



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi di sistemi sperimentali solar driven per la climatizzazione e la produzione di ACS presso utenze finali dell'isola di Lampedusa

M. Beccali, G. Leone, P. Finocchiaro,
G. Ciulla, V. Lo Brano

ANALISI DI SISTEMI SPERIMENTALI SOLAR DRIVEN PER LA CLIMATIZZAZIONE E LA PRODUZIONE DI ACS
PRESSO UTENZE FINALI DELL'ISOLA DI LAMPEDUSA

Marco M. Beccali, G. Leone, P. Finocchiaro, G. Ciulla, V. Lo Brano

Dicembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: D1 - Tecnologie per costruire gli edifici del futuro

Obiettivo: A1 - Architetture impiantistiche ibride per la climatizzazione degli edifici

Responsabile del Progetto: ing. Giovanni Puglisi, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: "Analisi di sistemi sperimentali solar driven per la climatizzazione e la produzione di acs presso utenze finali dell'isola di Lampedusa"

Responsabile scientifico ENEA: ing. Biagio Di Pietra



Responsabile scientifico Università degli Studi di Palermo: Prof. Ing. Marco Beccali



Indice

| | |
|--|----|
| <i>Premessa</i> | 4 |
| 1. Studio sull'integrazione di un'unità di climatizzazione solare presso l'edificio dell'Area Marina Protetta .. | 6 |
| 1.1 Presentazione del caso studio | 6 |
| 1.2 Progetto preliminare | 9 |
| 1.3 Analisi in regime dinamico del sistema edificio - impianto | 14 |
| 2. Analisi dei dati di monitoraggio invernali per il sistema freescoofaro | 18 |
| 2.1 Analisi delle prestazioni giornaliere | 18 |
| 2.2 Analisi delle prestazioni medie mensili | 25 |
| 3. Pompa di Calore per la produzione di ACS integrata con impianto Fotovoltaico: installazione presso un edificio residenziale nel centro abitato. Generazione dei profili di consumo di acqua calda sanitaria presso utenti isolani | 27 |
| 2.1 Scelta e presentazione del caso studio | 27 |
| 2.2 Stima dei consumi e impianto ACS | 30 |
| 2.2.1 Profilo di prelievo dell'utenza: metodologia di elaborazione | 31 |
| 2.2.2 Simulazioni in regime dinamico | 33 |
| 2.3 Risultati e Progetto preliminare | 35 |
| Pompa di calore da parete | 37 |
| Pompa di calore da pavimento | 41 |
| 2.4 Layout di impianto | 44 |
| Conclusioni | 46 |
| Bibliografia | 47 |

Premessa

Il presente report di ricerca rappresenta un ulteriore approfondimento sul tema dell'efficientamento energetico delle isole minori rispetto al lavoro svolto nelle precedenti trienni. Sono state selezionate due utenze residenziali e del terziario che presentano caratteristiche utili all'installazione e alla prova in campo delle tecnologie heat driven sperimentali. In questa fase si è voluto investigare la possibilità di installare presso la sede dell'Area Marina Protetta e un'abitazione privata tipo le tecnologie finora studiate: sistema solar cooling *Freescoc facade*, sistema pompa di calore per ACS con FV e accumulo elettrico/termico. Le caratteristiche di domanda delle due unità immobiliari sono state analizzate ed associate a tipologie rappresentative di utenze simili nel contesto territoriale in oggetto. Inoltre, sono stati acquisiti ed elaborati i dati di monitoraggio del funzionamento invernale del sistema solar heat driven *FreeSCoo* installato presso i locali del Laboratorio ENEA di Lampedusa (Faro Grecale). Si sono inoltre analizzati i dati relativi ai consumi di ACS derivanti dai monitoraggi svolti in questi anni e da rilevamenti statistici al fine di elaborare una metodologia per la generazione dei profili di consumo di acqua calda sanitaria presso utenti isolani sufficientemente affidabili.

Nel **Capitolo 1** viene descritto il progetto per l'installazione del sistema di solar cooling compatto presso l'edificio dell'Area Marina Protetta a Lampedusa. In una prima fase viene svolta l'analisi termica del locale scelto per l'installazione del sistema di raffrescamento alimentato ad energia solare ovvero un ufficio avente un'area utile di 27 m² posto al primo piano dell'edificio e avente esposizione SUD. Tale locale presenta infatti un carico termico frigorifero compatibile con la potenza della macchina di solar cooling oggetto di studio. Dall'analisi dei carichi termici effettuata, risulta che la potenza frigorifera massima richiesta per mantenere le condizioni di comfort è di circa 2 kW e dunque circa 10% minore rispetto a quella della macchina (2,2kW). Nel calcolo è stata considerata anche l'aliquota di potenza relativa al ricambio dell'aria pari a 0,5 vol/h. La posizione del locale scelto permette inoltre un comodo posizionamento della macchina frigorifera sulla terrazza che circonda gli uffici. In particolare, questa potrà essere montata sulla parete con esposizione Sud come mostrato in figura. Grazie alla presenza di un muro parapetto, l'unità di climatizzazione resta inoltre coperta alla vista. Il passaggio delle tubazioni di mandata e ritorno dei collettori solari può essere realizzato all'interno di un finto pluviale in modo da mantenerle nascoste alla vista e protette dagli agenti atmosferici. Vengono infine presentati i risultati dell'analisi in condizioni dinamiche del sistema edificio impianto realizzate con il software TRNSYS.

Nel **Capitolo 2** vengono riportati i risultati del proseguimento della campagna di monitoraggio invernale del sistema *freescoc* installato presso la sede ENEA al faro di Grecale a Lampedusa. I dati analizzati sono quelli relativi ai mesi di Novembre e Dicembre del 2018, durante i quali il sistema ha funzionato in modalità di riscaldamento e produzione di ACS. Nel periodo considerato il sistema ha funzionato regolarmente senza interruzioni fornendo calore per la preparazione di ACS e all'edificio sotto forma di flusso d'aria calda con temperatura mediamente attorno a 35°C. Non essendo installato nessun tipo di dispositivo ausiliario per la generazione del calore, il funzionamento in riscaldamento è stato programmato in funzione della disponibilità di calore ai collettori solari. E' da sottolineare che, a causa delle condizioni miti del clima di Lampedusa nel periodo considerato, il funzionamento in riscaldamento è stato limitato dal fatto che spesso la temperatura registrata all'interno dell'edificio è stata maggiore di 20 °C. In questi casi il calore prodotto da solare è stato interamente utilizzato per il riscaldamento dell'acqua calda sanitaria. L'efficienza elettrica media per il mese di dicembre (dati analizzati fino al 21.12) calcolata come somma del calore per riscaldamento e ACS diviso il totale dell'energia elettrica utilizzata, è risultata pari a 10,9 mentre il valore minimo e massimo sono stati rispettivamente pari a 4,5 e 15,5.

Nel **Capitolo 3** si è valutata la fattibilità tecnica relativa alla sostituzione dello scaldacqua elettrico con un impianto Pompa di Calore in uno caso studio rappresentativo selezionato fra le Utenze monitorate durante

il triennio di studio. Sono, quindi, stati stimati i consumi elettrici di una Pompa di Calore dedicata alla produzione di ACS della specifica utenza, al fine di un pre-dimensionamento dell'impianto. Si è proceduto attraverso simulazione in regime dinamico alla definizione della migliore soluzione impiantistica a partire dalle tecnologie presenti nel mercato da integrarsi con un impianto fotovoltaico dedicato. Nello specifico sono stati analizzati due differenti modelli di pompa di calore da 100 e 200 litri di accumulo e sono stati indagati gli effetti sulla prestazione del sistema dovuti alla presenza di un accumulo elettrico e/o termico.

A partire dai dati di fatturazione per la fornitura di energia elettrica e dai dati monitorati di consumo dello scaldacqua, attualmente installato presso l'Utenza, si è definito un profilo di prelievo orario e mensile proprio del caso studio da applicare alle simulazioni. Si è così stimato un consumo annuale per la produzione di ACS dell'Utenza analizzata pari a 365 kWh. Sulla base dei risultati ottenuti in questa prima fase si sono determinate le principali caratteristiche dell'impianto fotovoltaico dedicato con l'obiettivo di massimizzare il consumo dell'energia elettrica prodotta e/o accumulata dall'impianto ai fini della produzione e/ accumulo di ACS a determinata temperatura per mezzo della Pompa di Calore.

In termini di consumi di energia elettrica, a parità di condizioni di prelievo e in funzionamento standard, non si sono riscontrate differenze fra le due tecnologie. Nel caso della Pompa di Calore da 100 litri si è proposto un impianto fotovoltaico da 480 e 720 Wp, dal cui confronto non sono emerse sostanziali differenze in termini di prestazioni energetiche o di risparmi economici; mentre per la Pompa di Calore da 200 litri si è utilizzato un impianto da 720 Wp essendo la potenza nominale del compressore pari a 490 W. Si è infine ipotizzato, ad integrazione del sistema, l'installazione di un accumulo elettrico da 1200 Wh in grado di accumulare la quantità di energia utile al funzionamento giornaliero della Pompa di Calore, prevalentemente concentrato nelle ore serali, by-passando lo scambio con la rete e favorendo l'utilizzo diretto della produzione elettrica. Le soluzioni proposte sono state valutate sia in termini di consumo energetico sia in termini di comfort per l'utenza.

Dall'analisi dei risultati in presenza/assenza di accumulo elettrico è risultato necessario in entrambi i casi l'utilizzo della batteria in grado di fornire energia necessaria alla Pompa di Calore nelle ore serali quando si verifica per l'utenza analizzata il prelievo principale di ACS. Solamente nel caso della Pompa di Calore da 200 litri di accumulo è possibile integrando un funzionamento a *sincronizzazione produzione-radiazione del carico*, finalizzato a ottimizzare il consumo dell'energia elettrica prodotta dal fotovoltaico, alla presenza dell'accumulo elettrico si raggiunge una quota di copertura da FER per la produzione di ACS pari al 100% garantendo una erogazione di acqua calda a temperatura sempre superiore ai 45°C.

1. Studio sull'integrazione di un'unità di climatizzazione solare presso l'edificio dell'Area Marina Protetta

Nelle pagine seguenti, viene presentato lo studio svolto sulla possibile integrazione di un impianto dimostrativo che prevede l'installazione di un'unità compatta di solar cooling presso l'edificio dell'area Marina Protetta a Lampedusa, [Figura 1](#).



Figura 1 Vista aerea dell'edificio dell'Area Marina Protetta a Lampedusa

1.1 Presentazione del caso studio

Oggetto di studio è la sede dell'Area Marina Protetta (AMP) dell'Isola di Lampedusa. Si tratta di un edificio su 2 elevazioni fuori terra con struttura in muratura portante in conci di tufo intonacati sui due lati e solai in latero cemento. Il piano terra ospita una sala conferenza e una zona espositiva mentre al primo piano si trovano due ambienti destinati ad ufficio, uno esposto a nord e un secondo esposto ad sud, quest'ultimo oggetto dell'intervento impiantistico proposto ([Figura 2](#)). Si tratta di un ambiente con superficie utile pari a 27 m², un'altezza interna media di 3 m e presenta, oltre a 5 infissi vetrati, esposti a sud, di superficie pari a 0.25 m² ciascuno, un lucernaio di 1.9 m². Le superfici vetrate sono tutte caratterizzate da infissi in legno con vetro singolo. Allo stato attuale, la climatizzazione dell'ufficio è affidata ad una Pompa di Calore del tipo split aria/aria. Sulla base dei rilievi effettuati, si è quindi proceduto alla definizione di un'unica zona termica corrispondente al locale analizzato al fine di stimare i fabbisogni termici e i consumi dell'ambiente e determinare le potenze necessarie all'impianto in condizioni di utilizzo reale della struttura. Tali valutazioni sono state effettuate tramite simulazioni sia in regime dinamico sia in regime semi-stazionario imponendo per le superfici interne confinanti con ambienti climatizzati (solaio verso piano terra e pareti interne) una condizione a contorno adiabatica.

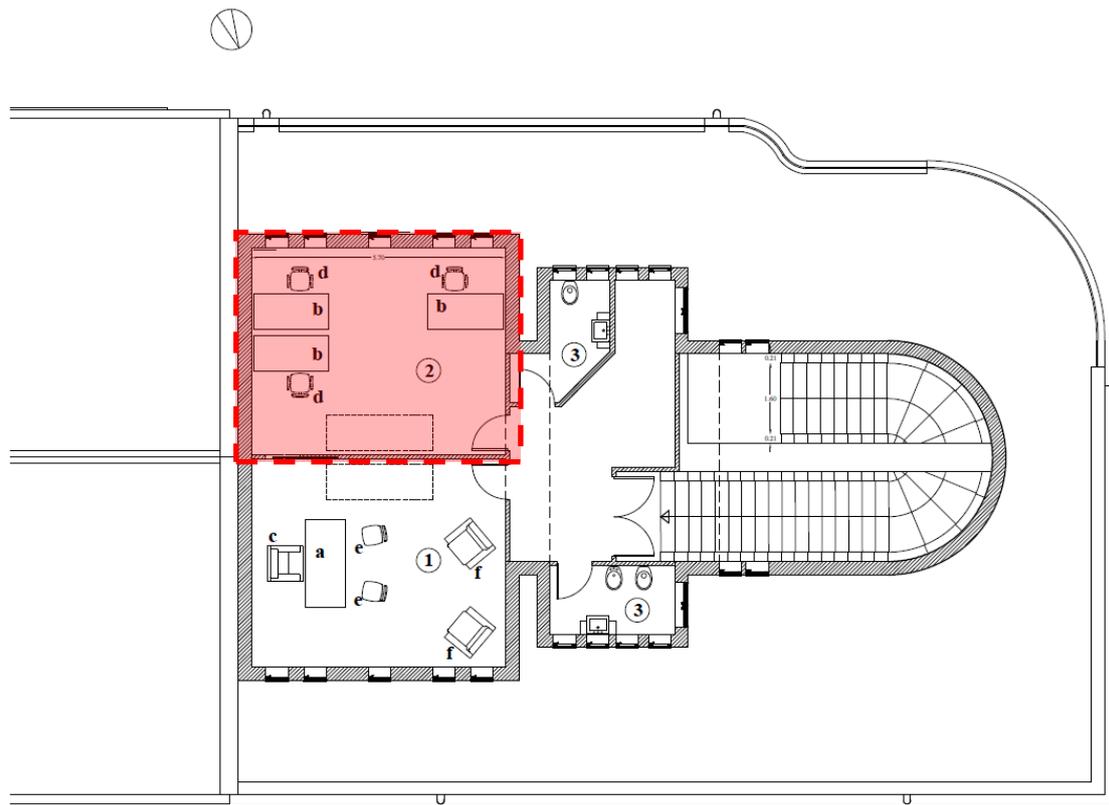


Figura 2 Pianta dell'edificio e del locale scelto per l'installazione del sistema freesco (tratteggiato in rosso)

Si sono pertanto individuati i principali elementi costituenti l'involucro edilizio disperdente:

- parete esterna portante in tufo,
 - solaio di copertura con struttura portante in latero-cemento,
 - superfici vetrate (finestre e lucernaio) tutte caratterizzate da telaio in legno duro e vetro singolo
- di cui si riportano in [Tabella 1](#) le dimensioni e le principali caratteristiche termiche ai fini del calcolo.

Tabella 1 Caratteristiche termofisiche dell'involucro

| COMPONENTI TRASPARENTI | vetro singolo | | | Telaio legno | Valori complessivi | | |
|--|----------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|------------------------------|------|
| | emissività [-] | trasmissione solare [-] | trasmissione termica [W/m²K] | trasmissione termica [W/m²K] | Superficie [m²] | Trasmissione termica [W/m²K] | |
| Finestre | 0.89 | 0.78 | 5.70 | 2.20 | 0.25 | 5.00 | |
| Lucernaio | | | | | 1.9 | 5.00 | |
| COMPONENTI OPACHI (da interno verso esterno) | s [m] | λ [W/mK] | ρ [kg/m³] | c [J/KgK] | R [m²K/W] | Trasmissione [W/m²K] | |
| Parete esterna | intonaco | 0.03 | 0.700 | 1400 | 1000 | 0.043 | 1.23 |
| | tufo | 0.3 | 0.550 | 1600 | 1000 | 0.545 | |
| Solaio | intonaco | 0.05 | 0.050 | 1800 | 910 | 0.056 | 1.27 |
| | intonaco | 0.03 | 0.700 | 1400 | 1000 | 0.043 | |

| | | | | | | | |
|--|------------------|------|-------|------|------|-------|--|
| | massetto | 0.16 | | 900 | 1000 | 0.330 | |
| | laterocemento | 0.04 | 0.580 | 1400 | 1000 | 0.069 | |
| | finitura esterna | 0.01 | 1.3 | 2300 | 840 | 0.008 | |

In funzione della destinazione d'uso e della zona climatica si sono considerate i seguenti valori di temperatura di setpoint da garantirsi nell'ambiente durante le effettive ore di effettivo utilizzo, queste ultime stimate sulla base degli orari di apertura del centro, *Tabella 2*.

Tabella 2 Set-point e schedule di funzionamento dell'impianto

| | periodo | orario | T-setpoint [°C] |
|----------------|---------------------------|---------------|-----------------|
| heating | da 01 dicembre a 15 marzo | 09:00 – 19:00 | 22 |
| cooling | da 16 marzo a 30 novembre | 10:00 – 20:00 | 26 |

I ricambi d'aria sono principalmente dovuti alle infiltrazioni causate dalla scarsa tenuta all'aria degli infissi e all'apertura degli stessi, pertanto si stima un valore pari a 0.5 V/h; mentre per i carichi interni si ipotizza che le 3 postazioni siano occupate negli orari di lavoro e che ciascuna di esse sia dotata di un PC (*Tabella 3*).

Tabella 3 Principali caratteristiche della zona termica

| | | |
|---|---------|----------------|
| Volume netto climatizzato | 79,00 | m ³ |
| Superficie netta climatizzata | 26,70 | m ² |
| Numero totale di persone | 3,000 | - |
| Potenza elettrica totale illuminazione/macchinari | 150 | W |
| Calore sensibile per persona | 64 | W |
| Calore latente per persona | 55 | W |
| Ventilazione/infiltrazioni | 0.5 | V/h |
| Esposizione principale | S - SE | |
| Tipo di utilizzo | Ufficio | |

Da una prima valutazione in regime semi-stazionario si è, quindi, stimato per l'ambiente in questione un fabbisogno di energia termica non rinnovabile per la climatizzazione pari a 150.37 kWh/m²anno con EPH_{gl,nren} pari a 54.95 kWh/m²anno e EPC_{gl,nren} pari a 76.96 kWh/m²anno; con un consumo totale annuo di energia elettrica, nell'ipotesi di utilizzare l'attuale Pompa di Calore aria/aria, per i servizi di climatizzazione pari a 1523 kWh_e. Considerate le caratteristiche dell'involucro e le condizioni climatiche si è evidenziato come la presenza del lucernaio incida sul fabbisogno termico estivo dell'ambiente. Nelle condizioni di carico più gravose si verifica infatti un'incidenza degli apporti per irraggiamento pari a circa il 50% rispetto al carico globale dovuta principalmente alla presenza del lucernaio (80% rispetto alla trasmissione attraverso gli infissi), *Tabella 4*.

Tabella 4 Valori di irraggiamento attraverso le superfici vetrate in un giorno t di Agosto.

| Ora | 8:00 | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 |
|--|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Q_{irr} [W] - lucernaio | 469 | 513 | 570 | 623 | 676 | 721 | 734 | 725 | 678 | 602 | 347 |
| Q_{irr} [W] – tot infissi sud | 115 | 125 | 140 | 155 | 165 | 175 | 180 | 180 | 165 | 150 | 85 |

Dal calcolo in regime dinamico, sulla base del file climatico orario, si evidenziano i risultati mensili in [Figura 3](#). Tale locale presenta pertanto un carico termico frigorifero compatibile con la potenza della macchina oggetto di studio. Da quanto risulta dall'analisi dei carichi termici presentata in precedenza, la potenza frigorifera massima richiesta per mantenere le condizioni di comfort è di circa 2 kW e dunque circa 10% minore rispetto a quella della macchina (2,2kW).

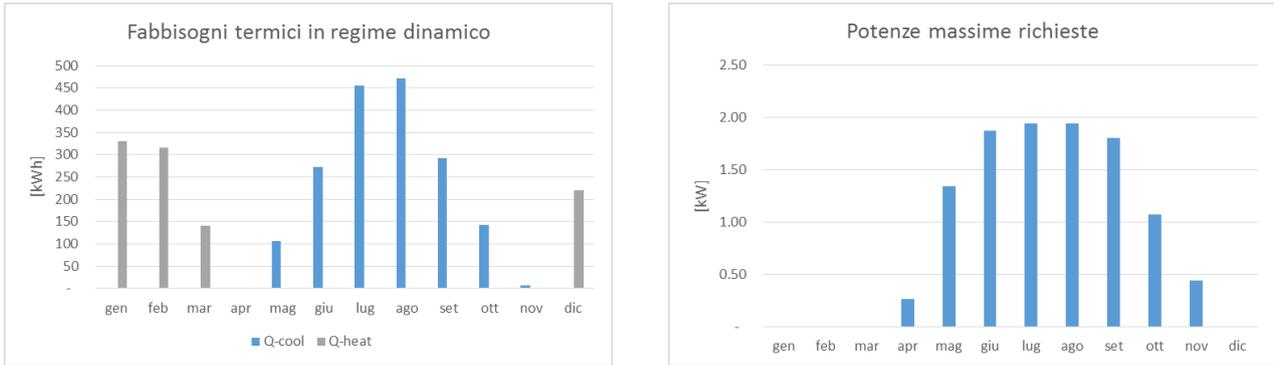


Figura 3 Risultati della simulazione in regime dinamico.

1.2 Progetto preliminare

La posizione del locale scelto permette inoltre un comodo posizionamento della macchina frigorifera sulla terrazza che circonda gli uffici. In particolare, questa potrà essere montata sulla parete con esposizione Sud come mostrato in [Figura 4](#). Grazie alla presenza di un muro parapetto, l'unità *freescoo* resta inoltre coperta alla vista. Il passaggio delle tubazioni di mandata e ritorno dei collettori solari può essere realizzato all'interno di un finto pluviale in modo da mantenerle nascoste alla vista e protette dagli agenti atmosferici.

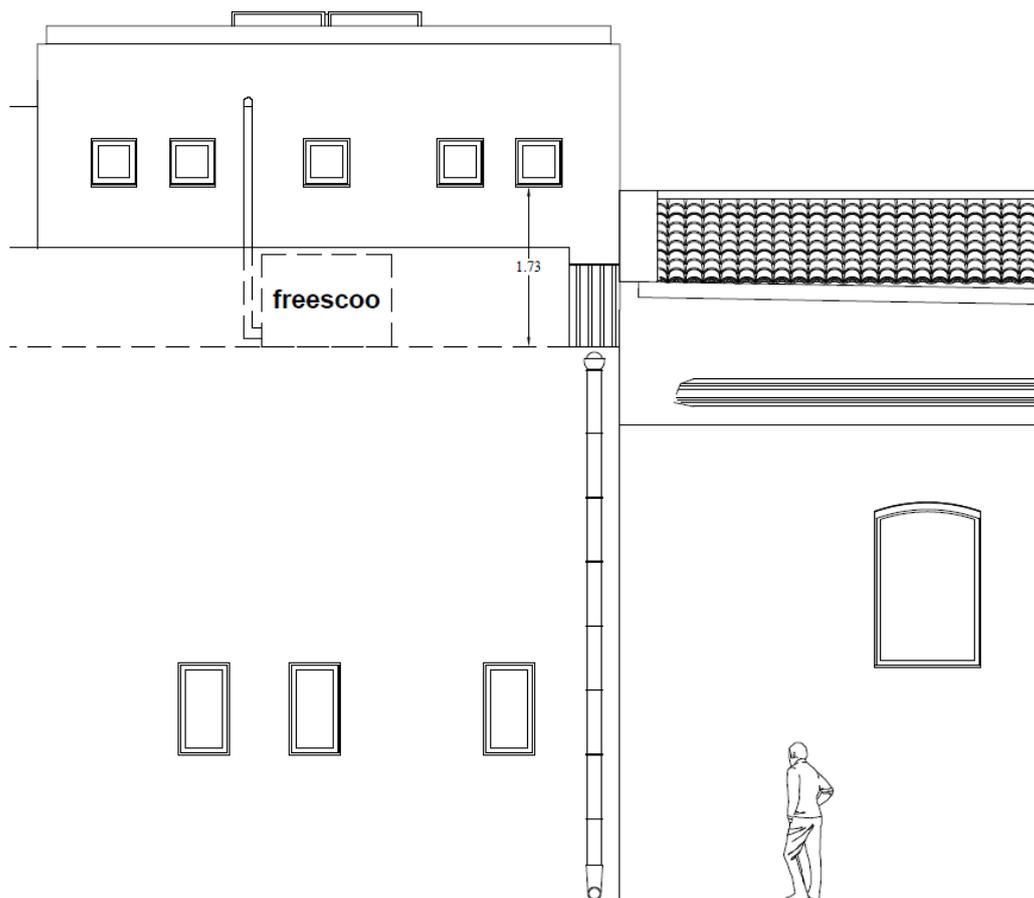


Figura 4: Prospetto lato Sud

I collettori solari possono essere montati sul solaio di copertura del locale in questione in modo da essere quasi del tutto coperti dalla balaustra che circonda la copertura, alta circa 90 cm (Figura 5). L'inclinazione scelta per i collettori è pari a 26° in modo da massimizzare la produzione da solare nei mesi estivi, Figura 6.

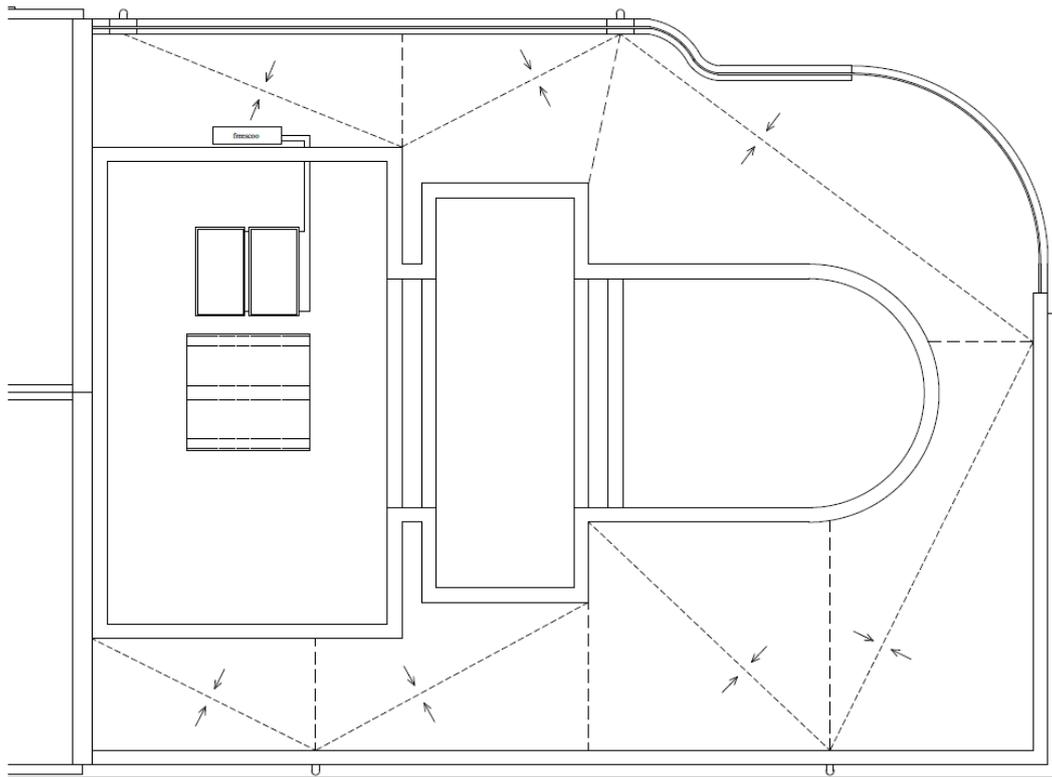


Figura 5: Pianta della copertura con i collettori solari

La distanza dei collettori dalla balaustra è di circa 1,3 m, in modo da evitare ombreggiamenti sul piano del collettore nei mesi invernali.

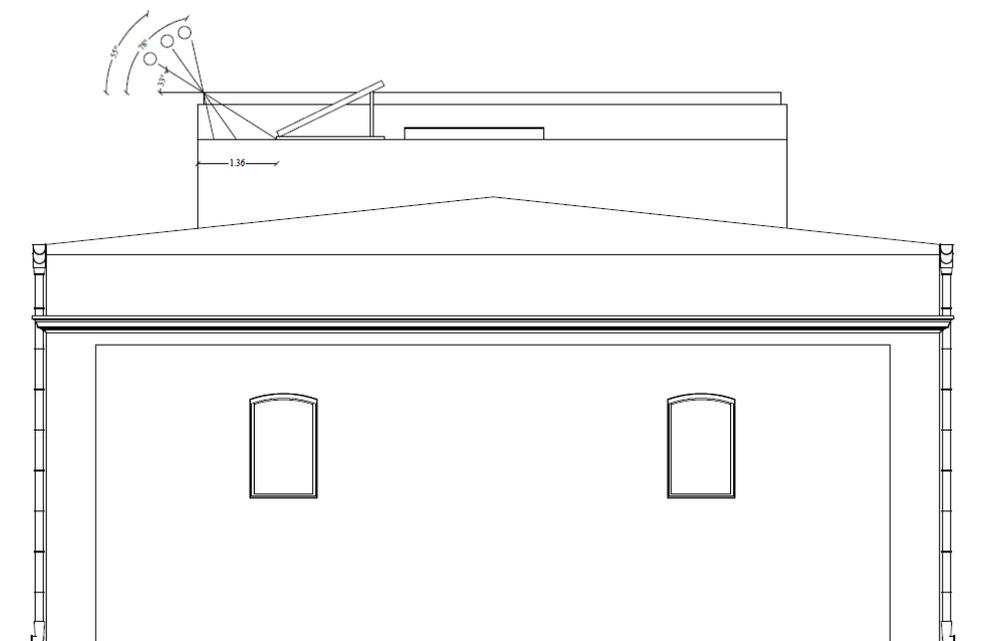


Figura 6: Vista laterale lato Est

L'unità di climatizzazione solare può essere direttamente posata sulla terrazza in adiacenza alla parete avente esposizione SUD così come mostrato in [Figura 7](#). I canali per l'immissione e l'estrazione dell'aria dall'ambiente attraversano hanno un percorso minimo dovendo solo attraversare la parete.

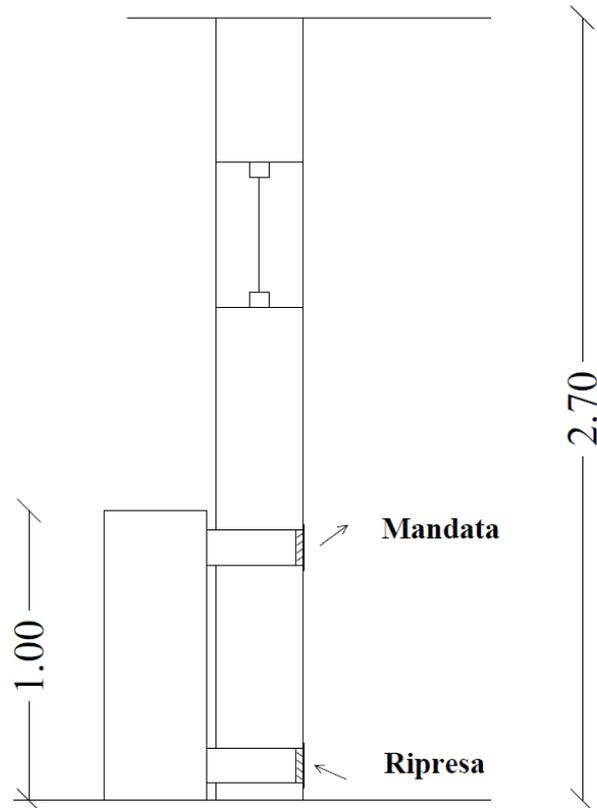


Figura 7: Posizionamento dell'unità *freescoc* e sezione della parete Sud

L'unità va collegata ai collettori solari termici secondo lo schema impiantistico mostrato in [Figura 8](#). Si noti che nell'impianto non è previsto l'utilizzo di sistemi di accumulo termico. Ciò è dovuto al fatto che l'unità in questione ha un'elevata capacità di accumulo sotto forma di calore latente. Infatti la massa di materiale essiccante utilizzato permette di accumulare l'energia solare sotto forma di capacità adsorbente che può essere utilizzata anche nei momenti in cui non è disponibile il calore solare. Ciò risulta essere un vantaggio in termini di riduzione degli ingombri, del numero di componenti e in definitiva dei costi del sistema.

Gli organi di sicurezza, il vaso di espansione e il circolatore possono essere posizionati al di sotto dello spazio dei collettori solari in modo da ridurre alla sola unità di climatizzazione i componenti installati sul piano della terrazza. Come già accennato le tubazioni di collegamento verso i collettori solari possono passare all'interno di un tubo pluviale appositamente montato.

Di seguito si riportano i disegni dell'unità di climatizzazione che si intende installare, [Figura 8](#) e [Figura 9](#).

Collettori solari

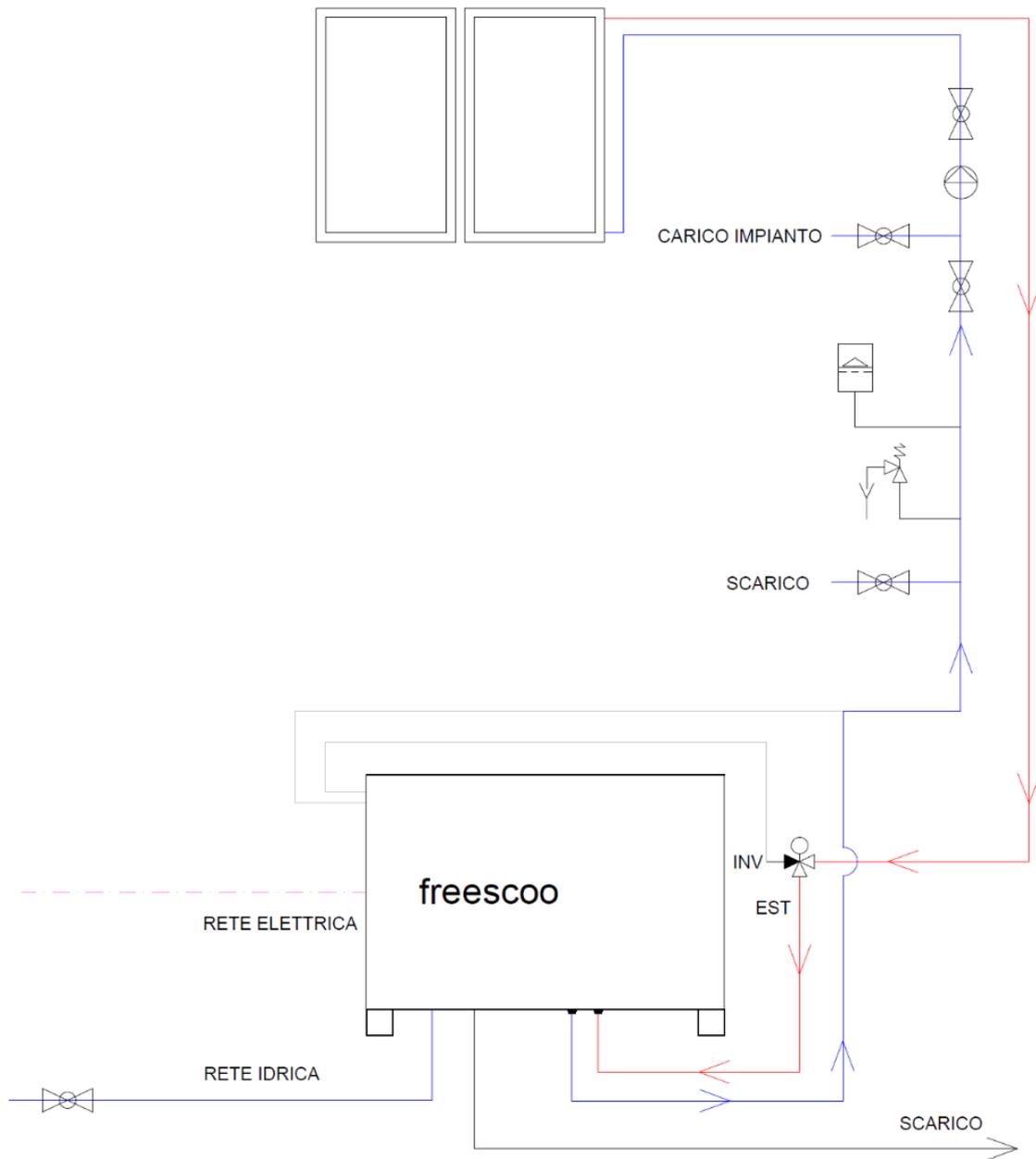


Figura 8: Schema impiantistico per l'allacciamento del sistema di climatizzazione all'impianto solare termico

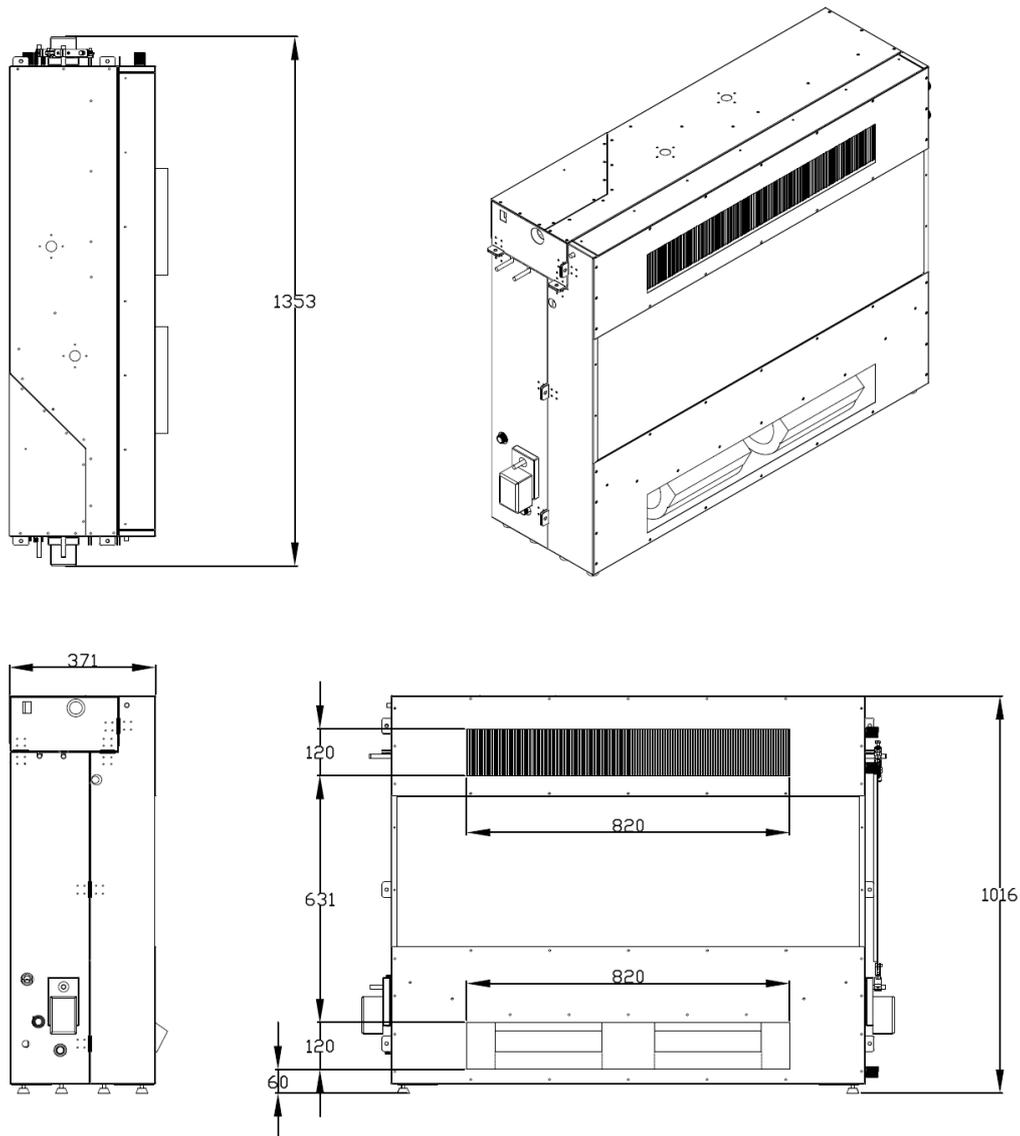


Figura 9: Disegni dell'unità di climatizzazione solare

1.3 Analisi in regime dinamico del sistema edificio - impianto

Il sistema è stato oggetto di studio tramite simulazioni dinamiche svolte con il software TRNSYS. Per l'analisi è stato utilizzato il modello sviluppato già in precedenza ([1], [2], [3]) con aggiornamenti relativi soprattutto all'edificio, ai collettori solari e al sistema di controllo. E' stata esclusa la parte del modello relativa all'ACS, non essendo previsto l'utilizzo di ACS nell'edificio in questione.

Tabella 5: Principali parametri e ipotesi – simulazioni TRNSYS

| Descrizione | Valore |
|--|-----------------------------|
| File meteo utilizzato | LAMPEDUSA_ISLAND-hour.tm2 |
| Time step | 0,25 ore |
| Soglia di temperatura per l'accensione e spegnimento in regime estivo | T solare > 50°C |
| Funzionamento | in regime di raffreddamento |
| Temperatura di produzione dell'acqua calda sanitaria | [no ACS] |
| Set point di temperatura nell'edificio | 26 °C in estate |
| Regolazione del sistema | Portata variabile |

Si è considerato l'uso di collettori solari piani aventi le seguenti caratteristiche:

Tabella 6: Collettori solari utilizzati

| Descrizione | Valore |
|-----------------------------|------------------|
| Area lorda | 2 m ² |
| η_0 | 0,76 |
| a1 [WK-1m-2] | 3,6 |
| a2 [WK-2m-2] | 0,014 |
| Numero di collettori | 2 |

Nel sistema non è previsto nessun serbatoio di accumulo del calore, ovvero i collettori solari sono direttamente collegati alla macchina di climatizzazione che utilizza il calore solare così come previsto nello schema impiantistico.

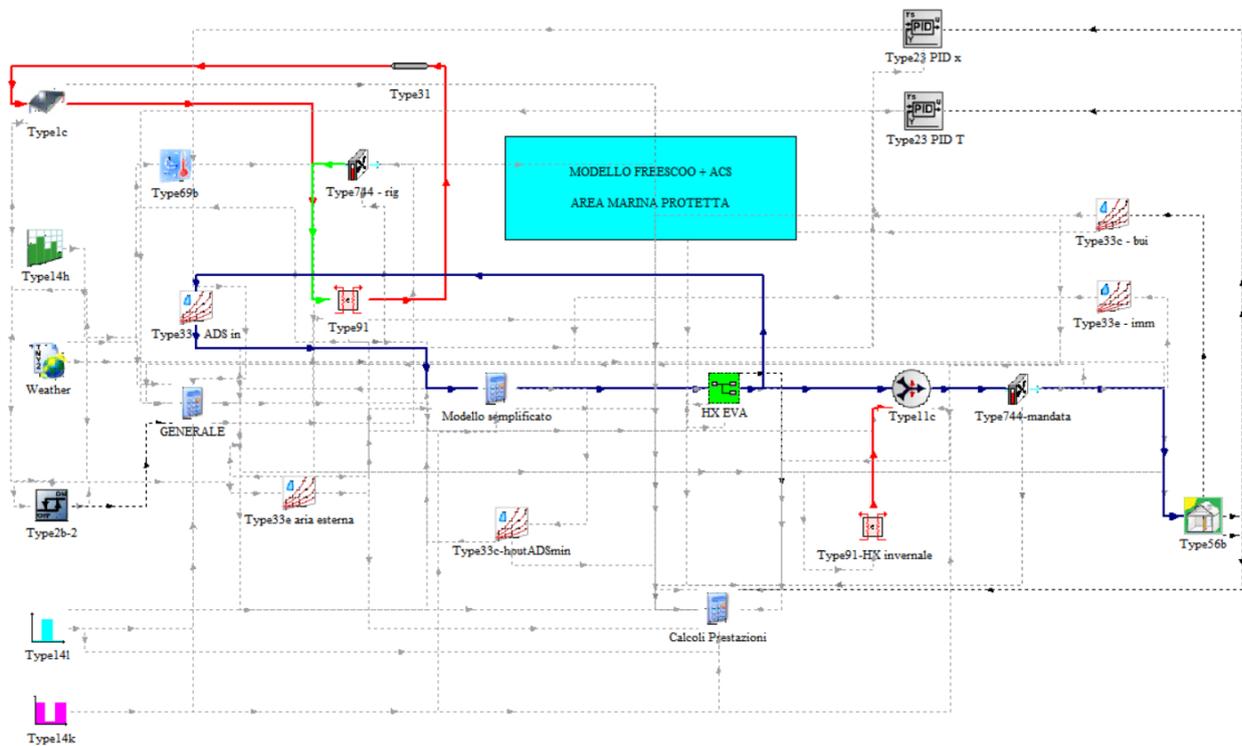


Figura 10: Progetto TRNSYS utilizzato per la simulazione del sistema edificio – impianto

Durante le ore diurne è stata considerata la presenza di tre occupanti con relative postazioni per terminali, mentre il ricambio dell'aria è stato impostato pari a 0,5 vol/h. Per tutti gli altri aspetti relativi all'edificio in termini di geometria, trasmittanza degli elementi opachi e finestrate e altro si è fatto riferimento ai disegni e alle grandezze presentate nel paragrafo relativo all'analisi dei carichi termici del locale.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti per le prime due settimane di luglio. In *Figura 11* si vede che la temperatura di immissione dell'aria nel locale oscilla tra 19 e 20°C durante le ore di funzionamento, facendo sì che possa essere mantenuta quasi sempre la temperatura desiderata di 26°C all'interno del locale. Si può notare infatti che il valore della variabile di controllo PID che determina la potenza frigorifera

della macchina resta mediamente al di sotto di 1 ovvero il sistema va in parzializzazione perché raggiunte le condizioni desiderate. Solo in presenza di giornate particolarmente calde, la temperatura nel locale sale oltre i 26 raggiungendo 27°C.

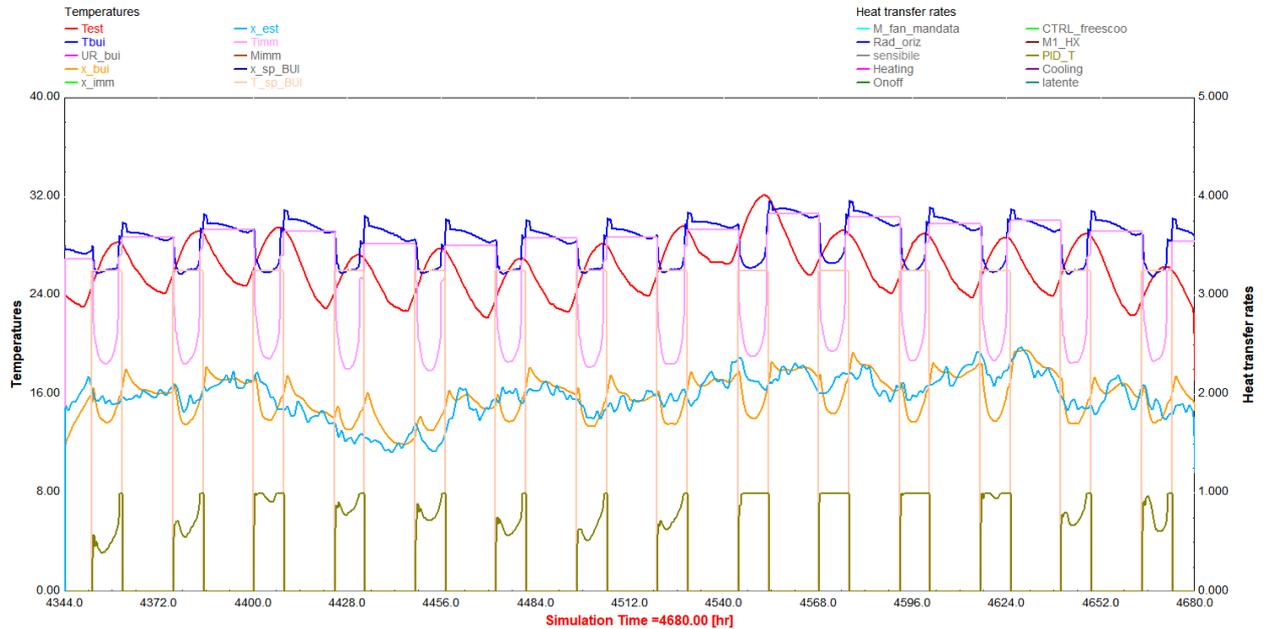


Figura 11: Andamento delle condizioni dell'aria nel locale climatizzato per le prime due settimane di luglio

In termini di efficienza elettrica ovvero EER il sistema presenta buone prestazioni raggiungendo valori medi giornalieri oltre 12 con picchi fino a 14.

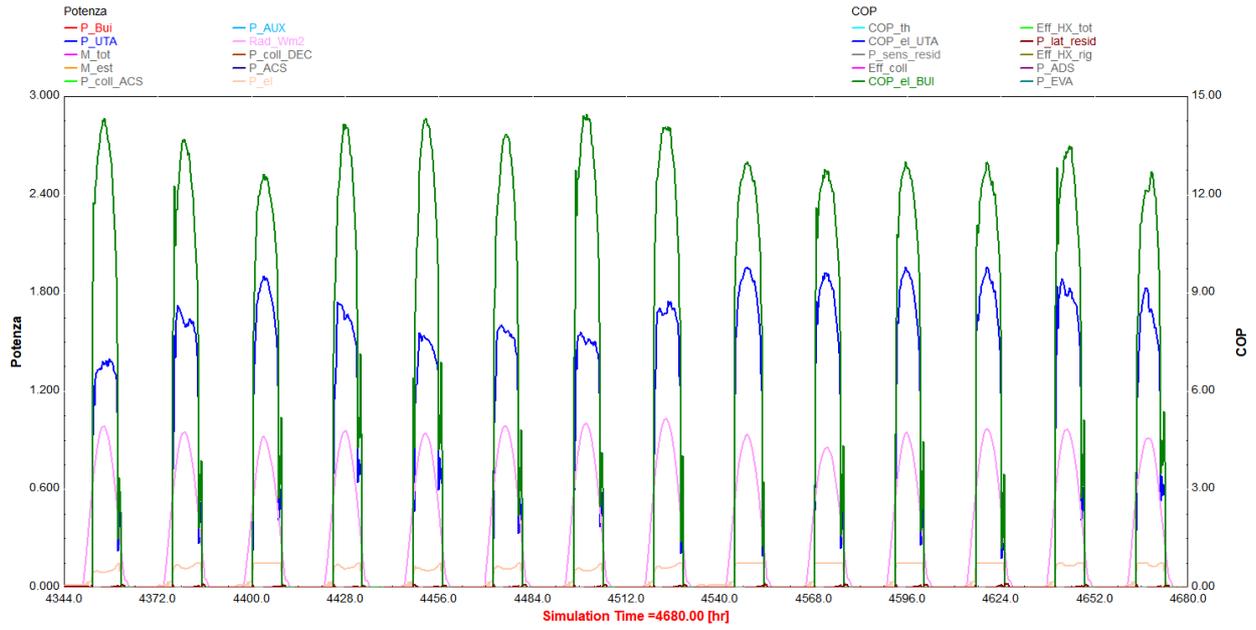


Figura 12: Andamento della potenza frigorifera (blu), EER (verde) e radiazione solare (rosa) per le prime due settimane di luglio

2. Analisi dei dati di monitoraggio invernali per il sistema freescoo faro

Di seguito vengono presentati i risultati delle analisi svolte sul sistema di climatizzazione solare *freescoo* installato al faro di Grecale a Lampedusa. Il monitoraggio è stato svolto tra Novembre e Dicembre del 2018.

2.1 Analisi delle prestazioni giornaliere

Si riporta lo schema impiantistico del sistema analizzato in modo da facilitare la comprensione dei risultati presentati (*Figura 13*). In modalità di riscaldamento l'acqua calda fornita alla macchina *freescoo* fluisce alla batteria di post-riscaldamento seguendo i rami disegnati in grigio.

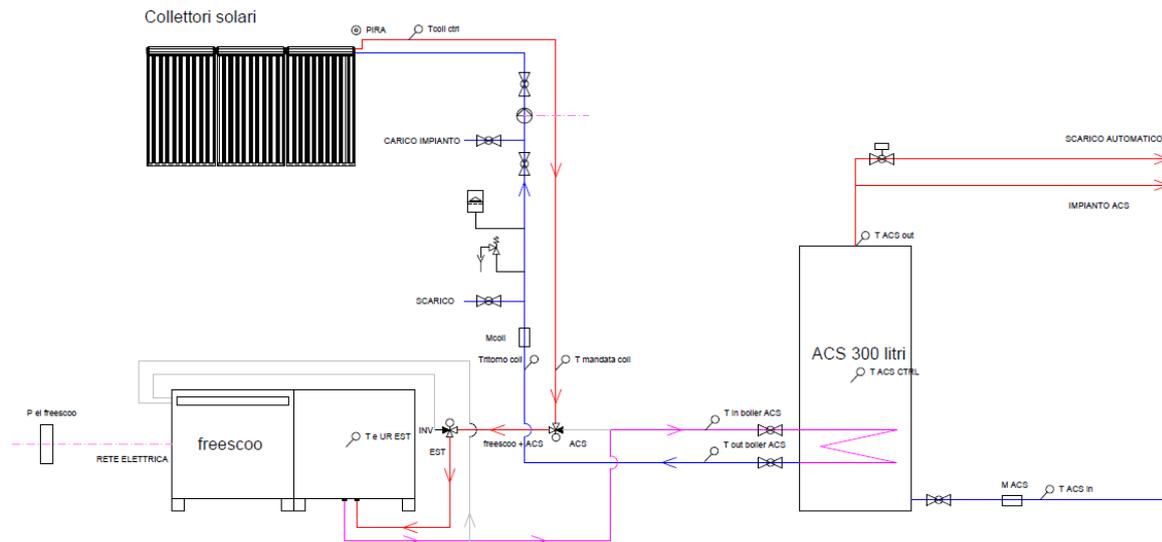


Figura 13: Schema impiantistico del sistema freescoo installato presso il centro ENEA al faro di Grecale a Lampedusa

A titolo di esempio, vengono di seguito presentati alcuni risultati su base oraria del monitoraggio svolto (*Figura 14*).

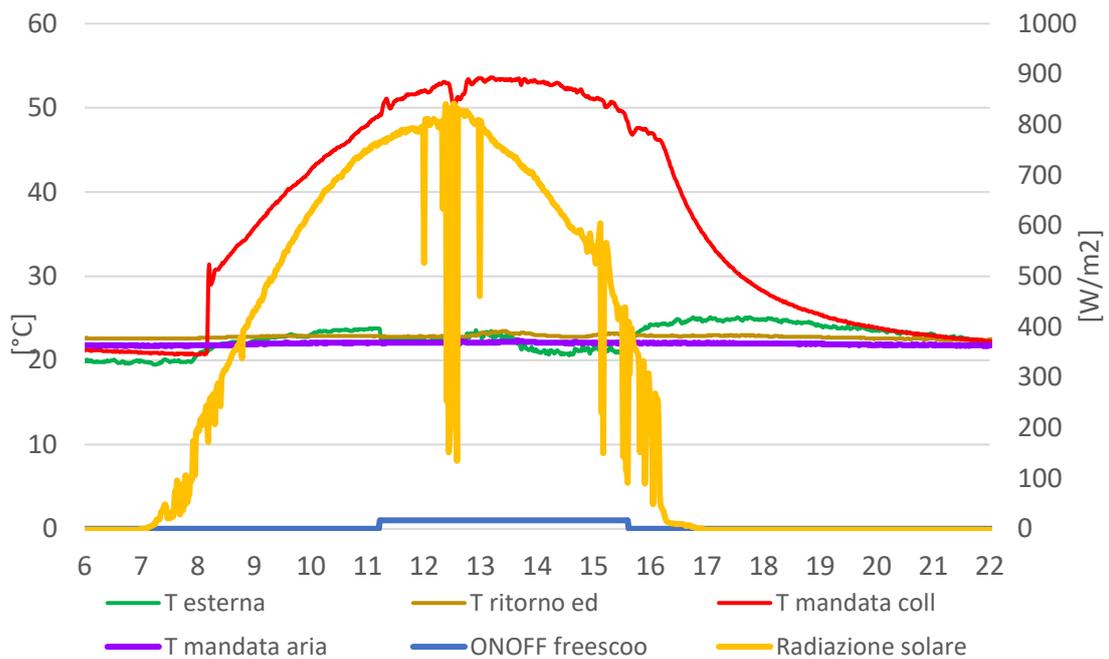


Figura 14: Temperature registrate - 25 Novembre 2018

Nella giornata rappresentata in [Figura 15](#) si può notare che il sistema produce calore per l'ACS durante la mattina fino alle 11 circa quando, raggiunta una certa soglia di temperatura, si attiva anche la macchina *freescoo*. Poiché però la temperatura interna all'edificio è attorno al set point richiesto (20°C) il sistema di controllo attiva la modalità di funzionamento che prevede la rigenerazione dei letti adsorbenti.

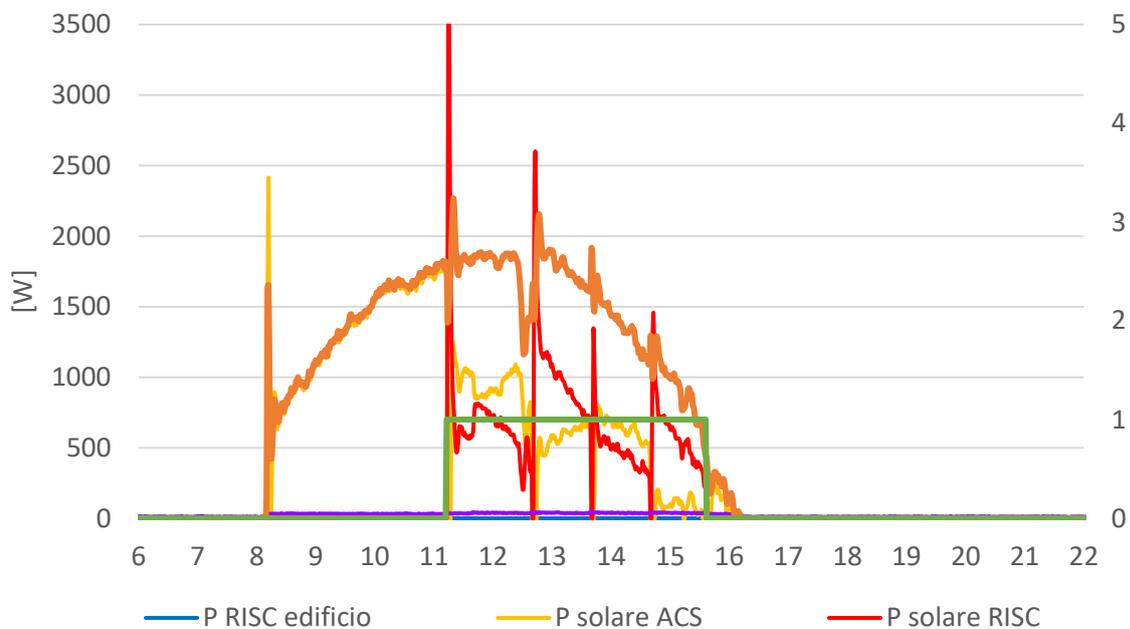


Figura 15: Potenze - 25 Novembre 2018

E' chiaro che l'utilizzo di calore per la rigenerazione dei letti adsorbenti è poco utile considerando che difficilmente nel periodo considerato è necessaria la deumidificazione dell'aria. Piuttosto sarebbe stato più

utile in questo caso restare in modalità di sola produzione di ACS oppure passare in modalità di riscaldamento, sovrariscaldando un po' l'edificio.

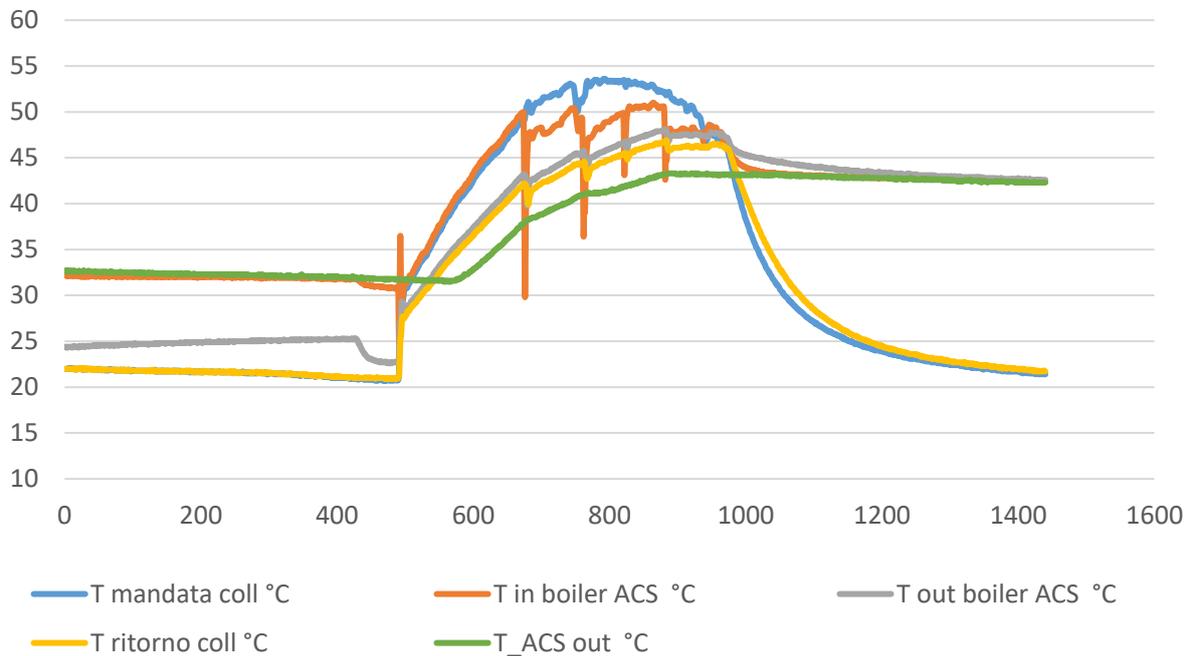


Figura 16: Temperature ACS – 25 Novembre 2018

I risultati in termini energetici per la giornata esaminata sono riassunti nel grafico seguente (Figura 17).

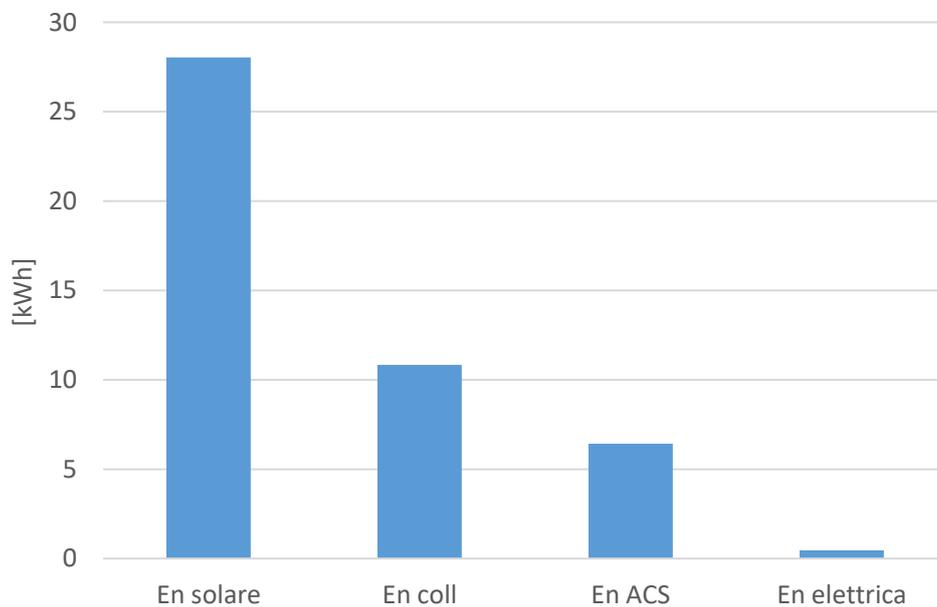


Figura 17: Risultati energetici – 25 Novembre 2018

La differenza tra l'energia prodotta dai collettori e quella impiegata per riscaldare l'ACS è data essenzialmente dal calore utilizzato per mantenere secchi i letti adsorbenti e in misura minore dalle perdite nelle tubazioni e nel serbatoio. Il COP elettrico medio giornaliero è pari a 14,8.

In *Figura 18* viene presentata un'altra giornata (20 dicembre) in cui il sistema opera anche in modalità di riscaldamento.

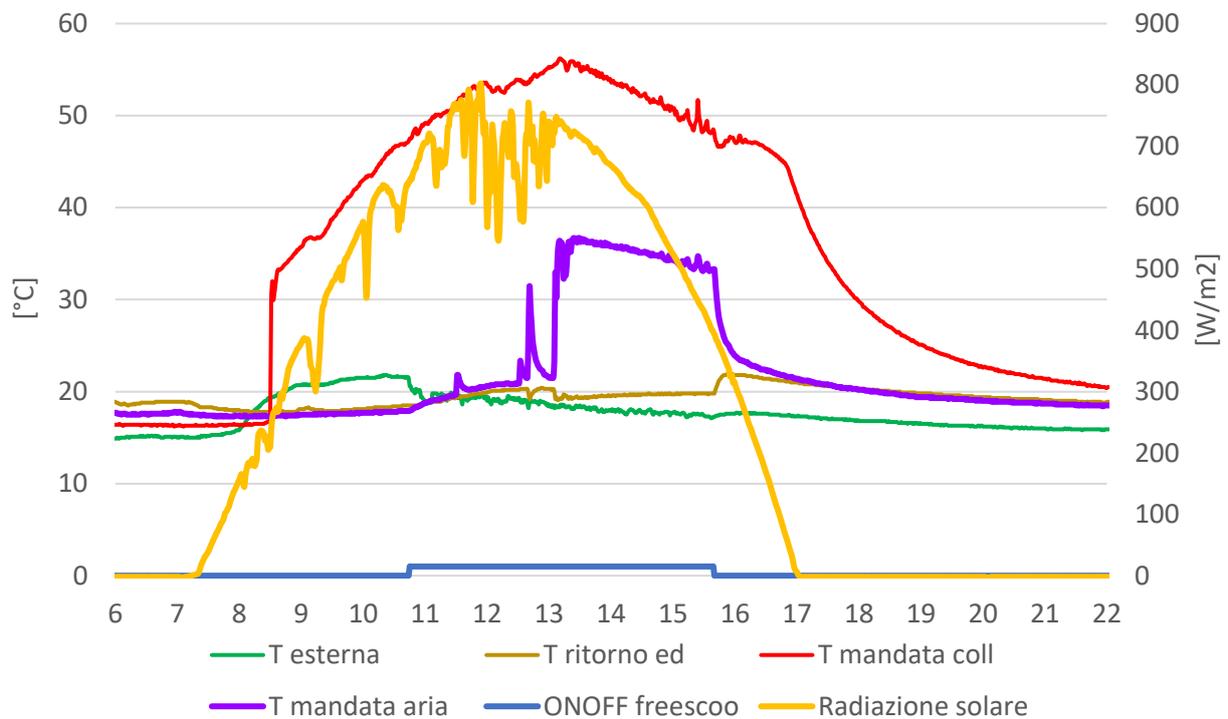


Figura 18: Temperature ACS – 20 Dicembre 2018

Dopo aver lavorato in modalità di produzione ACS, verso le 13, dopo alcune oscillazioni tra la modalità di rigenerazione (MODE=7) e quella di riscaldamento (MODE=3), il sistema si stabilizza sulla modalità riscaldamento. La temperatura dell'aria in immissione assume valori attorno a 35°C assicurando il mantenimento dell'ambiente al valore di set point (20°C).

La potenza ceduta al locale va da circa 1,6 kW all'inizio della fase di riscaldamento a circa 1kW poco prima dello spegnimento. Si noti invece come la potenza "solare ACS" assuma valori negativi, ovvero l'accumulo termico ceda calore all'acqua per il riscaldamento del locale.

Questo effetto può essere considerato un vantaggio dal momento in cui dà la possibilità di prolungare la modalità di riscaldamento nelle ore pomeridiane. Questo comportamento può essere comunque controllato intervenendo sulle soglie di temperatura che attivano le varie modalità di funzionamento.

Si fa notare che la potenza elettrica assume valori massimi durante il funzionamento in modalità di riscaldamento ove è raggiunto il valore di 120 W.

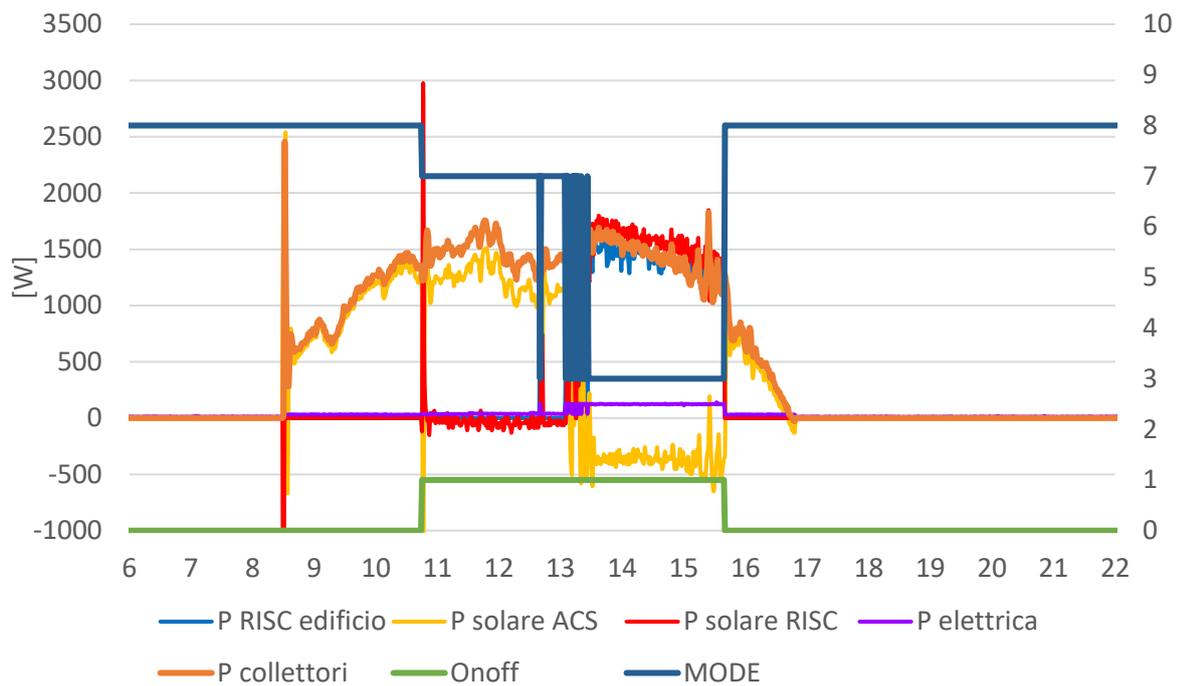


Figura 19: Potenze e modalità di funzionamento – 20 Dicembre 2018

Nella figura successiva (*Figura 20*) si possono osservare le temperature all'ingresso e all'uscita dell'accumulo termico. Si vede che la temperatura nella parte superiore del serbatoio di accumulo (T out boiler ACS) resta sempre attorno a 45°C anche durante il funzionamento in modalità riscaldamento. Ciò è dovuto al fatto che lo scambio di calore con l'acqua all'interno del serbatoio avviene nello scambiatore posto in basso per cui, grazie alla stratificazione del calore, la sottrazione di calore nella parte bassa non influenza la temperatura dell'acqua nel punto di prelievo.

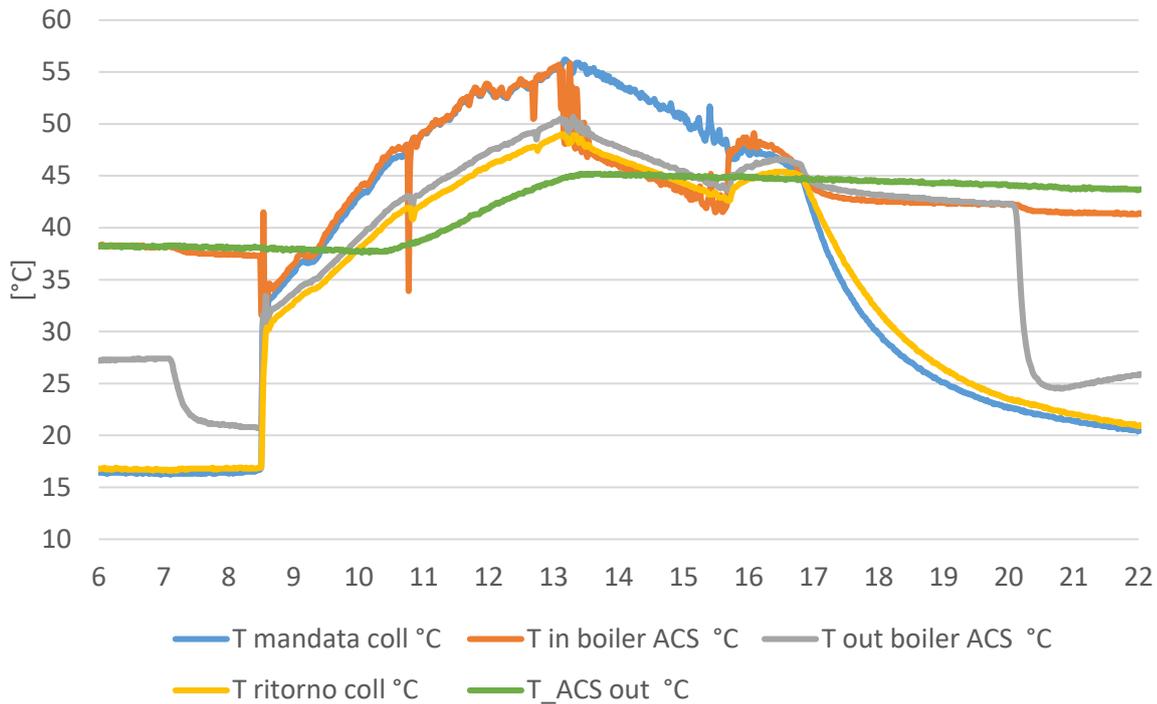


Figura 20: Temperature ACS – 20 Dicembre

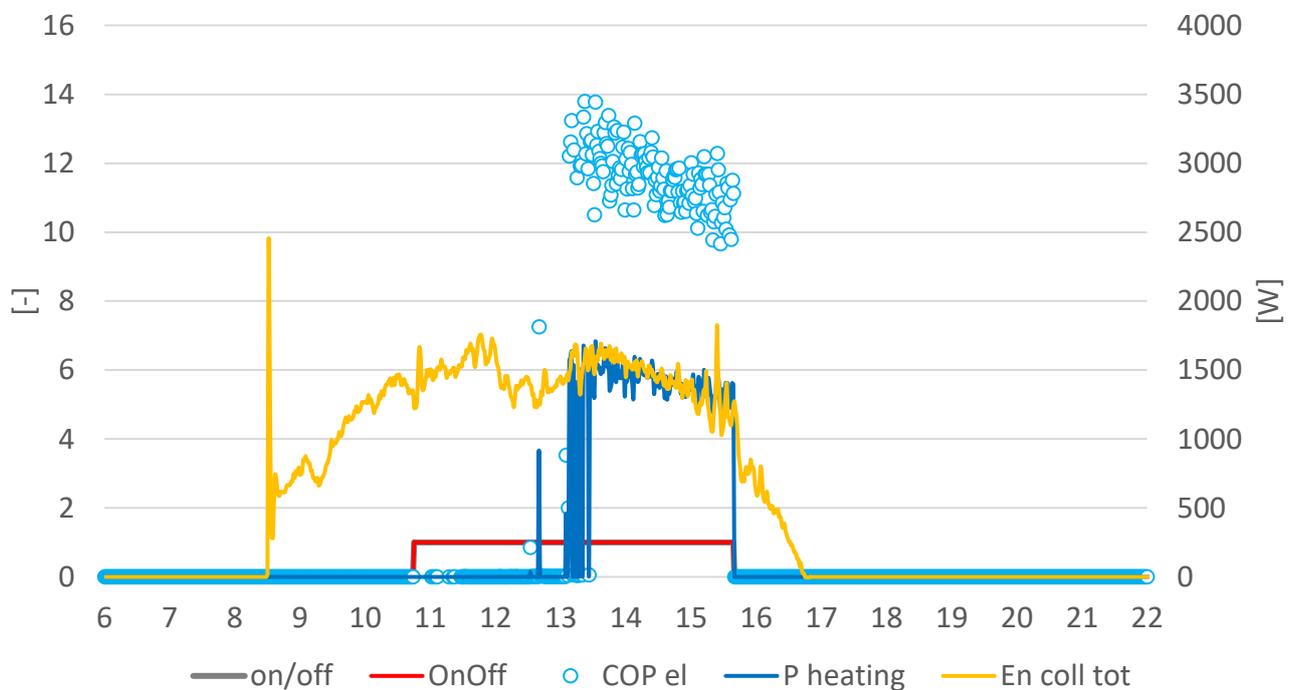


Figura 21: COP elettrico per riscaldamento – 20 Dicembre 2018

Nel grafico il COP elettrico rappresentato è calcolato come potenza termica fornita all'edificio diviso il totale della potenza elettrica assorbita, e dunque rappresenta l'efficienza elettrica della sola parte relativa al riscaldamento ovvero è calcolata non tenendo conto anche del calore prodotto per l'acqua sanitaria.

Per la giornata in questione il COP globale medio giornaliero, ovvero per riscaldamento e ACS, risulta pari a 11,8. Il grafico seguente riassume i principali risultati energetici per la giornata esaminata.

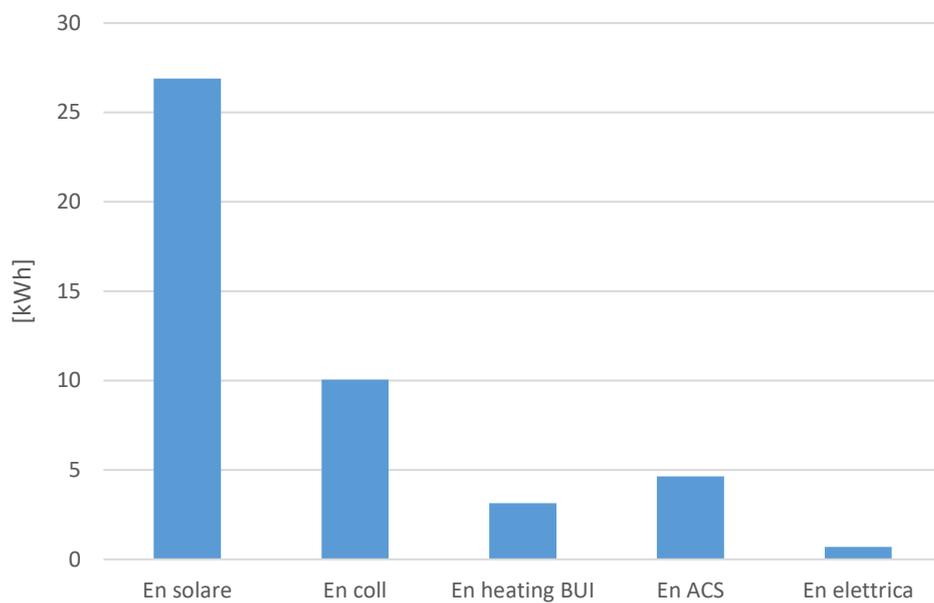


Figura 22: Risultati energetici – 20 Dicembre 2018

2.2 Analisi delle prestazioni medie mensili

Dato il clima particolarmente mite dell'isola di Lampedusa, nel mese di novembre il sistema ha operato essenzialmente sempre in regime di produzione di ACS e in misura minore in modalità "rigenerazione" così come visto al paragrafo precedente. La produzione di calore per ACS, così come il COP elettrico, riflette l'andamento della radiazione solare disponibile per la singola giornata. Il COP elettrico medio mensile risulta pari a 9,3.

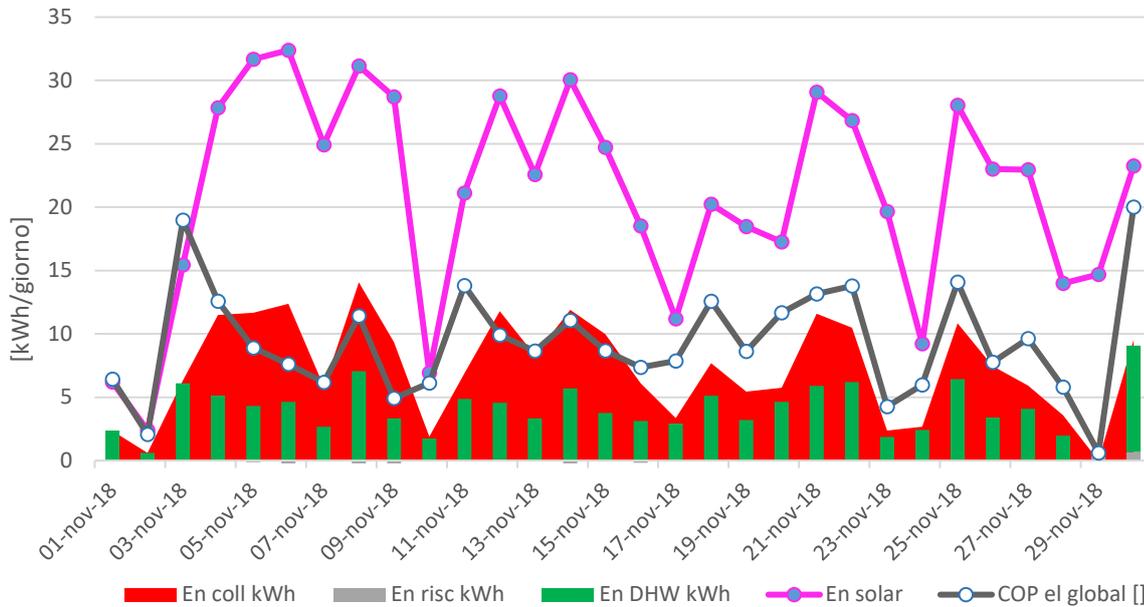


Figura 23: Risultati energetici su base mensile – Novembre 2018

Nel grafico seguente si riportano invece le temperature dell'aria esterna di mandata e di ripresa dal locale calcolate nelle ore diurne. Si vede che la temperatura esterna, assume sempre valore maggiori o uguali a 20°C tranne che per gli ultimi due giorni del mese.

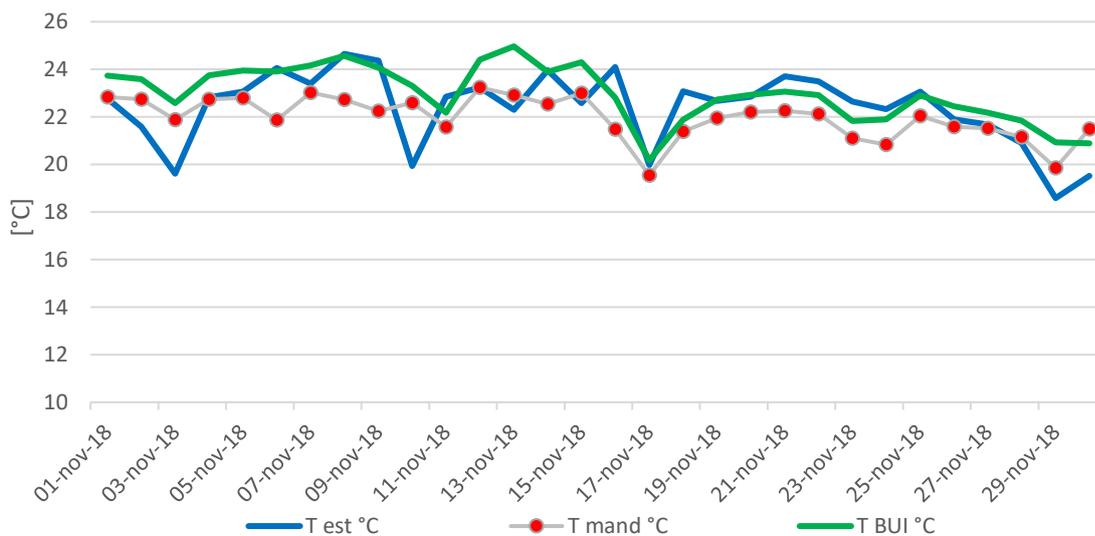


Figura 24: Temperatura esterna, interna al locale e di mandata dell'aria – Novembre 2018

Nel mese di dicembre invece il sistema ha operato anche in modalità di riscaldamento così come mostrato in [Figura 25](#). Il COP elettrico medio mensile risulta maggiore di quello ottenuto per novembre e pari a 10,9.

Ciò è dovuto al migliore sfruttamento del calore solare e dunque ad una maggiore produzione di calore utile per ACS e riscaldamento.

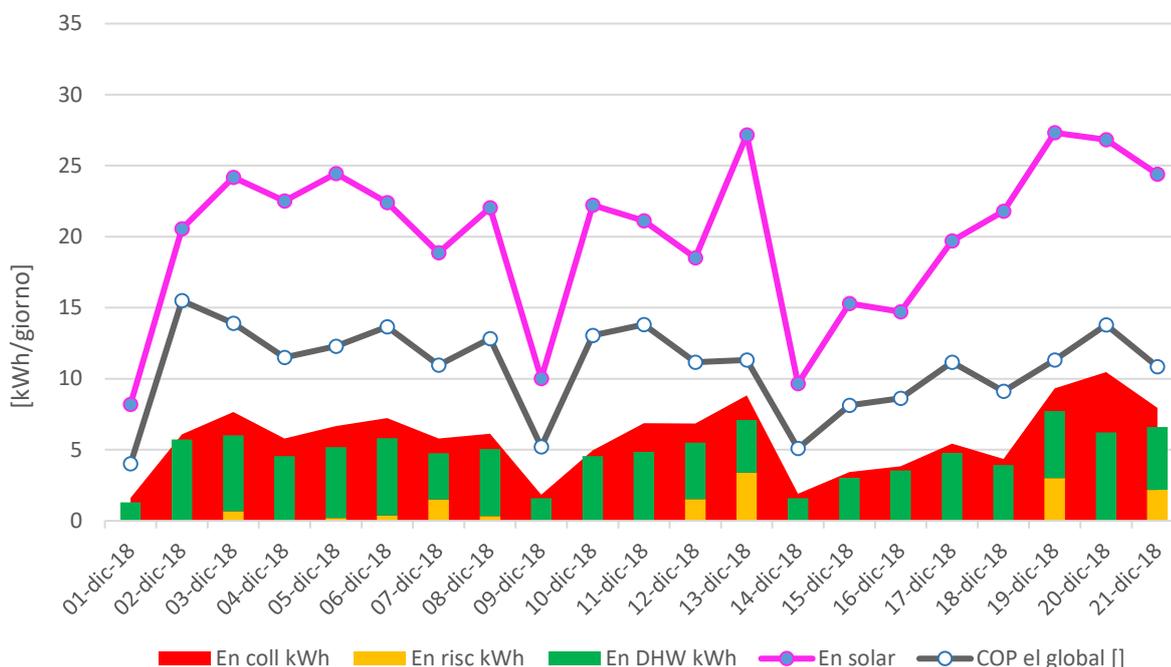


Figura 25: Risultati energetici su base mensile – Dicembre 2018

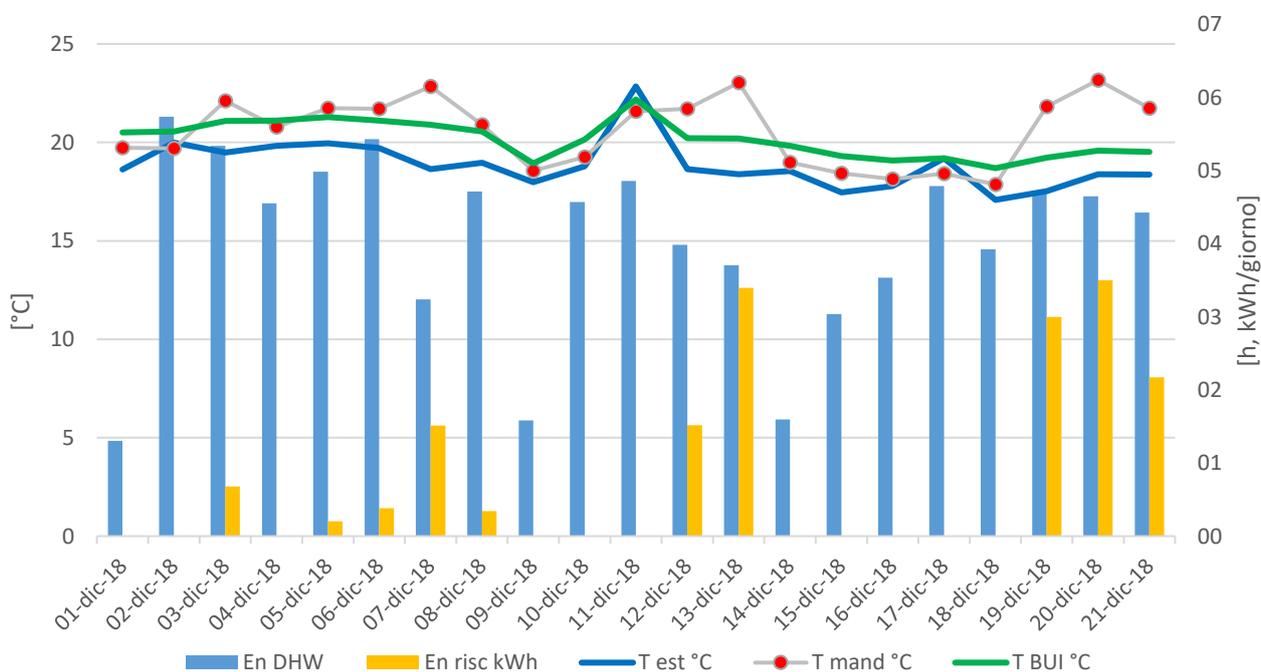


Figura 26 Temperature e produzione di calore solare per ACS e riscaldamento – dicembre 2018

3. Pompa di Calore per la produzione di ACS integrata con impianto Fotovoltaico: installazione presso un edificio residenziale nel centro abitato. Generazione dei profili di consumo di acqua calda sanitaria presso utenti isolani

Nel presente capitolo si sono analizzati i dati relativi ai consumi di ACS derivanti dai monitoraggi svolti in questi anni e da rilevamenti statistici al fine di elaborare una metodologia per la generazione dei profili di consumo di acqua calda sanitaria presso utenti isolani sufficientemente affidabili.

Si sono inoltre stati analizzati i consumi elettrici di una Pompa di Calore (PdC) dedicata alla produzione di Acqua Calda Sanitaria (ACS) scegliendo un caso studio fra le utenze monitorate durante il triennio di studio ([2] e [3]). Si è quindi proceduto attraverso simulazione in regime dinamico alla definizione della migliore soluzione impiantistica a partire dalle tecnologie presenti nel mercato da integrarsi con un impianto fotovoltaico dedicato. Nello specifico sono state analizzate due pompe di calore da 100 e 200 litri di accumulo e sono stati indagati gli effetti sulla prestazione del sistema dovuti alla presenza di un accumulo elettrico e/o termico.

2.1 Scelta e presentazione del caso studio

Durante il corso della prima annualità di studi [1], a seguito della somministrazione di alcuni questionari è stato possibile evidenziare come la produzione di ACS nelle Utenze isolate sia principalmente effettuata tramite scaldacqua elettrici. Si sono inoltre condotte delle campagne di monitoraggio dei consumi di ACS che hanno evidenziato un consumo medio giornaliero pari circa a 2.2 kWh nei mesi estivi che tende ad aumentare nei mesi invernali [3]. Il caso studio proposto in questa sede riguarda, pertanto, uno degli utenti monitorati nel corso del triennio di studio [2]. Nello specifico, si tratta di una famiglia di 2 componenti che risiedono in un appartamento all'interno del nucleo urbano con superficie utile pari a circa 250 m². Dal punto di vista statistico, l'utenza selezionata rappresenta un caso significativo fra i nuclei familiari dell'Isola. Dagli ultimi dati disponibili del Censimento della Popolazione e delle Abitazioni [4] per il Comune di Lampedusa e Linosa si rileva infatti come il 42% dei nuclei familiari comprende 2-3 componenti e come la maggior parte delle abitazioni occupate da residenti abbiano un numero di stanze superiori a 4, *Figura 27*.

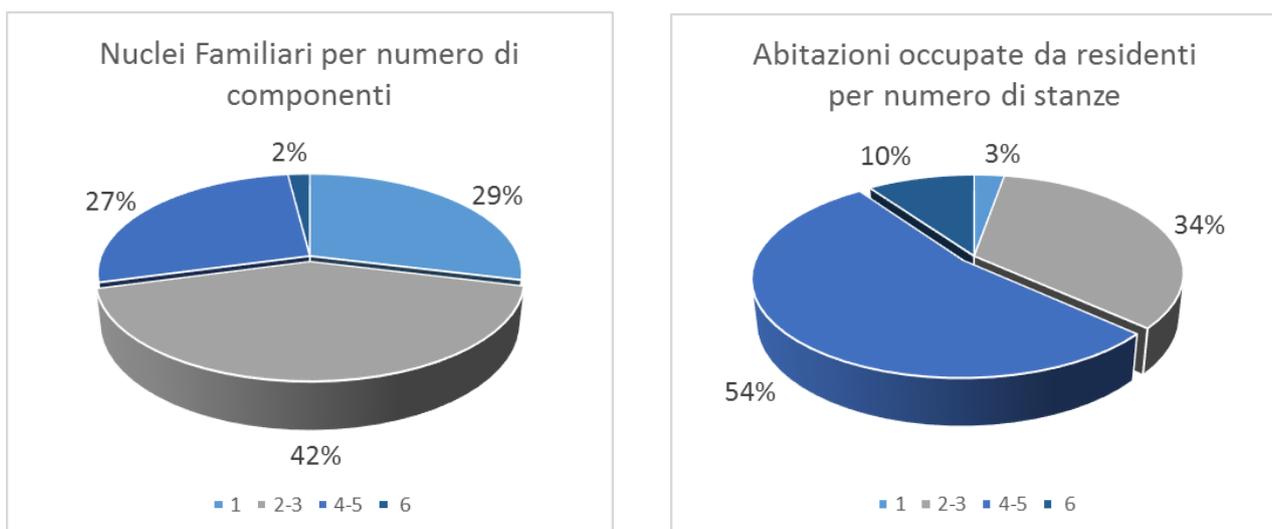


Figura 27 Dati censimento ISTAT

La produzione di ACS nell'abitazione è demandata ad uno scaldabagno elettrico da 1200 W e 80 litri di accumulo installato nell'ambiente al secondo livello, destinato a studio, che fornisce acqua calda ai punti di prelievo finale nei due bagni e nella cucina, entrambi al piano inferiore. Tale scaldacqua può essere facilmente sostituito con una pompa di calore presente sul mercato, sia nella versione da pavimento sia nella versione da parete. Le due soluzioni tecnologiche differiscono essenzialmente per le caratteristiche elencate in [Tabella 7](#) e sono entrambe coerenti per ciclo di prelievo dell'utenza analizzata.

Tabella 7 Caratteristiche tecniche della Pompa di Calore

| Caratteristiche | | Da pavimento | Da parete |
|----------------------------------|---------------------|--------------|-----------|
| Potenza elettrica nominale | [W] | 490 | 250 |
| Ciclo di prelievo di riferimento | | L | M |
| COP DHW (A15/W10-55) | [-] | 3.07 | 3.10 |
| Portata d'aria nominale | [m ³ /h] | 450 | 100-230 |
| Serbatoio di accumulo | [litri] | 208 | 80 |
| Resistenze elettriche ausiliarie | [W] | 2 x 1000 | 2 x 1000 |
| Temperatura massima con PdC | [°C] | 65 | 55 |

Considerato l'installazione della Pompa di Calore all'interno di un ambiente climatizzato si è scelto di valutare l'influenza che l'aria in uscita dall'evaporatore durante il ciclo di funzionamento della PdC può avere sulla climatizzazione dell'ambiente. Si è quindi valutato il fabbisogno termico della zona attraverso un modello di simulazione in regime dinamico secondo gli input riportati in [Tabella 8](#) e in [Tabella 9](#) nell'ipotesi di un ricambio d'aria pari a 0.3 volumi/ora e dei carichi interni dovuti alla presenza di persone, illuminazione e apparecchiature nei soli periodi di occupazione dell'abitazione, coincidenti con gli orari di accensione dell'impianto in [Tabella 9](#).

Tabella 8 Caratteristiche dell'involucro della zona termica

| | | vetro | | Telaio | | Valori complessivi | |
|--|------------------|----------------|-------------------------|---|---|------------------------------|---|
| COMPONENTI TRASPARENTI | | emissività [-] | trasmissione solare [-] | trasmissione termica [W/m ² K] | trasmissione termica [W/m ² K] | Superficie [m ²] | Trasmissione termica [W/m ² K] |
| Finestre | | 0.89 | 0.75 | 2.8 | 2.9 | 2.5 | 2.83 |
| COMPONENTI OPACHI (da interno verso esterno) | | s [m] | λ [W/mK] | ρ [kg/m ³] | c [J/KgK] | R [m ² K/W] | Trasmissione [W/m ² K] |
| Parete esterna | intonaco | 0.03 | 0.700 | 1400 | 1000 | | 1.23 |
| | tufo | 0.30 | 0.550 | 1600 | 1000 | | |
| | intonaco | 0.05 | 0.050 | 1800 | 910 | | |
| Solaio di copertura | intonaco | 0.03 | 0.700 | 1400 | 1000 | | 0.66 |
| | laterocemento | 0.24 | | 900 | 1000 | 0.330 | |
| | massetto | 0.04 | 0.580 | 1400 | 1000 | | |
| | isolante termico | 0.04 | 0.040 | 30 | 1250 | | |
| | finitura esterna | 0.01 | 1.3 | 2300 | 840 | 0.008 | |

Tabella 9 Setpoint periodo di climatizzazione

| | periodo | orario | T-setpoint [°C] |
|---------|---------------------------|-------------|-----------------|
| heating | da 01 dicembre a 15 marzo | 14:00-22:00 | 22 |
| cooling | da 16 marzo a 30 novembre | 14:00-22:00 | 26 |

Si ottiene un fabbisogno termico per il raffrescamento alle condizioni indicate pari a circa 800 kWh annuali con un andamento mensile così come riportato in [Figura 29](#).

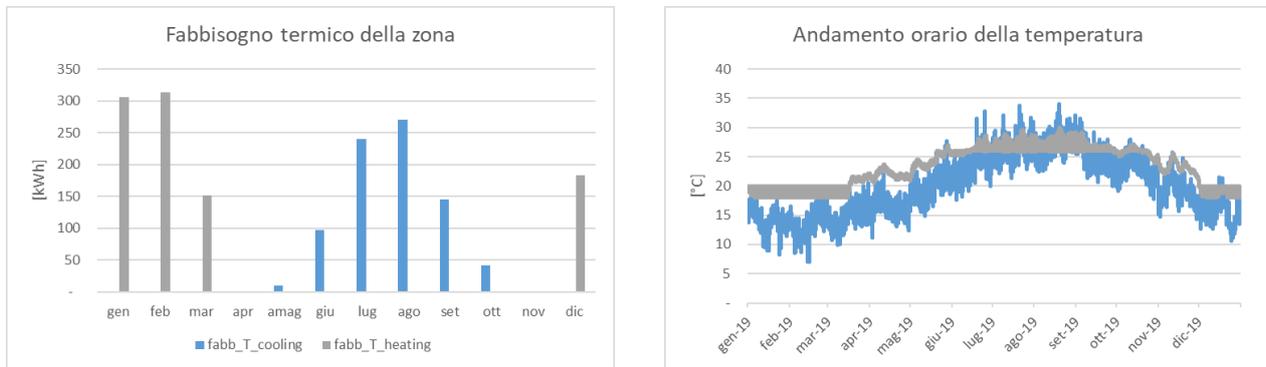


Figura 29 Valori mensili del fabbisogno termico (a sinistra) e andamento orario delle temperature (a destra)

2.2 Stima dei consumi e impianto ACS

La stima dei consumi per la produzione di ACS integrata ad un impianto fotovoltaico è stata effettuata attraverso simulazioni in regime dinamico in ambiente Trnsys sulla base del modello di Pompa di Calore già validato a cui è stato integrato il modello della zona termica interessata all’installazione della PdC e un modello atto a valutare il comportamento di un impianto fotovoltaico ad essa asservito.

Ai fini della determinazione dei consumi per la produzione di ACS si è scelto di simulare un profilo di prelievo quanto più possibile coerente con i dati sul consumo elettrico dell’utenza. Per l’utenza oggetto di studio, oltre ai dati di bolletta di un intero anno, sono infatti disponibili i dati monitorati durante i mesi estivi relativi sia al consumo elettrico dell’intera abitazione sia al consumo elettrico del solo scaldacqua. Come già rilevato, il consumo elettrico dello scaldabagno incide in media sui consumi generali dell’abitazione per il 30%, con un massimo in alcuni giorni pari al 48% ([Figura 30](#)), influenzando soprattutto i picchi di prelievo giornalieri come già dimostrato [1].

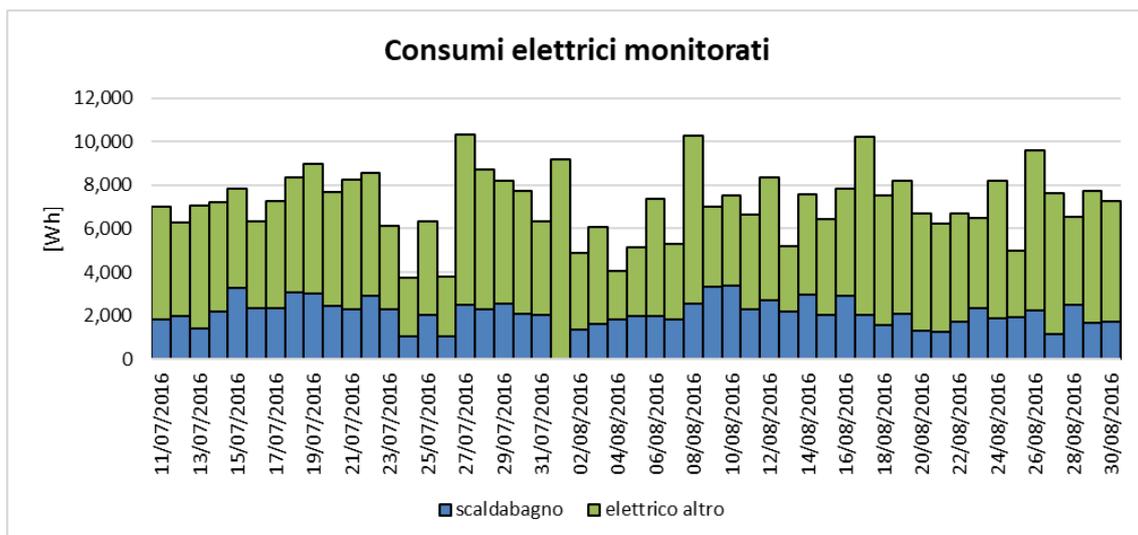


Figura 30 Dati di monitoraggio

Inoltre, si nota come i consumi del 4 e 5 bimestre (periodo monitorato) risultano rispettivamente il 61 e 55% del consumo massimo misurato nei mesi di gennaio e febbraio, con una ripartizione pressoché

costante durante l'anno nella fascia oraria F1 compresa fra il 25 e il 33% a favore delle altre 2 fasce di fatturazione (Figura 31). Tali dati sono stati utilizzati nel successivo paragrafo per identificare un'appropriata curva di prelievo giornaliero di ACS variabile mensilmente.

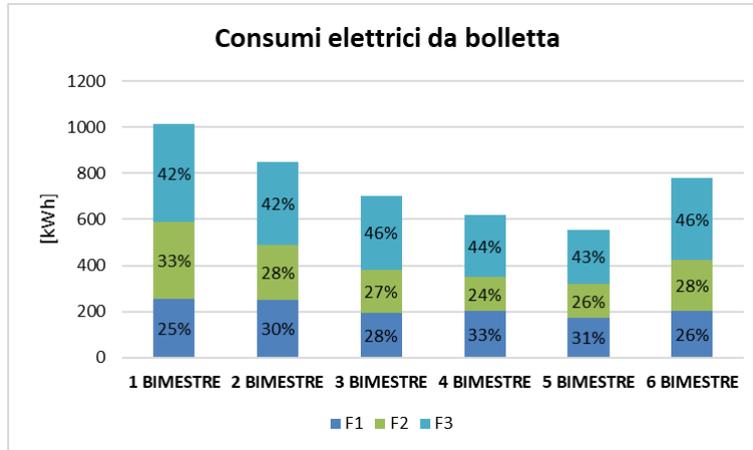


Figura 31 Consumo elettrico complessivo dell'utenza da dati di fatturazione

2.2.1 Profilo di prelievo dell'utenza: metodologia di elaborazione

Uno dei fattori cruciali nella stima dei consumi per la produzione di ACS riguarda la determinazione di appropriate curve di prelievo orario e la stima delle variazioni su base mensile dei valori di consumo giornalieri [5]. Si propone di seguito un metodo basato sulla normativa tecnica vigente e sui dati di consumo per la specifica utenza disponibili.

La norma UNI EN 12831-3:2018 [6] basa il dimensionamento dell'impianto per la produzione di ACS sull'uso di un appropriato ciclo di prelievo giornaliero con time step pari ad 1 minuto secondo la seguente formula:

$$V_{t,i} = V_{W,day} * x_{h,i} \quad (1)$$

dove $V_{t,i}$ è il prelievo espresso in litri/h al i^{mo} minuto, $V_{w,day}$ è il consumo complessivo giornaliero di ACS a determinata temperatura espresso in litri/giorno in funzione del numero di persone presenti nell'utenza ($V_{w,p,day}$) e x_{hi} è la frazione di consumo di ACS all' i^{mo} minuto.

La norma propone di utilizzare valori di $V_{t,i}$ e x_{hi} riportati nelle normative nazionali riconoscendo l'influenza che abitudini culturali, temperature dell'acqua proveniente dall'acquedotto (a sua volta influenzata dalle condizioni climatiche locali) hanno sui consumi per la produzione di ACS. In assenza di normative specifiche, la stessa norma propone di fare riferimento ai *tapping* standard prescritti dalla Direttiva comunitaria [7] per le procedure di test delle apparecchiature da immettere nel mercato.

Nel caso in esame, avendo a disposizione i dati di consumo elettrico dello scaldabagno, monitorati durante la campagna sperimentale, si è elaborato un profilo di x_{hi} rispondente alle abitudini proprie del nucleo familiare. In assenza di dati specifici sul consumo di ACS in litri/h, si è proceduto secondo le seguenti ipotesi:

- si sono considerati i valori medi orari registrati nel periodo di monitoraggio distinguendo giorni feriali, domeniche e sabati;
- il consumo medio orario di energia elettrica dello scaldabagno è stato considerato indicativo del prelievo di ACS da parte dell'utente;

- sono stati esclusi i valori di consumo elettrico medio orario inferiori al 2% rispetto al consumo massimo registrato nel giorno medio, ipotizzando che questi siano indicativi di un'accensione dell'apparecchio dovuta esclusivamente al mantenimento della temperatura di set-point;
- i dati così ottenuti sono stati normalizzati con riferimento al consumo medio giornaliero, determinando così la curva x_{hi} propria dell'utenza.

I risultati ottenuti sono riportati in [Figura 32](#), si nota come non vi sia una differenza sostanziale fra giorni feriali e giorni festivi, pertanto è stata determinata un'unica curva x_{hi} i cui valori sono ipotizzati costanti durante l' i^{ma} ora del giorno.

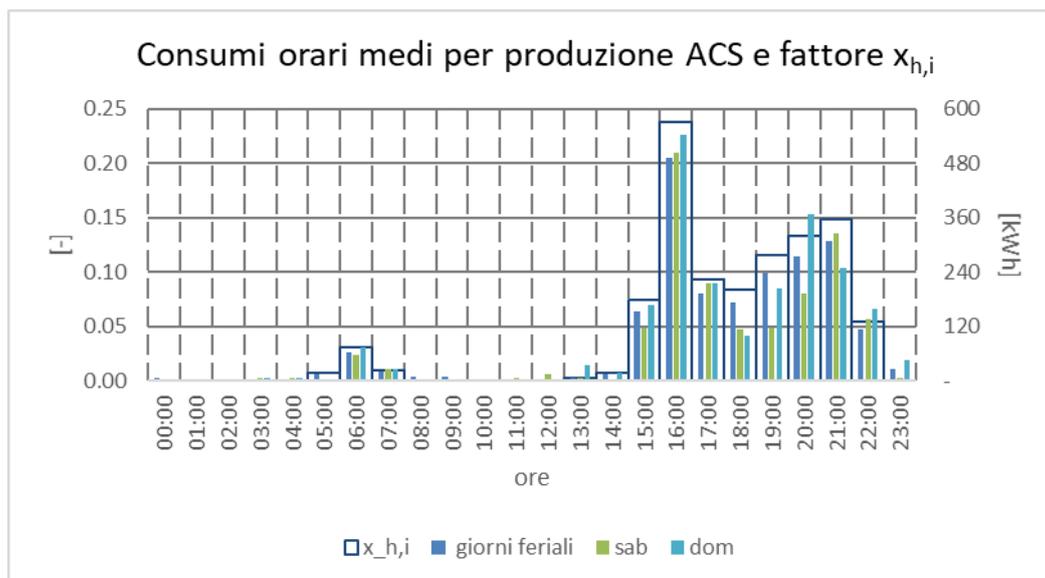


Figura 32 Consumi scaldacqua monitorati e curva oraria di prelievo

Per quanto riguarda il valore $V_{w,P,day}$ si utilizza in questa sede il valore determinato in fase di calibrazione del modello Trnsys [2] durante gli studi finora condotti, pari nei mesi estivi, a circa 45 litri/giorno per persona con temperatura dell'acqua a 60°C, per un totale nel caso dell'utenza analizzata corrispondente a 90 litri/giorno.

Vale la pena rilevare che tale valore è compatibile con quanto prescritto con l'appendice B.2.2. della UNI EN 12831:2018 [6] in funzione della superficie dell'abitazione e del numero di adulti equivalente, che valutato per lo specifico caso riporta un consumo di circa 40 litri/giorno a 60°C. Maggiori differenze sono riscontrabili, invece, se si paragona il risultato ottenuto dall'analisi dei dati monitorati durante gli studi con il prospetto E.1 della norma UNI 9182:2014 [8] e con il metodo proposto dalla UNI TS 11300-2:2016 [9], [Tabella 10](#).

Tabella 10 Prelievi giornalieri di ACS secondo le normative tecniche

| | [litri/giorno.unità] | utenza analizzata [litri/giorno] |
|-------------------------------|--|----------------------------------|
| UNI EN 12831-3:2018 | $f(S_u, n_P)^{(*)}$ | 82 |
| | Abitazioni popolari: 40-50 litri/persona | 80-100 |
| UNI 9182:2014 | Abitazioni tipo medio: 70-90 litri/persona | 140-180 |
| | Abitazioni di lusso: 150-200 litri/persona | 300-400 |
| UNI TS 11300-2:2014 | $f(S_u)^{(*)}$ | 250 |
| Risultati calibrazione | 45 [litri/persona] | 90 |

(*dove S_u =Superficie utile, n_p =numero equivalente di adulti

Si è già notato come la letteratura scientifica riporta una variabilità stagionale nei consumi di ACS [5] influenzata, oltre che dalle condizioni climatiche che influiscono sulla temperatura dell'acqua dall'acquedotto, anche da fattori socio-culturali. Questi ultimi, in un contesto isolano, possono incidere in modo significativo così come mostrato dai dati bimestrali di fatturazione per la fornitura elettrica, [Figura 31](#).

A partire da queste considerazioni, si è quindi scelto di introdurre un fattore mensile di correzione sui consumi giornalieri di acqua calda sanitaria stimati precedentemente che rispecchi l'andamento riportato in ottenendo una variabilità mensile dei consumi di ACS giornalieri dell'utenza così come riportato in [Figura 33](#).

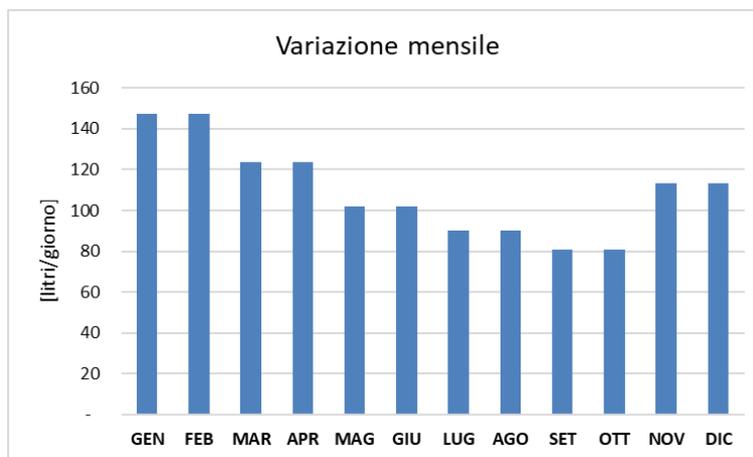


Figura 33 Consumi giornalieri di ACS al variare del mese

2.2.2 Simulazioni in regime dinamico

Definito quindi un profilo di prelievo per l'utenza in base ai reali dati di consumo, questo è stato utilizzato come input in un modello di simulazione in ambiente Trnsys precedentemente validato [2]. Il modello ripropone il comportamento della Pompa di Calore al variare dei prelievi di ACS sia su base giornaliera sia su base mensile stimando i consumi della stessa e l'interazione con un impianto e con la zona termica in cui è installata, [Figura 34](#).

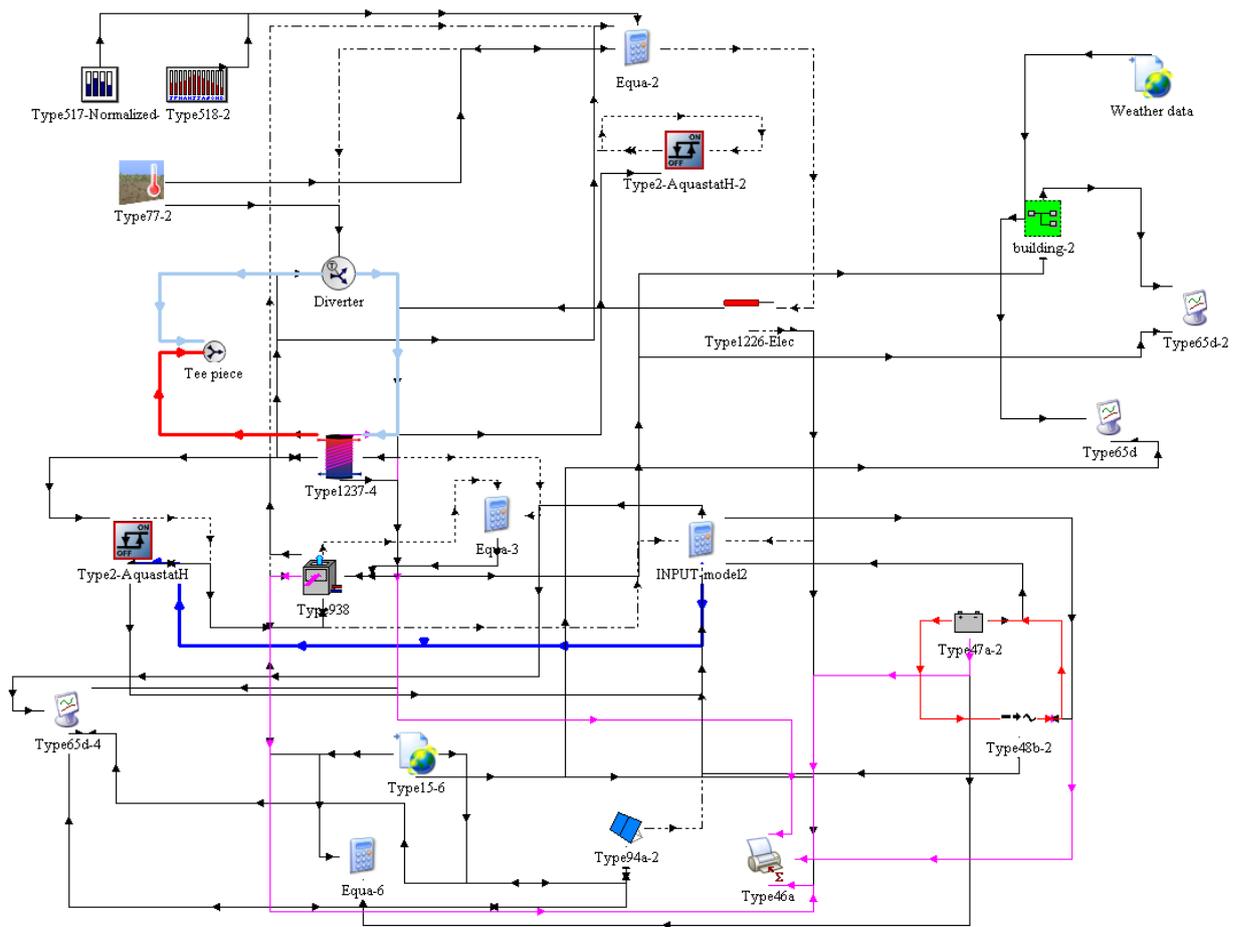


Figura 34 Modello di simulazione

L'obiettivo principale è quello di valutare nei seguenti scenari:

1. Consumi della PdC a pavimento da 200 litri di accumulo integrata a impianto fotovoltaico dedicato;
2. Consumi della PdC a parete da 80 litri di accumulo integrata a impianto fotovoltaico dedicato

la soluzione più vantaggiosa fra:

1. **Scenario 1.** Funzionamento standard del sistema in presenza di un accumulo elettrico
2. **Scenario 2.** Funzionamento a *sincronizzazione produzione-radiazione* dello stesso sistema che sfrutti la capacità termica del serbatoio di accumulo di acqua calda come accumulo in presenza/assenza di accumulo elettrico.

Nel primo scenario la temperatura di set-point sarà mantenuta costante al valore massimo consentita dalle caratteristiche tecniche della Pompa di Calore. $63 \pm 2^\circ\text{C}$ per la Pompa di calore a pavimento e $53 \pm 2^\circ\text{C}$ per la pompa di calore a parete (Tabella 7). Nello Scenario 2 invece la temperatura di setpoint dell'accumulo sarà massima nelle sole ore in cui l'impianto fotovoltaico e/o le condizioni di carica dell'accumulo elettrico permettono di erogare una potenza utile al funzionamento del compressore. Nelle restanti ore si imposterà tale temperatura pari a $40 \pm 2^\circ\text{C}$. In quest'ultimo Scenario si valuterà l'influenza che per l'utenza oggetto di studio può avere la presenza dell'accumulo elettrico. L'ipotesi generale è comunque quella di un impianto connesso in rete sia per garantire la produzione di ACS anche nelle giornate con insufficiente irraggiamento sia per poter comunque cedere alla rete il surplus prodotto.

Il modello di simulazione permette di valutare, con time-step di 10 minuti, gli output riportati in [Tabella 11](#) che consentono di determinare i seguenti indici utili alle analisi proposte:

- indice di Autoconsumo: $A_{FER} = \frac{E_{to-load}}{E_{PDC}}$ finalizzato a valutare la disponibilità di energia prodotta/accumulata dall'impianto PV rispetto ai consumi della PdC;
- indice di contemporaneità: $A_C = \frac{E_{PV}}{E_{PDC}}$ finalizzato a valutare la contemporaneità fra produzione dell'impianto FV della potenza utile ad alimentare direttamente la PdC e i consumi della stessa;
- indice di comfort: $C = 1 - \sum_{i=1}^h \frac{n.ore:(T_{ACS} < T_{ACS-comfort}; m_{ACS} > 0)}{n.ore\ tot:(m_{ACS} > 0)}$ (2)
- indice di discomfort potenziale $C' = \sum_{i=1}^h \frac{n.ore:(T_{ACS} < T_{ACS-comfort}; m_{ACS} = 0)}{n.ore\ tot:(m_{ACS} = 0)}$ (3)

Tabella 11 Principali output del modello di simulazione

| Simbolo | Descrizione | |
|-------------------|--|---------------------|
| E_{PDC} | consumo della Pompa di Calore | [kWh _e] |
| E_{PV} | produzione dell'impianto fotovoltaico | [kWh _e] |
| $E_{to-load}$ | energia prodotta dal fotovoltaico e fornita all'utenza, inclusa l'energia accumulata nella batteria | [kWh _e] |
| E_{grid} | energia prelevata (valori positivi, $E_{-from\ grid}$) o ceduta (valori negativi, $E_{-to\ grid}$) in rete | [kWh _e] |
| $E_{battery}$ | stato di carica della batteria valutato | [kWh _e] |
| Q_{zone} | Fabbisogno termico per il raffrescamento della zona | [kWh] |
| Q_{PDC} | Energia termica prodotta dalla PdC durante il ciclo di funzionamento e ceduta alla zona | [kWh] |
| P_{PDC} | potenza richiesta dalla Pompa di Calore | [kW _e] |
| P_{PV} | potenza utile prodotta dall'impianto fotovoltaico | [kW _e] |
| $P_{to-load}$ | potenza prodotta dal fotovoltaico e fornita all'utenza | [kW _e] |
| $P_{surplus}$ | potenza prodotta dal fotovoltaico non utilizzata dall'utenza o ceduta in rete | [kW _e] |
| $P_{from-grid}$ | potenza prelevata dalla rete | [kW _e] |
| $P_{to-grid}$ | potenza immessa dalla rete | [kW _e] |
| $P_{battery}$ | potenza immessa (+) o prelevata (-) dalla batteria | [kW _e] |
| T_{ACS} | temperatura dell'ACS erogata al terminale dell'impianto idrico | [°C] |
| T_{zone} | Temperatura della zona in cui è installata la PdC | [°C] |
| $T_{ACS.comfort}$ | temperatura minima consentita in erogazione dalla PdC ai fini di garantire il comfort dell'utenza | [°C] |
| M_{ACS} | Portata ACS | [litri/h] |

2.3 Risultati e Progetto preliminare

Da una valutazione preliminare dei risultati sui consumi per la produzione di ACS, in condizioni standard di esercizio e a parità di condizioni di prelievo, delle due tecnologie proposte (a parete da 100 litri e a pavimento da 200 litri di accumulo, vedi [Tabella 7](#)) si evidenzia come atteso una omogeneità di valori, [Figura 35](#).

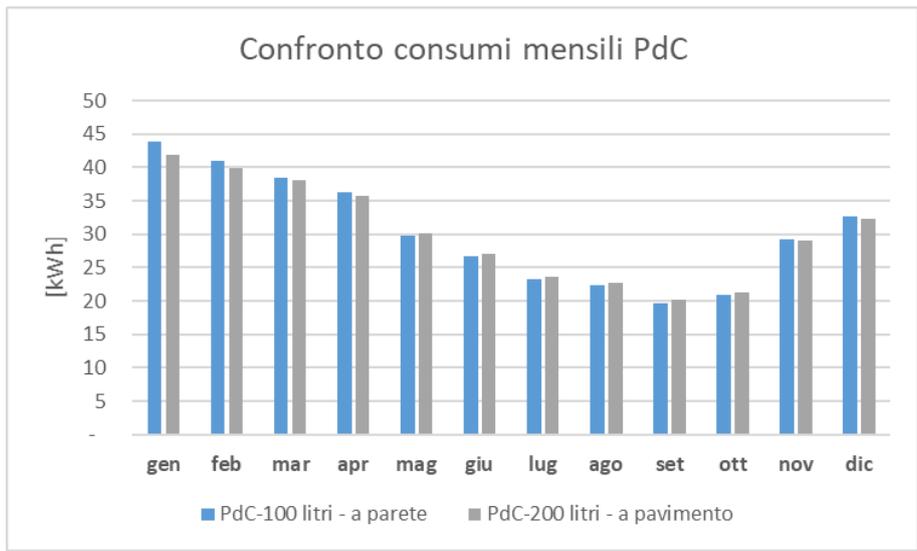


Figura 35 Confronto fra i consumi elettrici per la produzione di ACS fra le due tecnologie di PdC proposte

Il consumo annuo di energia si assesta sui 365 kWh con una variazione mensile dei consumi medi giornalieri della Pompa di Calore, nelle condizioni di esercizio descritte (Figura 36) in cui si sottolinea come la variazione bimestrale del prelievo di ACS introdotta e la variazione mensile delle condizioni climatiche influiscono entrambe sul consumo elettrico: a parità di prelievo giornaliero nei bimestri si riscontrano alcune differenze sui consumi medi giornalieri.

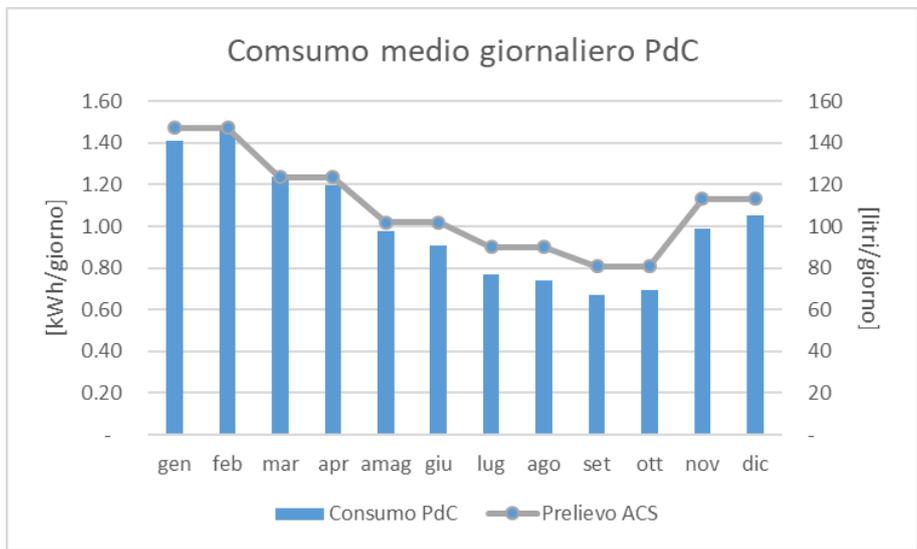


Figura 36 Consumi giornalieri della Pompa di Calore per ACS

Sulla base dei risultati ottenuti in questa prima fase si sono determinate le principali caratteristiche dell'impianto fotovoltaico dedicato con l'obiettivo di massimizzare il consumo dell'energia elettrica prodotta dall'impianto ai fini della produzione di ACS per mezzo di Pompa di Calore. L'impianto utilizza, quindi, pannelli fotovoltaici del tipo monocristallino da 240 W_p con rendimento nominale del 14.6% (inclinati rispetto all'orizzontale di un angolo pari alla latitudine del luogo), inverter di opportuna potenza con efficienza pari a 87%, un regolatore di carica con efficienza pari a 84% e batteria con limite di carica fra il 10% e il 90% del suo valore nominale. Si ipotizza quindi un accumulo elettrico pari a 1200 Wh utile ad accumulare l'energia giornaliera richiesta mediamente dalla PdC, tenendo in considerazione il fatto che i

prelievi di ACS si concentrano nelle ore pomeridiane e serali quando la produzione PV decresce. Si è quindi preliminarmente valutato il coefficiente di Contemporaneità (Ac) al variare del numero di moduli al fine di determinare le soluzioni impiantistiche da sviluppare con l'obiettivo di verificare in fase di simulazione gli indici di comfort e potenziale discomfort (Figura 37). Di conseguenza si è scelto, per la PdC a parete, di analizzare un impianto composto da un numero minimo di 2 pannelli in grado di garantire tale produzione media giornaliera nelle condizioni più svantaggiate e da un numero massimo di 3 pannelli in modo da massimizzare la disponibilità di ore di produzione con potenze di picco utili al funzionamento del compressore, nell'ipotesi di assenza di accumulo elettrico. Nel caso della Pompa di Calore a pavimento, essendo la sua potenza elettrica nominale pari a 490 W, si è invece scelto di utilizzare un impianto da 3 pannelli.

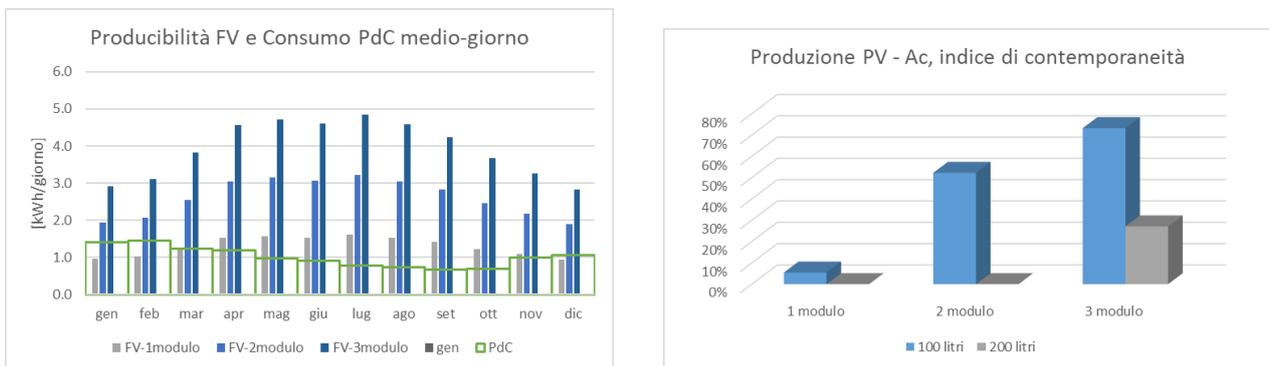


Figura 37 Analisi produzione fotovoltaica sulla base dei dati climatici orari dell'isola (fonte Meteonorm)

Pompa di calore da parete

Nel caso dello **Scenario 1** (funzionamento standard con Tsetpoint=53+-2°C) per la Pompa di Calore da 100 litri si verifica una copertura su base annuale dei consumi elettrici da parte dell'impianto fotovoltaico pari al 93% nel caso di un impianto composto da 3 pannelli e pari al 89% nel caso di un impianto composto da 2 pannelli. I risultati mensili per le due soluzioni analizzate sono riportate in Figura 38 dove si evidenzia come la principale differenza risieda nella quantità di energia esportata in rete a fronte di una maggiore taglia dell'impianto PV, soprattutto nei mesi estivi in cui è garantita una copertura dei consumi della PdC del 100%.

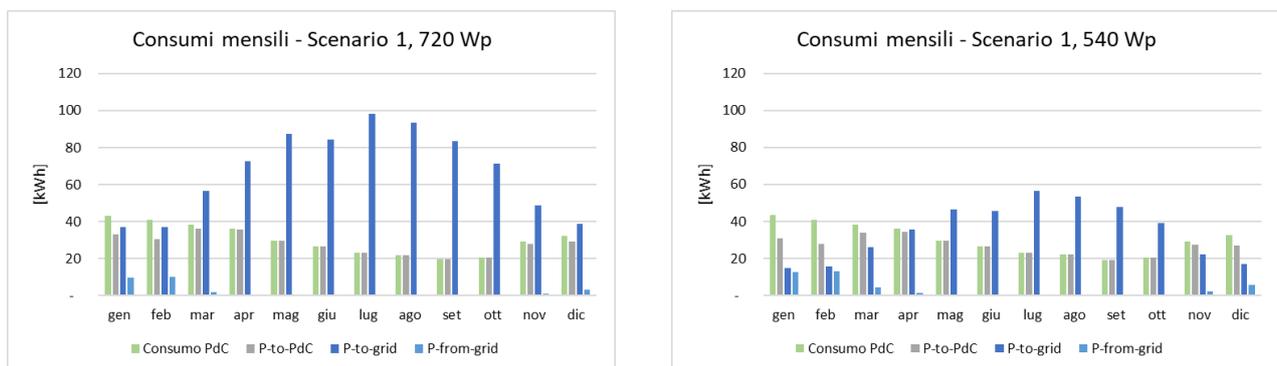


Figura 38 Risultati in condizioni di funzionamento standard al variare della potenza fotovoltaica installata

Dall'analisi del funzionamento del sistema in due giorni rappresentati (invernale ed estivo) caratterizzati da valori di irraggiamento medi per la stagione considerata, si evidenzia come l'impianto da 540 Wp riesca complessivamente a coprire i consumi della Pompa di Calore che sono principalmente prelevati dal sistema di accumulo (Figura 39).

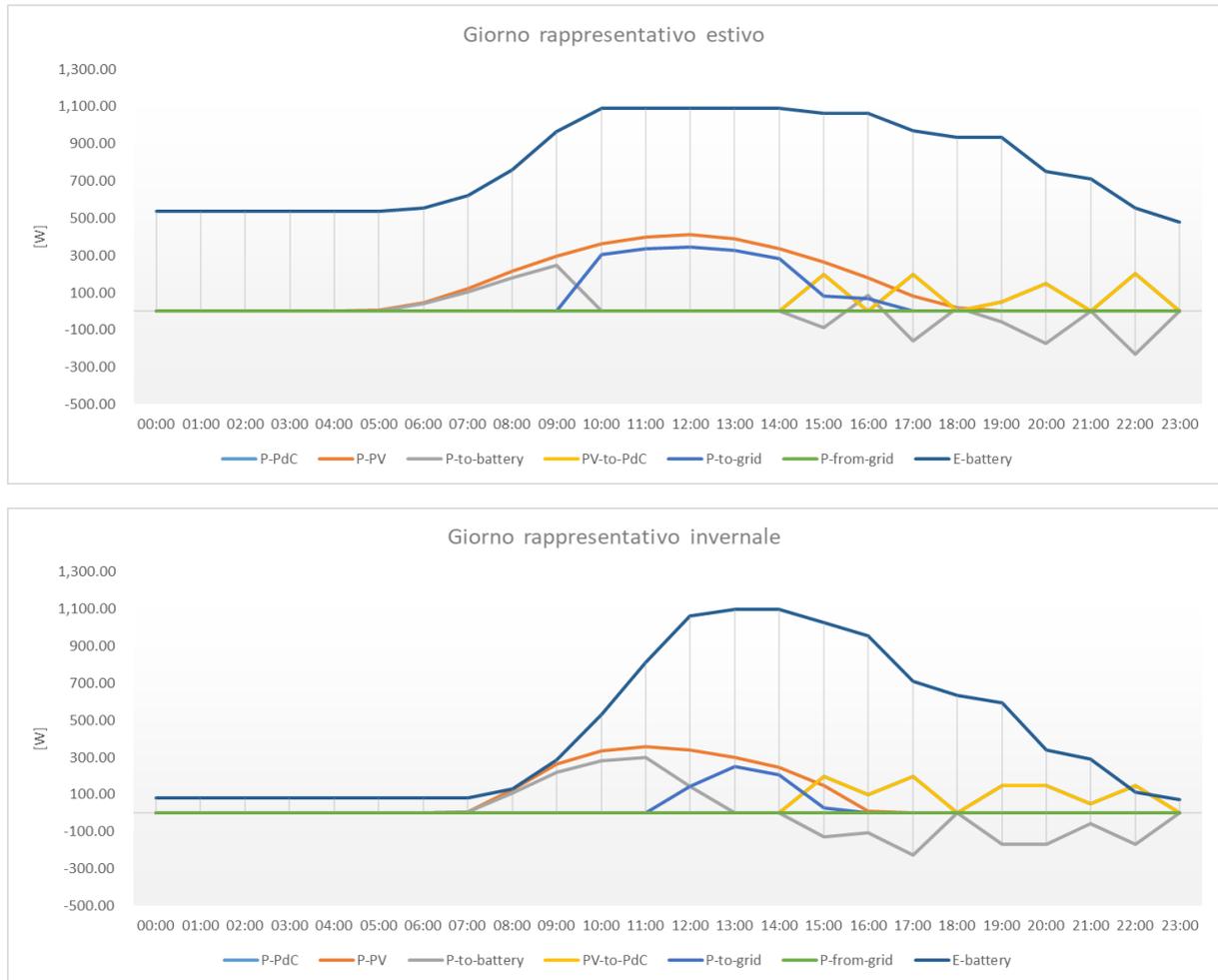


Figura 39 Funzionamento dell'impianto da 540 W nei giorni rappresentativi

Inoltre, a fronte di un investimento iniziale pari in entrambi i casi a circa 4.500,00 €, considerati i risparmi conseguibili rispetto all'attuale sistema installato nell'abitazione (scaldacqua elettrico) e una forma di detrazioni per l'installazione della Pompa di Calore (65%) e dell'impianto fotovoltaico (50%) in dieci anni, nonostante l'aumento dell'energia esportata in rete che risulta circa il doppio per l'impianto da 720 Wp non si evidenziano sostanziali differenze nell'analisi economica, [Figura 40](#).

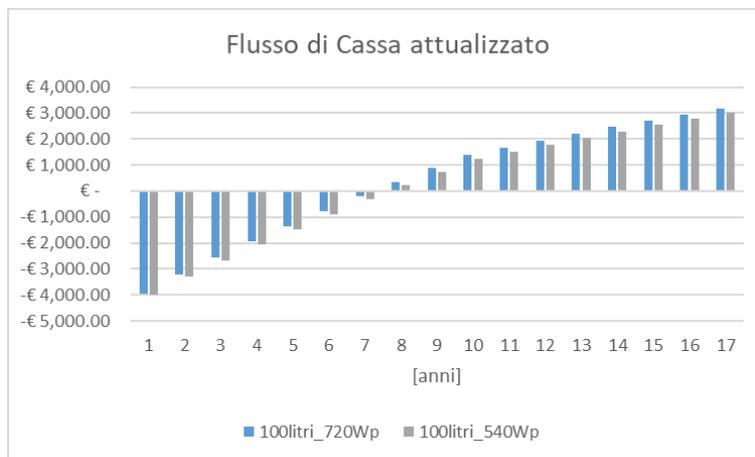


Figura 40 Analisi economica, confronto fra impianto da 720 Wp e impianto da 540 Wp

Per quanto riguarda invece lo **Scenario 2** che gestisce l'accensione della Pompa di Calore con l'obiettivo di massimizzarne il suo funzionamento in presenza di produzione fotovoltaica utile ad alimentare il compressore (sfruttando l'accumulo di ACS come accumulo termico dell'energia elettrica prodotta), si è scelto di utilizzare l'impianto da 720 Wp e valutare le prestazioni in termini di comfort in presenza e in assenza di accumulo elettrico.

In questo caso la temperatura di setpoint durante il giorno viene fatta variare da un massimo di 53+2°C in presenza di disponibilità di energia elettrica da parte dell'impianto PV/accumulo elettrico ad un minimo di 40+2°C nelle restanti ore. In *Figura 41* si nota come i consumi fra Scenario 1 e Scenario 2 tendano a diminuire a discapito delle condizioni di comfort per l'utente, valutate secondo le formule (2) e (3) utilizzando come valore limite per la temperatura dell'acqua nel serbatoio $T_{ACS-comfort}=40^{\circ}C$ pari alla temperatura in erogazione al terminale dell'impianto.

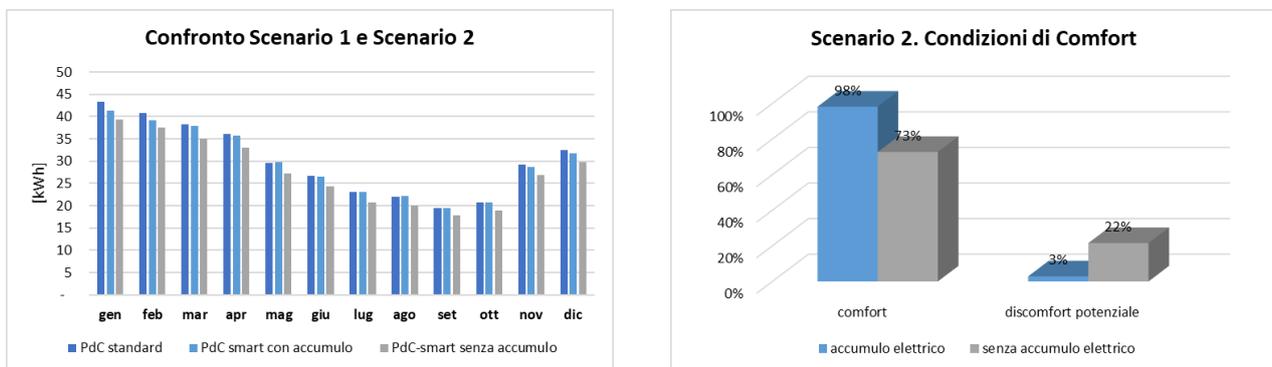


Figura 41 Consumi della Pompa di Calore e condizioni di comfort

Dall'analisi del funzionamento dell'impianto in assenza di accumulo elettrico nei giorni rappresentativi si evidenzia come l'accumulo termico raggiunge in entrambi i casi la temperatura massima di set-point durante le prime ore del giorno e come gran parte dell'energia elettrica prodotta venga esportata in rete a fronte di un prelievo di energia dalla rete nelle ore serali, *Figura 42*. Prestazioni migliori si evidenziano, invece, nel caso di un impianto con accumulo elettrico, *Figura 43*.

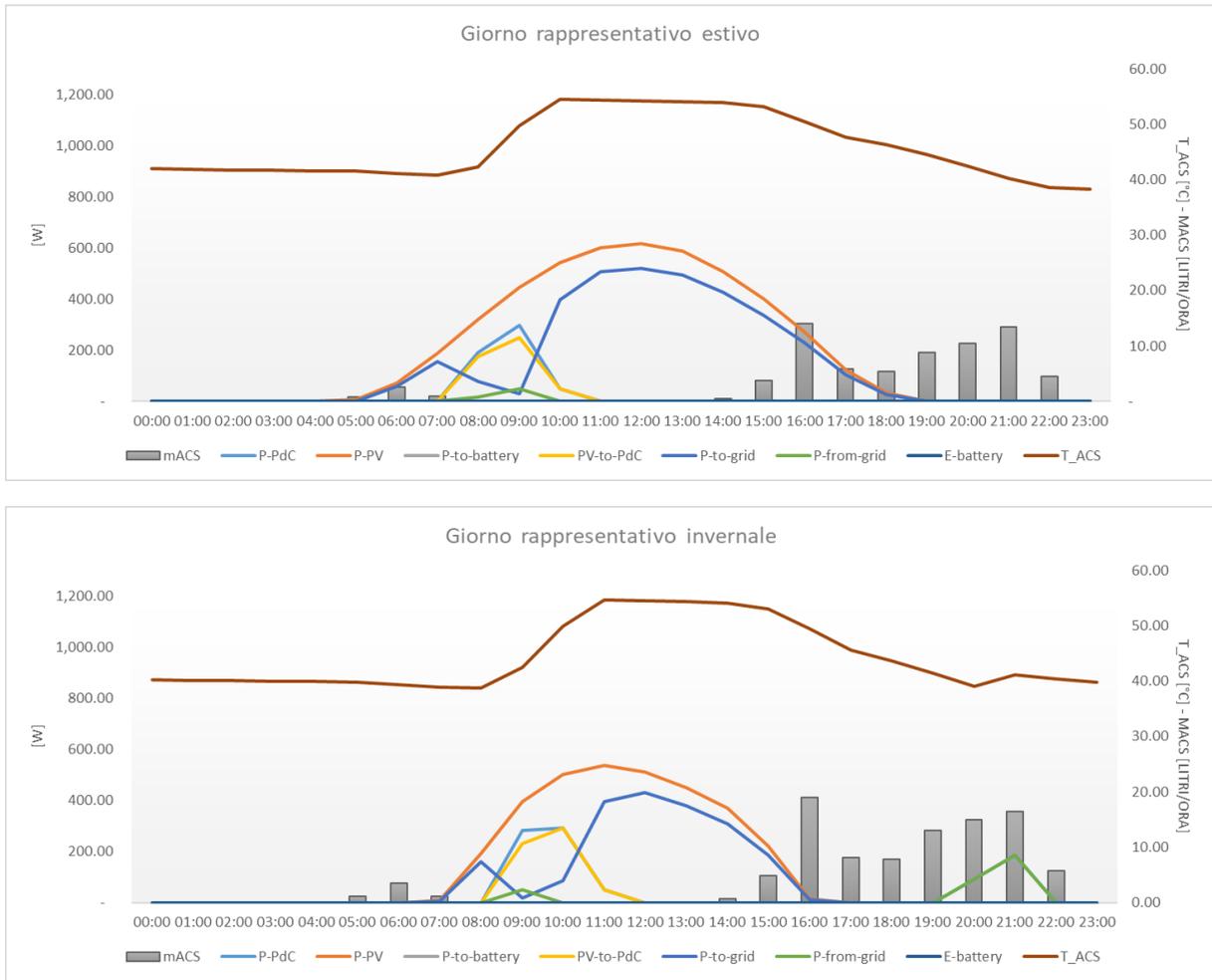
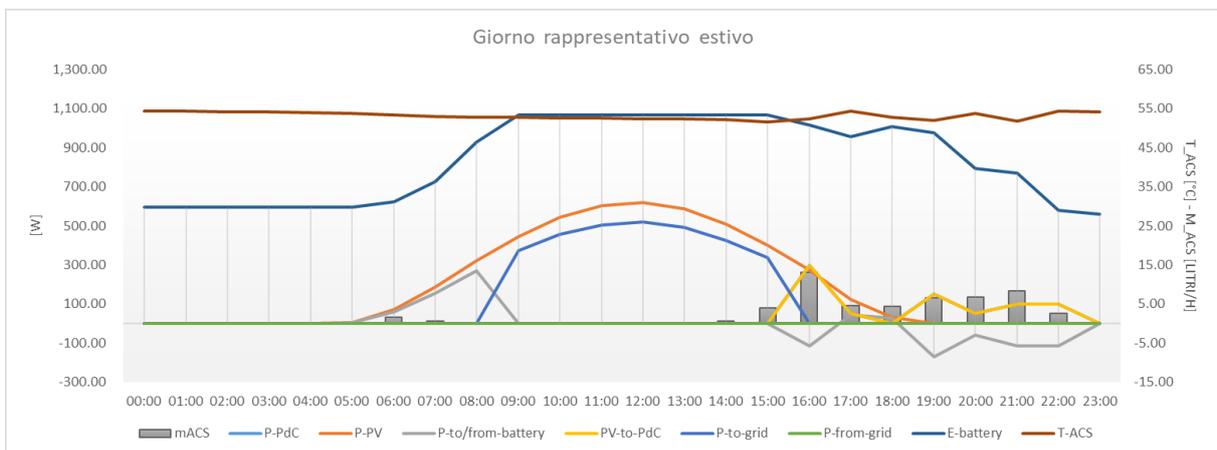


Figura 42 Funzionamento dell'impianto in assenza di accumulo elettrico nei giorni rappresentativi



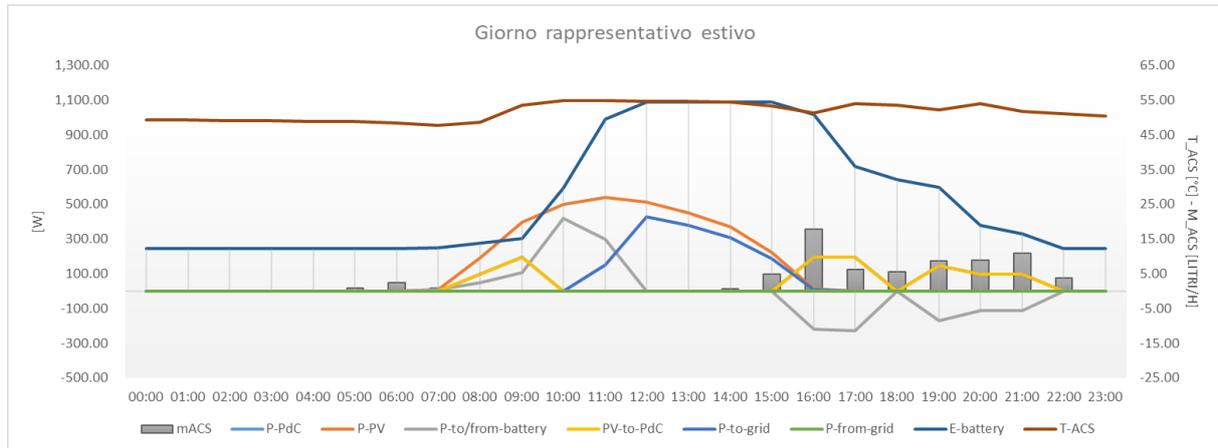


Figura 43 Funzionamento dell'impianto in presenza di accumulo elettrico nei giorni rappresentativi

Pompa di calore da pavimento

Nel caso dello **Scenario 1** (funzionamento standard con $T_{setpoint}=63\pm 2^{\circ}\text{C}$) per la Pompa di Calore da 200 litri, l'impianto fotovoltaico da 720 Wp permette una copertura su base annuale dei consumi elettrici da parte pari al 86% con un massimo del 100% nei mesi compresi fra Luglio e Ottobre, in cui all'aumentare dell'Irraggiamento disponibile diminuisce il fabbisogno di ACS in funzione dei profili di prelievo determinati per l'utenza analizzata, *Figura 44*.

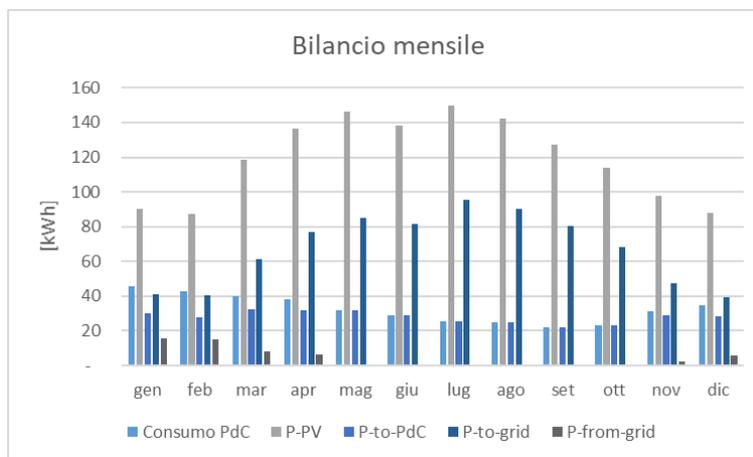


Figura 44 Raffronto fra consumi della Pompa di calore e produzione dell'Impianto Fotovoltaico

L'energia immessa in rete in questo caso ammonta a 800 kWh annui mentre il prelievo si assesta a circa 55 kWh; come riscontrabile in *Figura 45* nei giorni rappresentativi estivo e invernale, infatti, la Pompa di Calore è prevalentemente alimentata dalla batteria e in parte direttamente dalla stringa fotovoltaica.



Figura 45 Funzionamento standard dell'impianto nei giorni rappresentativi

Nello Scenario 2, invece, a parità di consumo rispetto e grazie alla più elevata capacità termica dell'accumulo di ACS rispetto allo Scenario 1, si ottiene una copertura totale del consumo elettrico da parte dell'impianto fotovoltaico annullando il prelievo da rete e garantendo le condizioni di comfort così come calcolate nelle formule (2) e (3). Tale condizione non è però verificata nell'ipotesi di eliminare dal sistema la batteria di accumulo, *Figura 46*.

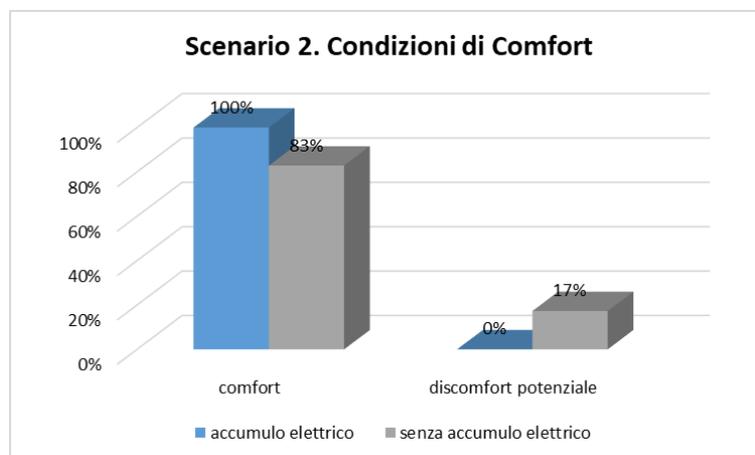


Figura 46 Verifica delle condizioni di comfort e potenziale discomfort

Questo è facilmente verificabile dall'analisi del funzionamento del sistema nei giorni rappresentativi, *Figura 47* per il sistema con presenza di accumulo elettrico e *Figura 48* per il sistema con assenza di accumulo elettrico. Nel primo caso infatti la temperatura dell'accumulo tende a mantenersi elevata sfruttando l'energia accumulata dalla batteria e poco risentendo dei prelievi di ACS durante il giorno. Nel secondo caso, invece, si evidenzia soprattutto nel periodo invernale una produzione fotovoltaica insufficiente ad azionare il compressore, il quale in assenza di accumulo rimane spento sino al raggiungimento della temperatura minima consentita di 38°C a discapito della condizione di comfort. Migliori risultati si possono ottenere in questo caso innalzando il valore di temperatura minima consentito.

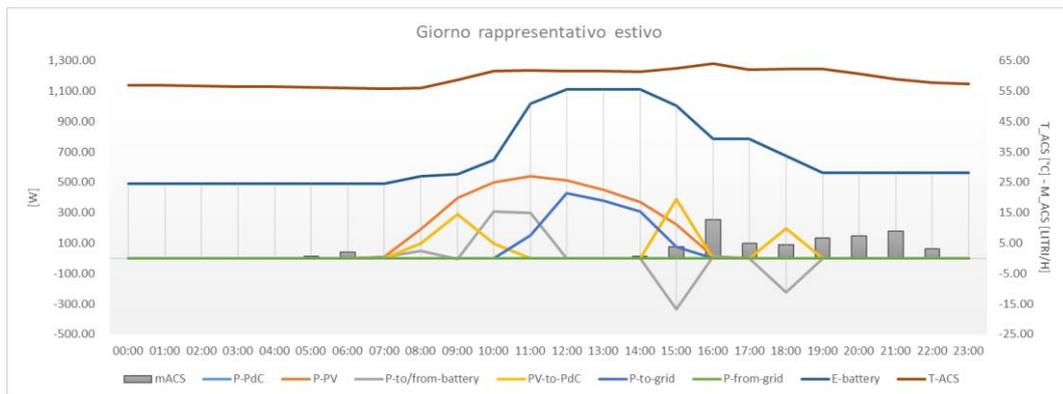
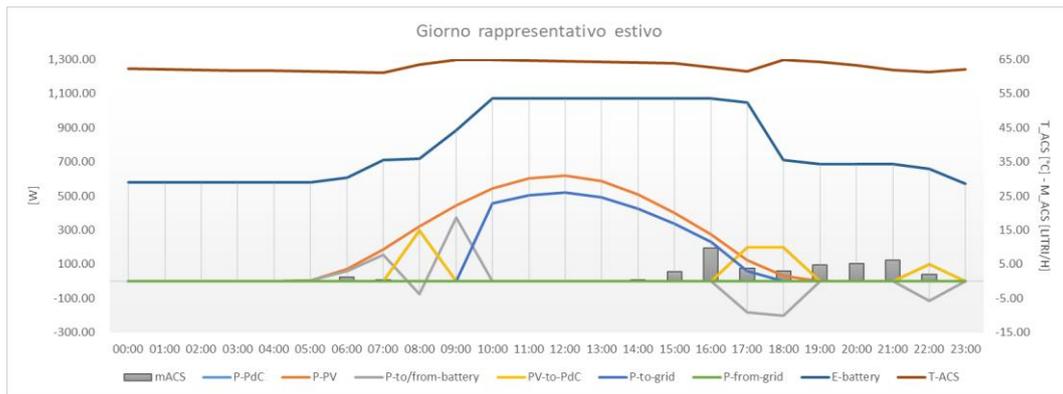
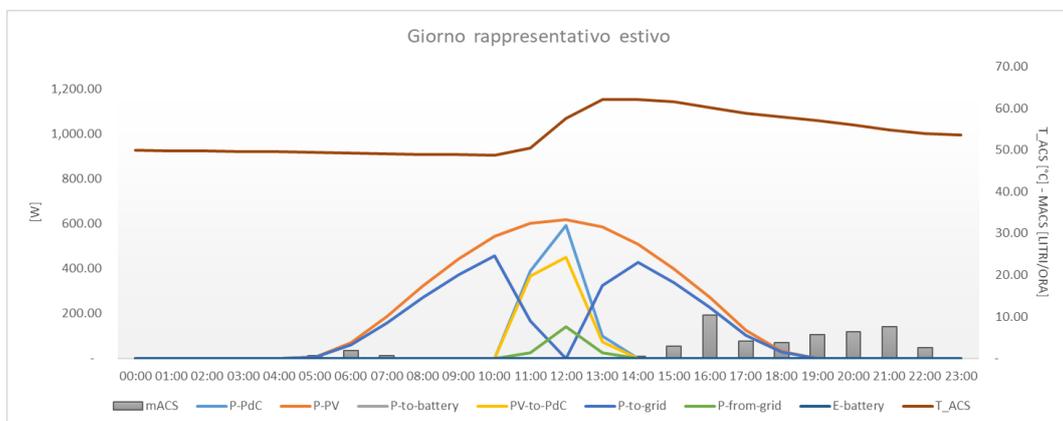


Figura 47 Funzionamento dell'impianto in presenza di accumulo elettrico nei giorni rappresentativi



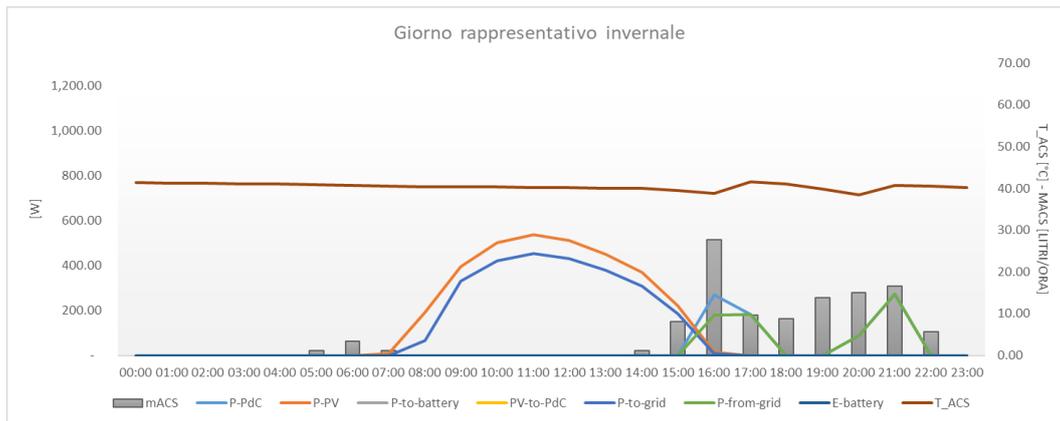


Figura 48 Funzionamento dell'impianto in assenza di accumulo elettrico nei giorni rappresentativi

Un'ultima annotazione riguarda le potenzialità di raffreddamento della Pompa di Calore nella zona termica in cui essa è installata. E' stato possibile verificare, infatti, come durante le sue ore di funzionamento la Pompa di Calore riesca a raffreddare l'ambiente sino alla temperatura di setpoint (26°C), *Figura 49*. Nella stessa figura si riporta (a destra) il rapporto fra il fabbisogno termico calcolato fra le 14:00 e le 22:00 della zona rispetto all'energia termica sottratta all'ambiente durante il ciclo di funzionamento della PdC.

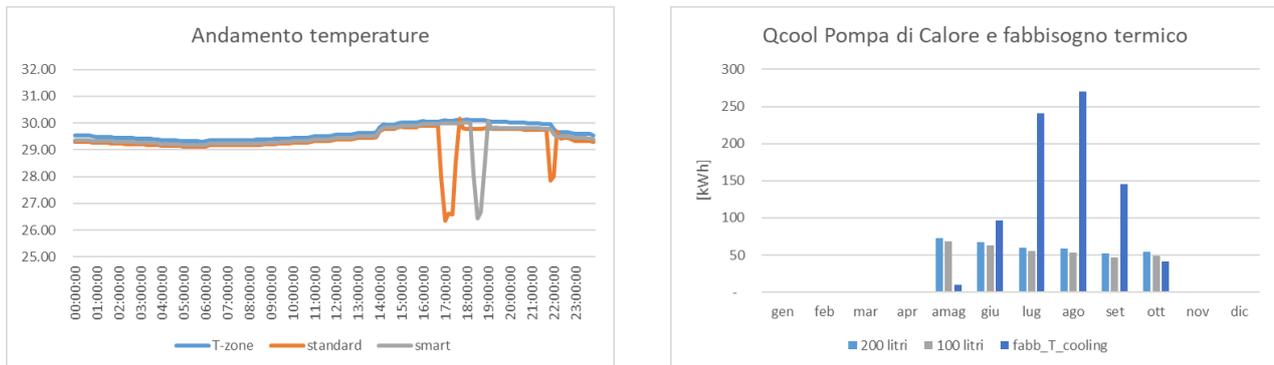


Figura 49 Influenza della Pompa di calore sulla climatizzazione della zona termica

2.4 Layout di impianto

Dalle simulazioni effettuate e dall'analisi dei risultati è stato possibile verificare il migliore assetto impiantistico per le due soluzioni tecnologiche proposte: Pompa di Calore per produzione di ACS a parete (100 litri) e a pavimento (200 litri). In termini di consumi di energia elettrica, a parità di condizioni di prelievo e in funzionamento standard, non si sono riscontrate differenze fra le due tecnologie. Nel caso della Pompa di Calore da 100 litri si è proposto un impianto fotovoltaico da 480 e 720 Wp, dal cui confronto non sono emerse sostanziali differenze in termini di prestazioni energetiche o di risparmi economici; mentre per la Pompa di Calore da 200 litri si è utilizzato un impianto da 720 Wp essendo la potenza nominale del compressore pari a 490 W. Si è infine ipotizzato in entrambi i casi un accumulo elettrico da 1200 Wh in grado di accumulare la quantità di energia utile al funzionamento giornaliero della Pompa di Calore prevalentemente concentrato nelle ore serali by-passando lo scambio con la rete e favorendo

l'utilizzo diretto della produzione elettrica. Dall'analisi dei risultati in presenza/assenza di accumulo elettrico è risultato necessario in entrambi i casi l'utilizzo di un sistema di accumulo elettrico in grado di fornire energia necessaria alla Pompa di Calore nelle ore serali quando si verifica per l'utenza analizzata il prelievo principale di ACS. Solamente nel caso della Pompa di Calore da 200 litri di accumulo è possibile integrando un funzionamento *a sincronizzazione produzione-radiazione*, finalizzato a ottimizzare il consumo dell'energia elettrica prodotta dal fotovoltaico, alla presenza dell'accumulo elettrico si raggiunge una quota di copertura da FER per la produzione di ACS pari al 100% garantendo una erogazione di acqua calda a temperatura sempre superiore ai 45°C. Si propone pertanto la soluzione impiantistica riportata in [Figura 50](#).

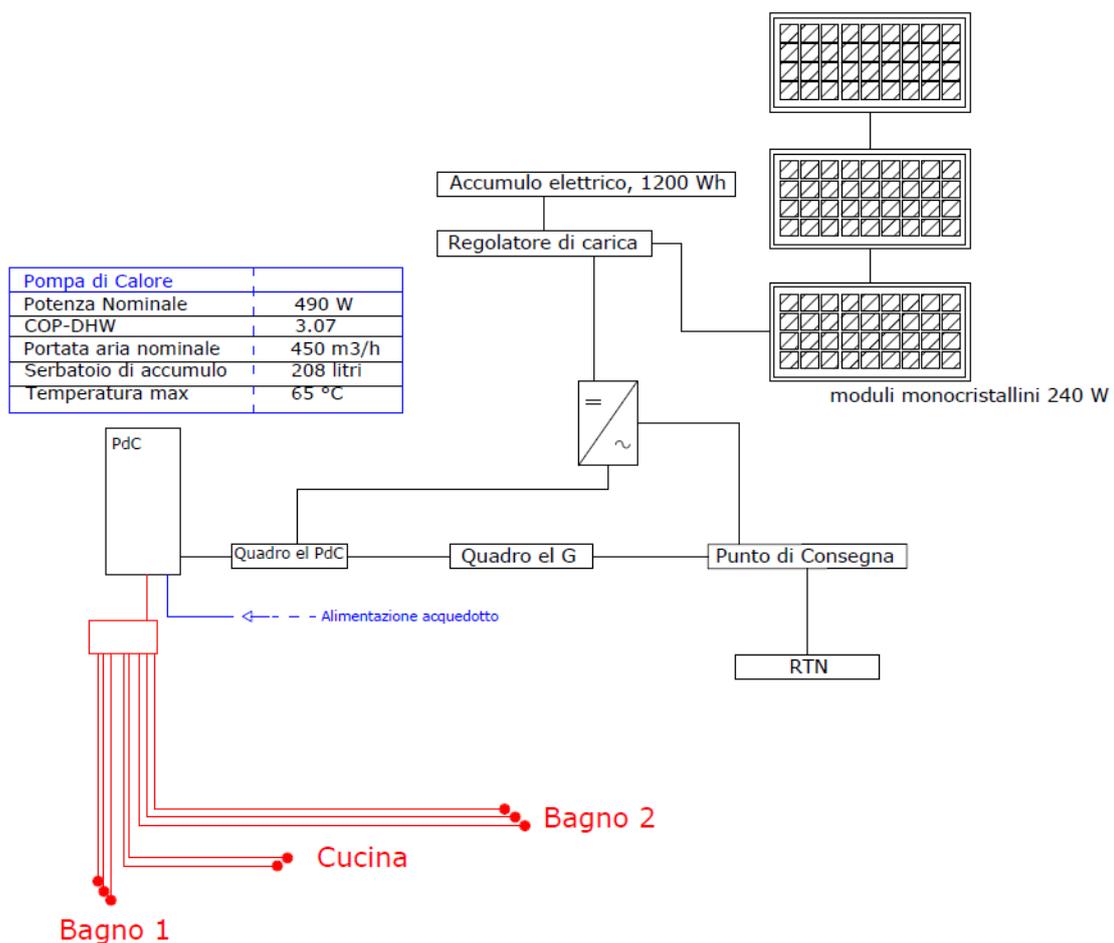


Figura 50 Layuot di impianto per l'utenza analizzata

Conclusioni

Principale obiettivo del presente lavoro è stata la valutazione preliminare di due possibili soluzioni impiantistiche da installare presso due utenze rappresentative nell'Isola di Lampedusa: un ufficio e un'abitazione.

La prima soluzione, presentata nel Capitolo 1, ha riguardato il sistema di climatizzazione solar heat driven Frescoo, già in parte testato in fase sperimentale nel Laboratorio Enea presente nell'Isola (di cui si sono presentati i dati monitoraggio invernale nel Capitolo 2). Si è quindi preliminarmente verificata la fattibilità tecnica di una sua installazione presso uno degli uffici della sede dell'Area Marina Protetta di Lampedusa, individuando possibili soluzioni che ne riducano l'impatto visivo e paesaggistico e ottenendo un buon livello di integrazione architettonica. Si è quindi valutato, attraverso l'utilizzo di simulazioni in ambiente Trnsys, i possibili benefici in termini di comfort e di risparmio energetico, riscontrando in generale un buon potenziale di raffrescamento.

La seconda soluzione impiantistica (Capitolo 3) ha riguardato la possibile sostituzione di uno scaldacqua elettrico con un sistema integrato Pompa di Calore e impianto fotovoltaico in un'abitazione privata. In questo caso si è analizzato un caso studio reale di una utenza rappresentativa dell'isola verificando la fattibilità tecnica di un tale intervento di retrofit rispetto l'impianto esistente. Sono state quindi eseguite delle simulazioni in regime dinamico a partire da un profilo di prelievo dedotto dai dati di consumo dell'utenza evidenziandone la metodologia applicata. Le simulazioni hanno avuto l'obiettivo di verificare la migliore soluzione impiantistica fra l'utilizzo di una Pompa di Calore con accumulo da 100 e da 200 litri in presenza/assenza di accumulo elettrico e in presenza/assenza di un funzionamento della Pompa di Calore a *sincronizzazione produzione-radiazione*. Fra le soluzioni investigate si propone l'impianto costituito da una Pompa di Calore con un serbatoio da 200 litri, che è possibile sfruttare come accumulo termico dell'energia elettrica prodotta da un impianto fotovoltaico da 720 W_p.

Bibliografia

- [1] V. Lo Brano, M. Beccali, M.G. Ippolito, G. Ciulla, P. Finocchiaro, D. La Cascia, G. Leone, G. Zizzo, *Analisi delle tecnologie per la climatizzazione e sistemi ICT applicati agli utenti finali delle isole minori non connesse alla RTN al fine di efficientare il sistema elettrico isolano*, Report RdS/PAR2015/145
- [2] M. Beccali, V. Lo Brano, M. Ippolito, G. Zizzo, G. Ciulla, G. Leone, P. Finocchiaro, *Simulazione e confronto di tecnologie per la climatizzazione e l'acqua calda sanitaria installate presso gli utenti finali delle isole minori non connesse alla RTN al fine di ridurre i costi energetici ed efficientare il sistema elettrico isolano*, Report RdS/PAR 2016
- [3] Marco Beccali, Marina Bonomolo, Giuseppina Ciulla, Pietro Finocchiaro, Mariano Giuseppe Ippolito, Giuliana Leone, Valerio Lo Brano, Rossano Musca, Gaetano Zizzo, *Analisi sperimentale e numerica di tecnologie solar driven per la climatizzazione e la produzione di ACS e di sistemi ICT per il controllo e la riduzione dei carichi elettrici nelle isole minori non connesse alla RTN*, Report RdS/PAR 2017
- [4] ISTAT, Censimento Popolazione <http://dati-censimentopopolazione.istat.it/Index.aspx?lang=it#>
- [5] E. Fuentes, L. Arce, J. Salom, *A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 81 (2018) 1530–1547
- [6] UNI EN 12831-3:2018 Prestazione energetica degli edifici – Metodo di calcolo del carico termico di progetto – Parte3: carico termico dei sistemi di acqua calda sanitaria e caratterizzazione dei fabbisogni, Moduli M8-2/3
- [7] REGOLAMENTO (UE) N. 814/2013 DELLA COMMISSIONE recante modalità di applicazione della direttiva 2009/125/CE del Parlamento europeo e del Consiglio in merito alle specifiche per la progettazione ecocompatibile degli scaldacqua e dei serbatoi per l'acqua calda in Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea del 06/09/2013
- [8] UNI 9182:2014, Impianti di alimentazione e distribuzione d'acqua fredda e calda - Progettazione, installazione e collaudo
- [9] UNI/TS 11300-4:2016, 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