stimato da RSE viene scalato in funzione della temperatura dell'acqua di acquedotto assunta pari alla media annuale della temperatura dell'aria.

Dopo aver stimato le prestazioni delle pompe di calore assumendo una semplice sostituzione del generatore, mantenendo quindi i consumi per riscaldamento nella situazione attuale, si valutano le prestazioni potenziali delle pompe di calore negli edifici riqualificati energeticamente.

Le prestazioni delle pompe di calore sono state valutate inizialmente mediante il metodo BIN proposto dalla specifica tecnica UNI/TS 11300-4 e utilizzato attualmente per le verifiche di rispondenza ai requisiti minimi di prestazione energetica del sistema edificio-impianto. Successivamente, è stata condotta un'analisi dettagliata su alcuni comuni rappresentativi del Trentino volta a comprendere il reale comportamento degli impianti a pompa di calore anche in relazione all'installazione di accumuli termici sia per la produzione di acqua calda sanitaria sia per il riscaldamento degli ambienti. Con l'analisi di dettaglio, oltre ad una miglior rappresentazione del sistema edificio impianto, è inoltre possibile valutare il potenziale autoconsumo dell'energia fotovoltaica prodotta in situ, valutando quindi il reale assorbimento elettrico dalla rete. Infine, un'ulteriore analisi valuta l'aumento potenziale di energia fotovoltaica autoconsumata mediante l'impiego di logiche di regolazione "rule-based" in cui la frequenza di alimentazione del compressore viene variata in base alla produzione dell'impianto fotovoltaico.

Analisi delle prestazioni delle pompe di calore nei comuni Trentini

Per valutare l'efficacia della sostituzione dei generatori di calore attualmente impiegati negli impianti di riscaldamento degli edifici con pompe di calore aria-acqua è indispensabile comprendere le prestazioni attese nei diversi comuni della provincia. Infatti, le pompe di calore hanno un coefficiente di prestazione (COP) sensibile alle variazioni di temperatura delle sorgenti fredda (aria esterna) e calda (acqua dell'impianto di riscaldamento). Mentre la temperatura della sorgente calda è lecito ipotizzare vari in funzione delle caratteristiche dell'involucro edilizio e dei terminali di emissione, la temperatura della sorgente fredda è strettamente legata al comune analizzato e quindi alla sua quota altimetrica.

Nella prima fase dello studio, quindi, è stato implementato il calcolo semplificato di un impianto a pompa di calore per ognuno dei 175 comuni trentini, variando inoltre le caratteristiche dell'edificio sia in termini di tipologia edilizia (monofamiliare, villetta a schiera, medio condominio e grande condominio) sia per epoca di costruzione e quindi di classe di vetustà. In particolare, per l'analisi della mera sostituzione dei generatori con pompa di calore è ipotizzabile che questa sia possibile solo su edifici relativamente recenti, per i quali siano stati svolti dei calcoli energetici durante la progettazione dell'edificio. Per questo motivo lo studio si focalizza sulle classi di vetustà successive all'entrata in vigore della legge n. 373/76 che per prima introdusse dei vincoli per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici e delle prescrizioni per l'isolamento termico degli edifici. Le classi di vetustà analizzate sono quindi la V5, edifici costruiti dal 1976 al 1990, V6 (dal 1991 al 2005) e V7 (dopo il 2005).

Metodo di calcolo

Per tener conto della variazione delle prestazioni delle pompe di calore al variare delle temperature delle sorgenti calda e fredda e per le valutazioni delle prestazioni energetiche degli edifici è stato impiegato il metodo BIN, previsto dalla specifica tecnica UNI/TS 11300-4. Il metodo è basato sull'andamento della temperatura esterna nel mese, ottenuto partendo dalle temperature medie mensili della norma UNI 10349-1. Le temperature dei diversi comuni sono state ottenute correggendo le temperature di Trento in funzione dell'altitudine:

$$T_{comune,i} = T_{Trento} \cdot (z - z_{Trento}) \cdot d$$

dove:

z e z_{Trento} sono rispettivamente l'altitudine del comune considerato e del comune di Trento

d è il gradiente termico verticale pari a 1°C ogni 178m.

Dai valori di temperatura media mensile si ipotizza una distribuzione Gaussiana delle temperature nel mese con deviazione standard che dipende dal mese considerato e dalla radiazione solare media giornaliera sul piano orizzontale.

$$\sigma_{mese} = 1{,}8 + 0{,}16 \cdot H_{mese} + \Delta\sigma_{max} \cdot k_{corr,\sigma,mese}$$

dove:

H_{mese} è la radiazione media giornaliera sul piano orizzontale del mese considerato;

$k_{corr,\sigma,mese}$è un coefficiente correttivo che vale 1,0 per gennaio, 0,5 per febbraio e dicembre e 0 negli altri mesi;

$\Delta\sigma_{max}$ è la deviazione massima valutata quindi nel mese di gennaio calcolata in funzione della temperatura madia di gennaio (T_{GEN}) e della temperatura esterna di progetto (T_{prog}) attraverso l'equazione:

$$\Delta\sigma_{max} = -0{,}502 - 0{,}15825 \cdot \left(T_{GEN} - T_{prog}\right) + 0{,}06375 \cdot \left(T_{GEN} - T_{prog}\right)^2 - 0{,}16 \cdot H_{mese,GEN}$$

Nota la distribuzione di temperatura per ogni intervallo (*bin*), il fabbisogno energetico dell'edificio viene ripartito in maniera proporzionale al numero di ore mensili in cui la temperatura ricade nel bin (fabbisogno di acqua calda sanitaria) o in base al numero di gradi ora di riscaldamento associati ad ogni bin (fabbisogno di riscaldamento).

I fabbisogni di riscaldamento per ogni tipologia di edificio e classe di vetustà sono stati ottenuti partendo dai valori ottenuti dallo studio RSE per il comune di Milano. Questi valori sono stati quindi corretti per ottenere il consumo nei diversi comuni trentini attraverso le seguenti equazioni:

$$Q_{RISC,comune,i} = Q_{RISC,Milano} \frac{GG_{comune,i}}{GG_{Milano}}$$

$$Q_{ACS,comune,i} = Q_{ACS,Milano} \frac{T_{er} - \overline{T}_{comune,i}}{T_{er} - \overline{T}_{Milano}}$$

dove:

GG è il numero di gradi giorno di riscaldamento mensili

T_{er} è la temperatura di erogazione dell'acqua calda sanitaria

$\overline{T}_{comune,i}$ è la temperatura dell'acqua d'acquedotto assunta pari alla temperatura media annuale dell'aria esterna della località

La temperatura di erogazione dell'acqua calda sanitaria viene definita dalla specifica tecnica UNI/TS 11300-2 ed è assunta pari a 40°C.

Noti i consumi mensili e valutati quelli associati ai singoli bin è possibile valutare le prestazioni delle pompe di calore nel funzionamento combinato di produzione di acqua calda sanitaria (funzionamento con priorità) e riscaldamento. Per quanto concerne il riscaldamento, nelle villette a schiera (VS), nei medi condomini (MC) e nei grandi condomini (GC) sono stati considerati sia gli impianti centralizzati sia quelli autonomi per ogni unità abitativa.

Ipotesi di calcolo

Come evidenziato nel capitolo precedente, le prestazioni delle pompe di calore dipendono anche dalla temperatura del pozzo caldo. Nelle analisi svolte, la temperatura del pozzo caldo è stata assunta costante e pari a 50°C durante la produzione di acqua calda sanitaria. Questa temperatura è la temperatura tipica di regolazione dell'accumulo di acqua calda sanitaria accoppiato alle pompe di calore. Per quanto riguarda la modalità di riscaldamento, le temperature del pozzo caldo sono state definite in accordo ad una curva di regolazione climatica e della classe di vetustà dell'edificio. Infatti, per gli edifici più recenti (V7) si ipotizzano dei sistemi di emissione a bassa temperatura quali ad esempio dei pannelli radianti a pavimento, mentre per le classi V5 e V6 si considerano dei terminali di emissione a temperatura medio-alta quali ad esempio dei ventilconvettori o dei radiatori. Per

questo motivo, in corrispondenza della temperatura esterna di progetto (T_{prog}) la temperatura del pozzo caldo è stata assunta pari a 55°C per edifici in classe V5 o V6, e di 39°C per edifici V7. Come già detto, la temperatura del pozzo caldo è fatta variare in accordo con la temperatura del pozzo freddo (di conseguenza variano rispettivamente sia il coefficiente di prestazione (COP) sia il fattore di carico (CR) della pompa di calore, implementando dunque una regolazione dell'impianto di tipo climatico. Inoltre, è stata considerata l'installazione di una pompa di calore di nuova generazione in cui la velocità di rotazione del compressore *scroll* viene variata in funzione del carico richiesto attraverso un inverter. In questo modo quindi la pompa di calore è in grado di modulare la propria potenza con un rapporto di modulazione 1:4. Al di sotto di questo valore limite di CR, si assume che la pompa di calore lavori con un funzionamento ON/OFF a cui corrisponde un degrado delle prestazioni valutato in accordo con la specifica tecnica UNI/TS 11300-4.

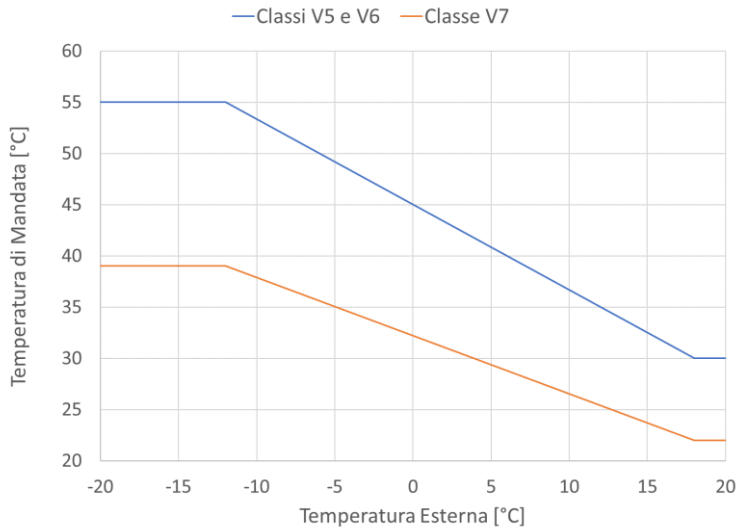

Figura 1- Andamento delle due curve climatiche degli impianti di riscaldamento.

Nel valutare le prestazioni delle pompe di calore è stato considerato lo scenario ottimale, in cui la taglia della pompa di calore è stata scelta al fine di massimizzare le prestazioni della pompa di calore stessa in funzione del fabbisogno dell'edificio. Per questo motivo, per ogni comune e per ogni edificio, sono state valutate diverse taglie di pompe di calore aria-acqua dalla taglia commerciale più piccola di 7 kW nel punto di funzionamento 7/35 ad una pompa di 96 kW sempre nel punto 7/35. Qualora la domanda termica dell'edificio risultasse superiore alla capacità della pompa di calore, una resistenza elettrica di *backup* è stata considerata e il rispettivo assorbimento elettrico è stato incluso nel calcolo delle prestazioni della pompa di calore. Infine, la taglia ottimale di pompa da installare per ogni caso analizzato è stata valutata come quella che massimizza il coefficiente di prestazione stagionale (SCOP) per il funzionamento combinato di riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria.

Risultati

I risultati dell'analisi condotta sono quindi gli andamenti dei coefficienti di prestazione stagionale, vale a dire del rapporto fra l'energia termica annuale in uscita dalla pompa di calore per rispondere alle richieste di riscaldamento e di produzione di acqua calda sanitaria, rispetto all'energia elettrica annuale assorbita dalla pompa di calore e dall'eventuale resistenza di backup. Questi valori sono stati ottenuti per tutti i comuni trentini, per le diverse tipologie di edificio e di classe di vetustà. Nei grafici seguenti vengono riportati gli andamenti dei SCOP delle taglie ottimali di pompa di calore al variare

dell'altitudine del comune sia per la configurazione di impianto autonomo sia per quello centralizzato. Nei grafici viene inoltre evidenziata una soglia di SCOP pari a 2,3. Questo valore è stato ricavato considerando il SCOP al di sopra del quale la pompa di calore presenta un consumo di energia primaria inferiore a quello di una caldaia a condensazione con un rendimento medio stagionale del 100%. Questo valore soglia può quindi essere ricavato dall'equazione seguente:

$$Soglia = \eta_{Caldaia} \frac{f_{p,EL}}{f_{p,comb}}$$

dove:

$\eta_{Caldaia}$ è il rendimento medio della caldaia rispetto al potere calorifico inferiore;

$f_{p,EL}$ è il fattore di conversione in energia primaria dell'elettricità (2,42);

$f_{p,comb}$ è il fattore di conversione in energia primaria dei combustibili fossili (1,05).

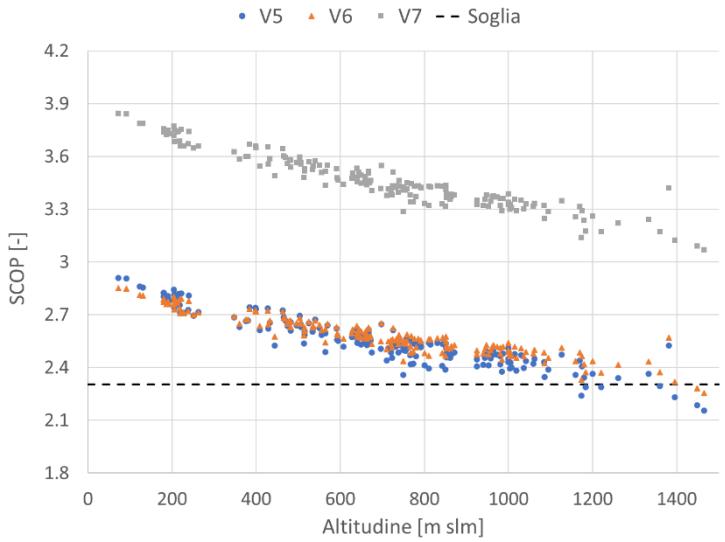

Figura 2 – Andamento del SCOP per impianti autonomi in edifici MF.

In Figura 2 si riporta l'andamento del SCOP in funzione dell'altitudine del comune per gli edifici monofamiliari. Dal grafico si nota come per le classi di vetustà V5 e V6, a causa del funzionamento a medio-alta temperatura dell'impianto di riscaldamento, il SCOP sia prossimo al valore soglia soprattutto per altitudini superiori ai 1000 m. La riduzione della temperatura di alimentazione dei terminali di emissione degli edifici in classe V7 porta a dei notevoli vantaggi in termini di SCOP.

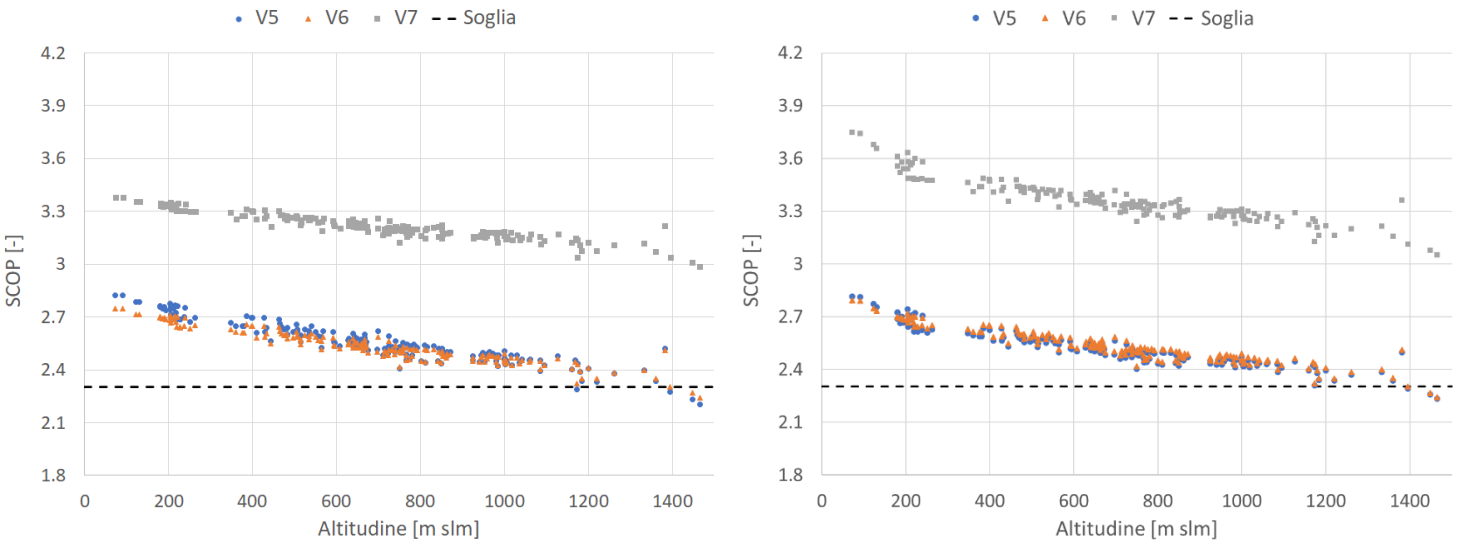

Figura 3 - SCOP per impianti autonomi (sinistra) e centralizzati (destra) in edifici VS.

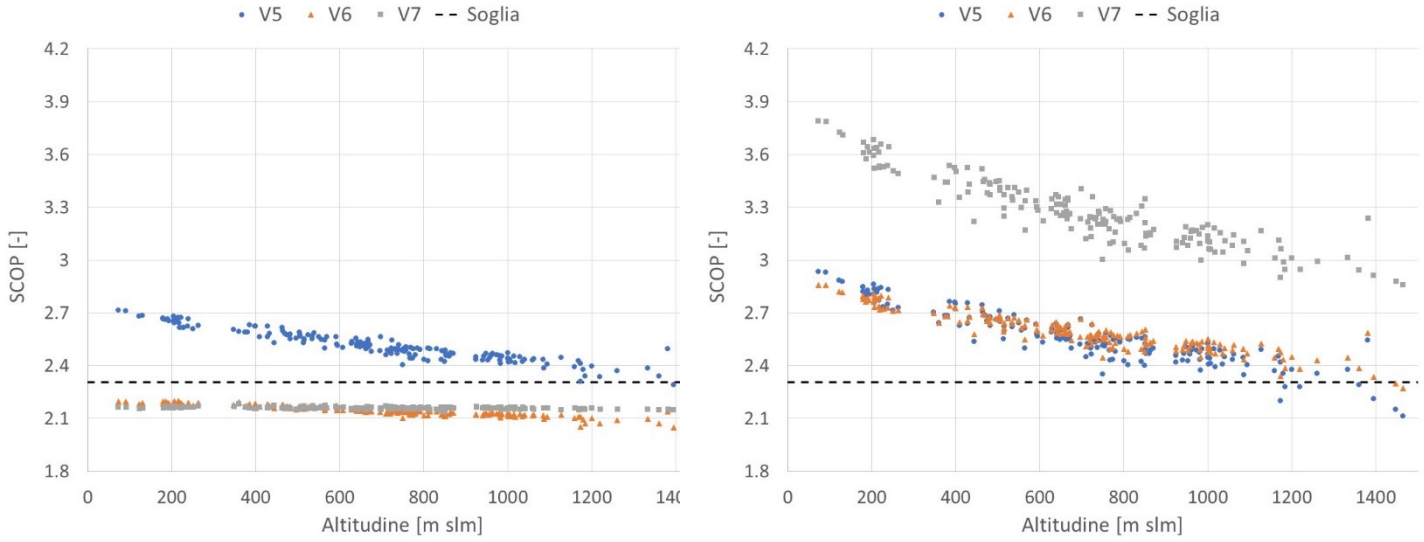

Figura 4 – SCOP per impianti autonomi (sinistra) e centralizzati (destra) in edifici MC.

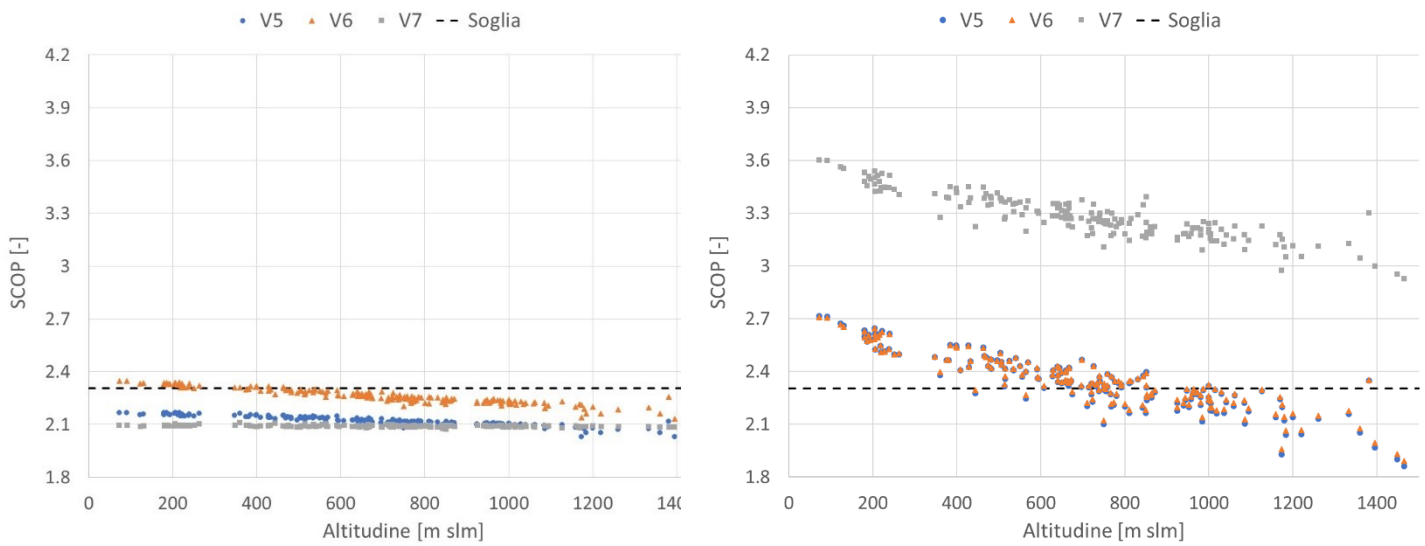

Figura 5 – SCOP per impianti autonomi (sinistra) e centralizzati (destra) in edifici GC.

La stessa analisi viene ripetuta anche per le altre tipologie di edificio (Figura 3 Figura 5), dove vengono inoltre messi a confronto gli impianti autonomi con quelli centralizzati. Per tutte e tre le tipologie si nota un miglior SCOP per gli impianti centralizzati soprattutto per i medi condomini (MC) e i grandi condomini (GC). Questo avviene perché la forma compatta dell'edificio e le dimensioni dei singoli appartamenti fanno sì che la taglia più piccola della pompa di calore risulti comunque sovradimensionata rispetto alle richieste di riscaldamento. Come conseguenza quindi la pompa di calore lavora spesso in regime on/off con un notevole degrado delle prestazioni. È bene rimarcare però che nell'analisi semplificata svolta non sono valutate in maniera sufficientemente dettagliata le diverse dispersioni dei circuiti di distribuzione che, negli impianti centralizzati, sono sicuramente maggiori. Partendo dai risultati appena ottenuti e considerando la frequenza con cui ogni edificio è presente in ognuno dei comuni trentini, è possibile valutare un SCOP medio delle pompe di calore (Figura 6). Nel grafico si nota come in generale per le tre classi di vetustà considerate il SCOP medio sia superiore al valore soglia di 2,3 , evidenziando quindi come la sostituzione del generatore con una pompa di calore aria-acqua sia generalmente una soluzione vantaggiosa in termini di risparmio di energia primaria. Come si vede però il vantaggio è molto modesto per gli edifici in classe V5 e V6 dove, la temperatura di alimentazione dei terminali di emissione, limita fortemente le prestazioni della pompa di calore. Il margine di vantaggio è invece decisamente superiore per gli edifici in classe V7 per i quali la temperatura di emissione è ridotta. Questo risultato mostra quindi l'importanza dell'intervento combinato di sostituzione del generatore e di efficientamento energetico dell'involucro edilizio.

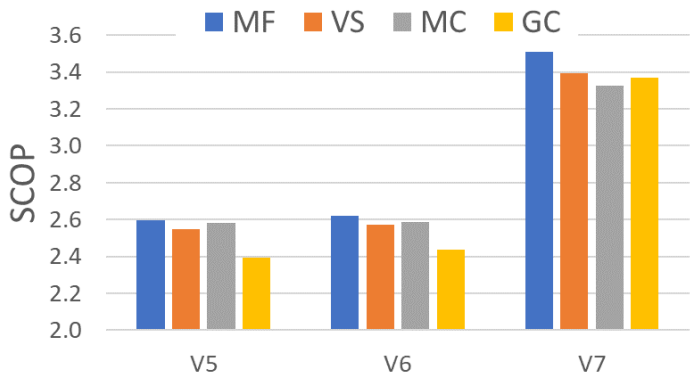

Figura 6 - Andamento del SCOP medio su tutti i comuni del Trentino.

Per questo motivo l'analisi è stata ripetuta al fine di valutare le prestazioni energetiche di un edificio riqualificato energeticamente. È stata valutata una ristrutturazione importante di primo livello che porti ad un indice di prestazione termica utile per il riscaldamento annuo di 60 kWh m^{-2}. Il fabbisogno di energia termica utile per la produzione di acqua calda sanitaria è stato invece considerato inalterato. L'analisi delle prestazioni delle pompe di calore è stata quindi ripetuta considerando la possibilità o meno di ridurre la temperatura di alimentazione dei terminali di emissione secondo la curva climatica già adottata per gli edifici in classe V7. In *Figura 7* si nota come la riduzione del fabbisogno energetico dell'edificio porti ad un miglioramento delle prestazioni dell'impianto, in maniera più marcata per i comuni di fondovalle. Il miglioramento più evidente però si ha quando la riqualificazione permette inoltre di ridurre la temperatura di mandata all'impianto di riscaldamento.

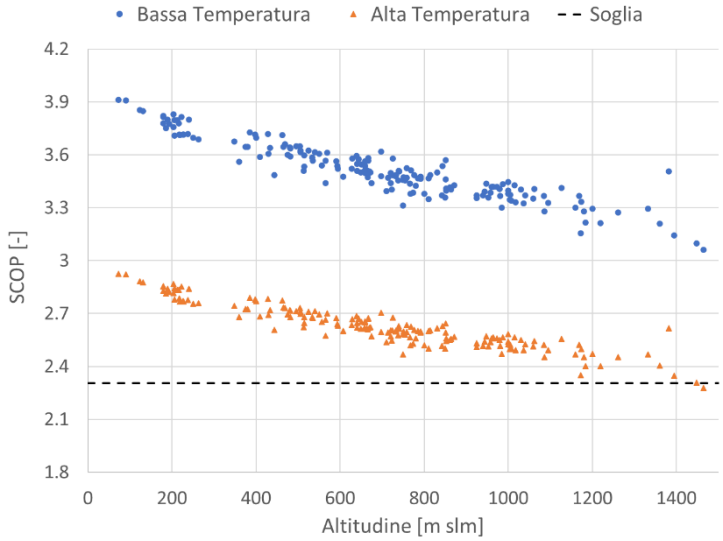

Figura 7 - Andamento del SCOP medio su tutti i comuni del Trentino.

Scenario di sostituzione dei generatori esistenti con pompe di calore

Partendo dalle prestazioni appena ottenute per tutti i comuni trentini si valuta ora l'impatto potenziale che la mera sostituzione dei generatori potrebbe avere sul bilancio energetico provinciale intervenendo solo sugli edifici appartenenti alle classi di vetustà V5, V6 e V7 (Tabella 1).

Tabella 1 - Numero di edifici dello stock edilizio per tipologia ed epoca di costruzione.

	V5	V6	V7
MF	4493	6232	12594
VS	5977	6783	4531
MC	478	730	611
GC	234	267	781

Questa analisi viene condotta partendo dai consumi degli edifici residenziali ottenuti dall'elaborazione dei dati catastali, degli interventi di riqualificazione già effettuati sul patrimonio edilizio trentino. Questi dati sono stati riportati nello scenario di riqualificazione energetica degli edifici residenziali e sono già stati validati sulla base del bilancio *baseline* PAT 2016. Considerando quindi l'intero *stock* edilizio residenziale, il fabbisogno di riscaldamento è pari a 377 ktep ripartito fra le diverse classi di vetustà come indicato in *Tabella 1 - Numero di edifici dello stock edilizio per tipologia ed epoca di costruzione.* Per l'acqua calda sanitaria, in analogia allo studio sugli scenari di riqualificazione energetica e a quello di Brunelli et al. (APRIE), il consumo per acqua calda sanitaria è stato quantificato nel 21% dei consumi per riscaldamento invernale. Complessivamente, quindi, la quantità totale di energia consumata è pari a 456,71 ktep a fronte di una stima su bilancio baseline 2016 di 431,8 ktep.

Tabella 2 - Andamento dei consumi energetici del settore residenziale espressi in ktep.

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	Totale
Riscaldamento	125,90	38,30	36,48	119,37	21,78	25,72	9,90	377,44
ACS	26,44	8,04	7,66	25,07	4,57	5,40	2,08	79,26
Totale	152,34	46,35	44,14	144,44	26,35	31,12	11,97	456,71

Non disponendo di dati locali precisi sulla suddivisione di questo consumo fra i diversi sistemi di generazione, si utilizzano le stime fatte nell'analisi sullo scenario di riqualificazione energetica. I consumi totali residenziali sono coperti al 33% da impianti a gas naturale, al 16% da prodotti petroliferi, al 30% da impianti a biomassa e il rimanente 21% da energia elettrica. Queste quote sono considerate costanti in tutte le classi di vetustà.

L'installazione di nuove pompe di calore si suppone avvenga in sostituzione delle caldaie a gas, GPL e legna, andando quindi ad incidere sul 79% dei consumi totali per riscaldamento e produzione di ACS per le classi di vetustà V5, V6 e V7.

Allo stato attuale quindi questi consumi sono:

Tabella 3 - Consumi residenziali di Gas Naturale, prodotti petroliferi e Biomassa, in ktep.

	V5	V6	V7	Totale
Riscaldamento	17,21	20,32	7,82	45,34
Acqua Calda sanitaria	3,61	4,27	1,64	9,52
Totale	20,82	24,59	9,46	54,86

Si considera lo scenario ideale in cui tutte le caldaie, i cui consumi sono riportati in *Tabella 2 - Andamento dei consumi energetici del settore residenziale espressi in ktep.*, vengano sostituite con delle pompe di calore. Per tener conto delle reali prestazioni delle pompe di calore, sono stati inizialmente valutati per ogni comune e per ogni tipologia edilizia ed epoca di costruzione i fabbisogni di energia utile per riscaldamento e acqua calda sanitaria moltiplicando i consumi per i valori dei rendimenti di generazione. Da questi valori di energia utile è stata quindi valutata l'energia elettrica assorbita adottando il valore del SCOP valutato nella sezione precedente.

Tabella 4 - Consumi elettici delle pompe di calore in sostituzione dei generatori tradizionali, in ktep.

	V5	V6	V7	Totale
Riscaldamento + ACS	4,98	7,51	2,16	14,65

L'analisi mostra quindi come, questo scenario ideale permetterebbe di spostare 54,86 ktep di consumi termici dal bilancio energetico a fronte di un aumento di 14,65 ktep di consumi elettrici.

Infine, è stata quantificata la variazione del fabbisogno di energia primaria totale ottenibile con la sostituzione dei generatori. Per questo sono stati adottati i fattori di conversione in energia primaria presenti nel decreto "Requisiti minimi". Per l'energia elettrica dalla rete è stato impiegato il fattore 2,42, mentre per i consumi in *Tabella 3* è stato valutato un fattore medio pesato sulla quota di fabbisogno coperto dalle diverse fonti energetiche ed ottenendo quindi un fattore pari a 1,033.

Tabella 5 - Tabella 5- Consumi di energia primaria in ktep.

	V5	V6	V7	Totale
Stato Attuale	21,51	25,40	9,77	56,68
Con Pompe di calore	12,06	18,17	5,23	35,46
Variazione	-44%	-28%	-46%	-37%

I risultati in *Tabella 5* mostrano quindi un risparmio complessivo di energia primaria quantificabile nel 37%, con risparmi variabili per le classi di vetustà a causa di una diversa composizione in termini di tipologie di edificio. Scenario di sostituzione dei generatori e riqualificazione energetica

Come evidenziato nel report "Scenario di riqualificazione energetica degli edifici residenziali in Trentino" l'intervento di coibentazione dell'involucro opaco unito alla sostituzione dei serramenti permette una notevole diminuzione del fabbisogno di energia utile degli edifici residenziali e, di conseguenza, una riduzione dei consumi, come evidenziato dai dati in *Tabella 6*. La riduzione della domanda di energia utile degli edifici fa sì che i terminali di emissione risultino sovradimensionati rispetto alla nuova potenza richiesta e, per questo motivo, potranno essere alimentati a temperatura inferiore.

Tabella 6 - Consumi per riscaldamento, in ktep, degli edifici residenziali allo stato attuale e dopo un intervento di coibentazione dell'involucro e di sostituzione dei serramenti.

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	Totale
Stato Attuale	125,9	38,3	36,5	119,4	21,8	25,7	9,9	377,4
Riqualificati	35,4	10,3	16,8	42,5	12,0	12,9	9,9	139,6

L'intervento di riqualificazione energetica può quindi ampliare la quota di patrimonio edilizio in cui, l'intervento di sostituzione del generatore di calore con pompa di calore risulta tecnicamente percorribile. Infatti, come evidenziato dei dati in Tabella 7, il consumo specifico annuale medio per riscaldamento per ogni classe di vetustà diventerebbe inferiore o uguale a 60 kWh m^{-2} anno per le classi di vetustà da V5 a V7. Inoltre, anche le classi dalla V1 alla V4 avrebbero in media un fabbisogno di energia inferiore a quello corrispondente alla classe V5 nelle condizioni attuali. Questo permetterebbe quindi di ampliare gli edifici su cui potenzialmente installare una pompa di calore in sostituzione degli attuali sistemi di generazione.

Tabella 7 - - Consumi specifico per riscaldamento, in kWh m^{-2}, degli edifici residenziali allo stato attuale e dopo un intervento di coibentazione dell'involucro e di sostituzione dei serramenti.

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	Media
Stato Attuale	315,1	294,1	210,4	225,2	109,7	97,9	34,5	190,5
Riqualificati	88,5	78,9	96,7	80,1	60,3	49,2	34,5	70,5

Analisi dettagliata degli impianti con pompa di calore

Sebbene l'analisi mediante il metodo BIN permetta di stimare con buona approssimazione le prestazioni stagionali della pompa di calore, il metodo di calcolo, basato su di un approccio stazionario, non consente di valutare la presenza di accumuli termici e la possibilità di gestire la pompa di calore per massimizzare l'autoconsumo dell'energia prodotta in situ. A tale scopo, è stata effettuata la simulazione dinamica per una selezione di località caratteristiche del territorio, ipotizzando un impianto a pompa di calore tipo.

Metodo di calcolo adottato

La simulazione dinamica del sistema edificio-impianto è stata effettuata tramite il software TRNSYS, il quale integra un modello di edificio molto affidabile, con la flessibilità nella modellazione della parte impiantistica, sia per quanto riguarda la sua configurazione, sia per ciò che concerne il modello del singolo componente.

Il modello di simulazione consiste di due parti: l'edificio e l'impianto.

Il primo è definito tramite la *type 56*, che modella il comportamento energetico dell'edificio adottando un approccio così detto *lumped* – concentrato – in cui il volume d'aria della zona termica viene identificato in un unico nodo. Le interazioni tra questo e l'involucro sono modellate attraverso delle resistenze (secondo lo schema a stella), rappresentative degli scambi convettivi e radiativi, mentre le componenti dell'involucro sono modellate attraverso funzioni di trasferimento.

Per quanto concerne i parametri geometrici degli edifici simulati, essi sono forniti in input dai modelli tridimensionali degli edifici tipo realizzati a partire dal report RSE del febbraio 2014, utilizzato nella prima parte del report come riferimento anche per la stima dei consumi caratteristici annuali nell'analisi con il metodo BIN. La geometria dell'edificio è semplificata come un parallelepipedo di volume e superficie disperdente che si discosta dai valori specificati nel report RSE 2014 del 2-7%, eccetto per le tipologie edilizie medio (MC) e grande condominio (GC) per cui si è utilizzata una forma più compatta che ha portata a una discrepanza fino al 30%. Anche la superficie finestrata è stata dedotta dal report RSE, adattandola in modo tale che tutte le zone termiche, rappresentative di unità abitative, fossero dotate di aperture trasparenti. Avendo adattato la forma del GC, è stato necessario aumentare la superficie finestrata rispetto ai valori stabiliti nel report RSE 2014. In Figura 1, è mostrato il modello tridimensionale dell'edificio GC composto da 36 zone termiche.

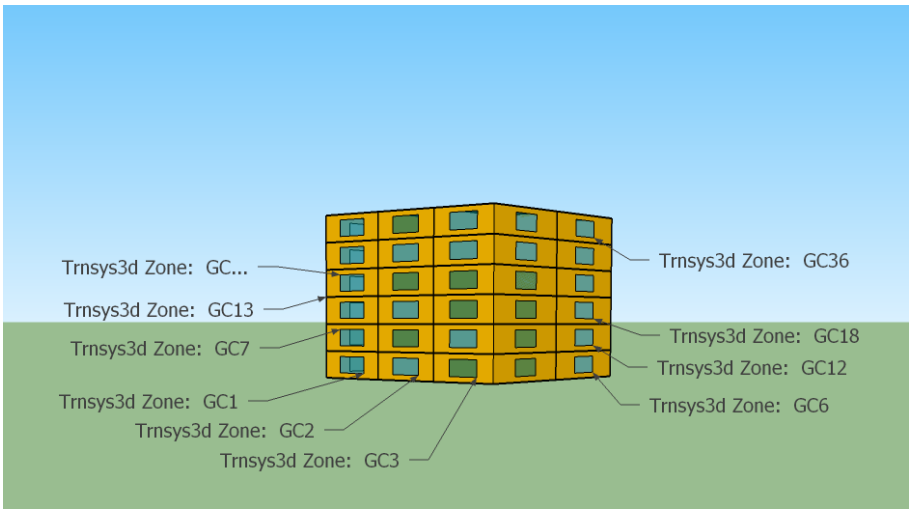

Figura 1 – Vista del modello tridimensionale della tipologia di edificio grande condominio.

Sia per le proprietà delle chiusure trasparenti, sia per la stratigrafia delle chiusure opache è stato necessario interpretare i dati del RSE e ipotizzare i dati mancanti. Si sono selezionate quattro tipologie di infisso, una per ogni classe di vetustà ed una per tutti i casi rinnovati, in base alla pratica costruttiva comune riferita all'epoca di costruzione dell'edificio considerato. La Tabella 8 elenca le tipologie di infisso selezionate e le loro proprietà termiche.

Tabella 8 – Tipologia degli infissi ipotizzati.

Tipologia	U ($W/(m^2K)$)	g_{gl} (-)
Singolo Vetro (V5_0)	5,70	0,81
Doppio Vetro (V6_0)	3,44	0,76
Doppio vetro con gas (V7_0)	1,12	0,61
Triplo vetro con gas (stato rinnovato)	0,57	0,58

Per quanto riguarda la composizione della stratigrafia delle strutture, a partire dai dati di trasmittanza termica e in base all'epoca di costruzione della tipologia di edificio, si sono ottenute le stratigrafie presentate in Tabella 9, Tabella 10 eTabella 11.

Tabella 9 – Stratigrafia essenziale delle pareti perimetrali per ogni classe di vetustà e per stato attuale (0) e rinnovato (R), evidenziato in grassetto. Riferimento normativo UNI/TR 11552 (2014). s = spessore, ρ = densità, c = capacità termica, λ = conducibilità termica, R = resistenza.

Vetustà_Stato	Materiale	s (m)	ρ (kg/m^3)	c (J/(kgK))	λ (W/(m K))	R (m^2K/W)
V5_0/**R**	Mattoni forati	0,08	800	1000	0,36	0,22
	Intercapedine d'aria	-	-	-	-	0,18
	Mattoni forati	0,25	800	1000	0,36	0,70
	Lana di roccia	**0,11**	**60**	**1030**	**0,04**	**3,14**
V6_0/**R**	Fibra di vetro	0,03	30	670	0,04	0,63
	Mattoni semipieni	0,30	1000	1000	0,37	0,81
	Lana di roccia	**0,11**	**60**	**1030**	**0,04**	**3,14**
V7_0/**R**	Fibra di vetro	0,02	30	670	0,04	0,50
	Mattoni semipieni	0,30	1000	1000	0,37	0,81
	Lana di roccia	0,11	60	1030	0,04	3,14
	Lana di roccia	**0,11**	**60**	**1030**	**0,04**	**3,14**

Tabella 10 – Stratigrafia essenziale della copertura per ogni classe di vetustà e per stato attuale (0) e rinnovato (R), evidenziato in grassetto. Riferimento normativo UNI/TR 11552 (2014). s = spessore, ρ = densità, c = capacità termica, λ = conducibilità termica, R = resistenza.

Vetustà_Stato	Materiale	s (m)	ρ (kg/m^3)	c (J/(kgK))	λ (W/(m K))	R (m^{2}K/W)
V5_0/**R**	Soletta laterocemento	0,24	1800	1000	0,65	0,37
	EPS	0,02	35	1000	0,05	0,44
	Lana di roccia	**0,14**	**120**	**1030**	**0,04**	**4,00**
V6_0/**R**	Soletta in laterocemento	0,24	1800	1000	0,65	0,37
	Pannello isolante	0,04	35	1000	0,05	0,89
	Lana di roccia	**0,12**	**120**	**1030**	**0,04**	**3,43**
V7_0/**R**	Soletta in laterocemento	0,24	1800	1000	0,65	0,37
	EPS	0,04	35	1000	0,05	0,89
	Lana di roccia	0,06	60	1030	0,04	1,71
	Lana di roccia	**0,06**	**60**	**1030**	**0,04**	**1,71**

Tabella 11 – Stratigrafia essenziale del solaio contro terra per ogni classe di vetustà e per stato attuale (0) e rinnovato (R), evidenziato in grassetto. Riferimento normativo UNI/TR 11552 (2014). s = spessore, ρ = densità, c = capacità termica, λ = conducibilità termica, R = resistenza.

Vetustà_Stato	Materiale	s (m)	ρ (kg/m^3)	c (J/(kgK))	λ (W/(m K))	R (m^{2}K/W)
V5_0/**R**	**XPS**	**0,11**	**50**	**800**	**0,03**	**3,33**
	CLS alleggerito	0,10	1200	1000	0,33	0,30
	Ghiaione	0,40	1700	1000	1,20	0,42
V6_0/**R**	**XPS**	**0,09**	**50**	**800**	**0,03**	**2,58**
	XPS	0,02	50	800	0,03	0,45
	CLS alleggerito	0,10	1200	1000	0,33	0,30
	Ghiaione	0,40	1700	1000	1,20	0,42
V7_0/**R**	**XPS**	**0,04**	**50**	**800**	**0,03**	**1,21**
	XPS	0,07	50	800	0,03	0,30
	CLS alleggerito	0,40	1700	1000	1,20	0,42
	Ghiaione	0,40	1700	1000	1,20	0,42

L'impianto considerato nelle simulazioni dinamiche consiste di una pompa di calore (PdC) aria-acqua a inverter, collegata a due accumuli termici. Gli accumuli termici sono a loro volta connessi all'impianto di riscaldamento e all'impianto di distribuzione dell'acqua calda sanitaria (ACS), che prevede la preparazione istantanea tramite uno scambiatore immerso nell'accumulo. In entrambi gli accumuli termici si è considerata la presenza di resistenze elettriche ausiliarie per coprire i picchi di fabbisogno. I terminali d'impianto sono modellati come radiatori e ogni zona termica è dotata di un terminale la cui potenza nominale è pari al carico termico di progetto della zona termica più sfavorita. A differenza del metodo BIN, per cui la taglia della pompa di calore è scelta in base alle prestazioni ottimali ottenibili, nell'analisi dettagliata la taglia della PdC è selezionata in modo tale che la sua potenzialità nel punto -7/35 corrisponda al carico termico dell'edificio alla stessa temperatura esterna. Sebbene la temperatura bivalente selezionata non sia ottimale per tutte le località considerate, questa semplificazione permette di limitare il numero di simulazioni e dunque il tempo necessario. Le portate nominali delle pompe di circolazione sono determinate in modo tale che nelle condizioni di progetto la massima differenza di temperatura sia di 5K e 10K rispettivamente per il circuito primario e secondario.

Gli edifici si considerano dotati di impianto fotovoltaico occupante per intero la superficie della copertura.

Lo schema semplificato dell'impianto è mostrato in Figura 8.

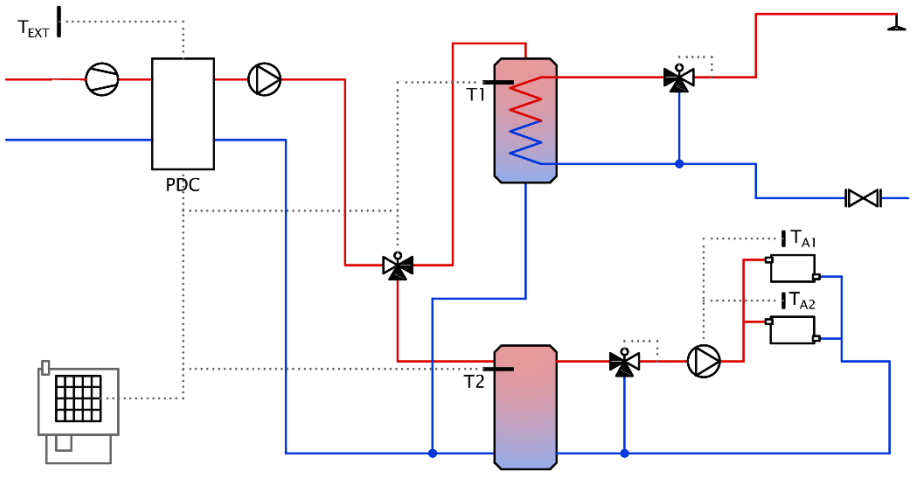

Figura 8 – Schema semplificato dell'impianto per il caso monofamiliare.

Ipotesi di calcolo

Il *timestep* della simulazione è stato impostato ad un minuto per rappresentare correttamente i fenomeni che riguardano il comportamento dell'impianto e per garantirne la convergenza, tuttavia gli output della simulazione sono integrati su base oraria.

La modalità di lavoro della PdC è definita in base alle sonde di temperatura all'interno degli accumuli, con priorità per la produzione di ACS. La temperatura di mandata è regolata sia tramite la valvola di miscelazione nel circuito secondario, sia variando il *setpoint* di temperatura nell'accumulo inerziale. Essa varia in base alla temperatura esterna (controllo di tipo climatico) con un massimo di 40°C quando la temperatura esterna è pari alla temperatura di progetto. Il *setpoint* di temperatura per la

produzione di ACS è fissato a 50°C all'interno dell'accumulo e lo scambiatore di calore è dimensionato in modo tale da ottenere ACS a 45°C.

La temperatura interna delle zone termiche determina l'accensione e lo spegnimento della pompa di circolazione del secondario. Qualora una o più zone termiche non necessitino di riscaldamento, il corrispondente terminale di impianto non viene attivato e il flusso spettante ricircolato.

Si è inoltre realizzato un controllo della frequenza di alimentazione della PdC in modo tale da massimizzare l'autoconsumo di potenza elettrica generata dall'impianto fotovoltaico.

Per quanto riguarda il fabbisogno di acqua calda sanitaria, si sono ipotizzati quattro profili di domanda giornaliera in base alle dimensioni dell'edificio considerato, ottenuti a partire dalla normativa EN 16147 (2017) in cui sono definiti i profili di riferimento per testare le PdC. Un esempio di profilo giornaliero per un'utenza media è riportato in Figura 9.

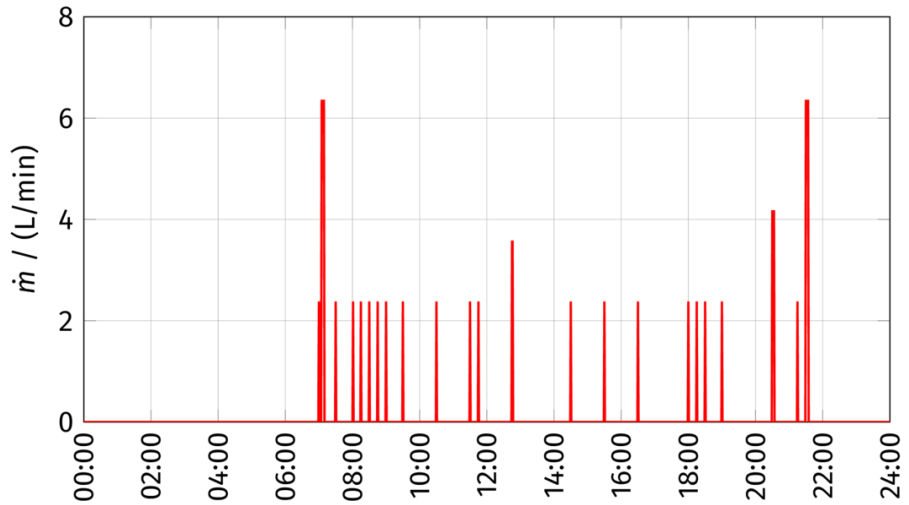

Figura 9 – Profilo di prelievo di acqua calda sanitaria (ACS) per un'utenza di medie dimensioni.

Comuni rappresentativi

Considerato il tempo di simulazione impiegato dal caso più sfavorevole (ossia la simulazione del grande condominio) e dato che le condizioni climatiche del territorio sono sufficientemente omogenee, si è scelto di simulare i casi di studio solo per alcuni comuni caratteristici.

La scelta di quest'ultimi è guidata da un processo di *clustering* basato sui dati climatici dei comuni trentini, nello specifico temperatura media annuale e temperatura di progetto che, secondo il rapporto tecnico UNI/TR 10349-2, è linearmente dipendente dall'altitudine del luogo considerato.

L'algoritmo *k-means* è stato utilizzato per la selezione dei cluster, il quale consiste nell'assegnare i dati ai vari cluster minimizzando la distanza che essi hanno dal baricentro del cluster a cui vengono assegnati. Si è scelto di limitare il numero di cluster a cinque, ognuno rappresentato dal comune più popoloso.

In **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**Figura 10 è mostrato il risultato del clustering, evidenziando la distribuzione sia sul piano temperatura media annuale - temperatura di progetto, che sul territorio provinciale, mentre la Tabella 12 riporta i dati climatici dei comuni selezionati.

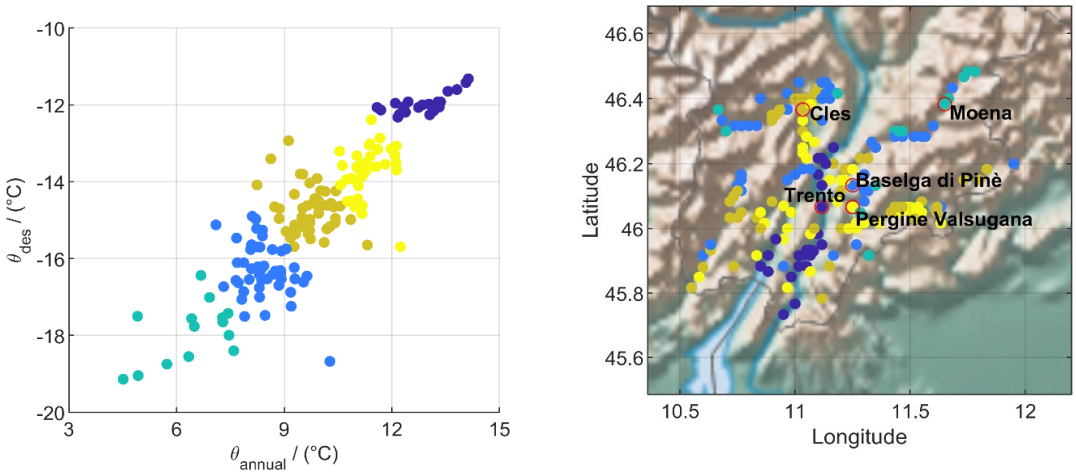

Figura 10– Risultato del processo di clustering dei comuni trentini. A destra sono evidenziati i cluster ottenuti nel piano temperatura media annuale-temperatura di progetto. A sinistra, la distribuzione dei cluster sul territorio, con evidenziati i comuni più popolosi per ciascun cluster e scelti per le simulazioni.

Tabella 12– Dati climatici dei comuni selezionati per le simulazioni.

Cluster	*Comune*	*h s.l.m. (m)*	*ϑ_{media} (°C)*	*$\vartheta_{progetto}$ (°C)*	*Zona climatica*
1	*Moena*	*1184*	*6.4*	*-18*	*F*
2	*Baselga di Pinè*	*964*	*8.8*	*-16*	*F*
3	*Cles*	*658*	*10,1*	*-15*	*F*
4	*Pergine Valsugana*	*482*	*11,4*	*-14*	*F*
5	*Trento*	*194*	*12,9*	*-12*	*E*

Presentazione e commento dei risultati

Le figure Figura 11,Figura 12,Figura 13 eFigura 14 mostrano il consumo elettrico specifico delle quattro tipologie edilizie considerate. Ogni grafico presenta il consumo per ogni comune caratteristico e classe di vetustà. Come si può notare, al crescere delle dimensioni dell'edificio decresce il consumo specifico come conseguenza della diminuzione del rapporto superficie disperdente-volume riscaldato, eccetto per l'edificio grande condominio il quale, come precedentemente spiegato, presenta una percentuale di superficie finestrata più elevata rispetto agli altri casi. Il rinnovo degli edifici abbassa il consumo allo stesso livello indipendentemente dalla classe di vetustà di partenza.

I grafici evidenziano anche la frazione di energia elettrica autoconsumata. Un'analisi più dettagliata dell'andamento dell'autoconsumo per il caso MF è fornita nella sezione successiva.

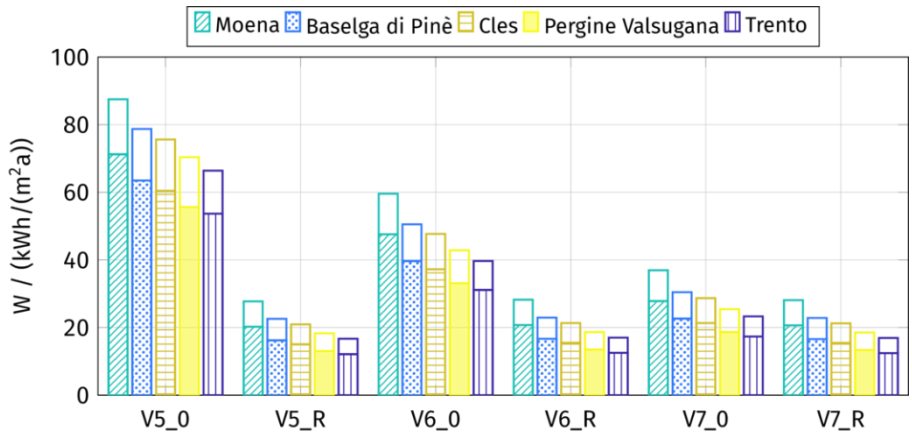

Figura 11 – Consumo elettrico specifico annuale dell'edificio monofamiliare (MF). La parte di barra non campita indica la quota di energia autoconsumata e il restante l'energia prelevata dalla rete.

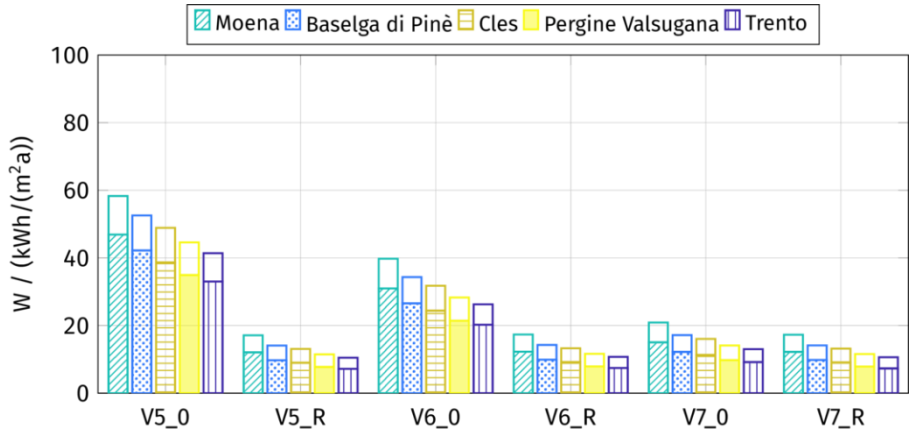

Figura 12 – Consumo elettrico specifico annuale dell'edificio villetta a schiera (VS). La parte di barra non campita indica la quota di energia autoconsumata e il restante l'energia prelevata dalla rete.

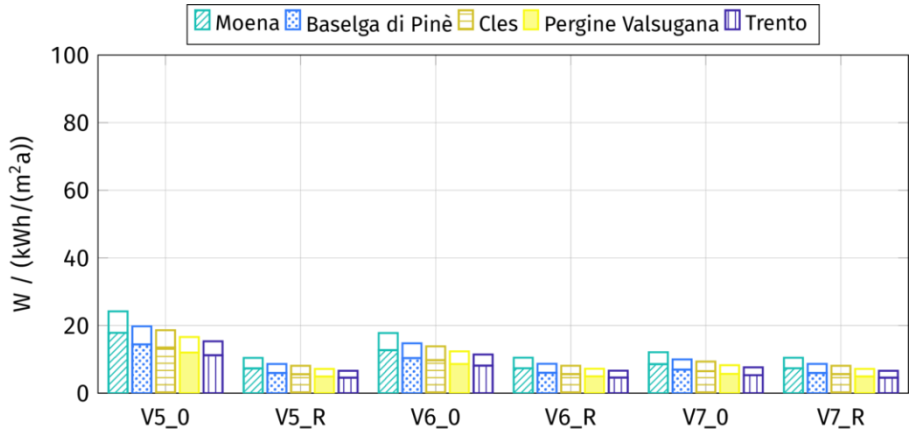

Figura 13 – Consumo elettrico specifico annuale dell'edificio medio condominio (MC). La parte di barra non campita indica la quota di energia autoconsumata e il restante l'energia prelevata dalla rete.

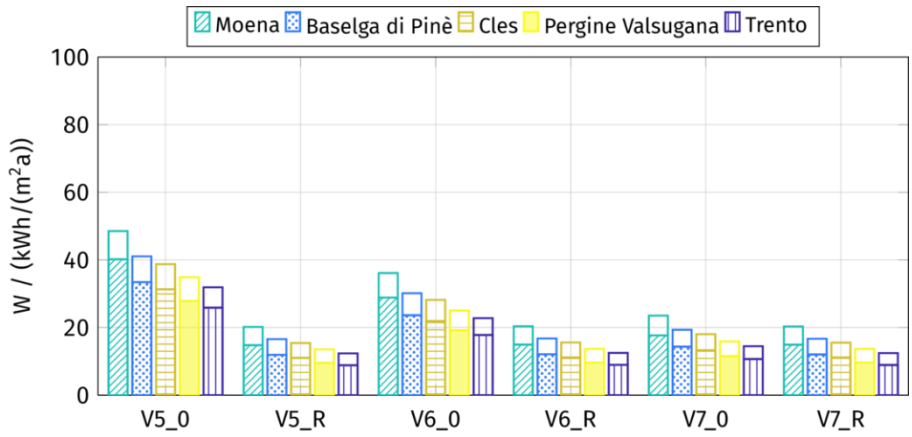

Figura 14 – Consumo elettrico specifico annuale dell'edificio grande condominio (GC). La parte di barra non campita indica la quota di energia autoconsumata e il restante l'energia prelevata dalla rete.

Le prestazioni stagionali sono il vero fattore discriminante per determinare qualora la sostituzione del generatore di calore a combustione con una PdC comporti un risparmio nel consumo di energia primaria. Come illustraato in precedenza, il valore di soglia del SCOP annuale è fissato a 2,3 , dunque valori inferiori a questo non comportano dei vantaggi in termini di risparmio di energia primaria. Di seguito sono riportati gli andamenti degli SCOP annuali per i casi analizzati (figureFigura 15,Figura 16,Figura 17 eFigura 18).

Le prestazioni della PdC non sono ottimali per il caso V5_0 per MF e VS e V6_0 per VS. La temperatura annuale media più bassa comporta in generale prestazioni inferiori eccetto nel caso MF V5_0, per cui l'andamento è invertito a causa della grande taglia della PdC che determina un frequente lavoro a carico parziale per le località con temperature medie annuali più elevate. L'aumentare delle dimensioni dell'edificio rende lo SCOP quasi indipendente dalla classe di vetustà e in tutti i casi superiore alla soglia. In generale il rinnovo degli edifici migliora le prestazioni con maggiore incidenza per gli edifici MF e VS.

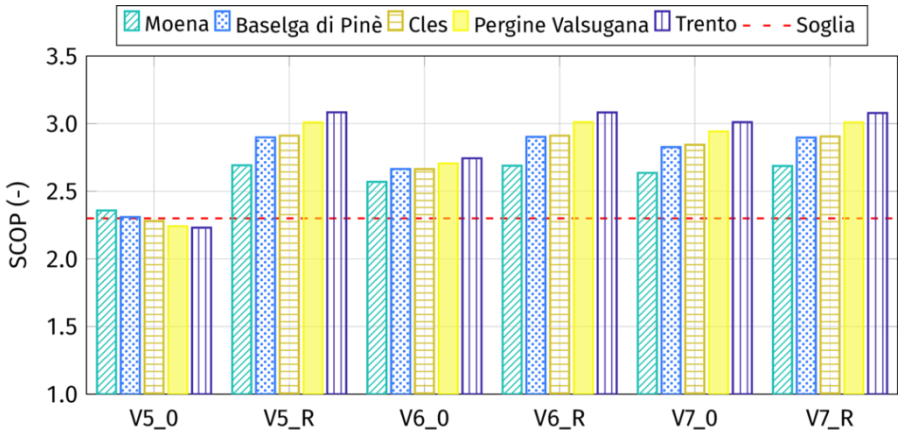

Figura 15 – Seasonal COP per l'edificio monofamiliare (MF).

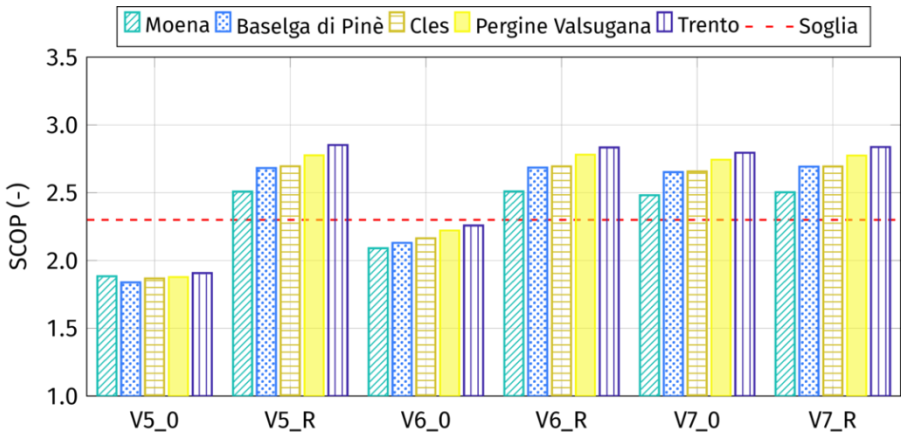

Figura 16 – – Seasonal COP per l'edificio villetta a schiera (VS).

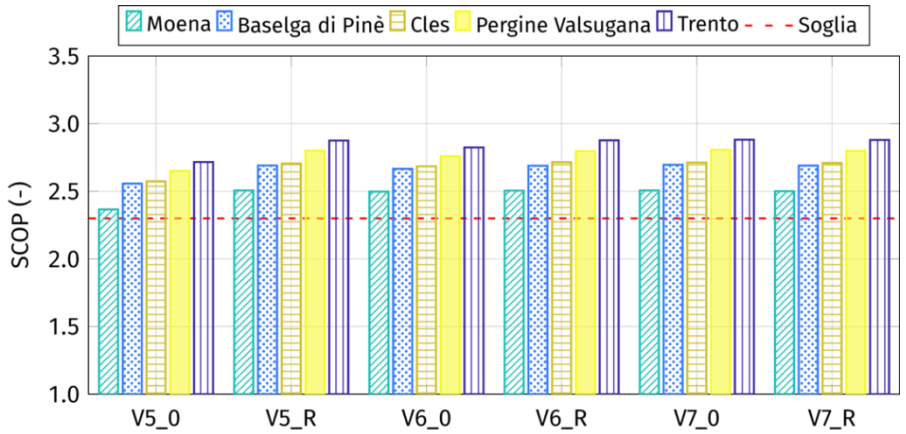

Figura 17 – – Seasonal COP per l'edificio medio condominio (MC).

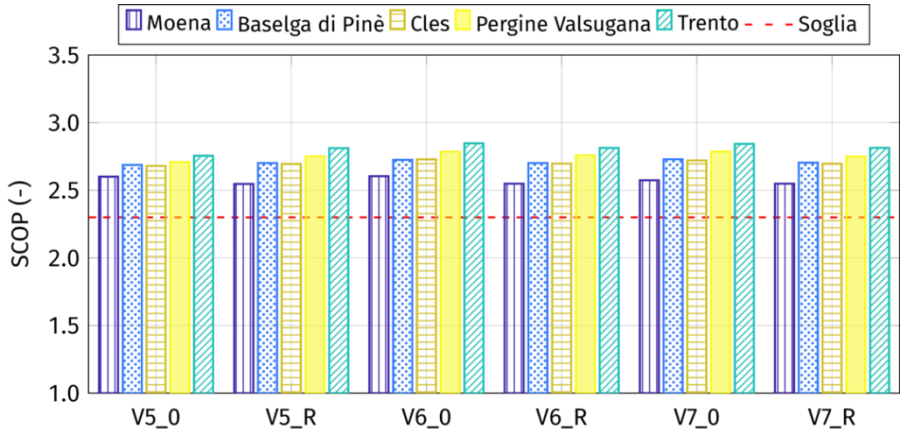

Figura 18 – – Seasonal COP per l'edificio grande condominio (GC).

Analisi dettagliata degli impianti con pompa di calore con gestione avanzata

Gli impianti a pompa di calore, dipendendo esclusivamente dall'energia elettrica, possono essere convenientemente accoppiati ad impianti fotovoltaici per la generazione in loco di energia da fonte rinnovabile. Nella sezione precedente, si è visto come, grazie all'impianto fotovoltaico (PV), parte del fabbisogno di energia elettrica complessivo dell'impianto possa essere coperto dall'autogenerazione. Questa frazione può essere aumentata attuando delle strategie di controllo avanzate con lo scopo di massimizzare l'autoconsumo. Ciò è possibile sfruttando la regolazione della frequenza di alimentazione del compressore della PdC – e dunque variando la potenza elettrica assorbita da quest'ultimo – in maniera tale da sfruttare l'eccesso di produzione fotovoltaica.

Nello specifico, in questa analisi si è implementato un sistema di controllo di tipo *"rule based"* che, al verificarsi di determinate condizioni, interviene regolando la velocità di rotazione del compressore della pompa di calore (PdC) e quindi la potenza termica generata. In particolare, il controllo si attiva qualora la potenza elettrica generata dall'impianto fotovoltaico superi il fabbisogno elettrico istantaneo assorbito dalla PdC e dalle (eventuali) resistenze ausiliarie. Al verificarsi di tale condizione, il controllo aumenta la potenza termica generata (rispettando i vincoli di funzionamento), e di conseguenza l'assorbimento elettrico della PdC in modo da sfruttare tutta la produzione fotovoltaica disponibile. A tale scopo, vengono innalzati i setpoint di temperatura degli accumuli termici affinché sia possibile immagazzinare l'eccesso di produzione di energia termica. Si è data precedenza al surriscaldamento dell'accumulo per la produzione di acqua calda sanitaria (ACS) essendo la domanda di ACS presente in ogni periodo dell'anno. Pertanto, in tali condizioni, il setpoint dell'accumulo per l'ACS viene alzato da 50°C a 60°C e, nel caso in cui esso sia già carico, il controllo provvede ad aumentare il setpoint dell'accumulo destinato al riscaldamento caricandolo a 40°C.

L'innalzamento dei setpoint comporta l'aumento del consumo elettrico della PdC e un abbassamento delle prestazioni e, dunque, affinché il controllo sia efficace, è necessario che via sia la possibilità di immagazzinare sufficiente energia termica in modo da ridurre il tempo di lavoro della PdC al di fuori delle ore di disponibilità di energia solare. Per questo motivo i volumi degli accumuli considerati nell'analisi sono stati aumentati del 50% e 100% rispettivamente per l'accumulo per ACS e riscaldamento.

L'analisi dettagliata è stata svolta per il caso monofamiliare (MF). La figura Figura 19 riporta l'andamento del fabbisogno elettrico dalla rete per tutti i casi con e senza il controllo per massimizzare l'autoconsumo. I casi con il controllo – linee tratteggiate – ottengono consumi più bassi con incidenza maggiore per gli edifici vetusti.

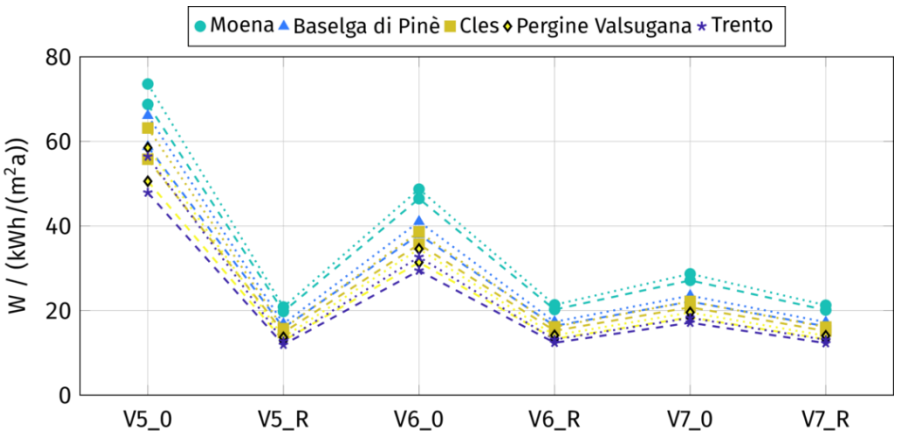

Figura 19 – Fabbisogno di energia elettrica dalla rete per l'edificio monofamiliare (MF) in caso in cui il controllo avanzato è attivo (linea tratteggiata) e non.

Nelle figure Figura 20 e Figura 21 sono mostrati gli andamenti per classe di vetustà e comune del *"supply cover factor"* (SCF) e *"load cover factor"* (LCF) annuali. Il primo è definito come il rapporto fra l'energia autoconsumata e l'energia autoprodotta e fornisce un'indicazione sull'effettivo sfruttamento della produzione di energia in loco. Il secondo fattore rappresenta la frazione del fabbisogno totale coperto dall'autoconsumo, ossia è il rapporto fra l'energia autoconsumata e il fabbisogno elettrico totale.

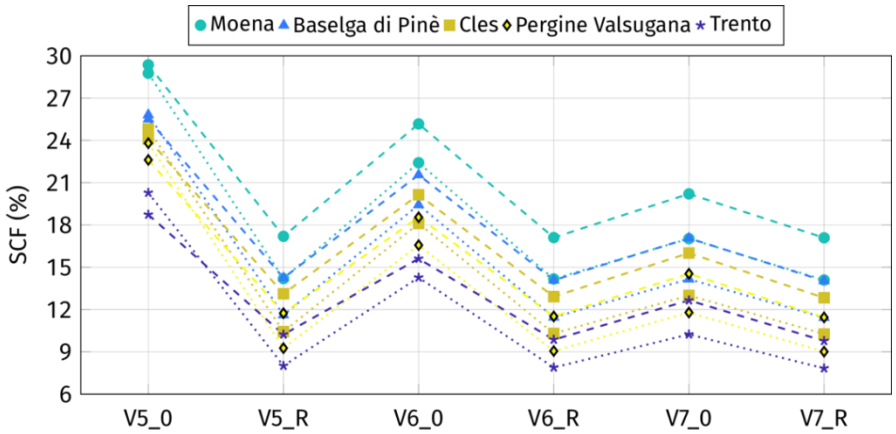

Figura 20 – "Supply cover factor" (SCF) per l'edificio monofamiliare (MF) in caso in cui il controllo avanzato è attivo (linea tratteggiata) e non.

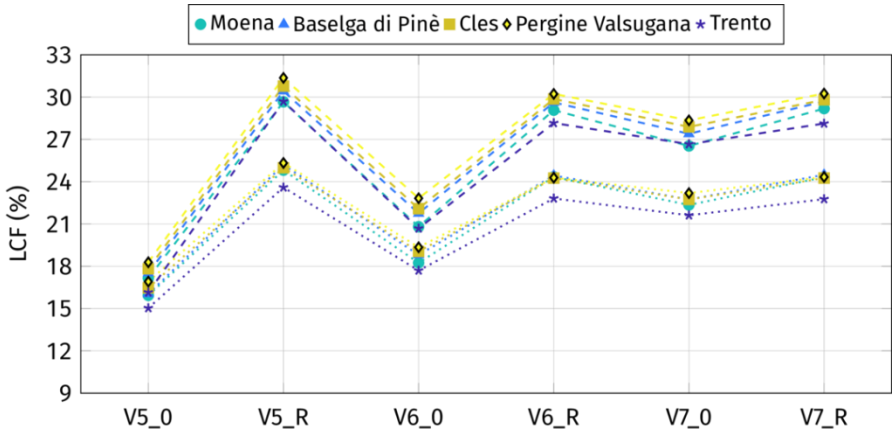

Figura 21 – "Load cover factor" (LCF) per l'edificio monofamiliare (MF) in caso in cui il controllo avanzato è attivo (linea tratteggiata) e non.

Lo sfruttamento dell'energia autoprodotta come atteso aumenta per effetto dell'attivazione del controllo, tuttavia esso decresce al crescere della qualità dell'involucro come conseguenza della riduzione del fabbisogno di energia mentre rimane costante la produzione dei PV. Allo stesso modo, il SCF è maggiore nelle località più fredde. Per quanto riguarda il LCF, la distinzione è più netta come si evince dalla *Figura 21*, con i casi dotati di controllo per l'autoconsumo che aumentano in media del 5% la copertura del fabbisogno totale con energia autoconsumata. I casi rinnovati, per effetto della riduzione del fabbisogno totale presentato anche i LCF più elevati.

Bibliografia

A. Bello, Scenario di riqualificazione energetica degli edifici residenziali in Trentino

F. Carrara, R. Brunelli, M. Borgarello, Provincia autonoma di Trento - I consumi energetici - I - Il riscaldamento residenziale, 2015, APRIE, rapporto interno

A. Capozza, F. Carrara, M. Gobbi, F. Madonna, F. Ravasio, A. Panzeri, Analisi tecnico-economica di interventi di riqualificazione energetica del parco edilizio residenziale italiano RSE 14002104, 2013. Rapporto Ricerca di Sistema

F. Madonna, V. Corrado, Studio sulla riqualificazione energetica di edifici residenziali RSE 14002701, 2013.

M. Pinamonti, A. Prada, and P. Baggio. Rule-based control strategy to increase photovoltaic self-consumption of a modulating heat pump using water storages and building mass activation. Energies, 13(23), 2020

UNI 10349-1. Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradianza solare nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradianza solare su di una superficie inclinata. UNI Ente Italiano di Normazione. 2016

UNI EN 16147. Pompe di calore con compressore elettrico - Prove, valutazione delle prestazioni e requisiti per la marcatura delle apparecchiature per acqua calda sanitaria. UNI Ente Italiano di Normazione. 2017

UNI EN ISO 52016-1. Prestazione energetica degli edifici - Fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne e carichi termici sensibili e latenti - Parte 1: Procedure di calcolo. UNI Ente Italiano di Normazione. 2018

UNI/TR 10349-2. Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 2: Dati di progetto. UNI Ente Italiano di Normazione. 2016

UNI/TR 11552. Abaco delle strutture costituenti l'involucro opaco degli edifici - Parametri termofisici. UNI Ente Italiano di Normazione. 2014

UNI/TS 11300-2. Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria. 2008

UNI/TS 11300-4. Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria. UNI Ente Italiano di Normazione. 2016

University of Wisconsin--Madison. Solar Energy Laboratory. TRNSYS, a Transient Simulation Program. Madison, Wisconsin.:The Laboratory, 1975.