



Ricerca di Sistema elettrico

Test sperimentali su un prototipo di sottostazione per TLR attivo in condizioni reali e perfezionamento di modelli per l'analisi di reti termiche efficienti

Mattia Ricci, Paolo Sdringola, Salvatore Tamburrino,
Biagio Di Pietra, Giovanni Puglisi

TEST SPERIMENTALI SU UN PROTOTIPO DI SOTTOSTAZIONE PER TLR ATTIVO IN CONDIZIONI REALI E
PERFEZIONAMENTO DI MODELLI PER L'ANALISI DI RETI TERMICHE EFFICIENTI

Mattia Ricci, Paolo Sdringola, Salvatore Tamburrino, Giovanni Puglisi, Biagio Di Pietra

Con il contributo di: A. Federici, C. Martini, E. Monno, M. Preziosi, C. Viola

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto: *1.5 - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti*

Work package: *4 - Reti energetiche integrate*

Linea di attività: *LA4.13 - Test sperimentali su un prototipo di sottostazione per TLR attivo in condizioni reali e perfezionamento di modelli per l'analisi di reti termiche efficienti*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi

Responsabile del Work package (LA4.1-LA4.15): Paolo Sdringola

Gli autori desiderano altresì ringraziare Cristina Capodaglio che ha partecipato al progetto durante il lavoro di tirocinio e di tesi di laurea magistrale.

Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE	10
2 PERFEZIONAMENTO DI MODELLI PER L'ANALISI DI RETI TERMICHE EFFICIENTI	11
2.1 SCAMBIATORI A EFFICIENZA COSTANTE E VARIABILE LUNGO L'INTERA STAGIONE DI RISCALDAMENTO	11
2.2 INTERVENTI DI RIQUALIFICAZIONE DELLE UTENZE	13
2.3 EFFETTI DELLA DEEP RENOVATION E DELLA TEMPERATURA OPERATIVA DELLA RETE	15
2.4 SISTEMI DI GENERAZIONE LOCALE E CENTRALIZZATA PER IL TELERISCALDAMENTO A BASSA TEMPERATURA: IMPATTO DEL POWER-TO-HEAT	17
2.5 ANALISI ENERGETICA DEGLI SCENARI ANALIZZATI	21
3 SOTTOSTAZIONE DI SCAMBIO TERMICO BIDIREZIONALE PER TELERISCALDAMENTO ATTIVO.....	23
3.1 MODELLO DINAMICO DI UNA SOTTOSTAZIONE ATTIVA E VALIDAZIONE	23
3.1.1 <i>Modello della sottostazione sviluppato in ambiente Dymola</i>	23
3.1.2 <i>Simulazioni stazionarie</i>	24
3.1.2.1 Scenario 1	25
3.1.2.2 Scenario 2	29
3.1.2.3 Scenario 3	30
3.1.2.4 Scenario 4	32
3.1.2.5 Scenario 5	35
3.1.3 <i>Simulazioni dinamiche</i>	36
3.1.3.1 Prova dinamica 1	41
3.1.3.2 Prova dinamica 2	44
3.1.3.3 Prova dinamica 3	51
3.1.3.4 Prova dinamica 4	57
3.1.3.5 Prova dinamica 5	65
3.1.3.6 Prova dinamica 6	69
3.1.3.7 Prova dinamica 7	72
3.1.3.8 Prova dinamica 8	76
3.1.4 <i>Considerazioni finali sul modello di sottostazione</i>	80
3.2 SVILUPPO DELLA SOTTOSTAZIONE COME COMPONENTE IN LINGUAGGIO MODELICA	81
3.2.1 <i>Modellazione del blocchetto Modelica</i>	81
3.2.2 <i>Inserimento del modello di sottostazione nella rete di TLR</i>	83
3.3 PARAMETRI E CONDIZIONI AL CONTO RNO IMPOSTE PER LA SESSIONE DI PROVE SPERIMENTALI	86
3.3.1 <i>Modellazione dell'edificio</i>	87
3.3.1.1 Caratteristiche dell'involucro.....	87
3.3.1.2 Guadagni e perdite	90
3.3.2 <i>Condizioni climatiche e selezione dei giorni di riferimento</i>	95
3.3.3 <i>Impianto termico</i>	96
3.3.3.1 Schema di impianto	96
3.3.3.2 Impianto di riscaldamento e sua modellazione	96
3.3.3.3 Fabbisogni termici dell'intero edificio e a livello di singolo appartamento	99
3.3.3.4 Impianto ACS e sua modellazione.....	101
3.3.3.5 Carichi termici complessivi	104
3.3.4 <i>Circuito solare</i>	105
3.3.5 <i>Controllo della sottostazione</i>	110
3.3.6 <i>Incertezza di misura e grandezze derivate</i>	111
3.4 SECONDA CAMPAGNA DI PROVE SPERIMENTALI.....	112
3.4.1 <i>Test preliminari</i>	112
3.4.2 <i>Test sessione A</i>	113
3.4.2.1 Giorno 1	115
3.4.2.2 Giorno 3	122
3.4.2.3 Giorno 5	132
3.4.2.4 Prestazioni energetiche ed indicatori per la sessione A	140

3.4.3	Test sessione B	146
3.4.3.1	Test preliminari sessione B	147
3.4.3.2	Fase 1 - Giorno 1	150
3.4.3.3	Fase 1 - Giorno 3	159
3.4.3.4	Fase 1 - Giorno 5	167
3.4.3.5	Fase 1 - Prestazioni energetiche ed indicatori per la sessione B1.....	175
3.4.3.6	Fase 2	180
3.4.3.7	Fase 2 - Giorno 1	181
3.4.3.8	Fase 2 - Giorno 3	188
3.4.3.9	Fase 2 - Giorno 5	196
3.4.3.10	Fase 2 - Prestazioni energetiche ed indicatori per la sessione B2.....	203
3.4.4	Estrapolazione annuale.....	206
3.4.5	Considerazioni sui risultati della seconda campagna di prove sperimentali.....	208
4	CONCLUSIONI.....	210
5	APPENDICE	213
5.1	DATI CLIMATICI	213
5.1.1	Condizioni dell'aria esterna.....	213
5.1.2	Temperatura del vano non riscaldato posto sotto il primo piano abitato	213
5.1.3	Curva climatica	213
5.2	RADIATORE E COLLETTORE SOLARE SCELTI PER LE SIMULAZIONI	214
5.3	IMPIANTO DI LABORATORIO.....	216
5.3.1	Connessione laboratorio con sottostazione	216
5.3.2	Connessione laboratorio e sottostazione con modello numerico	217
5.4	ULTERIORI RISULTATI DELLA SECONDA CAMPAGNA DI PROVE SPERIMENTALI.....	221
5.4.1	Sessione A - Giorno 2.....	221
5.4.2	Sessione A - Giorno 4.....	229
5.4.3	Sessione A - Giorno 6.....	236
5.4.4	Sessione B1 - Giorno 2.....	243
5.4.5	Sessione B1 - Giorno 4.....	251
5.4.6	Sessione B1 - Giorno 6.....	258
5.4.7	Sessione B2 - Giorno 2.....	266
5.4.8	Sessione B2 - Giorno 4.....	274
5.4.9	Sessione B2 - Giorno 6.....	281
	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	289

Sommario

Il quadro normativo europeo (Direttiva UE 2018/2001) e nazionale nel percorso di decarbonizzazione verso il 2050 pone l'accento sul ruolo del teleriscaldamento per il raggiungimento degli obiettivi di efficienza, sostenibilità energetica, utilizzo delle fonti rinnovabili e riduzione dell'uso dei combustibili fossili.

In questo contesto, la presente attività di ricerca si propone di perfezionare ed integrare i modelli numerici sviluppati nelle attività descritte nel Report RdS/PTR2020/144. In particolare, si è ritenuto opportuno analizzare i seguenti aspetti:

- efficienza degli scambiatori di calore collocati presso le sottostazioni di scambio termico alle utenze;
- potenza delle pompe idrauliche a servizio dei circuiti secondari presso le utenze;
- effetti dell'abbassamento della temperatura di esercizio della rete di teleriscaldamento a valle della *deep renovation* delle utenze;
- effetti della riqualificazione di tutte le utenze della rete ed effetti della *deep renovation* sul comfort termico e sui consumi energetici della centrale termica;
- effetti della riqualificazione energetica della centrale termica.

Il caso studio analizzato nel presente report è il medesimo descritto nel Report RdS/PTR2020/144, ovvero la rete di teleriscaldamento del Campus Universitario di Parma (ramo Nuova Sud). Le simulazioni numeriche sono state effettuate per tutta la durata della stagione di riscaldamento.

Per quanto riguarda la modellazione degli scambiatori di calore, è stato sviluppato mediante il *software* Dymola un nuovo componente che simula il funzionamento di uno scambiatore di calore ad efficienza variabile. I risultati di tale modello sono stati validati confrontando gli *output* numerici con le prove sperimentali. Il modello così implementato è stato utilizzato per confrontare, a livello di intera rete di teleriscaldamento, l'effetto dell'efficienza degli scambiatori sul *comfort* termico degli edifici. I risultati ottenuti mostrano che, dal punto di vista del *comfort* termico, la variazione di efficienza degli scambiatori di calore ha un effetto trascurabile. Al fine di ottenere comunque risultati accurati contenendo allo stesso tempo i costi computazionali, si è quindi ritenuto opportuno procedere con le simulazioni numeriche mantenendo costante l'efficienza di tali componenti.

Le attività di ricerca descritte nel Report RdS/PTR2020/144 suggerivano che in alcune utenze le potenze delle pompe di circolazione a servizio dei circuiti secondari potevano non essere adeguate alla domanda termica delle utenze stesse. È stata quindi effettuata una campagna di simulazioni numeriche al fine di ottimizzare, in condizioni di *design*, la potenza delle pompe per ogni utenza, in modo da evitare sovradimensionamenti o sottodimensionamenti delle stesse. Per questa campagna di simulazioni numeriche, le temperature nominali di mandata e ritorno della rete di teleriscaldamento sono state mantenute costanti a 80 °C/55 °C.

L'attività di ricerca è proseguita simulando il comportamento termo-idraulico della rete di teleriscaldamento quando le temperature nominali di esercizio della rete vengono abbassate a 55 °C/30 °C. Come atteso, le condizioni di *comfort* termico peggiorano in diverse utenze della rete, mentre allo stesso tempo aumenta l'energia assorbita dalle pompe di circolazione. Si è quindi deciso di procedere simulando il funzionamento della rete nello scenario in cui tutte le utenze hanno subito un intervento di *deep renovation*. I risultati ottenuti mostrano che in questo scenario i livelli di *comfort* termico sono soddisfacenti per tutti gli edifici della rete.

Una volta valutati gli effetti della riqualificazione energetica degli edifici, l'attività di ricerca è proseguita analizzando gli effetti della riqualificazione energetica della centrale termica. In particolare, è stato implementato un nuovo modello di centrale in cui la generazione di calore è stata affidata principalmente ad una pompa di calore (potenza nominale 1 MW), mentre il gruppo caldaie entra in funzione solo quando necessario a garantire la temperatura di mandata prescritta dalla curva climatica. È stata inoltre modellata la produzione di energia fotovoltaico inserendo nel nuovo modello di centrale sviluppato dei componenti *ad-hoc*. Al fine di ipotizzare un totale autoconsumo dell'energia prodotta, la pompa di calore è alimentata solo quando è disponibile potenza fotovoltaica. I risultati ottenuti, per quanto promettenti dal punto di vista del risparmio energetico, mostrano che al fine di ottimizzare l'utilizzo della fonte solare è necessario prevedere l'impiego di accumuli elettrici dedicati.

In riferimento al TLR attivo è stato creato un modello dinamico di una sottostazione, comprensivo dei relativi sistemi di controllo, a partire da uno scambiatore ad efficienza variabile basato sul metodo Thermal Resistance Scaling. Le simulazioni dinamiche e le analisi fatte mostrano un modello particolarmente sensibile alle variazioni di richiesta e produzione e interazioni delicate tra gli scambiatori. Questi aspetti potrebbero attenuarsi o non verificarsi se il modello fosse sottoposto a variazioni graduali del contorno; in ogni caso i parametri caratteristici dei sistemi di controllo e di ciascun componente della sottostazione sono stati scelti e tarati in modo da fornire risposte stabili e non oscillatorie e il modello è stato portato a convergenza per ogni condizione studiata. Il modello presenta quindi un'elevata rapidità di interazione e precisione sulla ripartizione dei flussi termici; i risultati ottenuti sulle potenze scambiate, sulle temperature e sulle portate dei vari circuiti della sottostazione sono in linea con i dati sperimentali. Sulla base delle analisi effettuate è stato rilevato come il modello è in grado di rispondere correttamente alle variazioni dinamiche sia di richiesta che di produzione e i sistemi di controllo implementati seguono, come previsto, la logica di dare priorità alla produzione del sistema di generazione e successivamente alla rete di teleriscaldamento.

Per la modellazione del relativo componente in Modelica è stato necessario eseguire una serie di azioni per razionalizzare il modello esistente, compresa: pulizia del modello originale con riorganizzazione delle logiche di controllo in blocchetti separati; organizzazione strutturata dei parametri nella mascherina del modello; check della consistenza dei risultati rispetto al modello di partenza. Ottenuto un modello strutturato che replicasse, a pari condizioni, lo stesso comportamento di quello di partenza, si è proseguito con l'estrazione di un modello di sottostazione come blocchetto Modelica, il test e la validazione dello stesso. È stato infine affrontato l'inserimento del modello di sottostazione nella rete di TLR, con specifico riferimento al Campus Universitario di Parma (descritto nel Report RdS/PTR2020/144). La modalità di connessione originaria del singolo edificio con la rete non permette, con il modello di sottostazione implementato, l'allacciamento della parte attiva; si è resa pertanto necessaria una modifica del layout, applicata a due reti semplificate, aventi rispettivamente 1 e 2 edifici, che hanno mostrato in fase di simulazione alcuni problemi di robustezza da investigare ulteriormente.

Il prototipo di sottostazione di scambio termico bidirezionale per teleriscaldamento permette di raccogliere energia termica proveniente da un sistema di generazione (solare o calore di scarto) prodotta dall'utenza, di utilizzarla direttamente all'utenza quando necessario, di cederne l'eccedenza alla rete di teleriscaldamento quando il fabbisogno dell'edificio è minore della disponibilità e infine di ricorrere alla rete come sorgente di calore per l'edificio nei momenti di assenza di generazione locale. La prima campagna di prove sperimentali ha permesso, da un lato di valutare le prestazioni della sottostazione in termini di scambio di energia nei diversi scambiatori, mettendo in luce la stabilità dei controlli implementati in condizioni stazionarie, e dall'altro di testare la sottostazione in condizioni di funzionamento dinamico andando a variare il profilo di richiesta da parte dell'utenza e il profilo di produzione del sistema di generazione, al fine di verificare che la sottostazione garantisca sempre il soddisfacimento dei fabbisogni termici. Una volta eseguiti gli opportuni interventi di miglioramento al fine di avere un corretto monitoraggio dei flussi energetici e un adeguato utilizzo degli scambiatori, è stata pianificata una seconda campagna di test sul prototipo per verificarne le prestazioni durante il funzionamento in condizioni reali.

La campagna di test sperimentali è stata suddivisa in due sessioni. Nel corso della sessione A il TLR è stato considerato operante in condizioni convenzionali, con temperatura di mandata pari a 80 °C e temperatura di ritorno pari a 50 °C. È stato utilizzato un modello numerico di edificio compatibile con la potenza termica nominale della sottostazione bidirezionale, ovvero 60 kW. Inoltre, è stato utilizzato un modello numerico per generare il profilo dinamico della potenza termica generata da un impianto a pannelli solari termici piani; tale impianto è dotato di un accumulo termico gestito per accumulare acqua calda a temperature superiori a 80°C. Nel corso della sessione B è stata considerata una rete di TLR operante in condizioni di bassa temperatura, con temperatura di mandata pari a 60 °C e temperatura di ritorno pari a 30 °C. Il modello numerico di edificio considera le stesse caratteristiche geometriche, lo stesso sistema di distribuzione del calore e uno stato di involucro edilizio risanato, al fine di poter garantire il soddisfacimento del fabbisogno con lo stesso sistema di emissione, ma con temperature più basse (fino a 55 °C anziché 70 °C). La sessione B è stata suddivisa in due fasi, B1 e B2, differenziate rispetto al sistema di generazione locale considerato: solare termico e calore di scarto. Per i test della fase B1 è stato utilizzato lo stesso modello numerico della sessione A per l'impianto a pannelli solari, ma con una gestione dell'accumulo finalizzata a produrre acqua a temperature maggiori di 60 °C, mentre per i test della fase B2 si è considerato un sistema di recupero di

calore di scarto da un caseificio, con una potenza recuperabile costante e pari a 55 kW per 7 ore al giorno. Per ogni sessione di test sono stati testati i sei giorni non consecutivi che meglio rappresentano la variabilità di condizioni climatiche dell'intero anno con riferimento ad un anno climatico medio per il comune di Castenaso, comune della città metropolitana di Bologna. Tramite un'interfaccia hardware-in-the-loop sono stati utilizzati modelli per i profili di carico termico di riscaldamento/ACS e per i sistemi di generazione locale, mentre la temperatura di ritorno dall'utenza sul circuito secondario è stata controllata in regime dinamico dalla test facility. Una volta eseguite le prove sperimentali è stata condotta un'analisi delle prestazioni energetiche della sottostazione per i 6 giorni di test considerati al fine di valutare i flussi energetici e la bontà dell'accoppiamento tra i modelli numerici di edificio e campo solare/recupero termico con il laboratorio. In alcune condizioni di funzionamento si hanno delle discrepanze tra variabile di riferimento e variabile controllata che si ripercuotono sui bilanci energetici, come risulta dai fattori di accoppiamento opportunamente definiti sia per l'energia proveniente dalla rete che per quella prodotta localmente. Si ha un miglior accoppiamento, e di conseguenza un miglior controllo della T8 di ritorno dall'utenza, nei giorni in cui il funzionamento del sistema è stabile ed è presente una richiesta di riscaldamento e ACS. Noti i flussi energetici della sottostazione è stato inoltre possibile valutare una serie di indicatori tra cui la frazione di energia ceduta all'utente e proveniente da TLR e da generazione locale, la frazione di energia prodotta localmente inviata all'utente e quella immessa in rete di TLR, oltre alla la frazione di energia prodotta e non viene direttamente utilizzata dalla sottostazione. I giorni 1 e 6 sono giornate tipicamente invernali durante le quali si ha un'elevata richiesta da parte dell'utente per esigenze di riscaldamento e ACS e una bassa radiazione solare; si verifica, quindi, che la richiesta dell'utente è soddisfatta principalmente dalla rete di TLR (99,8% e 95,6% per la sessione A; 92,8% e 93,4% per la sessione B1; 58,2% e 69,8% per la sessione B2), pur essendoci un'energia prodotta da solare comparabile, essa è disponibile in due diversi momenti della giornata. I giorni 2 e 3 sono giornate primaverili, con un buon andamento della radiazione solare e, allo stesso tempo, richieste termiche per riscaldamento e ACS da parte dell'edificio; in questi giorni si verifica che le richieste termiche dell'utente sono soddisfatte dalla rete di TLR (91,7 % e 72% per la sessione A, 76,5% e 69% per la sessione B1; 55,8% e 56,4% per la sessione B2) e dal solare/recupero termico, fino ad arrivare ad un funzionamento contemporaneo degli scambiatori S2 ed S3 data l'elevata produzione da solare che arriva fino a 40 kW. I giorni 4 e 5 sono giornate estive, per le quali non si hanno richieste di riscaldamento da parte dell'edificio, ma solo di ACS; anche in questo caso le richieste termiche dell'utente vengono soddisfatte in parte dal TLR (83,9% e 60,3% per la sessione A, 100% e 55,1% per la sessione B1, 72,1% e 21,8% per la sessione B2) e in parte crescente dal solare/recupero termico.

Sulla base dei risultati ottenuti nei giorni rappresentativi è stata effettuata un'estrapolazione su base annuale, rilevando che:

- L'energia per riscaldamento della sessione B1 è paragonabile a quella della sessione B2 in quanto è stato utilizzato lo stesso modello di edificio per le due sessioni di test. Si nota, invece, una differenza tra l'energia per riscaldamento della sessione A e B (B1 e B2): l'energia della sessione B è circa il 43% di quella della sessione A per effetto del risanamento dell'edificio; l'energia per ACS è paragonabile nelle tre sessioni di test in quanto non sono state apportate modifiche al modello di edificio per quanto riguarda il circuito ACS.
- L'energia prodotta dal campo solare nella sessione B1 è circa il 150% di quella della sessione A. Pur avendo lo stesso campo solare (tipologia di collettori e dimensione) è diversa la gestione dell'accumulo solare: nel test della sessione A esso è gestito ad una temperatura superiore ad 80 °C, mentre nella sessione B1 ad una temperatura superiore a 60 °C e comunque inferiore a quella della sessione A. Di conseguenza si ha una temperatura di ritorno al campo solare inferiore nella sessione B1 e conseguente aumento delle prestazioni dello stesso.
- La sottostazione permette di coprire il 92% e l'86% del carico termico dell'edificio con energia proveniente dal TLR e il restante 8% e 14% con energia proveniente da campo solare, rispettivamente considerando i test della sessione A e B1. L'incremento percentuale della frazione di energia all'utente da solare è dovuto, da un lato ad una minore richiesta da parte dell'utente in seguito al risanamento dell'edificio e, dall'altro, ad una maggiore produzione di energia da solare. Nel caso dei test della sessione B2 si ha una maggiore frazione di energia da sistema di generazione (calore di scarto) che va a soddisfare le richieste dell'utente, ovvero il 41,5%. Ciò è dovuto principalmente alla contemporaneità

tra richiesta dell'utente e disponibilità di calore di scarto che si ha tra le 7:00 e le 12:00 dei giorni invernali (1, 2, 3 e 6).

- La sottostazione permette di trasferire il 13% e il 9,6% dell'energia annuale prodotta da solare all'utente, il 68% e 79,5% viene immesso nella rete di TLR, mentre il 19% e l'11% è disperso sotto forma di perdite termiche in vari punti del circuito, rispettivamente considerando i test della sessione A e B1. Si nota, quindi, un aumento della frazione di energia solare immessa nella rete di TLR nei test della sessione B1 per effetto di una maggiore produzione da solare, una minore richiesta da parte dell'utente e minori perdite rispetto alla sessione A. La diminuzione delle perdite è dovuta principalmente ad una minore temperatura di gestione dell'accumulo solare che da un lato porta ad una diminuzione dell'energia richiesta nella fase di preriscaldamento del campo solare e dall'altro ad una diminuzione delle perdite termiche nel circuito tra campo solare e accumulo (simulato) e tra accumulo e secondario scambiatori S2 ed S3 (laboratorio).

I flussi energetici sono stati valutati considerando di utilizzare istantaneamente l'energia da sistema di generazione disponibile per soddisfare le richieste dell'utenza inviando il surplus nella rete di teleriscaldamento. Si può notare che, per tutte le sessioni di test, si ha energia proveniente da sistema di generazione immessa nella rete di teleriscaldamento pur potendo potenzialmente essere utilizzata per soddisfare totalmente o parzialmente le richieste dell'utenza. Ciò accade a causa della non contemporaneità tra richiesta dell'utente e disponibilità di energia dal sistema di generazione considerato. Ne risulta che, al fine di aumentare la percentuale di energia solare/calore di scarto utilizzata per coprire il carico, si dovrebbe agire sul dimensionamento e la gestione dell'accumulo solare più che sulla capacità installata. In alternativa, si potrebbe gestire in maniera differente l'interfacciamento con la rete di TLR considerando un regime di scambio sul posto termico, usando quindi la rete come sistema di accumulo dell'energia termica prodotta e non direttamente auto-consumata. Entrambe le possibilità necessiterebbero di una revisione e ottimizzazione dell'impianto: da un lato sarebbe necessario un corretto dimensionamento degli accumuli basato sia sulle potenzialità dei sistemi di generazione che sulle richieste dell'utente, rispettando quelli che sono i possibili limiti di ingombro all'interno di un condominio; dall'altro è importante tenere in considerazione le possibili limitazioni imposte dal gestore della rete di TLR per quando riguarda l'immissione in rete.

Sulla base di ciò è stata fatta l'ipotesi di applicare un sistema di scambio sul posto termico giornaliero e i risultati ottenuti sono stati estrapolati all'intero anno. Da un'analisi comparativa emerge che:

- Per la sessione A e B1 si ha un aumento rispettivamente del 15,9 % e 37,8% della frazione di energia all'utente da solare in regime di scambio sul posto giornaliero rispetto al considerare solo quella istantaneamente autoconsumata, arrivando rispettivamente al 24% e 52%. Inoltre, si ha una parte di energia da sistema di generazione che viene immessa nella rete di TLR e non prelevata per soddisfare l'utente per una quantità rispettivamente pari a 14.802 kWh e 28.385 kWh. Sarebbe, quindi, potenzialmente possibile aumentare ulteriormente la frazione di energia all'utente da sistema di generazione, considerando il regime di scambio sul posto su un intervallo di tempo più ampio (mensile o annuale anziché giornaliero).
- Per la sessione B2 la frazione di energia all'utente da calore di scarto arriva al 100% con un aumento del 58,5 % rispetto al considerare solo quella istantaneamente autoconsumata. Rispetto alla sessione A e B1, in questo caso l'energia prodotta dal sistema di generazione è pressoché costante per i 6 giorni di test, non essendo dipendente dalla disponibilità della fonte solare, ed è giornalmente sempre maggiore della richiesta da parte dell'utente. Risulta che una parte di energia prodotta dal sistema di generazione è immessa nella rete di TLR per una quantità pari a 93.254 kWh annuali.

Tutte le sessioni di test hanno evidenziato un corretto funzionamento delle logiche di controllo implementate anche in condizioni di funzionamento realistiche, confermando quanto già ottenuto nella prima campagna di prove (Report RdS/PTR2020/144). In particolare, la sottostazione è riuscita a soddisfare l'utenza andando a fornire, quando richiesto, energia ad una temperatura di 70 °C per i test della sessione A e 55 °C per i test della sessione B, e garantendo le condizioni di comfort all'interno dei locali del modello di edificio considerato.

La criticità principale ha riguardato lo scambiatore S1, dimensionato per fornire all'utente circa 60 kW a 60 °C se connesso con una rete di TLR operante a 80 °C e quindi risultato non adatto per fornire all'utente 25 kW (potenza di picco prevista dell'edificio risanato per i giorni di test) a 55 °C se connesso con una rete di TLR

operante a 60 °C. Per l'esecuzione delle prove della sessione B è stato necessario sostituire lo scambiatore S1 con uno di dimensioni maggiori al fine di poter soddisfare l'utenza risanata. Similmente è stata necessaria la sostituzione dello scambiatore S3 con uno di dimensioni maggiori al fine di potersi correttamente interfacciare con la rete di TLR e scambiare le potenze previste nei test delle fasi B1 e B2 (maggiori rispetto a quelle della sessione A). Ne deriva che la progettazione della sottostazione è strettamente dipendente dalle condizioni di funzionamento della rete di TLR, dai carichi termici previsti e dalle potenzialità del sistema di generazione considerato. Ipotizzando di avere una sottostazione installata presso un'utente e operante nelle stesse condizioni della sessione A, in vista di un possibile risanamento dell'edificio e/o della rete di TLR o anche di una variazione nel sistema di generazione sarebbe necessario verificare il corretto dimensionamento degli scambiatori e, se necessario, sostituirli.

1 Introduzione

A partire dalle attività condotte nelle annualità precedenti si è inteso perfezionare e validare gli strumenti di calcolo utilizzati per le modellazioni, anche sulla base dei casi studio analizzati e delle sperimentazioni effettuate.

È dedicata particolare attenzione: all'approfondimento di componenti come gli scambiatori di calore; ai sistemi di generazione locale e centralizzata per il teleriscaldamento a bassa temperatura; alla valutazione degli effetti di *deep renovation* applicata su diverse scale (dal singolo edificio e fino alla totalità delle utenze allacciate) e prevedendo diversi possibili livelli di temperatura del fluido nella rete. Inoltre, viene analizzato l'impatto del *power-to-heat* in abbinamento alle reti di teleriscaldamento per il bilanciamento della rete elettrica nei periodi di massima produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili non programmabili (*Sezione 2*).

In relazione al teleriscaldamento attivo sono perfezionati e validati specifici modelli per lo scambio termico bidirezionale, con l'obiettivo di definire il componente sottostazione e l'integrazione dello stesso in sistemi complessi. Sulla base della pianificazione definita nella precedente annualità, viene eseguita la seconda campagna di test sul prototipo di sottostazione termica per verificarne le prestazioni durante il funzionamento in condizioni reali, considerando sia una rete operante in condizioni standard che a bassa temperatura. I risultati dei test, anche grazie ad opportuni indicatori, permettono di supportare valutazioni di convenienza energetica ed economica circa lo scambio di energia bidirezionale nelle reti di teleriscaldamento attivo, in presenza di utenti *prosumer* in grado di immettere energia da fonti rinnovabili oppure con recupero di calore di scarto (*Sezione 3*).

2 Perfezionamento di modelli per l'analisi di reti termiche efficienti

Per l'ottimizzazione di modelli di reti termiche sono state presi in esame sei scenari. La rete di partenza, definita dallo scenario 1, è la medesima già analizzata nel Report RdS/PTR2020/144 [1]. Riguardo la rete studiata nello scenario 2, la potenza delle pompe è stata adattata in base alle utenze, in particolare, la potenza della pompa nel circuito secondario è stata ottimizzata sulla base del fabbisogno delle singole utenze prese in esame. I valori delle potenze nominali delle pompe nei circuiti secondari così ottenuti sono riportati in Tabella 2.3. Lo scenario 3 è identico allo scenario 1, con la sola differenza che gli scambiatori di calore sono stati modellati ad efficienza variabile, mediante un modello numerico sviluppato ad hoc. Gli scenari 4 e 5 sono dedicati allo studio della rete a bassa temperatura, ovvero è stata imposta una temperatura di mandata nominale pari a 55 °C e di ritorno pari a 30 °C. In questo scenario, la temperatura di mandata è in realtà determinata da una curva climatica sulla base della temperatura esterna (data come input mediante il file climatico). Lo scenario 5 è identico allo scenario 4, ma si è ipotizzato un intervento di riqualificazione di tutti gli edifici serviti dalla rete di teleriscaldamento. Infine, per quanto riguarda lo scenario 6, è stato ipotizzato un intervento di riqualificazione anche della centrale termica, per la quale è stata considerata l'aggiunta di una pompa di calore e di un impianto fotovoltaico. Una vista sintetica degli scenari di simulazione descritti è riportata in Tabella 2.1.

Tabella 2.1. Caratteristiche dei diversi scenari analizzati

Nome Scenario	Tipologia centrale	Potenza nominale pompe secondarie (originale - O/modificato -M)	Eff. Scambiatori (costante - C/variabile -V)	T (alta temperatura-H/bassa temperatura-L)	Retrofit Edifici (sì - Y/no -N)
Scenario 1	caldaie	O	C	H	N
Scenario 2	caldaie	M	C	H	N
Scenario 3	caldaie	O	V	H	N
Scenario 4	caldaie	M	C	L	N
Scenario 5	caldaie	M	C	L	Y
Scenario 6	Caldaie + pompa di calore + solare fotovoltaico	M	C	L	Y

2.1 Scambiatori a efficienza costante e variabile lungo l'intera stagione di riscaldamento

I componenti fondamentali nella sottostazione di scambio termico sono gli scambiatori di calore. Nell'ambito delle simulazioni stazionarie per modellare gli scambiatori di calore della sottostazione è stato utilizzato il modello denominato "ConstantEffectiveness", che si trova all'interno della libreria Fluid di IBPSA, in particolare nel pacchetto HeatExchangers. Tale modello di scambiatore è caratterizzato da una efficienza costante che rappresenta un parametro di input dell'utente. È stato possibile quindi utilizzarlo per la simulazione delle sole prove stazionarie, dove tale parametro a regime raggiunge un valore costante.

Per quanto invece riguarda le simulazioni delle prove dinamiche, è stato necessario implementare in Dymola un nuovo modello di scambiatore caratterizzato da un'efficienza dello scambio termico variabile. In particolare, è stato sviluppato un nuovo modello di scambiatore di calore, denominato "VariableEffectiveness", sulla base del metodo *Thermal Resistance Scaling*, che consente di calcolare l'efficienza dello scambio termico durante la simulazione a partire dai parametri di design dello scambiatore stesso, ovvero:

- le portate del fluido caldo e del fluido freddo;
- le temperature di ingresso e uscita del fluido caldo e del fluido freddo;
- la potenza termica scambiata;

- il coefficiente globale di scambio termico [kW/m²°C], che può eventualmente essere calcolato conoscendo i coefficienti di scambio termico convettivo del fluido caldo e di quello freddo, rispettivamente α_c e α_f [W/m²K], la conduttività termica λ del materiale che costituisce i condotti dello scambiatore [W/mK] e lo spessore della lastra [m].

Il metodo prevede inizialmente di calcolare la resistenza termica totale dello scambiatore in condizioni di progetto (denominata R_{TD})¹, espressa in K/kW, come:

$$R_{TD} = \frac{1}{(UA)_D} \quad (2.1)$$

In seguito questo valore di resistenza totale viene suddiviso nelle sue componenti, ovvero le resistenze termiche per convezione (lato fluido caldo e lato fluido freddo) e per conduzione, tenendo conto dei rispettivi fattori f_{lc} , f_{lf} , f_c (adimensionali):

$$R_{lc,D} = R_{TD} f_{lc} \quad f_{lc} = 0,46 \quad (2.2)$$

$$R_{c,D} = R_{TD} f_c \quad f_c = 0,13 \quad (2.3)$$

$$R_{lf,D} = R_{TD} f_{lf} \quad f_{lf} = 0,46 \quad (2.4)$$

Le resistenze termiche così calcolate in condizioni di *design* vengono utilizzate per calcolare i valori di *off-design* come segue:

$$R_{lc,OD} = R_{lc,D} \left(\frac{\dot{m}_{lc,D}}{\dot{m}_{lc,OD}} \right)^{0,8} \quad (2.5)$$

$$R_{lf,OD} = R_{lf,D} \left(\frac{\dot{m}_{lf,D}}{\dot{m}_{lf,OD}} \right)^{0,8} \quad (2.6)$$

$$R_{c,OD} = R_{c,D} \quad (2.7)$$

dove $\dot{m}_{lc}$ e $\dot{m}_{lf}$ rappresentano la portata in massa del fluido caldo e del fluido freddo, rispettivamente, mentre i pedici “D” e “OD” si riferiscono alle condizioni di design e di off-design, rispettivamente. Si nota che la componente di resistenza termica per conduzione resta invariata.

La resistenza termica totale in condizioni di off-design, il coefficiente globale di scambio termico, il numero di unità di trasporto (NTU) e l’efficienza possono quindi essere calcolate come segue:

$$R_{T,OD} = R_{lc,OD} + R_{lf,OD} + R_{c,OD} \quad (2.8)$$

$$(UA)_{OD} = \frac{1}{R_{T,OD}} \quad (2.9)$$

$$NTU_{OD} = \frac{(UA)_{OD}}{(Cmin)_{OD}} \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_{OD} = \frac{1 - e^{-\left(1 - \frac{C_{min}}{C_{max}}\right) NTU}}{1 - \frac{C_{min}}{C_{max}} e^{-\left(1 - \frac{C_{min}}{C_{max}}\right) NTU}} \quad (2.11)$$

dove C_{min} e C_{max} sono le capacità termiche riferite all’unità di tempo minime e massime. Il modello è stato implementato in Dymola utilizzando il linguaggio Modelica e partendo dalla classe che definisce lo scambiatore a efficienza costante. Il modello implementato è stato validato per ogni scambiatore presente

¹ Con il pedice “D” si fa riferimento alle condizioni di design

nella sottostazione confrontando i risultati numerici delle prove stazionarie ottenuti con lo scambiatore ad efficienza costante con quelli che implementano lo scambiatore ad efficienza variabile. Il confronto fra questi due *datasets* numerici ha mostrato che essi sono in ottimo accordo fra loro, validando la corretta implementazione del nuovo modello di scambiatore.

Dalla Tabella 2.2 si nota che, per la configurazione 3, l'energia fornita dalla centrale diminuisce del 3%, mentre aumenta la potenza elettrica di pompaggio per un valore pari al 15%. Per quanto invece riguarda il comfort termico, dalla Figura 2.1 si evince che i valori di benessere termico sono molto simili per le due configurazioni studiate, tranne che per l'utenza 44, che resta in condizioni di comfort per meno tempo rispetto allo scenario di partenza.

Tabella 2.2. Analisi energetica comparativa tra scenario 1 e 3

Scenari	Energia termica fornita dalla centrale	Energia primaria in ingresso alla centrale			Energia elettrica per pompaggio		Totale
	[kWh _t]	[kWh _t]	[m ³]	[tep]	[kWh _e]	[tep]	[tep]
Scenario 1	4.753.444	5.111.230,11	533.364	445,89	181.649	31.06	476,95
Scenario 3	4.602.333	4.948.745.16	516.408	431,72	209.651	35.85	467.57

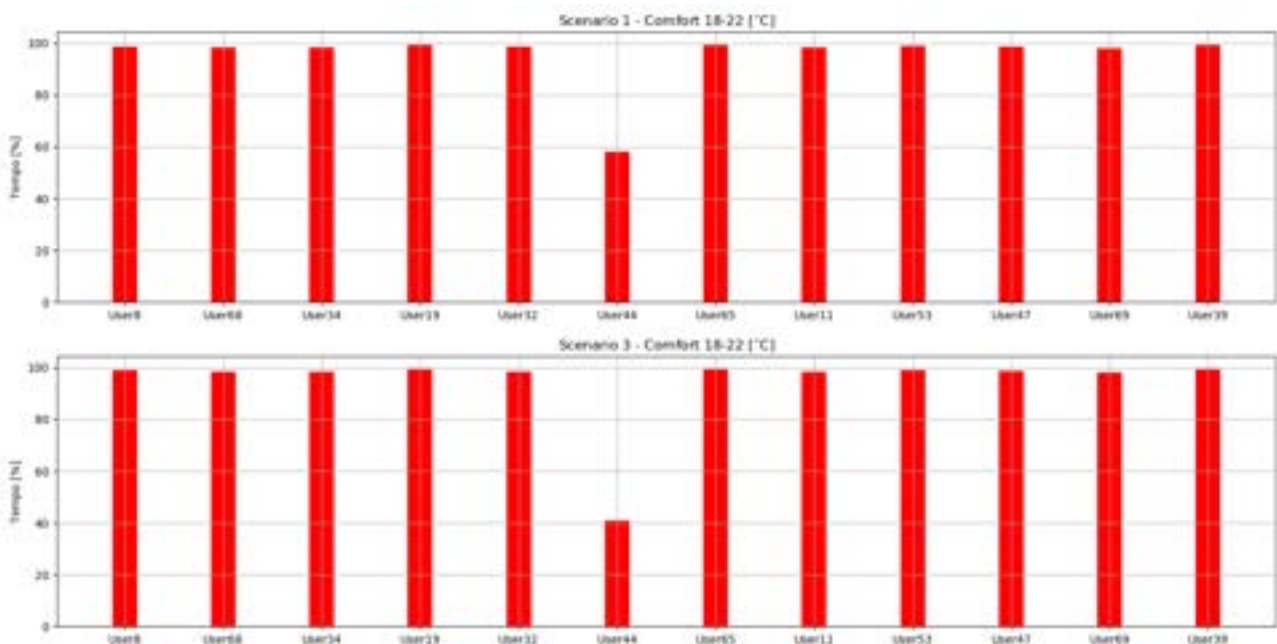


Figura 2.1. Comfort termico: confronto fra scenario 1 (eff. costante) e 3 (eff. variabile)

2.2 Interventi di riqualificazione delle utenze

Al fine di ottimizzare la potenza nominale delle pompe poste nei circuiti secondari, per utenza ogni è stata eseguita un'analisi numerica considerando la rete ad alta temperatura, con la temperatura di progetto esterna imposta costante e pari a -5 °C. In queste condizioni è stato calcolato il flusso termico necessario al fine di garantire in ogni utenza la temperatura interna di comfort di 20 °C. In Figura 2.2 si mostra il modello della singola utenza preso in esame.

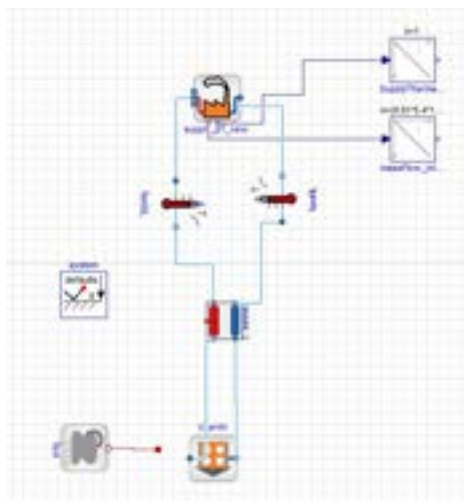


Figura 2.2. Calcolo delle potenze delle pompe al secondario – modello di esempio (utenza 44)

Dalla Tabella 2.3 si nota che, come atteso, il “fabbisogno” di potenza termica varia per tutte le utenze. In particolare, gli scostamenti maggiori (fra scenario 1 e 2) si notano per l’utenza 34, l’utenza 19 e l’utenza 32. Utilizzando le nuove potenze nominali delle pompe calcolate come descritto in precedenza si ottiene un significativo miglioramento delle condizioni di comfort, come mostrato in Figura 2.3, mentre dalla Tabella 2.4 si nota che i risultati termici ed elettrici sono molto simili.

Tabella 2.3. Potenze nominali delle pompe al secondario – scenario 1 e 2

<i>Utenza</i>	<i>Potenza nominale pompe (secondario) – Scenario 1 [kW]</i>	<i>Potenza nominale pompe (secondario) – Scenario 2 [kW]</i>
Utenza 8	250	210
Utenza 68	4515	3800
Utenza 34	4515	1900
Utenza 19	451	950
Utenza 32	535	1400
Utenza 44	25	55
Utenza 65	683	1050
Utenza 11	897	800
Utenza 53	705	710
Utenza 47	100	120
Utenza 69	193	215
Utenza 39	278	60

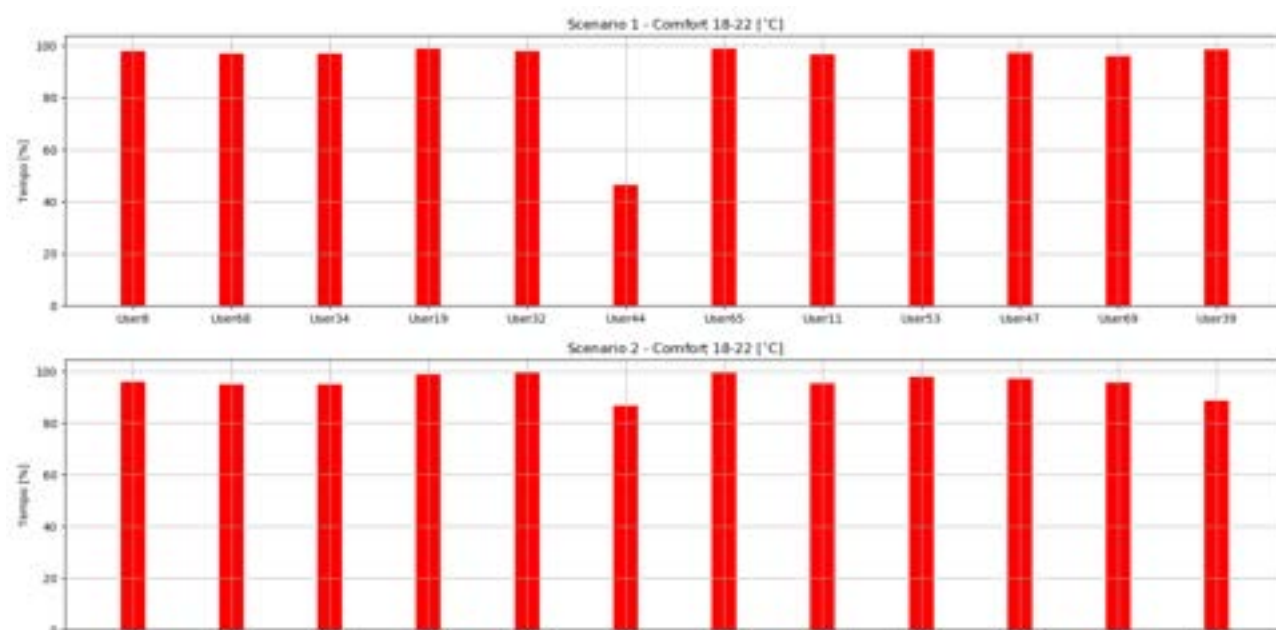


Figura 2.3. Comfort termico: confronto fra scenario 1 e 2

Tabella 2.4. Analisi energetica comparativa tra scenario 1 e 2

Scenari	Energia termica fornita dalla centrale	Energia primaria in ingresso alla centrale			Energia elettrica per pompaggio		Totale
	[kWh _t]	[kWh _t]	[m ³]	[tep]	[kWh _e]	[tep]	[tep]
Scenario 1	4.753.444	5.111.230,11	533.364	445,89	181.649	31.06	476,95
Scenario 2	4.757.333	5.115.411,03	533.800	446,26	174.011	29.75	476.01

2.3 Effetti della deep renovation e della temperatura operativa della rete

Per poter valutare gli interventi di miglioramento dell'efficienza energetica di tutte le utenze prese in esame, si interviene sui coefficienti prestazionali denominati a e b, dove il primo descrive il valore della trasmittanza termica delle pareti dell'edificio, mentre il secondo ne valuta la capacità termica.

Per questo motivo sono effettuate delle analisi per valutare i valori della trasmittanza e della capacità areica di varie stratigrafie, nelle condizioni di pre e post riqualificazione energetica. L'intervento consiste nella posa in opera di un cappotto termico da applicare principalmente alle facciate esterne degli edifici con spessore di 10 cm, avente un valore di trasmittanza termica pari a 0,026 W/m²K. Per la struttura post-intervento considerata, il valore di trasmittanza post intervento risulta essere inferiore al valore riportato nell'allegato E del Decreto 6 agosto 2020, che definisce Requisiti tecnici per l'accesso alle detrazioni fiscali per la riqualificazione energetica degli edifici - cd. Ecobonus (GU Serie Generale n.246 del 05-10-2020). In Tabella 2.5 vengono riportati i nuovi valori dei coefficienti prestazionali.

In Figura 2.4 il confronto fra lo scenario 4 e lo scenario 5 evidenzia un netto miglioramento della condizione di comfort all'interno di tutte le utenze. Entrambi gli scenari si riferiscono alla rete a bassa temperatura.

Il miglioramento delle condizioni di comfort dovuto all'intervento di riqualificazione degli edifici (scenario 5) è evidente anche in Figura 2.5 (utenza 39).

Il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici si ripercuote come atteso in termini di minor consumi in centrale, come mostrato dalla Tabella 2.6. Da questa, infatti, si nota come lo scenario 5 comporti un'energia primaria in ingresso alla centrale ridotta a circa il 60% rispetto a quella richiesta dallo scenario 4.

Tabella 2.5. Coefficienti prestazionali degli edifici alimentati dalla rete Nuova Sud di Parma

ID Utenza	Utenza servita	a [1/h]	b [°C/kJ]	c [1/h]	d [1/h]
8	Archivio Storico	0,01790	2,41e-06	0,00000	0,01810
11	Scienze degli Alimenti	0,006032	1.01e-06	0,00555	0,02780
19	Laboratorio Materiali	0,002162	5.011e-07	0.001	0,02428
32	Tecnopolo	0,001123	4,4101e-07	2,061e-06	0,04513
34	Scienze della Terra	0,005136	3,3500e-07	0,006515	0,018103
39	Centro la Grande Copisteria	0,006285	7.102e-06	0,001856	0,00000
44	Bar	0,006285	7.102e-06	0,001856	0,00000
47	Centro la Grande Chiesa/Aule	0,004454	6,5866e-06	0,003711	0,036804
53	Polifunzionale/Auditorium	0,001841	4,55e-07	0,001577	0,01393
65	Palacampus	0,000856	4,21e-07	0,003	0,025247
68	Ingegneria Scientifica	0,004973	1,8328e-07	0,00923	0,0200
69	Mensa	0,008115	4,78e-06	0,002784	0,02732

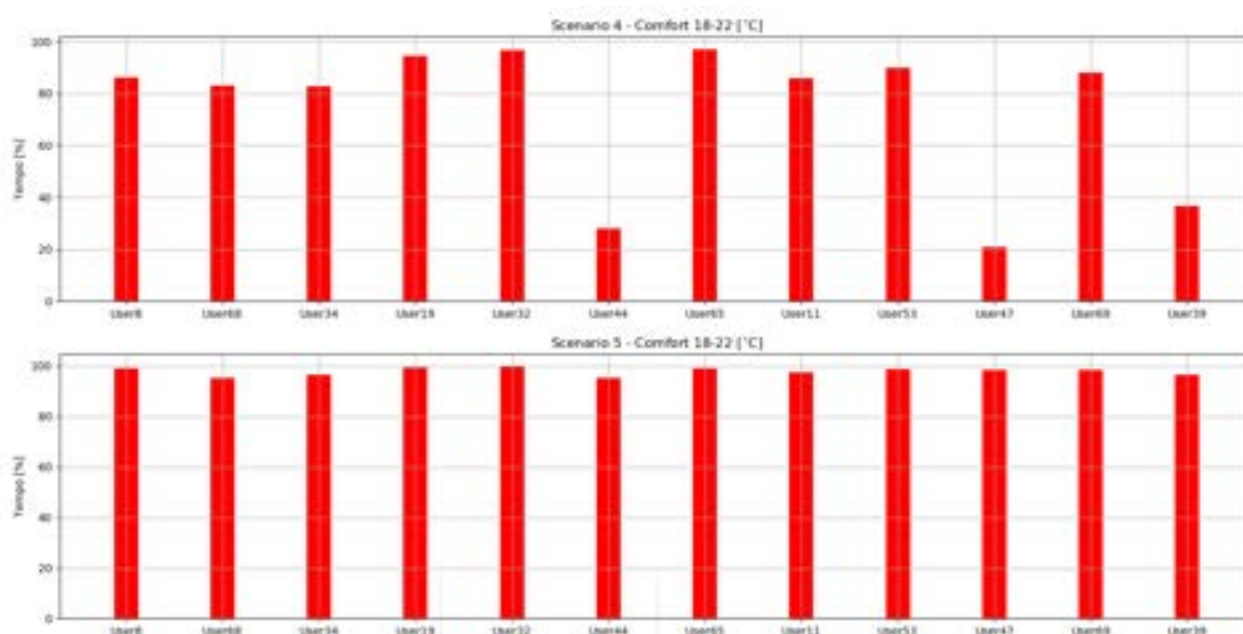


Figura 2.4. Comfort termico: confronto fra scenario 4 (rete a bassa temperatura ed edifici non riqualificati) e 5 (rete a bassa temperatura ed edifici riqualificati)

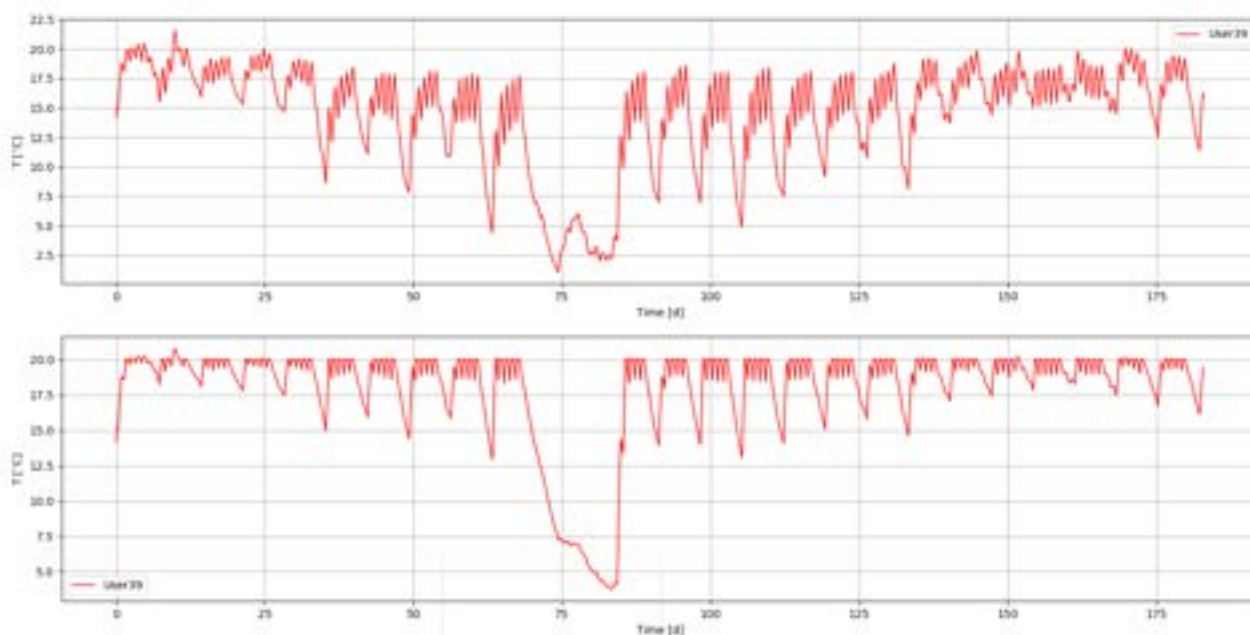


Figura 2.5. Temperatura interna per l'utenza 39: scenario 4 (in alto, rete a bassa temperatura ed edificio non riqualificato) e scenario 5 (in basso, rete a bassa temperatura ed edificio riqualificato)

Tabella 2.6. Analisi energetica comparativa tra scenario 4 e 5

Scenari	Energia termica fornita dalla centrale	Energia primaria in ingresso alla centrale			Energia elettrica per pompaggio		Totale
	[kWh _t]	[kWh _t]	[m ³]	[tep]	[kWh _e]	[tep]	[tep]
Scenario 4	4.029.647	4.332.953,76	452.150	377,99	226.325	38.70	416,69
Scenario 5	2.498.304	2.686.348,39	280.324	234,35	212.237	36.29	270.64

2.4 Sistemi di generazione locale e centralizzata per il teleriscaldamento a bassa temperatura: impatto del power-to-heat

Per quanto riguarda lo scenario 6, è stato ipotizzato un intervento di riqualificazione anche per la centrale termica. In particolare, per la climatizzazione invernale alla caldaia è stata accoppiata una pompa di calore. In Figura 2.6, viene mostrata la nuova centrale termica implementata, dove la pompa di calore, la caldaia ed i componenti ad essi collegati sono definiti all'interno dal rettangolo rosso (Figura 2.7), mentre i pannelli per la produzione di energia elettrica sono all'interno del rettangolo verde (Figura 2.8).

La potenza nominale della pompa di calore è pari ad 1 MW, ed è alimentata dall'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico, dovuta all'irraggiamento per la città di Parma. È stato modellato anche l'accumulo elettrico, ma non è stato impiegato per la simulazione dello scenario 6. In Figura 2.9 si sottolineano le caratteristiche del modello del pannello fotovoltaico.

Grazie alla climatica e all'impostazione di una temperatura di set point, la caldaia interviene quando la pompa di calore non riesce a soddisfare il fabbisogno energetico della rete.

In Figura 2.10 si riporta l'andamento della temperatura di mandata e di ritorno della rete di riscaldamento, mentre in Figura 2.11 si mostra il confronto tra la potenza prodotta dall'impianto fotovoltaico e quella assorbita dalla pompa di calore, per tutto il periodo preso in esame.

In Figura 2.12 si nota la sovrapproduzione di potenza elettrica dell'impianto fotovoltaico; quindi, è evidente la necessità/utilità di impiegare l'accumulo elettrico per migliorare la gestione della pompa di calore e della rete.

In Figura 2.13 non si notano differenze rilevanti fra l'andamento del comfort termico per lo scenario 5 e lo scenario 6.

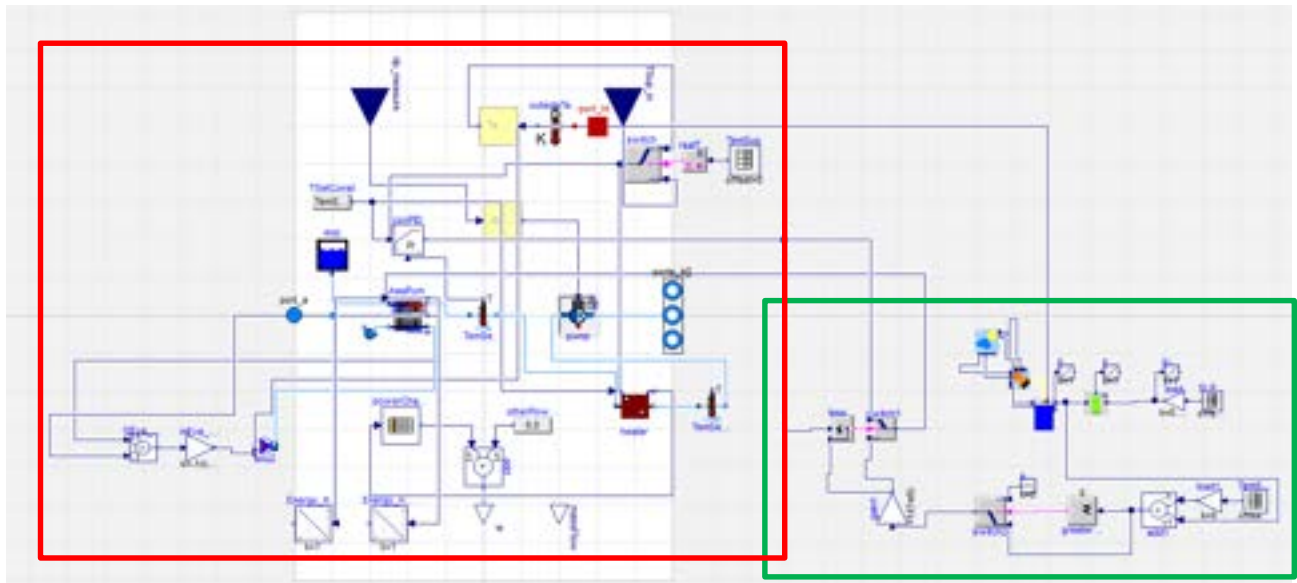


Figura 2.6. Nuovo modello di centrale termica che include pompa di calore, caldaia e generazione di energia elettrica mediante pannelli fotovoltaici

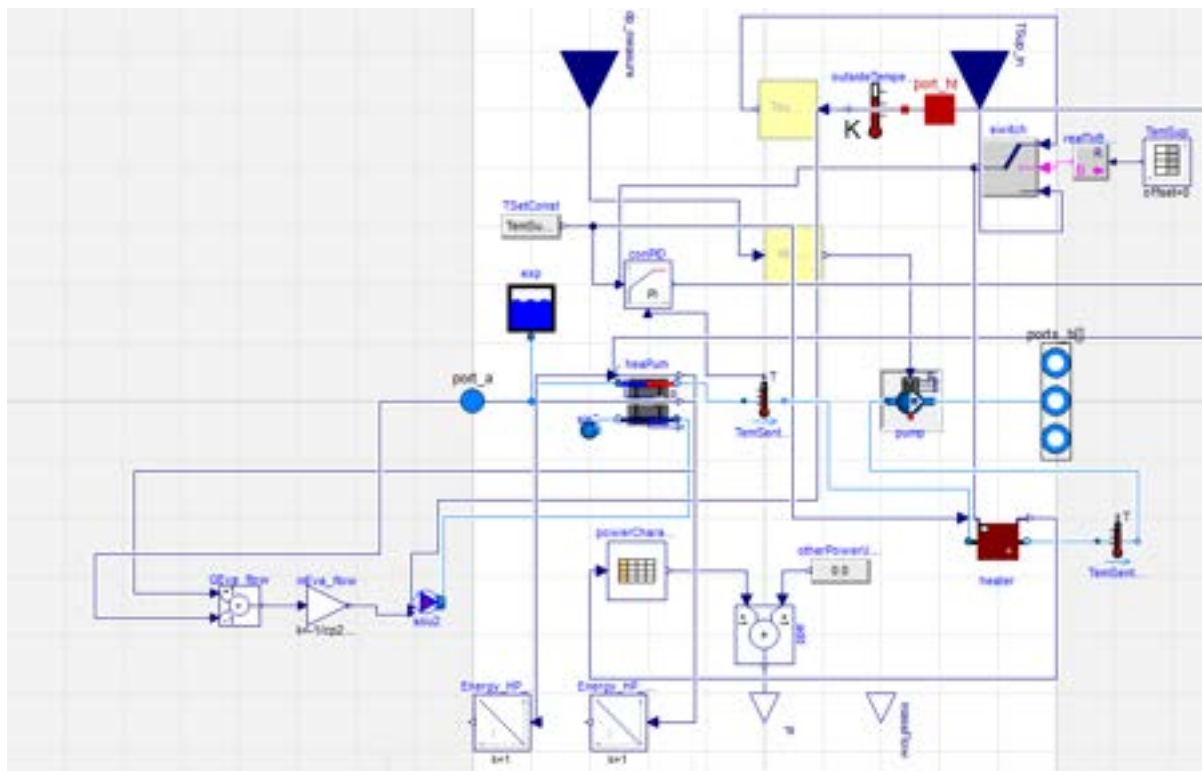


Figura 2.7. Nuovo modello di centrale termica: particolare che mostra la pompa di calore, la caldaia ed i componenti ad essi collegati (riquadro rosso in Figura 2.6)

The screenshot displays the 'PV module' configuration window in PVsyst, specifically for a 'poly_1_PV_Storage_1_1_pjField' module. The window is divided into two main sections: 'General' and 'Advanced'.

General Tab (Left Pane):

- Component:** poly_1_PV_Storage_1_1_pjField
- Model:** BuildingSystems.Technologies.Photovoltaics.PModules.PModuleSinglePP
- Path:** BuildingSystems.Technologies.Photovoltaics.PModules.PModuleSinglePP
- Comment:** HPV controlled one diode photovoltaic module model
- Parameters:**
 - number of parallel modules:** 10 (Number of parallel connected modules within one common orientation)
 - number of serial modules:** 100 (Number of serial connected modules within one common orientation)
 - Module characteristics:** modules/BuildingSystems.Technologies.Photovoltaics.Data.PT (Characteristic data of the PT module)
 - Orientation:**
 - use_angleDegPT:** true (Use input for controlling the tilt angle of the PT module)
 - angleDegPT_constant:** 1 (Tilt angle of the PT module)
 - use_angleDegST:** true (Use input for controlling the azimuth angle of the PT module)
 - angleDegST_constant:** 0 (Azimuth angle of the PT module: South=0 deg West=90 deg East=-90 deg)
 - Shading:**
 - use_GSC_jn:** true (Use input for geometric shading coefficient GSC)
 - GSC_constant:** 0.5 (Constant shading coefficient (if use_GSC_jn = true))

Advanced Tab (Right Pane):

- Component:** poly_1_PV_Storage_1_1_pjField.pModuleData
- Model:** BuildingSystems.Technologies.Photovoltaics.Data.PhotovoltaicModules.TSPCSPCES
- Path:** BuildingSystems.Technologies.Photovoltaics.Data.PhotovoltaicModules.TSPCSPCES
- Comment:**
- Parameters:**
 - k1:** 0.00001 (1st coefficient (Phi))
 - k2:** 0.00000000000000000000 (2nd coefficient (Phi))
 - k4:** 0.00000000000000000000 (3rd coefficient (Phi))
 - k5:** 0.00000000000000000000 (2nd coefficient (Phi))
 - g1:** 0.00000000000000000000 (Gap)
 - height:** 0.0000 (PT module height)
 - ISc:** 0.0000 (Short circuit current under standard conditions)
 - IScRef:** 0.0000 (Number of serial connected cells within the PT module)
 - IScRef:** 0.0000 (Number of parallel connected cells within the PT module)
 - PEL_nominal:** 0.0000 (Module power under standard conditions)
 - Rser:** 0.00000000000000000000 (Serial resistance)
 - Rpar:** 0.00000000000000000000 (Parallel resistance)
 - TS0:** 0.0000 (Temperature coefficient for the short circuit current in mW/C)
 - TS1:** 0.0000 (Temperature coefficient for the open circuit voltage in V/C)
 - U0:** 0.0000 (Open circuit voltage under standard conditions)
 - width:** 0.0000 (Module width)

19

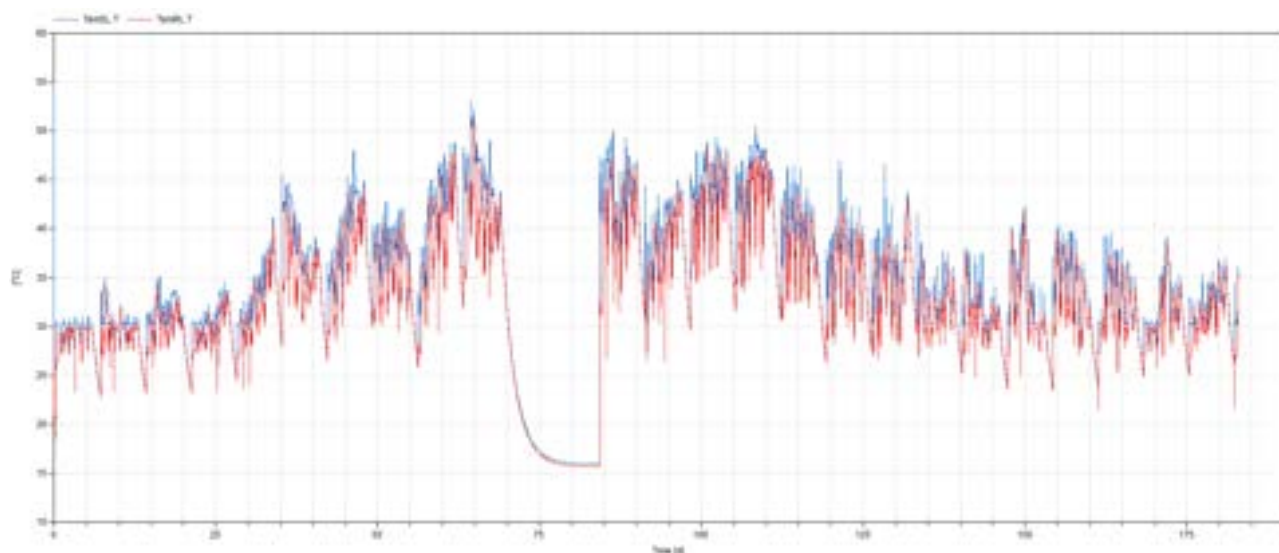


Figura 2.10. Scenario 6 – Andamento delle temperature di mandata e di ritorno alla centrale termica

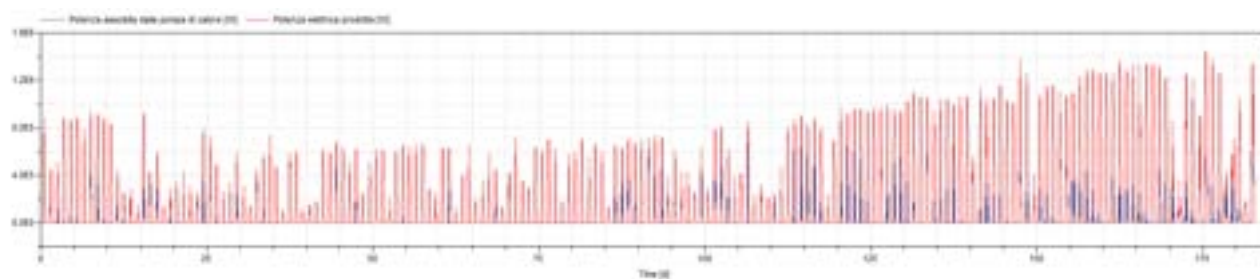


Figura 2.11. Scenario 6 – Potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore e potenza elettrica prodotta dai pannelli fotovoltaici

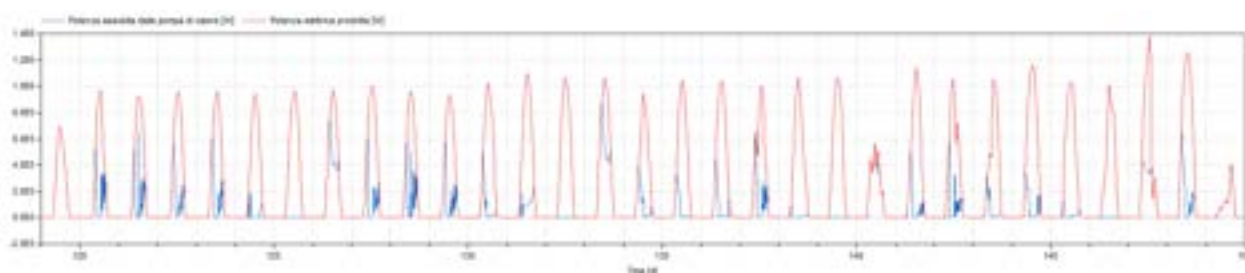


Figura 2.12. Scenario 6 – Potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore e potenza elettrica prodotta dai pannelli fotovoltaici (dettaglio giorni 120 – 150)



Figura 2.13. Comfort termico: confronto fra scenario 5 (rete a bassa temperatura ed edifici riqualificati) e 6 (rete stesso setup dello scenario 5 ma con diversa centrale termica)

Confrontando i risultati in Tabella 2.6 e in Tabella 2.7, i valori di energia termica prodotta dalle due configurazioni è praticamente la stessa.

Tabella 2.7. Analisi energetica scenario 6

Scenari	Energia termica fornita dalla centrale - heater	Energia termica fornita dalla centrale - HP	Energia elettrica assorbita - HP	Energia elettrica per pompaggio	Energia elettrica prodotta
	[kWh _t]	[kWh _t]	[kWh _e]	[kWh _e]	[kWh _e]
Scenario 6	1.845.881	645.964	236.119	212.713	752.733

2.5 Analisi energetica degli scenari analizzati

In Tabella 2.8 si mostrano i risultati termici ed elettrici per tutte e sei le configurazioni studiate. Le configurazioni più performanti dal punto di vista energetico sono la 5 e la 6. Lo scenario 6 può essere migliorato con l'utilizzo dell'accumulo elettrico.

Non essendo noti i fattori di energia primaria per l'energia termica consegnata, si è scelto di procedere con la conversione delle quantità di gas naturale che alimenta la centrale e dell'energia elettrica prelevata dalla rete per il pompaggio in tonnellate equivalenti di petrolio (tep), sulla base dei coefficienti di conversione adottati da FIRE (Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia) in base a quanto previsto al punto 13 della nota esplicativa della circolare MiSE del 18 dicembre 2014 (Tabella 2.9). È stato inoltre necessario eseguire un aggiornamento del fattore di conversione con il rendimento elettrico equivalente 2019, i.e. 0,504 (fonte: ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Indicatori di efficienza e decarbonizzazione del sistema energetico nazionale e del settore elettrico, Rapporti 343/2021, ISBN 978-88-448-1049-8).

Tabella 2.8. Quantità di energia primaria nei diversi scenari, espressa in tep

<i>Scenari</i>	<i>Energia termica fornita dalla centrale</i>	<i>Energia primaria in ingresso alla centrale</i>			<i>Energia elettrica per pompaggio</i>		<i>Totale</i>
	<i>[kWh_t]</i>	<i>[kWh_t]</i>	<i>[m³]</i>	<i>[tep]</i>	<i>[kWh_e]</i>	<i>[tep]</i>	<i>[tep]</i>
Scenario 1	4.753.444	5.111.230,11	533.364	445,89	181.649	31.06	476,95
Scenario 2	4.757.333	5.115.411,03	533.800	446,26	174.011	29.75	476.01
Scenario 3	4.602.333	4.948.745.16	516.408	431,72	209.651	35.85	467.57
Scenario 4	4.029.647	4.332.953,76	452.150	377,99	226.325	38.70	416,69
Scenario 5	2.498.304	2.686.348,39	280.324	234,35	212.237	36.29	270.64
Scenario 6 caldaia	1.845.881	1.984.818,28	207.118	173.15	212.713	36.37	209.52
Scenario 6 HP	645.964	-	-	110,50			110.50

Tabella 2.9. Fattori di conversione in tep utilizzati per il calcolo dei consumi energetici

Vettore energetico	Unità	Fattore di conversione in tep
Gas Naturale	1000 Sm ³	0,836
Energia elettrica dalla rete	MWh	0,171

3 Sottostazione di scambio termico bidirezionale per teleriscaldamento attivo

3.1 Modello dinamico di una sottostazione attiva e validazione

In questa sezione viene descritto un primo modello della sottostazione di scambio termico bidirezionale realizzato in ambiente Dymola, comprensivo di tutti i sistemi di controllo necessari per il corretto funzionamento. Sono stati scelti i componenti che meglio rappresentassero le dinamiche in gioco in modo da riprodurre il comportamento della sottostazione seguendo le logiche di funzionamento stabilite e descritte nel report RdS/PTR2020/144. I risultati numerici di simulazioni stazionarie e dinamiche sono stati confrontati con quelli delle prove sperimentali condotte da EURAC Research presso il proprio laboratorio Energy Exchange con sede a Bolzano per la validazione del modello.

3.1.1 Modello della sottostazione sviluppato in ambiente Dymola

Il modello della sottostazione sviluppato con il software Dymola è rappresentato in Figura 3.1. In analogia con il layout della sottostazione di Figura 3.2 è stato rappresentato con i colori rosso (mandata) e blu (ritorno) il circuito della rete di teleriscaldamento, in verde il circuito dell'utenza e in nero il sistema di generazione distribuita.

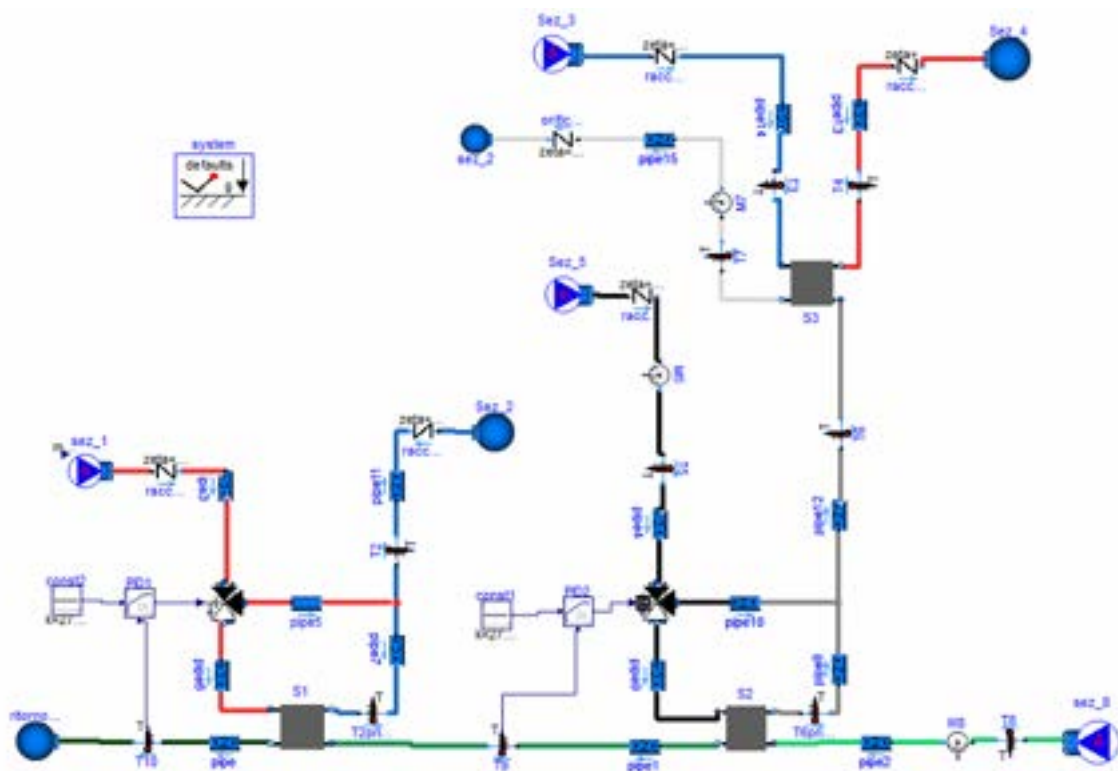


Figura 3.1. Modello dinamico della sottostazione di scambio termico, privo delle logiche di controllo

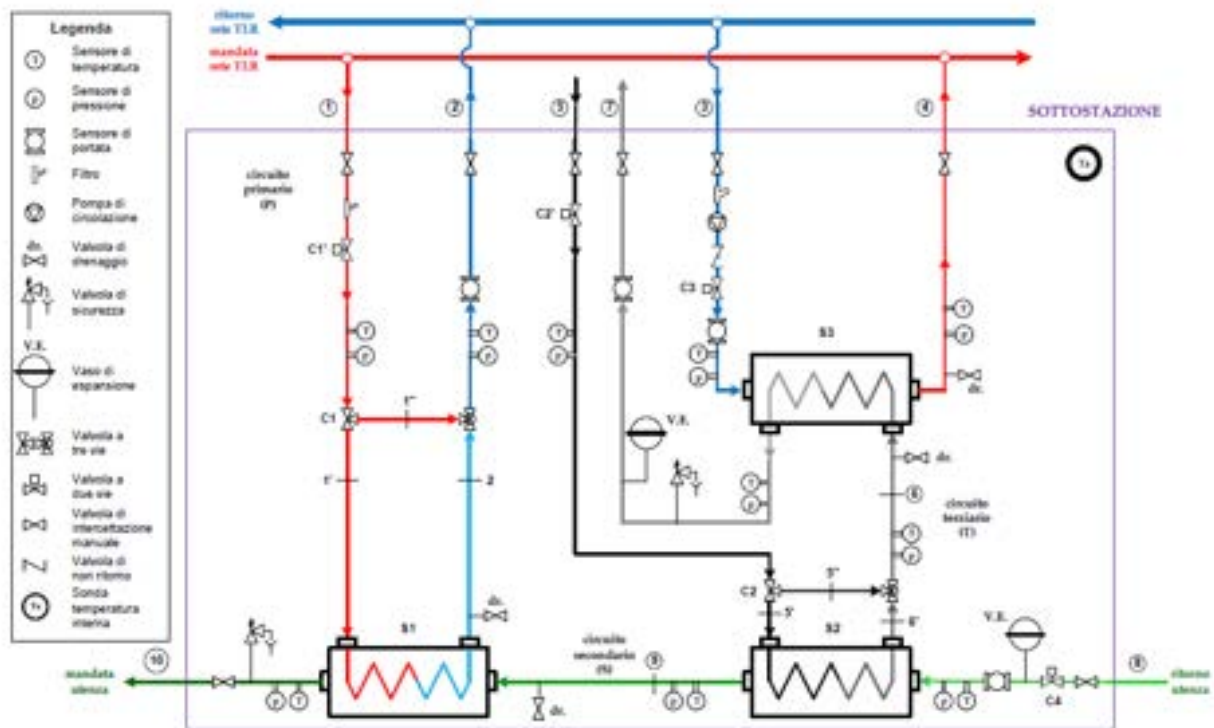


Figura 3.2. Schema sottostazione

Gli unici sistemi di controllo riportati nello schema di Figura 3.1 sono il controllore PID1 che agisce sulla valvola a tre vie C1 in ingresso (lato rete di teleriscaldamento) allo scambiatore S1 e il controllore PID2 che agisce sulla valvola a tre vie C2 in ingresso (lato sistema di generazione) allo scambiatore S2. Anche nel modello numerico, come sul prototipo fisico, sia il controllore PID1 che PID2 sono controllori PI; la differenza è sulla scelta dei valori della costante di guadagno e della costante di tempo del blocco integratore e sul ciclo di isteresi. Infatti, il componente che rappresenta il controllore PI (“Modelica.LimPID”) non ha alcuno ciclo di isteresi implementato nel proprio codice. Dalle analisi fatte sul modello tale condizione non ha portato a problemi numerici, ma è comunque consigliato applicare uno schema di isteresi se dovessero verificarsi situazioni in cui la simulazione oscilla attorno al valore di taratura ed emetta così dei *warning* o possa addirittura rallentare fino a dare errore.

Confrontando il layout del prototipo della sottostazione rappresentato in Figura 3.2 con la Figura 3.1 si può notare che è stata trascurata la presenza dei due vasi di espansione, dei filtri, delle valvole di sicurezza e di drenaggio, in quanto questi elementi non influiscono significativamente sulla termofluidodinamica che si vuole indagare. Per semplicità non è stata inserita neanche la pompa di circolazione, il cui ruolo di regolazione della portata è stato affidato a un controllore PI. Nelle analisi descritte in questa sezione, vengono trascurate le considerazioni sulle pressioni, ma nell’ottica di accoppiare il modello della sottostazione ad una rete di distribuzione è indispensabile conoscere i livelli di pressione sulla mandata e sul ritorno e di conseguenza inserire una pompa di circolazione adeguatamente dimensionata.

3.1.2 Simulazioni stazionarie

Ciascuna delle prove in regime stazionario che verrà descritta in questa sezione è stata svolta in 1 ora di funzionamento stabilizzato nelle condizioni previste. In particolare, per condizioni stazionarie si intende:

- oscillazioni di temperatura rispetto al riferimento di ± 1 °C;
- oscillazioni di portata rispetto al valore di riferimento di ± 3 %.

Nell’ambito delle simulazioni stazionarie, i dati sperimentali sono da considerarsi come valore medio di tutta la prova. L’obiettivo di queste prove è quello di valutare le prestazioni della sottostazione per quanto riguarda lo scambio di energia nei diversi scambiatori, le logiche di controllo implementate e la bontà di tali controlli in condizioni stazionarie. Tutte le simulazioni svolte per validare il modello prendono come riferimento i dati sperimentali, indicati nelle successive tabelle all’interno della colonna con intestazione “ENEA”.

Ogni scenario preso in considerazione è stato simulato due volte, mantenendo costanti le condizioni al contorno ma variando il componente che modella la dinamica dello scambiatore di calore. In prima analisi viene utilizzato lo scambiatore a efficienza costante, impostata mediante una taratura manuale iterativa in modo da ottenere i valori sperimentali attesi. In seguito è stato inserito lo scambiatore ad efficienza variabile. Tale componente calcola automaticamente l'efficienza dello scambio termico nelle attuali condizioni di lavoro sulla base delle condizioni di design. La scelta di eseguire due simulazioni con due diverse implementazioni degli scambiatori di calore ha come obiettivo quello di testare l'affidabilità dello scambiatore ad efficienza variabile all'interno del modello della sottostazione in vista di simulazioni dinamiche in cui sarà fondamentale il suo utilizzo.

Per lo scambiatore S1 le grandezze di design che è necessario fornire (nell'implementazione dello scambiatore ad efficienza variabile il pedice 1 indica il fluido caldo mentre il pedice 2 indica il fluido freddo) sono:

- $\dot{M}_1 = 0,501 \text{ kg/s}$
- $\dot{M}_2 = 0,500 \text{ kg/s}$
- $T_{IN_1} = 80,41 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{OUT_1} = 50,47 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{IN_2} = 40,32 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{OUT_2} = 60,01^\circ\text{C}$
- $\dot{Q} = 41,22 \text{ kW}$

Per lo scambiatore S2 le grandezze di design che è necessario fornire sono:

- $\dot{M}_1 = 0,780 \text{ kg/s}$
- $\dot{M}_2 = 0,500 \text{ kg/s}$
- $T_{IN_1} = 90,44 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{OUT_1} = 77,47 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{IN_2} = 40,59 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{OUT_2} = 59,98^\circ\text{C}$
- $\dot{Q} = 41,74 \text{ kW}$

Per lo scambiatore S3 le grandezze di design che è necessario fornire sono:

- $\dot{M}_1 = 0,780 \text{ kg/s}$
- $\dot{M}_2 = 0,600 \text{ kg/s}$
- $T_{IN_1} = 90,06 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{OUT_1} = 67,33 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{IN_2} = 50,74 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{OUT_2} = 80,04^\circ\text{C}$
- $\dot{Q} = 72,90 \text{ kW}$

3.1.2.1 Scenario 1

Lo scenario 1 rappresenta la condizione di funzionamento della sottostazione per la quale la richiesta dell'utenza viene soddisfatta solo dalla rete di teleriscaldamento; pertanto lavora solo lo scambiatore S1 e la rete ha assetto passivo in quanto lo scambio di potenza termica è unidirezionale, ovvero dalla rete verso l'utenza. Lo scenario 1 contiene tre differenti prove che si differenziano per il livello di potenza richiesta dall'utenza:

- Scenario 1.1: richiesta in condizioni di design
- Scenario 1.2: richiesta minima
- Scenario 1.3: richiesta massima

Per tutte le prove dello scenario 1 si ipotizza che il sistema di generazione distribuita non contribuisca al soddisfacimento della richiesta termica dell'utenza, quindi gli scambiatori S2 ed S3 sono inattivi. Per come sono state implementate le logiche di controllo nel modello della sottostazione, una situazione di questo tipo potrebbe verificarsi se la temperatura di mandata del sistema di generazione fosse inferiore alla temperatura di ritorno dall'utenza (T_8) incrementata di $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (salto minimo di temperatura stabilito per lo scambio termico), infatti in queste condizioni non viene inviata portata allo scambiatore S2. Per le considerazioni

appena fatte si è scelto di svolgere le simulazioni dello scenario 1 con un modello semplificato (Figura 3.3), che implementa solamente lo scambiatore S1.

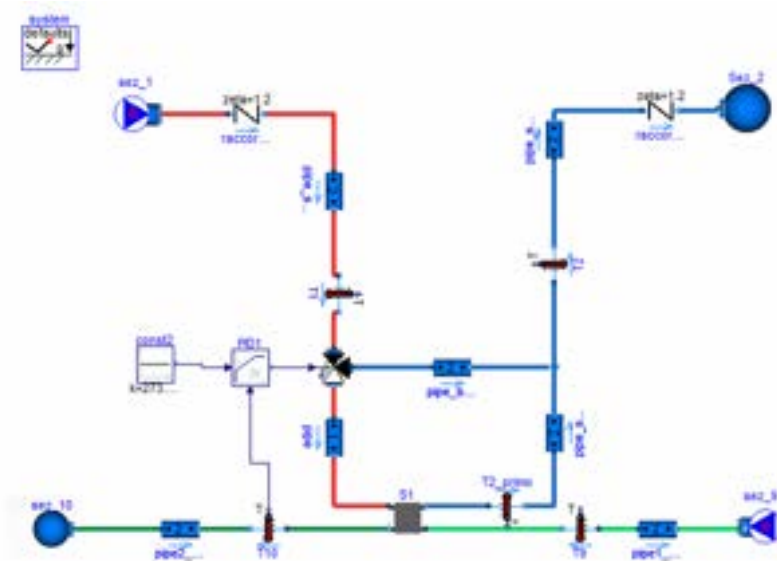


Figura 3.3. Layout del modello semplificato utilizzato per la simulazione dello scenario 1

L'unico sistema di controllo presente è il controllore PI che regola la portata in ingresso allo scambiatore mediante una valvola a tre vie in modo da portare la temperatura di mandata all'utenza ad un valore stabilito. Il componente che è stato scelto è il "LimPid" proveniente dalla libreria Modelica, mentre i parametri principali del controllore (denominato PID 1) sono:

- Costante di guadagno (K): 1,3
- Costante di tempo del blocco integratore (Ti): 10 s

Tali valori sono stati scelti in modo da ottenere una risposta a regime costante e non oscillatoria. Nello scenario 1 le grandezze di set-up sono:

- La temperatura di mandata del circuito principale della rete di teleriscaldamento (T1)
- La portata del circuito principale della rete di teleriscaldamento ($M2=M1$)
- La temperatura del fluido in ingresso allo scambiatore S1 (T9)
- La portata in ingresso allo scambiatore S1 proveniente dal ramo che rappresenta l'utenza (M9).

Nel modello tali grandezze rappresentano le condizioni al contorno. La grandezza controllata dal sistema di controllo, in questo caso il controllore PI, è la temperatura di mandata dell'utenza. Ad occuparsi di tale regolazione è la valvola a tre vie C1 che in base alla lettura sul sensore T10 regola la portata che entra nello scambiatore affinché la temperatura di mandata raggiunga 60 °C (set-point). Le grandezze non direttamente controllate, ma che derivano dall'apertura della valvola C1 e dallo scambio termico sono:

- la portata $M2'$ in ingresso ad S1;
- la temperatura $T2'$ in uscita da S1, lato primario;
- la temperatura T2 di ritorno al circuito primario che sarà necessariamente maggiore di $T2'$ poiché deriva dal mescolamento con la portata di bypass che è a temperatura superiore;
- la potenza termica scambiata in S1.

Prima di entrare nel dettaglio dei sotto casi dello scenario 1, si riportano in Tabella 3.1 le misure sperimentali disponibili per gli scenari 1.1, 1.2 ed 1.3. Tali valori saranno utilizzati per validare il modello numerico implementato.

Tabella 3.1. Condizioni di lavoro dei sotto casi dello scenario 1

	Scenario 1.1	Scenario 1.2	Scenario 1.3
M2 [kg/s]	0.501*	0.501	0.501
M9 [kg/s]	0.500*	0.500	0.500
T1 [°C]	80.41	80.19	80.48
T2' [°C]	50.47	53.06	49.38
T2 [°C]	58.70	67.83	50.54
T9 [°C]	40.32	50.07	30.48
T10 [°C]	60.01	60.00	59.90
S1 [kW]	41.22	20.80	62.69

Scenario 1.1

Nello scenario 1.1 l'utenza si trova a lavorare in condizioni di design, quindi la temperatura di ritorno del fluido termovettore dall'utenza è pari a 40,32 °C. Il confronto fra i risultati numerici ed il dato sperimentale è riportato in Tabella 3.2, sia per il caso in cui lo scambiatore è stato modellato con efficienza fissa, sia per il caso con efficienza variabile.

I valori su sfondo bianco sono quelli utilizzati nelle simulazioni numeriche come condizioni al contorno, mentre i valori evidenziati in azzurro sono i risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche. Confrontando i valori numerici con i dati sperimentali, l'unica differenza degna di nota si osserva quando si analizza la temperatura T2, che è misurata a valle del mescolamento tra la corrente 2' a temperatura 50,47 °C e la corrente 1 a temperatura 80,41 °C. La causa di tale scostamento è da ricercarsi nel posizionamento del sensore, che si trova troppo vicino al punto di miscelazione tra il ricircolo di T1 e T2'. In tale posizione ancora non si ha un completo mescolamento tra T1 e T2' e quindi la temperatura T2 non è la temperatura del fluido completamente miscelato. Infatti, se si confronta il valore di T2 ottenuto numericamente con quello di design non si nota uno scostamento di circa 2 °C, ma solo una differenza di 0,77 °C, dato che rientra nelle oscillazioni di temperatura rispetto alla tolleranza di +/- 1°C considerata accettabile per le condizioni stazionarie.

Un'importante considerazione riguarda l'efficienza dello scambiatore. L'utilizzo dello scambiatore ad efficienza costante ha permesso una taratura tale da ottenere i valori di temperatura e portata misurati sperimentalmente. Per quanto riguarda lo scambiatore S1 il valore ottenuto è $\epsilon = 0,748$. Tale risultato è stato confermato dalla simulazione con lo scambiatore ad efficienza variabile. Infatti, tale simulazione restituisce una efficienza calcolata pari a $\epsilon = 0,747$, valore molto vicino a quello tarato in modo iterativo con lo scambiatore ad efficienza costante.

Tabella 3.2. Simulazioni stazionarie, Scenario 1.1: utenza in condizioni di design

SCENARIO 1.1		Design	ENEA	Dymola $\epsilon_{\text{Costante}}$ $\epsilon_{\text{ps}}=0.748$	Dymola $\epsilon_{\text{Variabile}}$ $\epsilon_{\text{ps}}=0.747$
[kg/s]	M2	0.50*	0.501	0.501	0.500
	M2'	0.33*		0.330	0.330
	M9	0.50*	0.500	0.500	0.496
[°C]	T1	80	80.41	80.41	80.41
	T2'	50	50.47	50.42	50.47
	T2	60	58.70	60.73	60.77
	T9	40	40.32	40.32	40.32
	T10	60	60.01	60.00	60.00
[kW]	S1	41.87	41.22	41.17	41.17

Scenario 1.2

Nello scenario 1.2 l'utenza si trova a lavorare in condizioni di richiesta minima. In questo scenario, la temperatura di ritorno dall'utenza è pari a 50,07 °C. I risultati delle simulazioni numeriche sono confrontati

con il dato sperimentale in Tabella 3.3, in cui è indicato anche il confronto fra il modello di scambiatore a efficienza costante e quello a efficienza variabile.

Tabella 3.3. Simulazioni stazionarie, Scenario 1.2: utenza in condizioni di richiesta minima

SCENARIO 1.2		Richiesta MIN	ENEA	Dymola ϵ _Costante $\epsilon_{ps}=0.890$	Dymola ϵ _Variabile $\epsilon_{ps}=0.892$
[kg/s]	M2	0.50*	0.501	0.501	0.501
	M2'	0.33*		0.185	0.185
	M9	0.50*	0.500	0.500	0.500
[°C]	T1	80	80.19	80.19	80.19
	T2'	50	53.06	53.38	53.32
	T2	70	67.83	70.25	70.28
	T9	50	50.07	50.07	50.07
	T10	60	60.00	60.00	60.00
[kW]	S1	20.94	20.80	20.77	20.77

Anche in questo caso si nota una discrepanza solo per quanto riguarda la temperatura T2 successiva al mescolamento tra la corrente 2' a temperatura 53,06 °C e la corrente 1 a temperatura 80,19 °C.

Per quanto riguarda l'efficienza dello scambiatore, anche in questo caso il modello a efficienza variabile restituisce un valore di efficienza sostanzialmente identico al valore tarato con lo scambiatore ad efficienza fissa. Quindi anche per questo scenario è possibile affermare che lo scambiatore a efficienza variabile implementato sta funzionando come atteso.

Scenario 1.3

Nello scenario 1.3 l'utenza si trova a lavorare in condizioni di richiesta massima. La temperatura di ritorno del fluido termovettore dall'utenza è pari a 30,48 °C. I risultati delle simulazioni numeriche sono confrontati con il dato sperimentale in Tabella 3.4, dove è anche riportato il confronto fra il modello di scambiatore a efficienza costante e quello a efficienza variabile.

Diversamente dai due scenari precedenti, in questo caso non si nota alcuna discrepanza nella temperatura T2 in quanto la valvola C1 è completamente aperta, perché essendo l'utenza in condizioni di richiesta massima, è necessario che lo scambiatore S1 riceva la massima portata possibile. La corrente in uscita non si mescola con nessun'altra corrente proveniente dal by-pass e quindi T2'=T2.

Per quanto riguarda l'efficienza, lo scambiatore a efficienza costante è stato tarato e si ottengono risultati in linea con i valori sperimentali per $\epsilon = 0,620$, mentre con lo scambiatore ad efficienza variabile il modello calcola automaticamente $\epsilon = 0,624$. Anche in questo caso, lo scambiatore ad efficienza variabile implementato si comporta come atteso.

Tabella 3.4. Simulazioni stazionarie, Scenario 1.3: utenza in condizioni di richiesta massima

SCENARIO 1.3		Richiesta MAX	ENEA	Dymola ϵ _Costante $\epsilon_{ps}=0.620$	Dymola ϵ _Variabile $\epsilon_{ps}=0.624$
[kg/s]	M2	0.50*	0.500	0.501	0.501
	M2'	0.33*			0.624
	M9	0.50*	0.500	0.500	0.500
°C	T1	80	80.48	80.48	80.48
	T2'	50	49.38	49.48	49.28
	T2	50	50.54	50.96	51.02
	T9	30	30.48	30.48	30.48
	T10	60	59.90	60.00	60.00
[kW]	S1	62.81	62.69	61.76	61.76

3.1.2.2 Scenario 2

Lo scenario 2 mira a caratterizzare il funzionamento del solo scambiatore S2 della sottostazione. Dalla Figura 3.4 si può osservare che S2 permette lo scambio di energia termica dal circuito del sistema di generazione al circuito dell'utenza. Analogamente a quanto mostrato per lo scenario 1, anche in questo caso il modello sviluppato è stato semplificato e contiene il solo scambiatore S2 che, per quelle che sono le condizioni di lavoro, è l'unico ad essere attivo (sono inattivi S1 ed S3).

Per questo scenario la richiesta termica è quindi soddisfatta esclusivamente dal sistema di generazione. La sottostazione si trova in una situazione di questo tipo al verificarsi contemporaneamente delle seguenti condizioni:

- la temperatura di mandata del sistema di generazione (T5) è superiore alla temperatura di ritorno dall'utenza (T8) incrementata di 10 °C (differenza di temperatura minima per lo scambio termico su S2);
- la temperatura in uscita dallo scambiatore S2 lato caldo è inferiore a 82°C, valore minimo di temperatura consentito per attivare lo scambio termico in S3 con la corrente fredda eventualmente prelevata dal ritorno della rete di teleriscaldamento.

Pertanto, il livello energetico del sistema di generazione è alto al punto da soddisfare la richiesta dell'utenza, ma non abbastanza da generare un surplus di potenza termica da poter cedere alla rete di teleriscaldamento. La richiesta termica dell'utenza considerata per questa prova è quella in condizioni di design. In questo scenario nella simulazione vengono fissate le seguenti quantità:

- la portata di mandata del sistema di generazione, in ingresso lato caldo allo scambiatore S2 (M5=M7);
- la portata di ritorno dall'utenza, in ingresso lato freddo allo scambiatore S2 (M8);
- la temperatura di ritorno dall'utenza, in ingresso lato freddo allo scambiatore S2 (T8);
- La temperatura di mandata del sistema di generazione, in ingresso lato caldo allo scambiatore S2 (T5).

Nel modello tali grandezze sono state fissate mediante le condizioni al contorno. La grandezza controllata dal controllore denominato PID 2 è la temperatura di mandata dell'utenza T9. Ad occuparsi di tale regolazione è la valvola a tre vie C2 che, in base alla lettura sul sensore T9, regola la portata che entra nello scambiatore affinché la temperatura di mandata raggiunga 60 °C (set-point). Le grandezze non direttamente controllate ma che derivano dall'apertura della valvola C1 e dallo scambio termico sono:

- la temperatura di uscita dallo scambiatore S2 lato sistema di generazione (T6');
- la temperatura di ritorno al circuito di generazione (T6) che potrebbero differire da T6' per effetto della valvola miscelatrice C2;
- la portata in ingresso ad S1 lato caldo (M2').

I risultati delle simulazioni numeriche sono confrontati con il dato sperimentale in Tabella 3.5, dove è inoltre presente il confronto fra il modello di scambiatore a efficienza costante e quello a efficienza variabile.

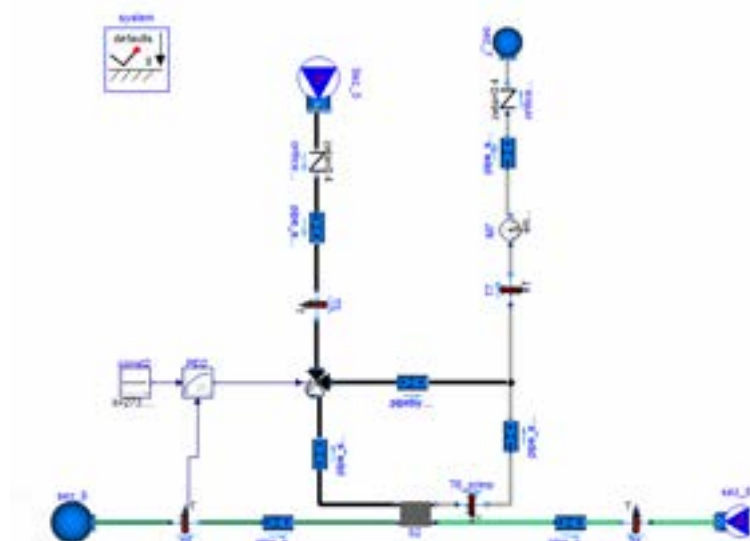


Figura 3.4. Modello semplificato per la simulazione dello scenario 2

Tabella 3.5. Simulazioni stazionarie, Scenario 2

SCENARIO 2		Design	ENEA	Dymola ε _Costante $\varepsilon=0.386$	Dymola ε _Variabile $\varepsilon=0.384$
[kg/s]	M8	0.50	0.50	0.50	0.50
	M7 = M5	1.25	0.78	0.78	0.78
[°C]	T5	90	90.44	90.44	90.44
	T6	82	77.89	78.10	78.15
	T6'	82	77.47	78.10	78.15
	M5'			0.780	0.780
	T8	40	40.59	40.59	40.59
	T9	60	59.98	59.83	59.75
[kW]	S2	41.87	41.74	40.25	40.09

È importante notare che la portata considerata in condizioni di design ($4,5 \text{ m}^3/\text{h} = 1,25 \text{ kg/s}$) è stata poi modificata in $2,8 \text{ m}^3/\text{h}$ ($0,78 \text{ kg/s}$), poiché durante le prove sperimentali si è osservato un sovradimensionamento di S3. Per questo motivo, dal confronto tra le condizioni di funzionamento previste con quelle effettivamente ottenute durante le prove, emergono discrepanze per le temperature T6' e T6, che risultano più basse di circa $4,5 \text{ °C}$ rispetto al valore di design; la differenza è dovuta ad un valore di portata M5 più basso rispetto a quello di design. Questa condizione non si verifica nel confronto tra i dati sperimentali ed i risultati ottenuti con il software Dymola, poiché in questo caso si sono utilizzate le stesse condizioni al contorno su portate e temperature. Si noti inoltre che le temperature T6 e T6' coincidono in quanto, per poter raggiungere la temperatura di mandata di set-point dell'utenza (60 °C) è necessario fornire allo scambiatore tutta la portata a disposizione. Quindi non si avrà portata nel ramo di bypass e non si avrà mescolamento in uscita dallo scambiatore e di conseguenza $T6 = T6'$.

Per quanto riguarda l'efficienza dello scambiatore, quello ad efficienza costante restituisce risultati in linea con i valori sperimentali se lavora con efficienza pari a $\varepsilon = 0,386$, mentre con lo scambiatore ad efficienza variabile si è ottenuto $\varepsilon = 0,384$. Anche in questo caso, lo scambiatore ad efficienza variabile restituisce valori in linea con le aspettative.

3.1.2.3 Scenario 3

Lo scenario 3 rappresenta la condizione di funzionamento per la quale il sistema di generazione distribuita alimenta l'utenza mediante lo scambiatore S2 e cede il surplus di potenza termica generata alla rete tramite lo scambiatore S3. Diversamente dallo scenario 1, in questa condizione la rete è attiva e non è necessaria l'attivazione dello scambiatore S1. L'utenza si trova a lavorare in condizioni di richiesta minima e gli scambiatori attivi sono S2 ed S3. Come per le prove precedenti, le simulazioni sono state svolte su un modello semplificato nel quale sono presenti solo lo scambiatore S2 ed S3; il layout è illustrato in Figura 3.5.

Lo scenario 3 si verifica quando sono soddisfatte contemporaneamente le seguenti condizioni:

- la temperatura di mandata del sistema di generazione (T5) è superiore alla temperatura di mandata dell'utenza (T8) incrementata di 10 °C (differenza di temperatura minima per attivare lo scambio termico su S2);
- la temperatura in uscita dallo scambiatore S2 lato caldo è pari o superiore a 82 °C , che è il valore minimo di temperatura consentito per lo scambio termico in S3 con la corrente fredda prelevata dal ritorno della rete di teleriscaldamento.

In questo scenario nella simulazione vengono fissate le seguenti quantità:

- la portata di ritorno dall'utenza (M8);
- la temperatura di ritorno dall'utenza (T8);
- la portata di ritorno del sistema di generazione distribuita in uscita da S3 (M7);
- la temperatura sul ramo di ritorno dal circuito principale (T3);
- la portata prelevata dal ritorno della rete di teleriscaldamento (M3);
- la temperatura di mandata del sistema di generazione distribuita (T5).

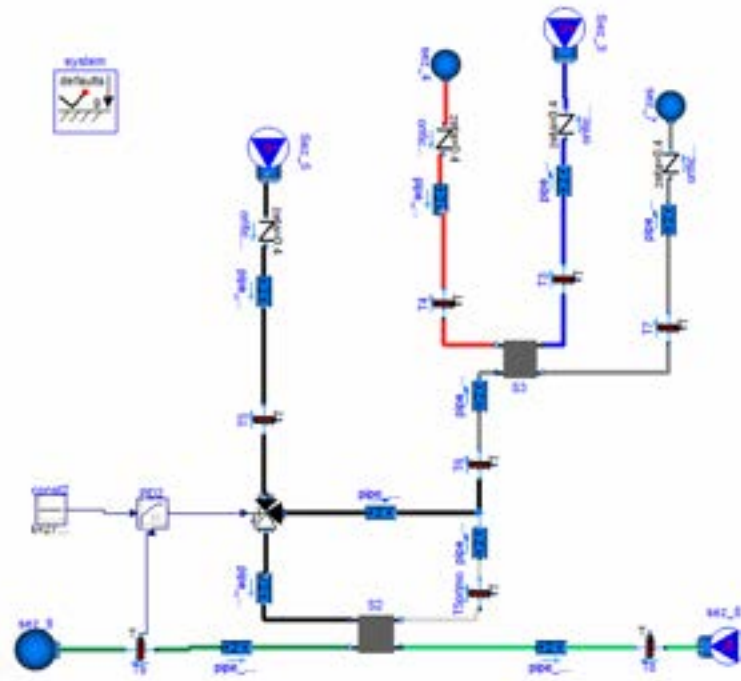


Figura 3.5. Modello semplificato per la simulazione dello scenario 3

Nel modello tali grandezze sono state fissate mediante l'imposizione di condizioni al contorno. La grandezza controllata dal sistema di controllo, in questo caso il controllore PI, è la temperatura di mandata dell'utenza in uscita dallo scambiatore S2 lato freddo (T9). Ad occuparsi di tale regolazione è la valvola a tre vie C2 che in base al sensore T9 regola la portata che entra nello scambiatore affinché la temperatura di mandata (T9) raggiunga 60 °C (set-point). I principali parametri del controllore che sono stati scelti in modo da ottenere una risposta a regime costante e non oscillatoria sono:

- costante di proporzionalità (K): 1/100;
- costante di tempo del blocco integrale (Ti): 100 secondi.

Le grandezze non direttamente controllate, ma che derivano dall'apertura della valvola C1 e dallo scambio termico, sono:

- la temperatura sul ramo di mandata della rete di teleriscaldamento (T4);
- la temperatura in uscita dallo scambiatore S2 lato sistema di generazione (T6');
- la temperatura di uscita dallo scambiatore S2 sul lato del sistema di generazione (T6);
- la temperatura in uscita dallo scambiatore di calore S3 sul ramo di ritorno del sistema di generazione (T7);
- la portata in ingresso allo scambiatore S2 lato generazione distribuita (M5');
- la potenza termica scambiata da S2;
- la potenza termica scambiata da S3.

I risultati delle simulazioni numeriche sono confrontati con il dato sperimentale in Tabella 3.6, dove è anche presente il confronto fra il modello di scambiatore a efficienza costante e quello a efficienza variabile.

Nel presente scenario non è necessaria tutta la portata M7 proveniente dal sistema di generazione per portare a 60 °C la temperatura di mandata dell'utenza, quindi la valvola C2 immette una portata nel bypass pari a $M7 - M5'$, che si rimescolerà a $M5'$ in uscita allo scambiatore. Per questo motivo, come si può vedere in Tabella 3.6, $T6 \neq T6'$.

È inoltre importante osservare che per quanto riguarda la temperatura in uscita da S3 dal lato della rete di teleriscaldamento (T4), questa temperatura deve raggiungere almeno il valore di 80 °C in modo da evitare riduzioni del valore della temperatura sul ramo di mandata della rete principale. Nel modello completo della sottostazione è presente un controllore PI che regola la portata prelevata dal ritorno in modo da soddisfare tale condizione. In queste simulazioni non è presente il sistema di controllo sulla temperatura T4, ma come

si può notare dai risultati ottenuti, si ottiene $T_4 \approx 80^\circ\text{C}$, in quanto la condizione al contorno $M_3 = 0,39 \text{ kg/s}$ è tale da permetterlo.

Tabella 3.6. Simulazioni stazionarie, Scenario 3

SCENARIO 3		MIN	ENEA	Dymola ϵ _Costante epsS2=0.560 epsS3=0.860	Dymola ϵ _Variabile epsS2=0.462 eps=0.868	Dymola ϵ _Costante epsS2=0.462 epsS3=0.868
[kg/s]	M8	0.50*	0.50*	0.50	0.50	0.50
	M7	1.25*	0.78*	0.78	0.78	0.78
	M3	0.23*	0.39*	0.39	0.39	0.39
	M5'			0.211	0.256	0.256
[°C]	T3	50	50.15	50.15	50.15	50.15
	T4	80	80	79.59	79.89	79.87
	T5	90	90.47	90.47	90.47	90.47
	T6	86	84.49	84.40	84.41	84.4
	T6'		68.84	68.12	72.03	72.03
	T7	80	69.31	69.66	69.53	69.53
	T8	50	50.56	50.56	50.56	50.56
	T9	60	60.01	60.00	60	60
[kW]	S2	20.9	19.47	19.21	19.75	19.75
	S3	29	48.27	48.16	48.52	48.51

Per quanto riguarda l'efficienza degli scambiatori, con lo scambiatore a efficienza costante si ottengono risultati in linea con i valori sperimentali se lavora con efficienza pari a $\epsilon = 0,560$ per lo scambiatore S2 e $\epsilon = 0,860$ per lo scambiatore S3. Utilizzando lo scambiatore ad efficienza variabile, si è ottenuto invece $\epsilon = 0,460$ per S2 e $\epsilon = 0,868$ per S3. Si verifica quindi che l'efficienza di S2 ottenuta con lo scambiatore ad efficienza variabile è inferiore del 10% rispetto a quella ottenuta con lo scambiatore ad efficienza fissa. Rispetto ai valori ottenuti con lo scambiatore a efficienza fissa, si nota inoltre una discrepanza, poco significativa, sulla portata M5' (lato sistema di generazione) che passa da 0,211 kg/s (0,76 m³/h) a 0,256 kg/s (0,92 m³/h), mentre si ottiene una differenza più rilevante (4 °C) sulla temperatura in uscita T6' (lato sistema di generazione). Invece, la temperatura di set-up dell'utenza (T9), le potenze scambiate e la temperatura in ingresso allo scambiatore S3 sono soddisfatte. Pertanto si può concludere che le differenze ottenute riguardano solo una sezione intermedia (sezione 6'), che non impatta sulla bontà del funzionamento della sottostazione.

3.1.2.4 Scenario 4

La prova dello scenario 4 mira a caratterizzare il funzionamento contemporaneo degli scambiatori S1 e S2 della sottostazione, mentre lo scambiatore S3 è inattivo. L'energia termica necessaria al soddisfacimento dell'utenza viene fornita prioritariamente dal sistema di generazione tramite S2; se il sistema di generazione non riesce a soddisfare l'utenza, allora interviene la rete di teleriscaldamento tramite S1, andando a fornire l'energia mancante. Il modello della sottostazione per simulare questo scenario è stato semplificato inserendo solo gli scambiatori attivi, ovvero S1 e S2, come mostrato in Figura 3.6.

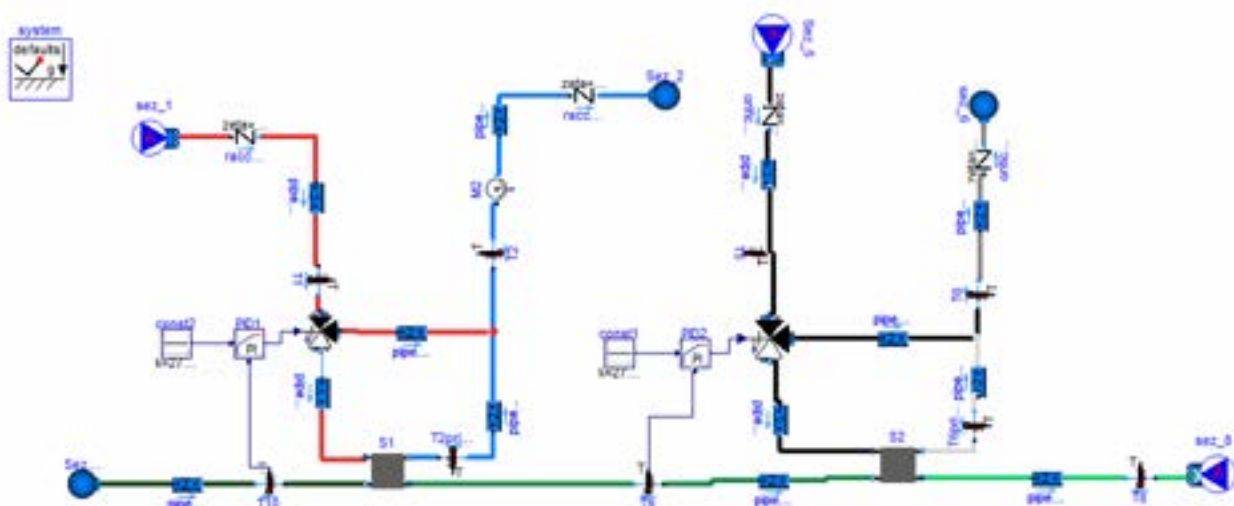


Figura 3.6. Modello semplificato per la simulazione dello scenario 4

Il presente scenario si verifica quando si verificano le seguenti condizioni:

1. la temperatura di mandata del sistema di generazione distribuita (T4) è superiore alla temperatura di ritorno dell'utenza (T8) incrementata di 10 °C (salto di temperatura minimo per lo scambio termico sullo scambiatore S2);
2. la temperatura in uscita dallo scambiatore S2 lato caldo in seguito all'eventuale mescolamento con la corrente di bypass (T6) è inferiore a 82 °C (valore minimo di temperatura affinché sia possibile scambiare potenza con la rete);
3. la temperatura in uscita dallo scambiatore S2 lato utenza (T9) non riesce a raggiungere la temperatura di set point (60 °C).

Quando si verifica la condizione 1, si attiva lo scambiatore S2, mentre quando si verifica la condizione 2 lo scambiatore S3 si disattiva; infine quando si verifica la condizione 3, si attiva S1. La richiesta termica dell'utenza considerata per questa prova è quella massima.

In questo scenario nella simulazione vengono fissate le seguenti quantità:

- la temperatura di mandata dalla rete di teleriscaldamento (T1);
- la portata prelevata dalla mandata della rete di teleriscaldamento ($M1 = M2$);
- la temperatura di ritorno dall'utenza, in ingresso allo scambiatore S2 (T8);
- la portata proveniente dall'utenza, in ingresso allo scambiatore S2 (M8);
- la temperatura di mandata del sistema di generazione distribuita (T5);
- la portata mandata dal sistema di generazione distribuita, in ingresso allo scambiatore S2 ($M5 = M7$).

Nel modello tali grandezze sono state fissate mediante condizioni al contorno, mentre le grandezze controllate secondo le logiche di controllo stabilite in fase di progettazione sono:

- la temperatura in uscita da S2 lato utenza (T9);
- la temperatura in uscita da S1 lato utenza (T10).

Ad occuparsi della regolazione nel modello numerico sono:

- il controllore PI denominato PID 2, sul lato della generazione distribuita, che agisce sulla valvola C2 sulla base della temperatura del sensore T9;
- il controllore PI denominato PID 1, sul lato della rete di teleriscaldamento, che agisce sulla valvola C1 sulla base della temperatura del sensore T10.

Le temperature di riferimento per entrambi i controllori sono fissate a 60 °C, nel caso in cui il PID 2 non sia in grado, per quelle che sono le condizioni al contorno, di portare la temperatura T9 al raggiungimento del set point, interviene il PID 1, prelevando portata dalla rete di teleriscaldamento e indirizzandola verso S1. I principali parametri del controllore che sono stati scelti, per entrambi i controllori, in modo da ottenere una risposta a regime costante e non oscillatoria sono:

- costante di proporzionalità (K): 1,3;
- costante di tempo del blocco integrale (Ti): 10 secondi.

Le grandezze non direttamente controllate ma che derivano dall'apertura della valvola C1 e dallo scambio termico sono:

- la temperatura di uscita dallo scambiatore S1 lato teleriscaldamento ($T2'$);
- la temperatura di ritorno da S1 lato teleriscaldamento ($T2$) che potrebbe differire da $T2'$ per effetto della valvola miscelatrice C1;
- la portata circolante nello scambiatore S1 lato teleriscaldamento ($M2'$);
- la temperatura di uscita dallo scambiatore S2 lato sistema di generazione ($T6'$);
- la temperatura di ritorno lato il sistema di generazione ($T6$) che potrebbe differire da $T6'$ per effetto della valvola miscelatrice C2.

I risultati delle simulazioni numeriche sono confrontati con il dato sperimentale in Tabella 3.7, dove è anche presente il confronto fra il modello di scambiatore a efficienza costante e quello a efficienza variabile.

Si osserva che anche in questo caso per via del sovradimensionamento di S3 la portata considerata in condizioni di design $M7 = M5$ differisce da quella utilizzata durante le prove sperimentali. Nel modello numerico, questa ultima è stata utilizzata ai fini della sua validazione.

Si nota che le temperature $T2$ e $T2'$ sono differenti in quanto la valvola C1 è regolata in modo da deviare la portata ($M1-M2'$) alla temperatura $T1$ verso il bypass. Tale portata si rimescola poi con la portata $M2'$ a temperatura $T2'$, che è inferiore a $T1$. Al contrario, $T6 \approx T6'$ perché la valvola C2 è completamente aperta e non manda alcuna portata sul ramo di bypass, quindi la corrente in uscita dallo scambiatore non subisce alcun mescolamento.

Osservando i risultati ottenuti per T9 e per T10, si può fare un'osservazione sul funzionamento dei controllori PI. Nonostante il controllore PID 2 mandi alla valvola il segnale di massima apertura, la portata in ingresso a S2 alla temperatura $T1$ non è sufficiente a portare la temperatura in uscita T9 al valore di set point (60°C). Pertanto si attiva anche lo scambiatore S1 e il controllore PI lato rete di teleriscaldamento si occupa di portare la temperatura di mandata dell'utenza (T10) a 60°C .

Infine, per quanto riguarda l'efficienza, lo scambiatore a efficienza costante restituisce risultati in linea con i valori sperimentali se lavora con $\epsilon = 0,955$ per lo scambiatore S2 e $\epsilon = 0,390$ per lo scambiatore S3. Quando si utilizza lo scambiatore ad efficienza variabile, si è ottenuto $\epsilon = 0,955$ per S2 e $\epsilon = 0,398$ per S2. Tali valori sono molto prossimi a quelli ottenuti con lo scambiatore ad efficienza costante. Anche in questo caso, quindi, si può concludere che lo scambiatore ad efficienza variabile mostra ottime prestazioni.

Tabella 3.7. Simulazioni stazionarie, Scenario 4

SCENARIO 4		MAX	ENEA	Dymola $\epsilon_{\text{variabile}}$ epsS1=0.955 epsS2=0.398	Dymola_epsCostante epsS1=0.955 epsS2=0.390
[kg/s]	M2	0.50*	0.50*	0.501	0.501
	M2'			0.116	0.124
	M8	0.50*	0.50*	0.500	0.500
	M5'		0.780	0.78	0.78
	M7	1.25	0.78	0.78	0.78
[°C]	T1	80	79.25	79.25	79.25
	T2'		55.1	55.66	55.17
	T2	74	70.2	73.80	73.3
	T5	90	90.48	90.48	90.48
	T6	80	75.59	75.22	75.54
	T6'		75.27	75.21	75.53
	T8	30	30.74	30.74	30.74
	T9	54	53.72	54.54	54.03
[kW]	T10	60	60	60	60
	S1	12.6	18.93	11.42	12.47
	S2	50.2	49.58	49.79	48.74

3.1.2.5 Scenario 5

La prova dello scenario 5 mira a caratterizzare il funzionamento del solo scambiatore S3 della sottostazione che permette lo scambio di energia termica dal sistema di generazione alla rete di teleriscaldamento. In questo scenario, la richiesta termica dell'utenza è nulla, quindi S3 è l'unico scambiatore attivo. Per semplicità, come nei casi precedenti il modello è stato semplificato, inserendo solo lo scambiatore S3, come mostrato in Figura 3.7.

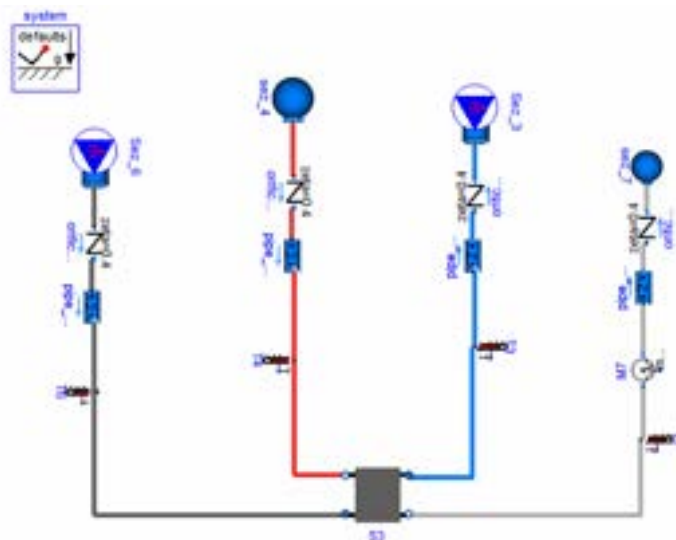


Figura 3.7. Modello semplificato per la simulazione dello scenario 5

In questo scenario nella simulazione vengono fissate le seguenti quantità:

- la portata in mandata dal sistema di generazione ($M5 = M7$);
- la temperatura della corrente di mandata dal sistema di generazione ($T5$);
- la portata prelevata dal ritorno della rete di teleriscaldamento ($M3$);
- la temperatura della corrente prelevata dal ritorno della rete di teleriscaldamento ($T3$).

Nel modello tali grandezze sono state fissate mediante l'imposizione di condizioni al contorno. Per la condizione di funzionamento in esame non è necessario inserire un sistema di controllo, in quanto le temperature $T9$ e $T10$ non sono coinvolte e la temperatura della corrente che si immette sulla mandata della rete di teleriscaldamento ($T4$) si mantiene al valore di set point pari a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ a causa delle condizioni al contorno stabilite dalla prova. Le grandezze non direttamente controllate ma che derivano dall'apertura della valvola $C1$ e dallo scambio termico sono:

- la temperatura di ritorno lato sistema di generazione ($T7$);
- la portata nello scambiatore $S3$ lato teleriscaldamento ($M3 = M4$).

I risultati delle simulazioni numeriche sono confrontati con il dato sperimentale in

Tabella 3.8, dove è inoltre presente il confronto fra il modello di scambiatore a efficienza costante e quello a efficienza variabile.

Per quanto riguarda l'efficienza, lo scambiatore a efficienza costante mostra risultati in linea con i valori sperimentali se lavora con efficienza pari a $\epsilon = 0,750$, mentre con lo scambiatore ad efficienza variabile si ottiene $\epsilon = 0,754$. Anche in questo caso, il modello di scambiatore a efficienza variabile implementato mostra ottime prestazioni.

Tabella 3.8. Simulazioni stazionarie, Scenario 5

SCENARIO 5		Richiesta NULLA	ENEA	Dymola ε _Costante eps=0.750	Dymola ε _variabile eps=0.754
[kg/s]	M7	1.25*	0.78*	0.78	0.78
	M3	0.40*	0.60*	0.60	0.60
[°C]	T3	50	50.74	50.74	50.74
	T4	80	80.04	80.23	80.41
	T5	90	90.06	90.06	90.06
	T7	80	67.33	67.50	67.54
[kW]	S3	50.2	72.9	73.05	73.49

3.1.3 Simulazioni dinamiche

Con prove in regime dinamico si intendono delle simulazioni che vengono svolte variando dinamicamente il profilo di richiesta da parte dell'utenza e/o il profilo di produzione del sistema di generazione. Per indicare la variazione della richiesta dell'utenza si può agire o sulla portata M8 e/o sulla temperatura di ritorno T8, mentre la variazione di produzione da parte del sistema di generazione viene imposta agendo sulla portata di mandata M5. Il modello utilizzato per queste prove prevede l'implementazione di tutti i sistemi di controllo della sottostazione. Il layout completo del modello utilizzato è rappresentato in Figura 3.8, dove le linee tratteggiate rappresentano i segnali di controllo.

Le logiche di controllo sono state implementate sulla base di quanto descritto nel Capitolo 5 del Report/PTR2020/144. Le uniche valvole che sono state implementate poiché necessarie per questa campagna di simulazioni sono: la valvola a tre vie C1, che regola la portata in ingresso (lato rete di teleriscaldamento) allo scambiatore S1; la valvola a tre vie C2, che regola la portata in ingresso (lato sistema di generazione) allo scambiatore S2. Tali valvole sono regolate dal controllore denominato PID 1 e PID 2 rispettivamente. Gli altri controlli che sono invece svolti dalle valvole C1', C2', C4 e dalla pompa P sono stati implementati nel modello agendo direttamente sulle condizioni al contorno della sezione 1, della sezione 3 e della sezione 5.

Con riferimento alla Figura 3.8 si notano i controlli sulla valvola C1 e C2, già menzionati, mentre i restanti controlli vengono descritti di seguito. Il componente "switch" (Figura 3.9) utilizzato in tutti i blocchi di controllo restituisce un output y pari a u1 se il segnale booleano in ingresso (al centro del componente) è vero, altrimenti restituisce y = u2.

Blocco di controllo 1 (in ingresso alla sezione 1: mandata rete di teleriscaldamento)

Il blocco di controllo 1 (Figura 3.10) svolge il ruolo della valvola C1'. Infatti, se $T_9 > 59,5\text{ °C}$ o se $M_8 = 0$ non viene prelevata portata dalla mandata della rete, nel primo caso perché è sufficiente il sistema di generazione a soddisfare la richiesta e nel secondo perché non vi è alcuna richiesta.

Si precisa che la temperatura di riferimento utilizzata nel blocco di controllo 1 al di sopra della quale S1 si disattiva non è 60 °C , come descritto in precedenza, ma $59,5\text{ °C}$. Tale valore è stato scelto in modo da non attivare S1 non appena la temperatura scende al di sotto di 60 °C , ma si è scelto di implementare una tolleranza di $0,5\text{ °C}$.

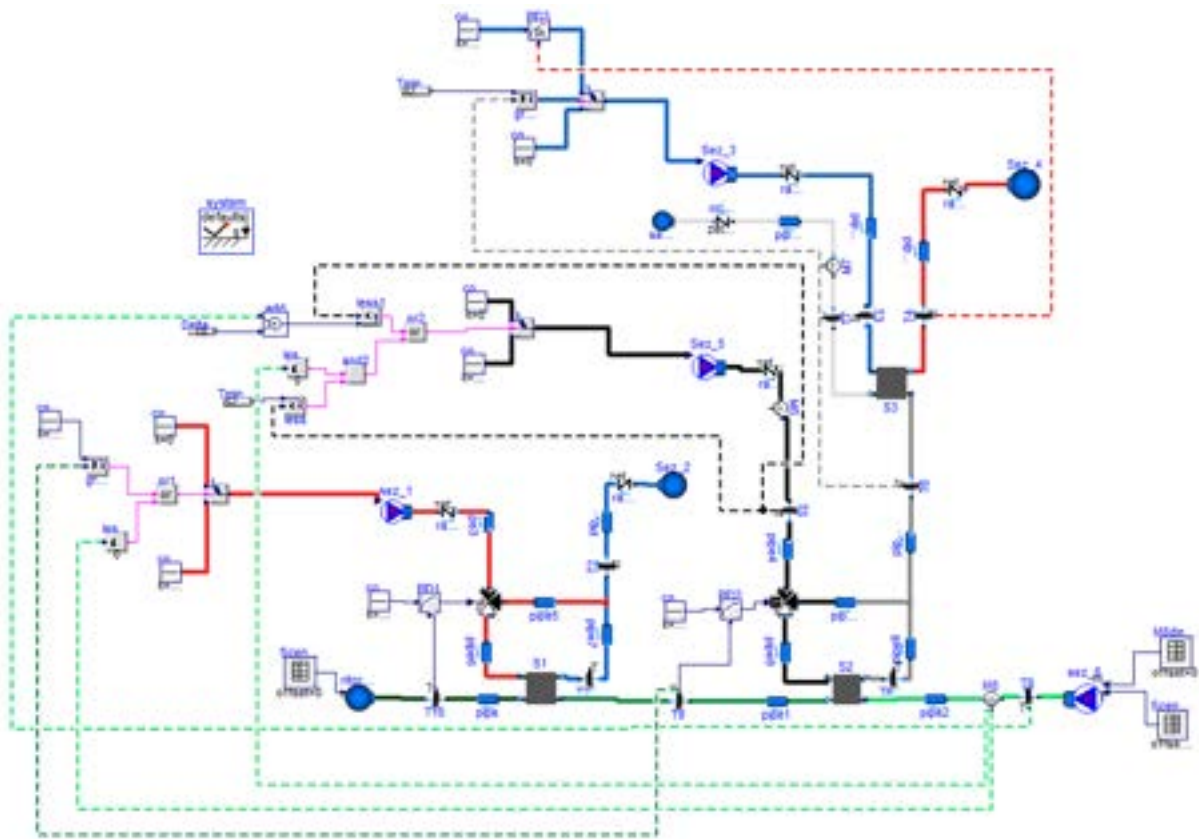


Figura 3.8. Modello dinamico della sottostazione di scambio termico comprensivo dei sistemi di controllo

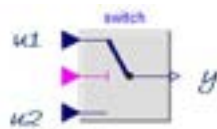


Figura 3.9. Componente switch

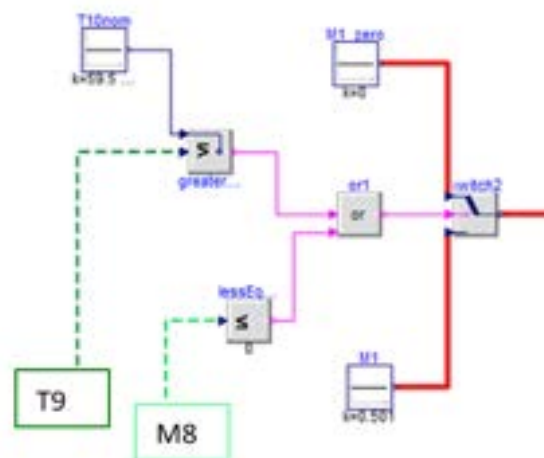


Figura 3.10. Blocco di controllo 1

Blocco di controllo 2 (in ingresso alla sezione 5: mandata sistema di generazione)

Il blocco di controllo 2 riportato in Figura 3.11 svolge il ruolo della valvola C2'. Infatti nel caso in cui $T5 \geq T8 + \Delta T5_{\min}$ viene impostato $M5 = M5_{\text{nom}}$, altrimenti $M5 = 0$. Inoltre se $T5 < 82^\circ\text{C}$ e $M8 = 0$ viene annullata la portata ($M5 = 0$), poiché se c'è richiesta da parte dell'utenza lo scambiatore S2 deve essere disattivato e se non c'è nemmeno un livello energetico del sistema di generazione sufficiente per lo scambio con la rete, anche S3 deve essere disattivato. Se la portata che attraversa lo scambiatore è nulla, quest'ultimo si considera disattivato.

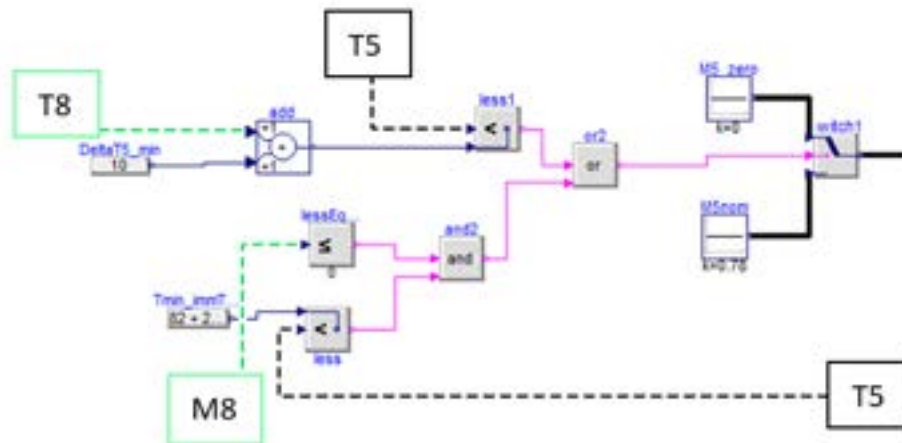


Figura 3.11. Blocco di controllo 2

Blocco di controllo 3 (in ingresso alla sezione 3: ritorno della rete di teleriscaldamento)

Il blocco di controllo 3 riportato in Figura 3.12 svolge il ruolo della pompa P e della valvola C3. Infatti, nel caso in cui $T6 > T_{\text{min,immTLR}} (82^\circ\text{C})$, si attiva il controllore PI che regola la portata in ingresso M3 in modo da mantenere T4 al suo valore di set point (80°C). Diversamente, nel caso in cui $T6 < T_{\text{min,immTLR}}$, lo scambio attivo tra sistema di generazione e rete di teleriscaldamento deve essere disattivo e quindi la portata prelevata dalla sezione 3 viene impostata a zero ($M3 = 0$).

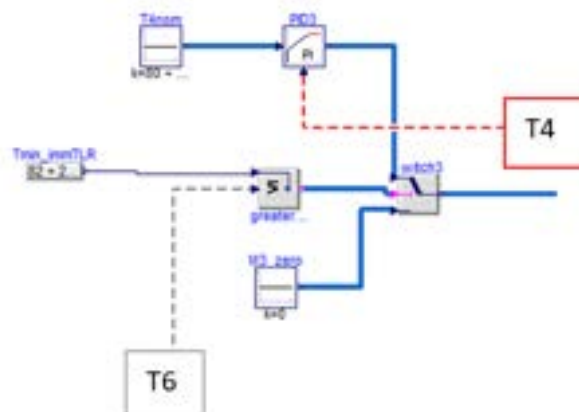


Figura 3.12. Blocco di controllo 3

Il componente utilizzato per il controllore PI del blocco di controllo 3 è l' "IBPSA.LimPid" e proviene dalla libreria IBPSA in quanto, diversamente dall'analogo componente della libreria Modelica, possiede l'opzione *ReverseAction*, fondamentale per il corretto funzionamento del controllo. Infatti in questo caso si vuole agire sulla portata della corrente fredda di ritorno della rete di teleriscaldamento, per regolare la temperatura T4 di immissione nella mandata. In particolare, ogni qualvolta questa temperatura è inferiore al valore di

riferimento (80 °C), è necessario che il controllore diminuisca la portata M3. Per realizzare questo comportamento del controllore è necessario che l'opzione *ReverseAction* sia attiva.

È inoltre importante osservare che le logiche di controllo, per quanto riguarda la pompa P e la valvola C3, prevedono che, nel caso in cui $M7 (= M5)$ sia nulla non debba essere prelevata portata dalla sezione 3 (ritorno della rete di teleriscaldamento). Questa condizione non è necessario inserirla in modo esplicito nel modello numerico perché viene applicata indirettamente dalle logiche di controllo già implementate. Infatti, quando il blocco di controllo 2 pone $M7 = M5 = 0$ (scambiatore S2 inattivo) si ha sicuramente o $T5 < 82^{\circ}\text{C}$ (quindi anche $T6 < 82^{\circ}\text{C}$ perché S2 inattivo) o $T5 < T8 + \Delta T5_{\min}$ ($T8 + \Delta T5_{\min}$ vale al più 60°C perché $T8$ non supera mai 50°C e $\Delta T5_{\min}$ è 10°C , quindi sicuramente $T6 < 82^{\circ}\text{C}$). Di conseguenza, poiché il blocco di controllo 3 pone $M3 = 0$ quando $T6 < 82^{\circ}\text{C}$, si avrà sicuramente $M3 = 0$ quando $M7 = 0 (= M5)$.

Nel seguito verranno spiegati alcuni dettagli relativi al modello numerico e alcune integrazioni e modifiche apportate allo stesso per giungere alla configurazione riportata in Figura 3.8 con la quale sono state svolte le simulazioni dinamiche.

Come anticipato precedentemente, nell'ambito delle simulazioni dinamiche il componente che rappresenta lo scambiatore di calore deve necessariamente essere ad efficienza variabile ("VariableEffectivness"). In particolare sono state applicate delle modifiche che tengono conto della possibilità di annullamento della portata in ingresso allo scambiatore e della possibile interazione dei tre scambiatori di calore e quindi dei tre sistemi di controllo (PID 1, PID 2, PID 3). Pertanto sono stati inseriti alcuni blocchi condizionali all'interno dello scambiatore di calore che partecipano al controllo della sottostazione. Per il calcolo dell'efficienza, il componente "VariableEffectivness" calcola la resistenza termica lato freddo e lato caldo che ha al denominatore la portata in condizioni di off-design; se tale portata fosse nulla si presenterebbero errori numerici, quindi l'implementazione del componente è stata modificata nel seguente modo:

- Per quanto riguarda gli scambiatori S1 ed S2 è stata inserita una condizione che imposta a zero tutti i parametri che caratterizzano lo scambiatore, in particolare la potenza termica scambiata quando la portata che circola nel primario (sistema di generazione) è nulla.
- Per quanto riguarda lo scambiatore S3 è stata inserita una condizione che imposta a zero tutti i parametri che caratterizzano lo scambiatore, in particolare la potenza termica scambiata quando la portata che circola nel secondario (rete di teleriscaldamento) è nulla.

L'inserimento di un blocco condizionale anche sulla seconda corrente che circola nello scambiatore rallenterebbe la simulazione al punto da generare errori numerici nell'interazione tra i sistemi di controllo sotto alcune condizioni di lavoro della sottostazione. Per evitare l'insorgere di tali problematiche è stata inserita una sola condizione su ciascuno scambiatore, comunque sufficiente per gli scambiatori S1 ed S3 grazie ai sistemi di controllo. Infatti se $M8 = 0$ (circuitto secondario di S1) il blocco di controllo 1 pone $M1 = 0$ (circuitto primario) e se $M7 = 0$ (circuitto primario di S3) il blocco di controllo 3 pone $M3 = 0$ (circuitto secondario). Mentre per S2, se $M8 = 0$ (circuitto secondario) non necessariamente $M5 = 0$ (circuitto primario) pertanto è stata inserita un'ulteriore modifica all'implementazione di S3: viene aggiunta alla portata una quantità dell'ordine di 10^{-18} , in questo modo non si verificano problemi in caso di portata nulla e non si impatta significativamente sul calcolo dei parametri caratteristici dello scambiatore in caso di portata non nulla. Inoltre visto il buon funzionamento di tale implementazione sullo scambiatore S2 si è deciso di aggiungere tale modifica anche agli scambiatori S1 ed S3, in modo da prevenire eventuali problematiche sui ritardi dei segnali di controllo dovuti all'interazione dei tre circuiti della sottostazione. Per far fronte a problematiche di questo tipo è stato di fondamentale importanza l'inserimento del filtro sulla valvola a tre vie C2, senza il quale il modello non riesce a raggiungere la convergenza in situazioni in cui tutti e tre gli scambiatori sono attivi e si presentano variazioni dinamiche sulle condizioni al contorno.

Un'altra considerazione da fare riguardo il modello della sottostazione di scambio termico utilizzato per lo svolgimento delle simulazioni dinamiche riguarda l'utilizzo del componente "StaticPipe", invece del "DynamicPipe" presente nel modello sviluppato per le prove stazionarie. I tubi dinamici devono risolvere equazioni di bilancio alle derivate parziali, ma in presenza di condizioni al contorno che variano a gradino, come accade nelle prove dinamiche, si perde la continuità delle variabili e diventano non differenziabili. Con l'idea di utilizzare il modello di sottostazione abbinato all'interno di un modello di rete (incluso il sistema di generazione e le utenze) si possono ipotizzare variazioni delle portate graduali e sarà quindi possibile utilizzare i tubi dinamici; nei casi esaminati – con condizioni al contorno che variano a gradino – è necessario utilizzare il componente "StaticPipe".

Un'altra considerazione da fare prima di introdurre le simulazioni dinamiche riguarda l'aggiunta fatta al modello sulle condizioni al contorno del circuito dell'utenza. Se la portata dell'utenza è nulla la temperatura T8 viene stabilita sulla base delle condizioni al contorno facendo una media tra la temperatura in ingresso e quella in uscita. Quindi se ad esempio al tempo $t = 60$ minuti la portata si annulla e la temperatura T8 è in quell'istante pari a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, il modello calcola una temperatura sulla linea dell'utenza pari a $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ perché la condizione in ingresso pone $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ e quella in uscita pone $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (valore di default che non viene considerato quando la portata entra nella boundary). Non essendoci portata non è di interesse la temperatura di mandata dell'utenza; per non creare ulteriori variazioni sulle condizioni al contorno si è inserito lo stesso andamento di temperatura anche sulla condizione al contorno di mandata dell'utenza, in modo che la temperatura sul circuito rimanga costante e pari a T8, anche in assenza di portata su tutta la linea dell'utenza. Infine, per lo stesso motivo, è stata modificata la condizione al contorno relativa alla sezione 7 di ritorno al sistema di generazione imponendo $T7 = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Per svolgere le prove dinamiche sono stati individuati 8 scenari nei quali sono previsti diversi livelli di interazione tra i 3 scambiatori della sottostazione. Ogni scenario ha una durata che varia dalle 5 alle 7 ore e per ogni prova sono riportati dei grafici con gli andamenti delle grandezze (temperature, portate, potenze) di interesse durante tutto il corso della simulazione. Si ricorda che l'obiettivo di questi test è quello di valutare come le logiche di controllo implementate sulla sottostazione rispondono alle variazioni sulle condizioni al contorno dell'utenza e del sistema di generazione. Le grandezze che non vengono modificate durante le prove si mantengono ai valori nominali, riportati nella

Tabella 3.9: le grandezze evidenziate in azzurro sono quelle che, in base alla prova dinamica che si sta considerando, possono variare dinamicamente nel corso della simulazione, mentre le grandezze evidenziate in verde sono quelle controllate dai regolatori PI che prendono come riferimento il valore nominale; su fondo bianco le condizioni al contorno inserite nel modello e che rimarranno invariati in tutte le prove dinamiche. Si ricorda che, per il corretto funzionamento del modello della sottostazione, è stato necessario imporre $M1 (=M2) = 0,501\text{ kg/s}$ (invece di $0,500$) per evitare errori numerici sullo scambiatore S1, quando anche la portata del primario (M8) è pari a $0,500\text{ kg/s}$. Se tali valori fossero infatti identici, si otterrebbe un errore numerico nell'equazione che calcola l'efficienza dello scambio termico al paragrafo 2.1.

Gli andamenti ottenuti dalle simulazioni numeriche in ambiente Dymola verranno confrontati con gli andamenti ottenuti sperimentalmente sotto le stesse condizioni di lavoro. In particolare i grafici presi in considerazione per il confronto riporteranno gli andamenti sperimentali delle temperature, portate e potenze sovrapposti con i valori di riferimento per la prova considerata. Da notare che le grandezze riportate nei grafici fanno riferimento ai valori istantanei acquisiti con un tempo di campionamento di 1 secondo. Inoltre le variazioni dinamiche di portata e temperatura si presentano con dei transitori nei dati sperimentali e con dei cambiamenti repentini nei risultati numerici. Infatti nel modello dinamico è stato inserito il componente "StaticPipe" come modello di tubo il quale, diversamente dal "DynamicPipe", risolve le equazioni di bilancio di massa, energia e quantità di moto in forma stazionaria.

Per quanto riguarda le variabili controllate dalla sottostazione, ed in particolare T9, T10 e T4 (temperature in uscita al secondario di S2, S1 ed S3 rispettivamente), si verificano delle oscillazioni notevoli sui valori ottenuti sperimentalmente durante gli avviamenti dei relativi scambiatori, dovute al riscaldamento/raffreddamento del fluido al secondario a scambiatore non attivo; questa situazione non si verifica nel modello sviluppato in Dymola perché, per come è stato implementato lo scambiatore di calore, la potenza termica è nulla se lo scambiatore è inattivo ovvero se la portata che lo attraversa è nulla.

Per differenziare i dati sperimentali viene aggiunto il prefisso EXP (i.e. experimental) ai risultati delle prove e le curve saranno rappresentate con una linea più sottile rispetto a quelle basate sulle simulazioni numeriche.

Tabella 3.9. Valori controllati nel modello di sottostazione

	Valore nominale
M7 [kg/s]	0.78
M2 [kg/s]	0.5
M8 [kg/s]	0.5
T1 [°C]	80
T3 [°C]	50
T4 [°C]	80
T5 [°C]	90
T8 [°C]	40
T10 [°C]	60

3.1.3.1 Prova dinamica 1

La prova dinamica 1 prevede il funzionamento del solo scambiatore S1 (teleriscaldamento-utenza) per diversi livelli di richiesta termica dell'utenza variabile tra richiesta minima, massima e nominale. Tale prova può essere considerata come una combinazione delle tre prove in regime stazionario costituenti lo scenario 1. La temperatura T5 non è stata fissata a 90 °C perché lo scenario che si vuole simulare prevede il funzionamento del solo scambiatore S1; pertanto in presenza di una portata dell'utenza non nulla – come in questo caso – l'unica possibilità per escludere lo scambiatore S2 (e quindi anche S3) è quella di imporre una temperatura di mandata del sistema di generazione inferiore alla temperatura T8 incrementata del salto minimo di temperatura (10 °C). Secondo l'andamento riportato in Figura 3.13, T8 non raggiunge mai temperature inferiori a 30 °C, quindi impostando T5 = 35 °C si è sicuri che il blocco di controllo 2 inattivi S2 ed S3.

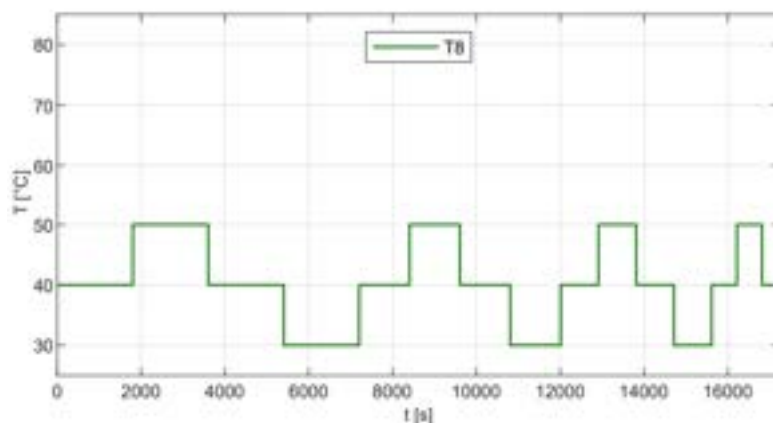


Figura 3.13. Prova dinamica 1. Variazione dinamica della temperatura di ritorno dell'utenza (T8)

I parametri inerenti la simulazione che sono stati selezionati sono:

- Stop time: 18.000 secondi
- Interval length: 18.000 secondi
- Tolerance: 0,0001

Il modello è in grado di simulare anche con tolleranze più basse, ma si è scelto il valore di default in quanto è sufficiente a raggiungere la precisione desiderata.

In Figura 3.14 è riportata la temperatura T1 di mandata del sistema di generazione che è stata imposta nel modello numerico dalle condizioni al contorno e che rimane costante per tutto il corso della simulazione. Invece la temperatura T1 ottenuta sperimentalmente ha un andamento caratterizzato da oscillazioni dovute al controllo di temperatura dell'impianto di prova a monte del punto di collegamento 1-2 con la sottostazione. Lo scostamento medio assoluto valutato su tutta la prova resta comunque contenuto in ± 1 °C.

L'andamento delle temperature T8 e T9 calcolate numericamente è riportato in Figura 3.15; in particolare T8 non è visibile dal grafico perché coincidente con T9. Infatti per quelle che sono le condizioni di lavoro nello scenario 1, lo scambiatore S2 (utenza-sistema di generazione) è inattivo e di conseguenza la temperatura T8 non viene incrementata nell'attraversamento di S2. Si può notare come l'andamento del valore misurato T8 sia in ritardo rispetto all'andamento della temperatura T8 calcolata numericamente (valore di riferimento), a causa della distanza circuitale tra il punto dell'impianto di prova in cui T8 viene controllata e il punto della sottostazione in cui T8 viene misurata. È stato misurato un $\Delta T8 = 10$ °C per 5 minuti, ma lo scostamento medio assoluto valutato su tutta la prova resta comunque contenuto in ± 1 °C. Tale scostamento si ripercuote anche sugli andamenti delle grandezze legate a T8, come descritto nei confronti che seguono. Per quanto riguarda la temperatura di mandata all'utenza (T10) si ha che la differenza tra il valore calcolato numericamente e il valore misurato è inferiore a $\pm 0,5$ °C per la gran parte del test. Da notare che la maggiore discrepanza si registra per la richiesta massima da parte dell'utenza (T8 = 30 °C): questa rappresenta la condizione limite di funzionamento dello scambiatore S1 (la valvola C1 è completamente aperta) e a causa delle oscillazioni in T1 e delle perdite termiche non si riescono ad ottenere 60 °C in T10. Questa condizione non si verifica nel calcolo numerico proprio perché la temperatura T1 non ha oscillazioni e quindi T10 rimane costantemente pari al valore di riferimento (60 °C); le oscillazioni a livello numerico sono dovute alle variazioni dinamiche sulle condizioni al contorno, ma in misura molto minore (decimi di grado) rispetto al caso sperimentale, tanto da non essere apprezzabili graficamente in Figura 3.15.

In Figura 3.16 è riportato l'andamento della temperatura T2' in uscita dallo scambiatore S1 (lato rete di teleriscaldamento), sia per il caso sperimentale che per quello numerico. Dal confronto si può notare come gli andamenti siano i medesimi, ma con uno scostamento dei risultati sperimentali su quelli numerici a causa del ritardo presente sulla variazione dinamica delle condizioni al contorno T8. La stessa considerazione si può fare per la temperatura T2 (Figura 3.17), derivante dal mescolamento tra la corrente di mandata della rete di teleriscaldamento (a temperatura T1) e la corrente della rete di teleriscaldamento in seguito allo scambio termico con l'utenza (temperatura T2'), della quale segue lo stesso andamento.

In Figura 3.18 è mostrato l'andamento della potenza termica fornita all'utenza dalla rete di teleriscaldamento (scambiatore S1). In corrispondenza della minima richiesta fornisce 20,92 kW, passando a quando 41,84 kW in condizioni di design, fino ad arrivare a 62,76 kW in corrispondenza della massima richiesta. Dal confronto tra la potenza misurata sperimentalmente e quella ottenuta per via numerica si può notare un leggero ritardo (qualche minuto) dell'andamento sperimentale conseguente al ritardo misurato sull'andamento della temperatura T8.

Per completezza viene riportato l'andamento dell'efficienza in off-design dello scambiatore S1 (Figura 3.19); il valore massimo di efficienza che si raggiunge è 0,889 (richiesta dell'utenza minima), il valore minimo è 0,610 (richiesta dell'utenza massima), mentre in condizioni di design dell'utenza lo scambiatore S1 lavora con efficienza pari a 0,736.

In conclusione, all'aumentare della richiesta dell'utenza (T9 scende da 50 °C fino a 30 °C), lo scambiatore si adatta a tale variazione diminuendo le temperature in uscita lato caldo, aumentando la potenza scambiata con una riduzione dell'efficienza.

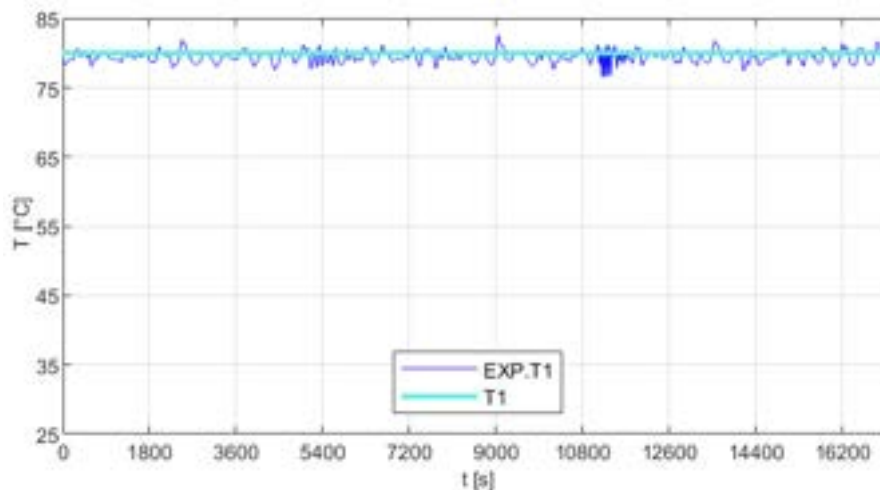


Figura 3.14. Prova dinamica 1. Temperatura di mandata della rete di teleriscaldamento (T1)

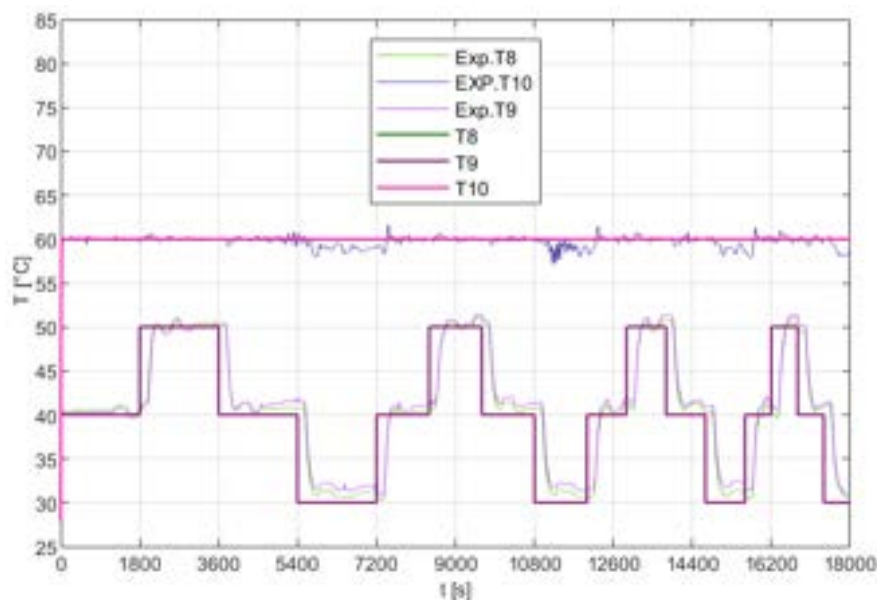


Figura 3.15. Prova dinamica 1. Temperatura T8 di ritorno dall'utenza, temperatura T9 dell'utenza in seguito allo scambio termico con il sistema di generazione e temperatura T10 dell'utenza in seguito allo scambio termico con la rete di teleriscaldamento

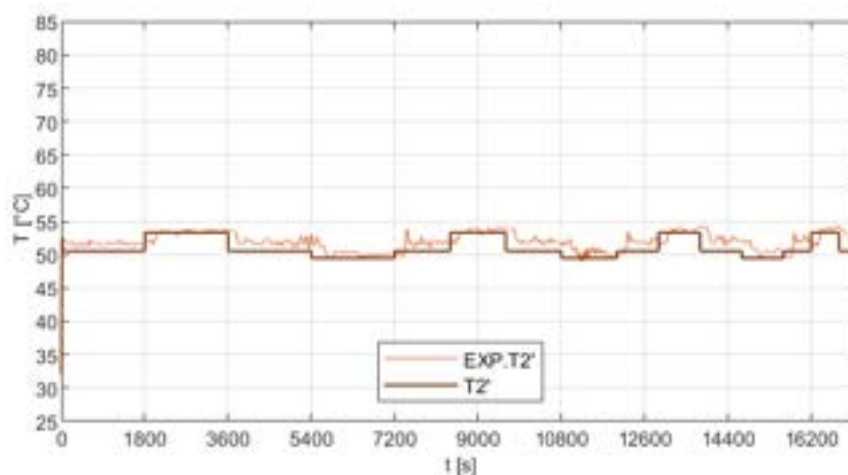


Figura 3.16. Prova dinamica 1. Temperatura T2' del circuito della rete di teleriscaldamento nella sezione 2' in uscita dallo scambiatore S1 (rete di teleriscaldamento-utenza)

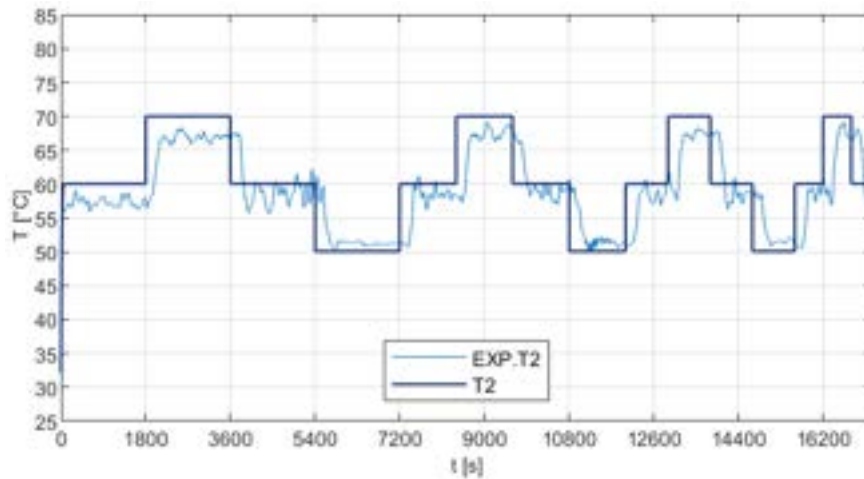


Figura 3.17. Prova dinamica 1. Temperatura in uscita da S1 (T2') e temperatura T2 successiva al mescolamento tra la corrente a temperatura

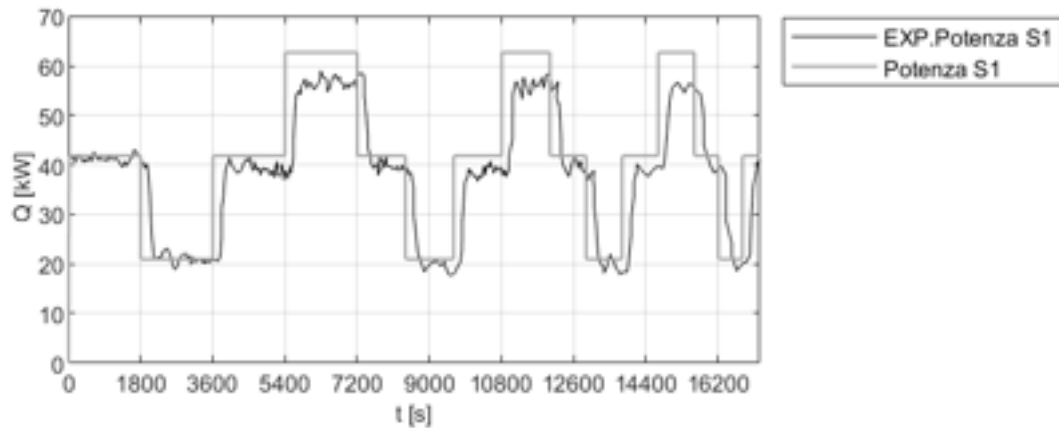


Figura 3.18. Prova dinamica 1. Potenza termica scambiata nello scambiatore S1 (utenza-rete di teleriscaldamento)

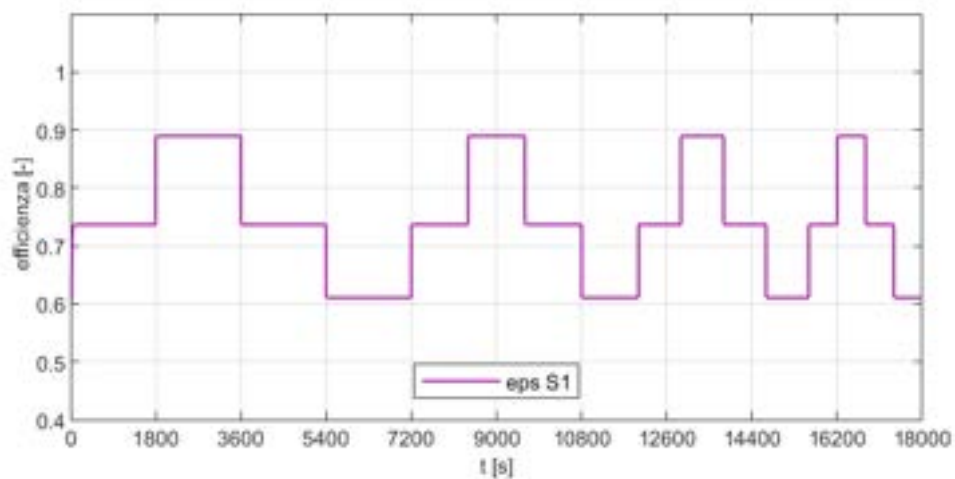


Figura 3.19. Prova dinamica 1. Efficienza dello scambiatore S1 in off-design

3.1.3.2 Prova dinamica 2

La prova dinamica 2 prevede il funzionamento degli scambiatori S2 (sistema di generazione-utenza) ed S3 (sistema di generazione-teleriscaldamento) per diversi livelli di richiesta termica dell'utenza variabile tra

richiesta in condizione di design, massima e nulla. Tale prova può essere considerata come una variante dinamica dello scenario 3 simulato in condizioni stazionarie.

I parametri inerenti alla simulazione che sono stati selezionati sono:

- Stop time: 25.200 secondi
- Interval length: 25.200 secondi
- Tolerance: 0,1

La tolleranza citata è la più bassa tra le tolleranze che portano a convergenza; con valori inferiori si verificano problemi numerici. Nonostante questo, la tolleranza scelta è sufficiente per ottenere risultati in linea con le prove sperimentali.

In Figura 3.20 e Figura 3.21 è riportato l'andamento di M8 (portata del circuito dell'utenza) e di T8 (temperatura di ritorno dall'utenza) rispettivamente. La variazione dinamica di tali grandezze definisce i possibili casi di richiesta dell'utenza che verranno indagati. Con riferimento alla Figura 3.22, si può notare come ci siano dei picchi improvvisi nell'andamento del valore misurato M8, dovuti agli effetti causati sull'impianto di prova dagli avviamenti e spegnimenti dei diversi scambiatori della sottostazione. Ci si aspetta pertanto di osservare negli andamenti sperimentali gli stessi picchi sulle grandezze influenzate dalla portata M8; diversamente, negli andamenti numerici tali picchi non saranno presenti. In Figura 3.23 è riportato l'andamento della temperatura T8 imposta come condizione al contorno dinamica per l'utenza e della temperatura T9, regolata da controllore PID 2, che ha come valore di riferimento 60 °C.

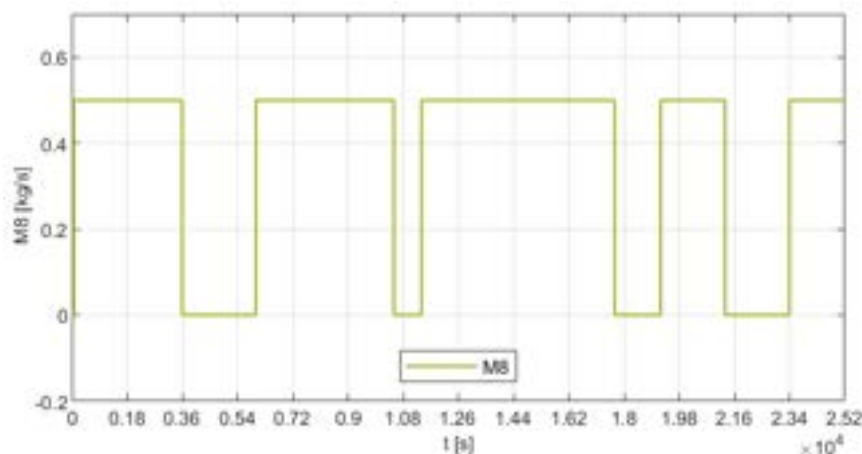


Figura 3.20. Prova dinamica 2. Variazione dinamica della portata M8 di ritorno

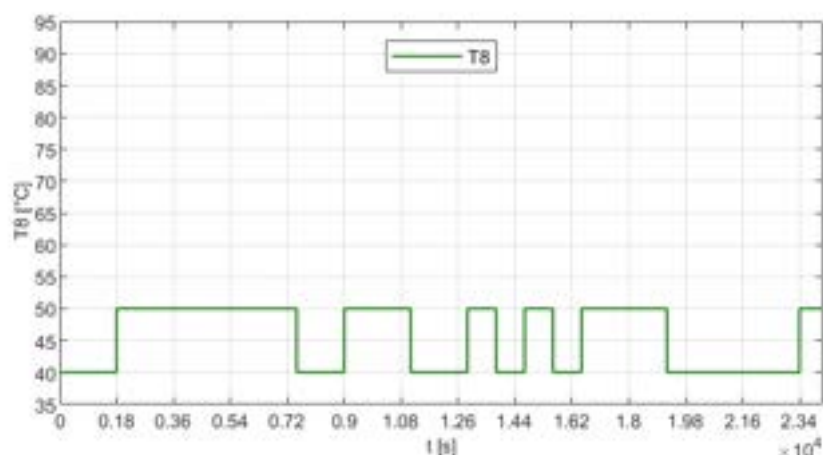


Figura 3.21. Prova dinamica 2. Variazione dinamica della temperatura T8 di ritorno dell'utenza

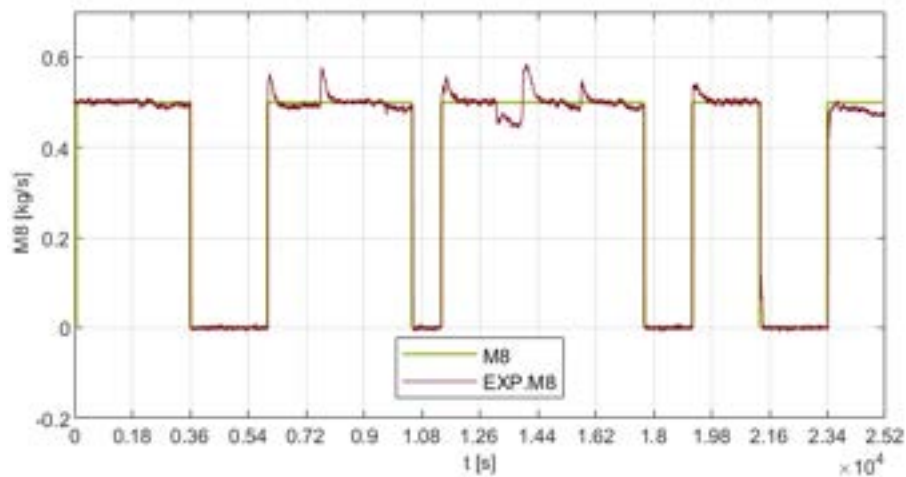


Figura 3.22. Prova dinamica 2. Confronto tra risultati numerici e sperimentali dell'andamento della portata M8 dell'utenza

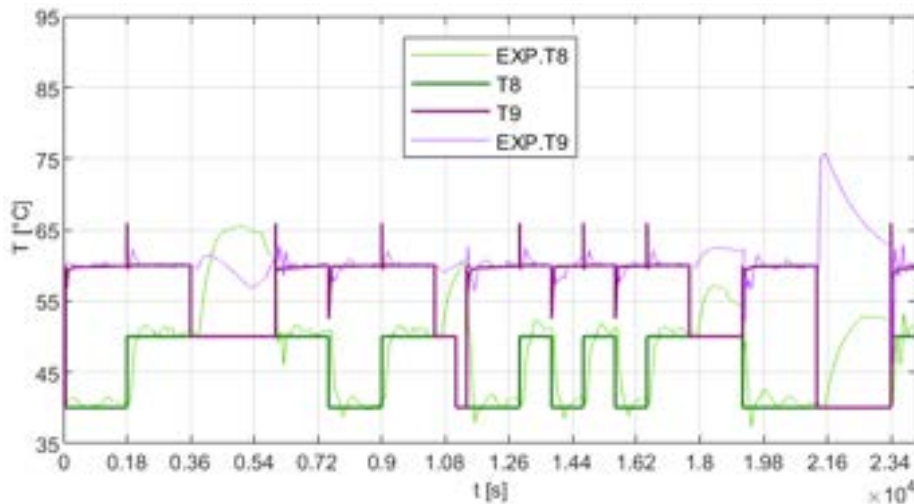


Figura 3.23. Prova dinamica 2. Temperatura T8 di ritorno dall'utenza e temperatura T9 dell'utenza in seguito allo scambio termico con il sistema di generazione

Un'osservazione da fare prima di confrontare gli andamenti sopra riportati riguarda gli istanti di tempo in cui la richiesta dell'utenza è nulla ovvero non vi è portata (vedi Figura 3.20). Nel caso in cui $M8 = 0$ sul circuito dell'utenza, il modello numerico impone la temperatura definita dalle condizioni al contorno in ingresso e in uscita, quindi $T8$ e $T9$ nel solo modello numerico sono coincidenti. Pertanto sulla base di Figura 3.23 si può notare che il controllore PID 2 riesce sempre a mantenere la temperatura $T9$ al valore di set point ($60\text{ }^{\circ}\text{C}$), ad eccezione degli istanti di tempo relativi alla variazione a gradino di $T8$ in cui si raggiungono picchi fino a $65\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tali picchi però si risolvono nell'arco di decimi di secondo per tornare a riassetarsi costantemente a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e senza mai scendere sotto $59,5^{\circ}\text{C}$. I principali parametri che caratterizzano il PID 2 che regola la portata $M5'$ in ingresso a S2 sono la costante di guadagno (K) e la costante di tempo del blocco integratore (T_i). Al fine di limitare la sovraelongazione sugli ingressi a gradino si è provato dapprima ad agire su K e T_i facendoli diminuire e successivamente si è inserita l'azione derivativa, ma tali tentativi non hanno portato risultati soddisfacenti. I parametri con i quali si è ottenuto il miglior risultato permettendo di raggiungere un adeguato tempo di assestamento della risposta e di salita e un piccolo errore a regime sono $K = 2,5$ e $T_i = 130\text{ s}$. Dal confronto con gli andamenti sperimentali si può notare che sono presenti i picchi su $T9$ agli stessi istanti di tempo, ma in misura molto più limitata: questa differenza si può associare alla diversa variazione di $T8$ che nelle prove sperimentali è più graduale e non a gradino come accade nel modello numerico. Inoltre è da notare che, come previsto, $T9$ cala ponendosi uguale a $T8$ nel periodo di funzionamento in cui la portata è nulla.

In Figura 3.24 è riportato l'andamento della temperatura T5 di mandata del sistema di generazione, imposto nel modello numerico come condizione al contorno e pari a 80 °C e che quindi si mantiene costante per tutto il corso della simulazione.

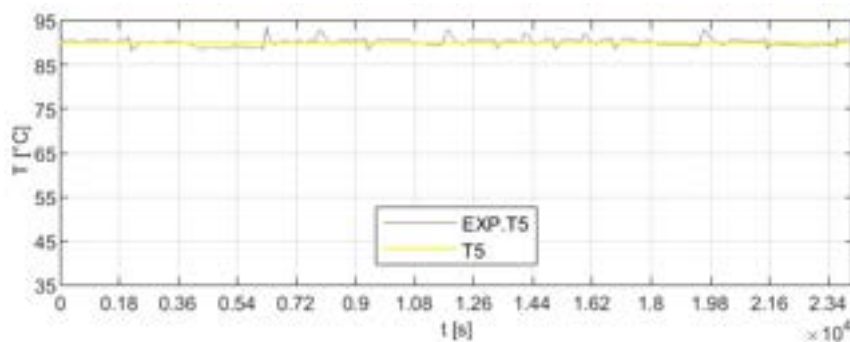


Figura 3.24. Prova dinamica 2. Temperatura T5 di mandata del sistema di generazione

In Figura 3.25 è mostrato il confronto tra l'andamento sperimentale e numerico relativo alla temperatura T6' in uscita dallo scambiatore S2 lato sistema di generazione. Come si può notare dal grafico, il minimo valore raggiunto da T6' è di circa 4 °C superiore nel caso numerico rispetto al caso sperimentale, ed è la stessa differenza che si era riscontrata anche nella corrispondente simulazione stazionaria (scenario 3). Infine si può notare che, come descritto in precedenza, negli istanti di tempo in cui la portata è nulla i tre scambiatori sono inattivi, non si ha scambio termico e il modello numerico restituisce $T6' = T5$ (90 °C).

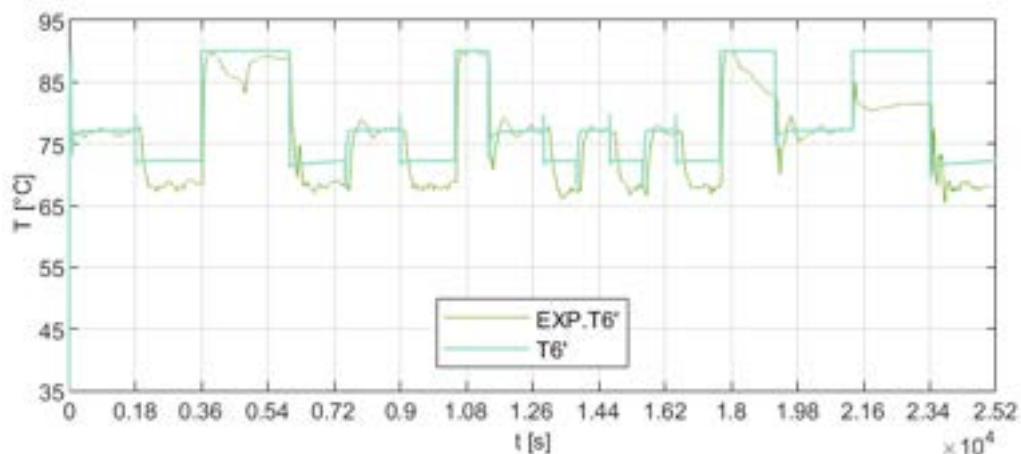


Figura 3.25. Prova dinamica 2. Temperatura T6' del sistema di generazione in uscita da S2 (utenza-sistema di generazione)

In Figura 3.26 è riportato l'andamento della temperatura T6 della corrente successiva al mescolamento tra la portata proveniente dal ramo di bypass della valvola C2 (a temperatura T5) e la corrente in uscita dallo scambiatore di calore S2 lato sistema di generazione (a temperatura T6'). Come si può notare dal grafico l'andamento numerico segue quello sperimentale per tutto il corso della simulazione. Inoltre anche in questo caso vale la considerazione fatta per la temperatura T6' in caso di portata nulla dell'utenza: in quella condizione non vi è scambio termico in S2, la temperatura T6' coincide con la temperatura T5 e di conseguenza anche $T6 = T5$ (90 °C).

Da tenere a mente per le valutazioni successive è il controllo che regola la portata sul circuito della rete di teleriscaldamento nelle sezioni 3 e 4 (blocco di controllo 3) che coinvolge la temperatura T6. Infatti quando tale temperatura supera 82 °C viene attivato lo scambio con la rete di teleriscaldamento tramite lo scambiatore di calore S3. Con riferimento al grafico di Figura 3.26 si nota che T6 è sempre superiore a 82 °C ad eccezione dei periodi in cui staziona sul proprio valore minimo (circa 77 °C). Pertanto in questi stessi periodi non vi è prelievo di massa dalla sezione 3 (ritorno rete di teleriscaldamento) e il modello numerico

definisce la temperatura del circuito facendo una media sulle condizioni al contorno in ingresso ($T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) e in uscita ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$), ovvero in questo caso imposta $T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Viceversa quando si creano le condizioni per lo scambio attivo ($T_8 \geq 82\text{ }^{\circ}\text{C}$) si preleva portata dalla sezione 3 alla temperatura $T_3 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Con riferimento alla Figura 3.27 si nota che l'andamento numerico di T_3 è in linea con quello sperimentale, che però raggiunge temperature di qualche grado superiore al valore di riferimento ($50\text{ }^{\circ}\text{C}$) e presenta un ritardo di qualche secondo sui risultati numerici di riferimento. È importante sottolineare che il modello numerico utilizza delle temperature imposte come boundary quando la portata è nulla e, quindi, i risultati numerici e sperimentali riportati in Figura 3.27 possono essere confrontati solo per i periodi di tempo in cui M_3 non è nulla (vedi Figura 3.29). In Figura 3.28 è mostrato l'andamento della temperatura T_4 del circuito della rete di teleriscaldamento in uscita dallo scambiatore S2, in seguito allo scambio termico con il sistema di generazione. Come si può notare l'andamento numerico (per portata non nulla) segue quello sperimentale ed è in linea con l'andamento di T_3 . In particolare quando $T_3 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (portata non nulla) viene regolata la portata prelevata dalla sezione 3 (ritorno della rete di teleriscaldamento) in modo da portare la temperatura T_4 al proprio valore di riferimento ($80\text{ }^{\circ}\text{C}$). Viceversa quando non vi è portata T_3 e T_4 coincidono e sono pari alla temperatura del circuito sulla base delle condizioni al contorno ($35\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Dal grafico riportato in Figura 3.29 si può notare che l'andamento dei risultati sperimentali relativi alla portata M_7 del sistema di generazione è in linea con l'andamento numerico di riferimento ($0,78\text{ kg/s}$). Inoltre è mostrato l'andamento della portata M_3 prelevata dal ritorno della rete di teleriscaldamento che raggiunge dei picchi superiori nel caso sperimentale rispetto al caso numerico: questo perché la temperatura T_3 è di qualche grado superiore e quindi per scambiare la stessa potenza termica è necessario prelevare più portata.

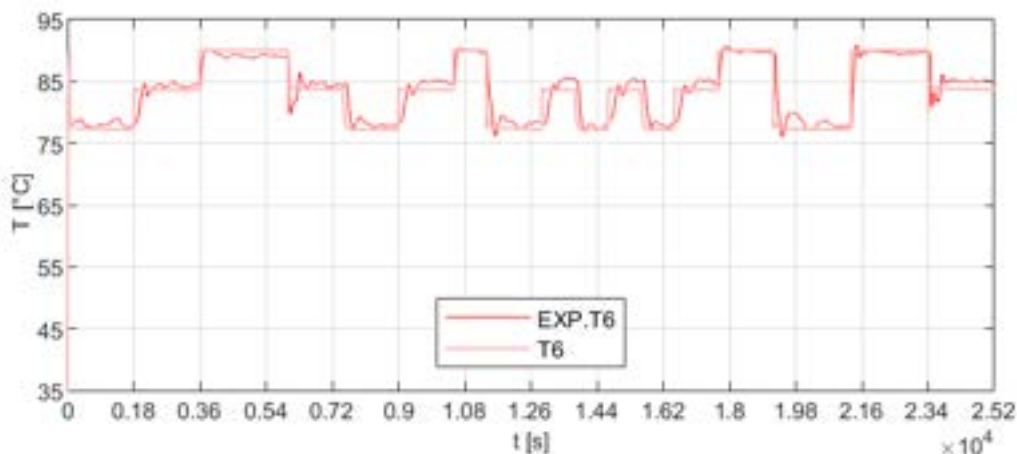


Figura 3.26. Prova dinamica 2. Temperatura T_6 del sistema di generazione in seguito al mescolamento tra la corrente a temperatura T_5 e la corrente a temperatura T_6'

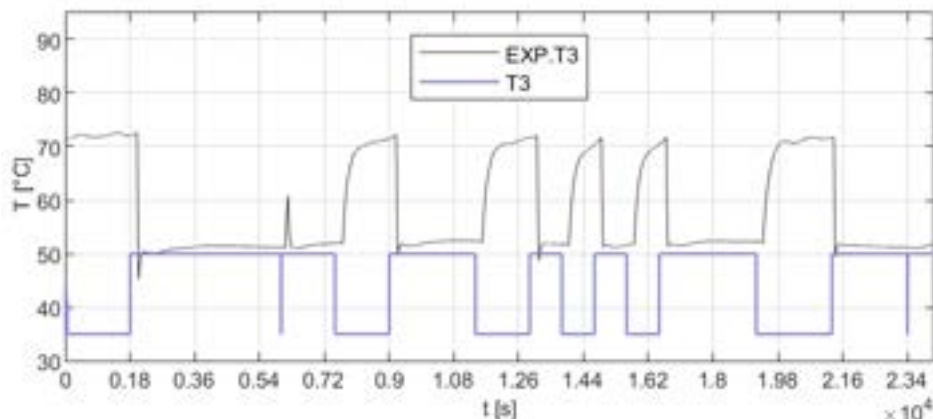


Figura 3.27. Prova dinamica 2. Temperatura T_3 della corrente prelevata dal ritorno della rete di teleriscaldamento

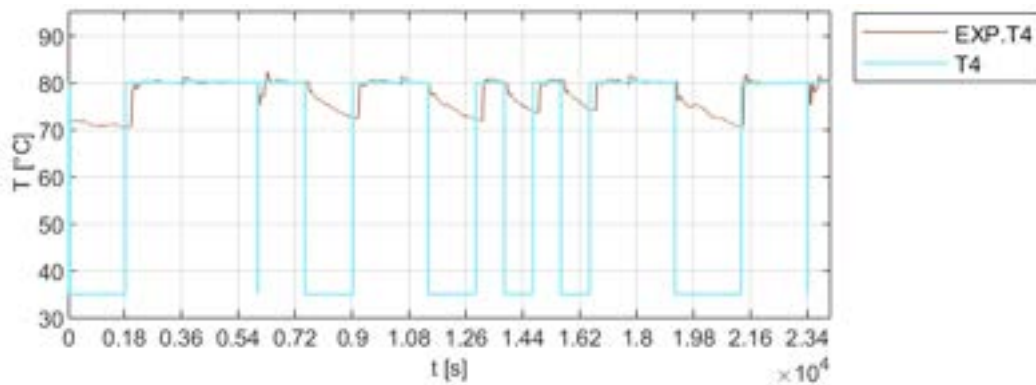


Figura 3.28. Prova dinamica 2. Temperatura T4 in uscita dallo scambiatore S3 (sistema di generazione-rete) lato mandata della rete

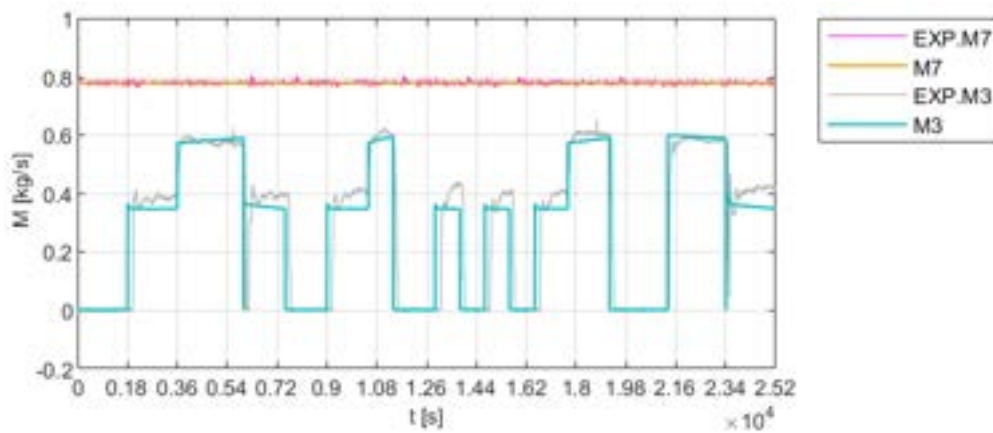


Figura 3.29. Prova dinamica 2. Portata M7 del circuito del sistema di generazione e portata M3 prelevata dal ritorno della rete di teleriscaldamento per ricevere il surplus di potenza termica del sistema di generazione

In Figura 3.30 è riportata la temperatura T7 del sistema di generazione in seguito alla cessione di potenza termica alla rete; sono rappresentati sia i risultati numerici che quelli sperimentali e come si può notare dal grafico entrambi seguono lo stesso andamento.

Dai grafici riportati in Figura 3.31 (scambiatore S2) e Figura 3.32 (scambiatore S3) si può notare come i due scambiatori interagiscano. In particolare, quando la richiesta da parte dell'utenza è quella di design (circa 40 kW), la temperatura T6 non è sufficiente a far funzionare lo scambiatore S3 secondo i valori di temperatura stabiliti e tali da poter garantire una cessione di calore alla rete di teleriscaldamento ad una temperatura di 80 °C. In questa condizione lo scambiatore S3 non è attivo. Nel caso in cui la richiesta dell'utenza sia minima (circa 20 kW) o nulla, lo scambiatore S3 è attivo e può inviare alla rete di teleriscaldamento l'energia prodotta dal sistema di generazione. Lo stesso comportamento si può osservare negli andamenti della potenza scambiata da S2 e da S3 ottenuti numericamente. Da notare che il ritardo individuato sulle temperature relative alle sezioni 3 e 4 della rete di teleriscaldamento (T3, T4) si ripercuote sulla potenza termica scambiata in S3, che presenta scostamenti rispetto all'andamento numerico agli stessi istanti di tempo. Inoltre la differenza che si nota sui valori massimi e minimi sperimentali e numerici raggiunti dalla potenza scambiata in S3 si può legare allo scostamento per l'incertezza di misura sull'energia termica al primario e al secondario. Per completezza viene riportato l'andamento dell'efficienza dello scambiatore S2 ed S3 in condizioni di off-design (Figura 3.33 e Figura 3.34).

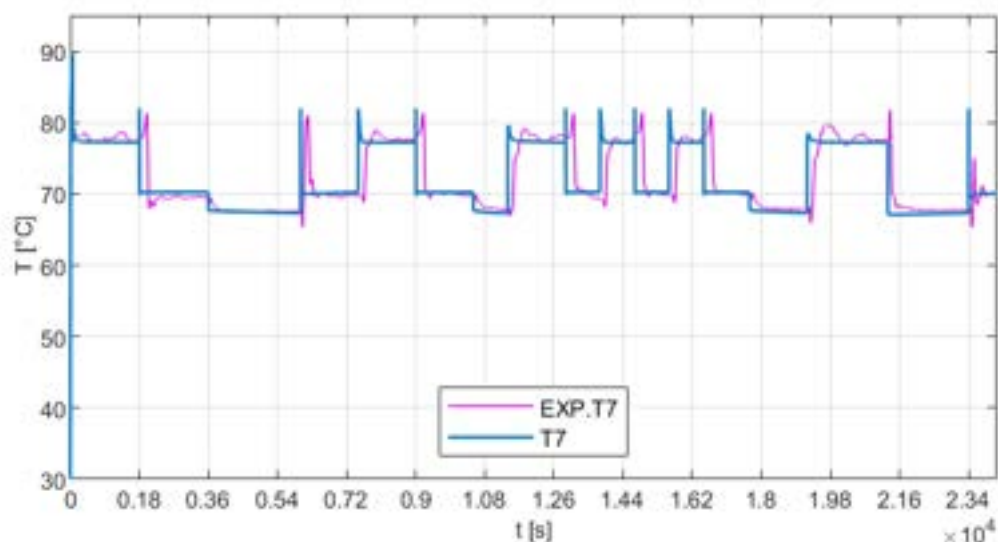


Figura 3.30. Prova dinamica 2. Temperatura T7 di ritorno del sistema di generazione in seguito allo scambio in S3 (rete di teleriscaldamento-sistema di generazione)

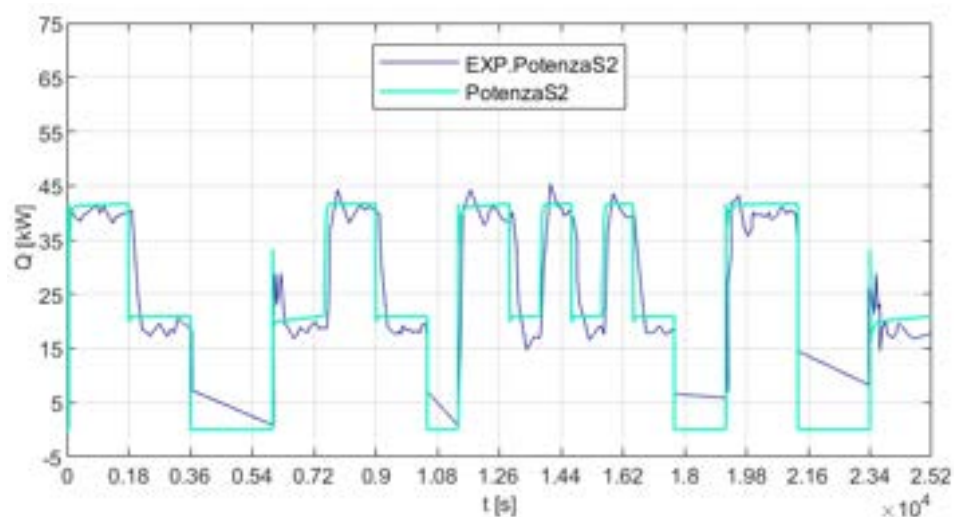


Figura 3.31. Prova dinamica 2. Potenza termica scambiata in S2 (utenza-sistema di generazione)

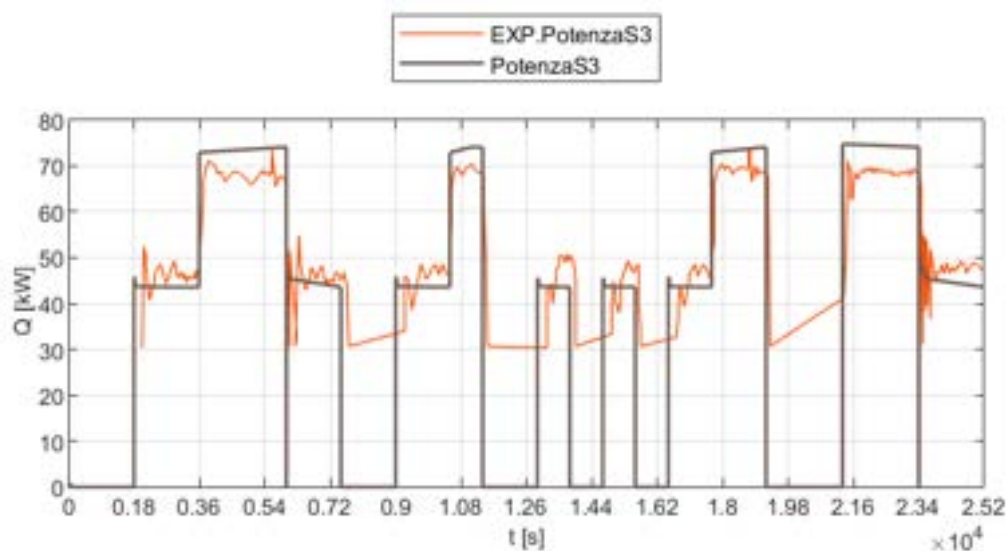


Figura 3.32. Prova dinamica 2. Potenza termica scambiata in S3 (sistema di generazione- rete di teleriscaldamento)

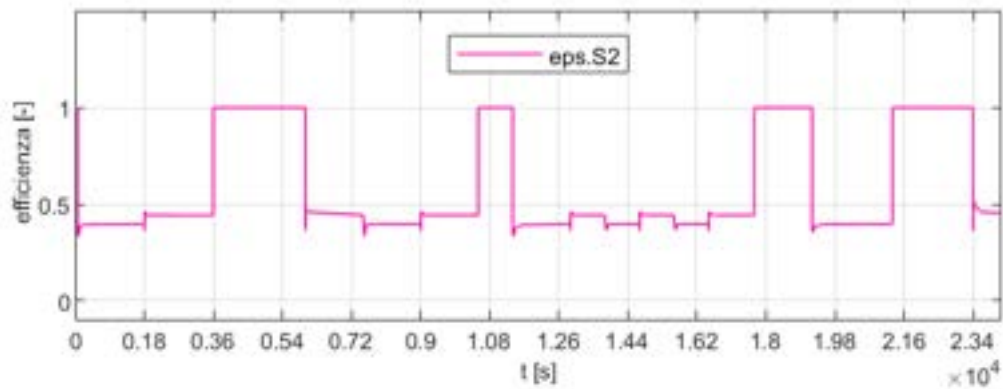


Figura 3.33. Prova dinamica 2. Efficienza dello scambiatore S2 in condizioni di off-design

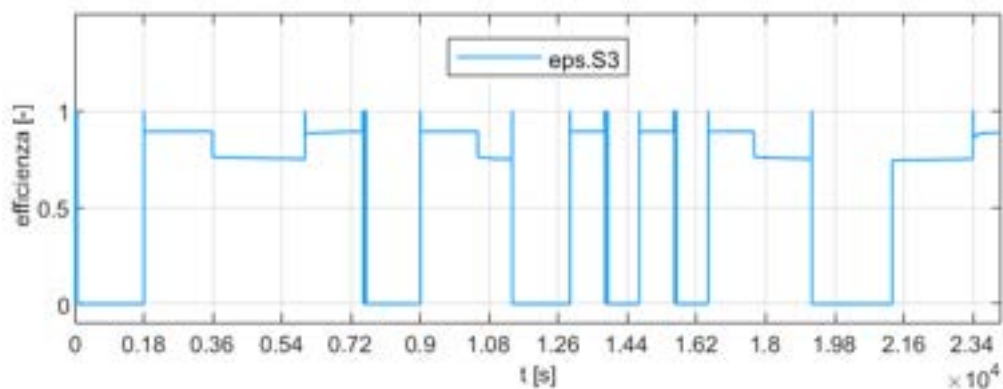


Figura 3.34. Prova dinamica 2. Efficienza dello scambiatore di calore S3 in condizioni di off-design

3.1.3.3 Prova dinamica 3

La prova dinamica 3 prevede il funzionamento degli scambiatori S1 (teleriscaldamento-utenza) ed S2 (sistema di generazione-utenza) per diversi livelli di richiesta termica dell'utenza variabile tra richiesta in condizione di design e di massimo carico. Tale prova può essere considerata come una variante dinamica dello scenario 4 simulato in condizioni stazionarie. Il sistema di generazione ha in mandata un livello energetico sufficiente da attivare lo scambio termico con l'utenza su S2, ma non abbastanza elevato da soddisfare l'intera richiesta; la potenza termica mancante viene fornita dalla rete di teleriscaldamento attivando lo scambio termico su S1. In Figura 3.35 è riportata la variazione dinamica della temperatura T8 dell'utenza.

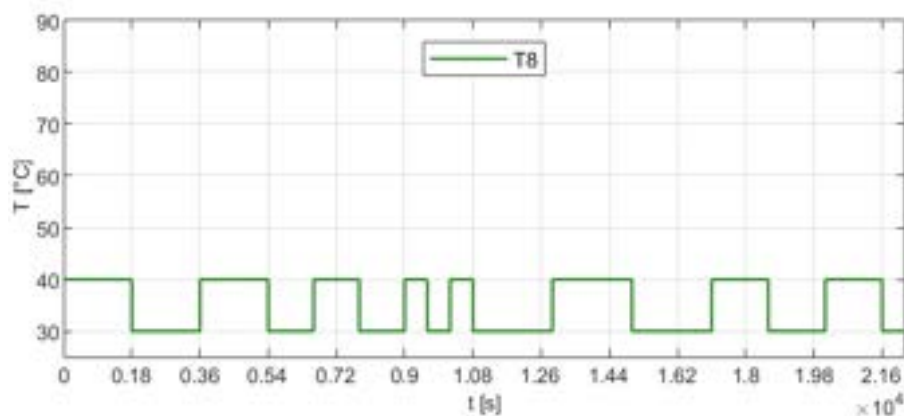


Figura 3.35. Prova dinamica 3. Variazione dinamica della temperatura T8 di ritorno dall'utenza

I parametri inerenti alla simulazione che sono stati selezionati sono:

- Stop time: 22.200 secondi

- Interval length: 22.200 secondi
- Tolerance: 0,0001

Il modello è in grado di simulare anche con tolleranze più basse, ma si è scelto il valore di default in quanto è sufficiente a raggiungere la precisione desiderata.

In Figura 3.36 è riportato l'andamento della temperatura T8 di ritorno dell'utenza e della temperatura T9 dell'utenza in uscita dallo scambiatore S2 (sistema di generazione-utenza). Quando la richiesta dell'utenza è in condizioni di design ($T8 = 40\text{ °C}$) il sistema di generazione è in grado di portare la temperatura T9 al proprio valore di set point (60 °C), mentre se l'utenza è in condizioni di richiesta massima ($T8 = 30\text{ °C}$) è necessario attivare anche lo scambiatore S1 (teleriscaldamento-utenza) perché la temperatura T9 non riesce a raggiungere il valore di riferimento.

In Figura 3.37 è possibile osservare l'andamento della temperatura T1. Il profilo legato ai dati numerici restituisce un valore costante definito dalle condizioni al contorno, mentre nell'andamento sperimentale è legato all'attivazione dello scambiatore S1 (in caso di inattività, con assenza di prelievo di portata dalla sezione 1m l'andamento di temperatura non è rilevante). Nei periodi di tempo in cui S1 è attivo ($T9 < 60\text{ °C}$) l'andamento sperimentale è in linea con quello numerico di riferimento, ad eccezione dell'istante iniziale di avviamento dello scambiatore in cui si presentano dei picchi fino a raggiungere 85 °C .

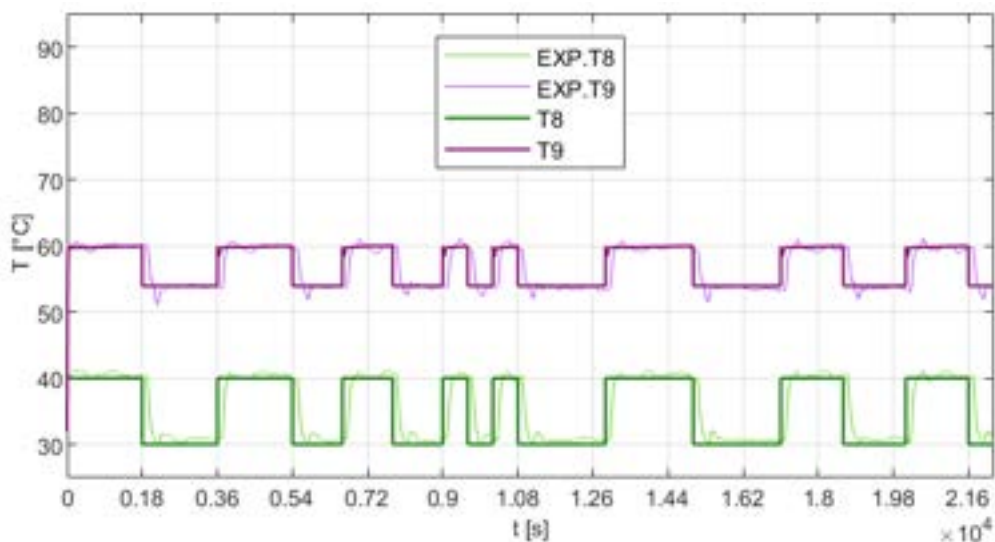


Figura 3.36. Prova dinamica 3. Temperatura T8 di ritorno dall'utenza e temperatura T9 dell'utenza in seguito allo scambio termico con il sistema di generazione

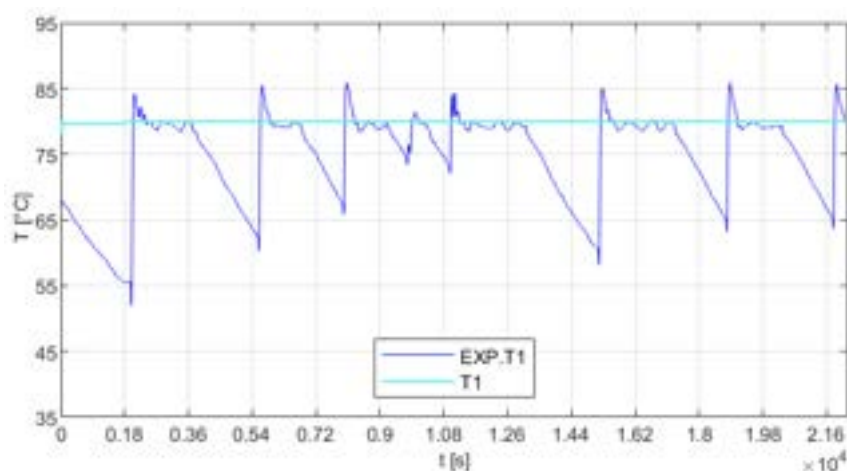


Figura 3.37. Prova dinamica 3. Temperatura T1 dalla mandata della rete di teleriscaldamento

In Figura 3.38 è mostrato l'andamento della portata $M2 = M1$ della rete di teleriscaldamento nel circuito che scambia potenza termica con l'utenza. Come accade per la temperatura $T1$, all'avviamento dello scambiatore si presenta un picco elevato che porta la portata fino a circa $0,8 \text{ kg/s}$ per poi assestarsi nell'arco di una decina di minuti. La portata $M8$ dell'utenza è invece molto vicina alla portata di riferimento e non presenta oscillazioni significative.

In Figura 3.39 è riportato l'andamento della temperatura $T2'$ del circuito rappresentante la rete di teleriscaldamento, in uscita dallo scambiatore $S1$ (rete di teleriscaldamento-utenza). Quando $T9$ raggiunge il proprio valore di riferimento (60°C) lo scambiatore $S1$ non è attivo quindi non vi è alcun salto di temperatura tra il fluido in ingresso e in uscita di entrambe le correnti che attraversano lo scambiatore, pertanto essendo $T9 = 60^\circ\text{C}$ anche $T10 = 60^\circ\text{C}$ e $T2' = 60^\circ\text{C}$. Mentre quando $S1$ si attiva, la corrente fluida entra a temperatura $T1 = 80^\circ\text{C}$ e si raffredda (cede potenza termica all'utenza) fino a $T2'$; nell'andamento sperimentale diversamente da quello numerico sono presenti dei picchi all'avviamento dello scambiatore (come si è osservato anche sulla temperatura $T1$). Il leggero ritardo (qualche secondo) dell'andamento sperimentale rispetto ai risultati numerici di riferimento è legato allo scostamento rilevato sulla variazione dinamica della temperatura $T8$.

In Figura 3.40 è riportato l'andamento della temperatura $T2$ della corrente derivante dal mescolamento tra $T1$ e $T2'$. Come si è verificato nello scenario 4 della raccolta di simulazioni stazionarie, anche in questo caso la temperatura $T2$ misurata sperimentalmente risulta essere inferiore rispetto alla temperatura attesa, il cui andamento è ben rappresentato dai risultati numerici, a causa del posizionamento del sensore di temperatura troppo vicino al punto di miscelazione.

In Figura 3.41 è riportato l'andamento della temperatura $T10$ ottenuta sia numericamente che sperimentalmente; si può notare che sono presenti dei picchi all'avviamento dello scambiatore solo nell'andamento sperimentale, mentre si presentano dei picchi più bassi anche nell'andamento numerico allo spegnimento dello scambiatore. In entrambi i casi i tempi di assestamento sono molto brevi (decimi di secondo) e la temperatura $T10$ rimane costantemente pari al valore di set point (60°C) per tutta la durata della prova.

Negli istanti in cui si ha la variazione dinamica di $T8$ sia la temperatura $T5$ che la portata $M7=M5$ del sistema di generazione hanno dei picchi istantanei che si assestano al valore di riferimento, come visibile in Figura 3.42 e Figura 3.43.

Si riportano inoltre gli andamenti della temperatura $T6'$ del sistema di generazione in seguito allo scambio termico con l'utenza (Figura 3.44), della temperatura $T6$ successiva al mescolamento tra la corrente a temperatura $T5$ e la corrente a temperatura $T6'$ (Figura 3.45) e quella della potenza termica scambiata in $S1$ (rete di teleriscaldamento-utenza) e in $S2$ (sistema di generazione-utenza) (Figura 3.46).

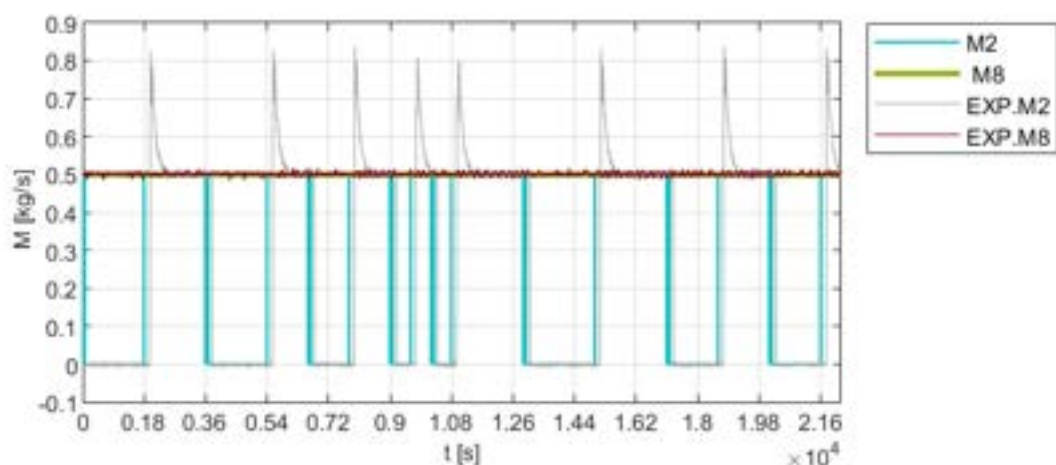


Figura 3.38. Prova dinamica 3. Portata $M2$ della rete di teleriscaldamento che scambia potenza termica con l'utenza e portata $M8$ del circuito dell'utenza

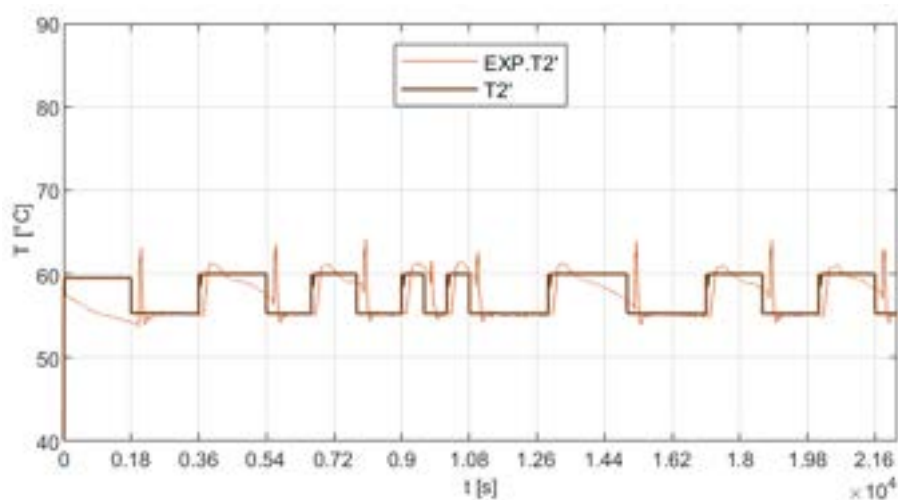


Figura 3.39. Prova dinamica 3. Temperatura T2' in uscita da S2 (lato sistema di generazione)

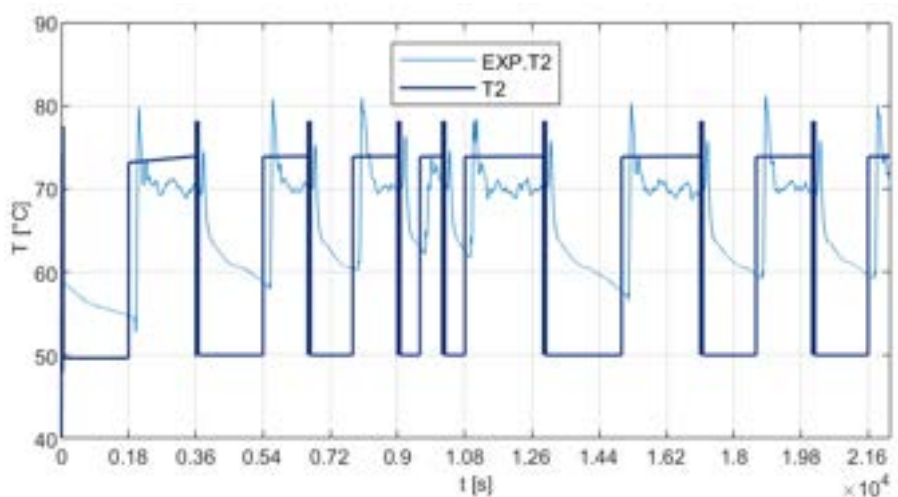


Figura 3.40. Prova dinamica 3. Temperatura T2 successiva al mescolamento tra la corrente a temperatura T1 e la corrente a temperatura T2'

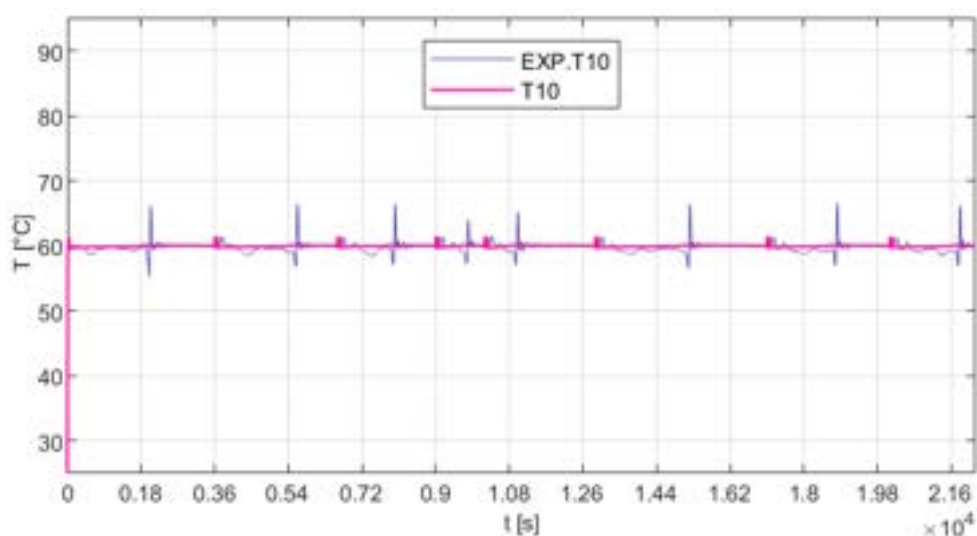


Figura 3.41. Prova dinamica 3. Temperatura T10 di mandata dell'utenza in seguito allo scambio termico con la rete di teleriscaldamento

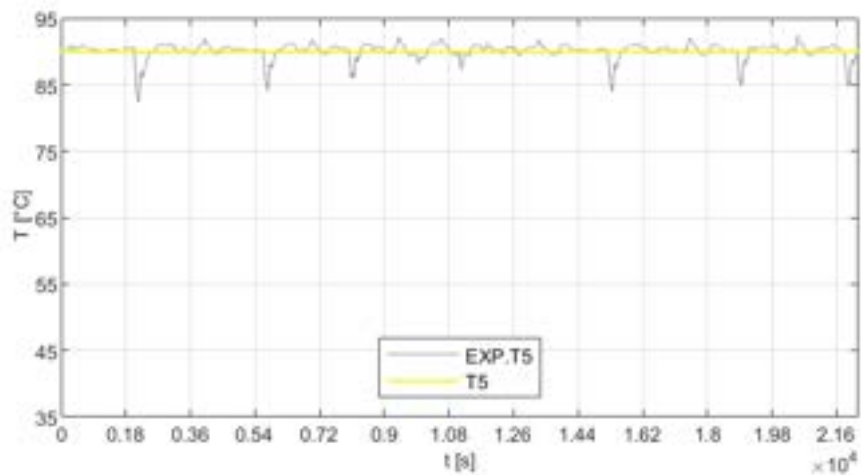


Figura 3.42. Prova dinamica 3. Temperatura T5 di mandata del sistema di generazione

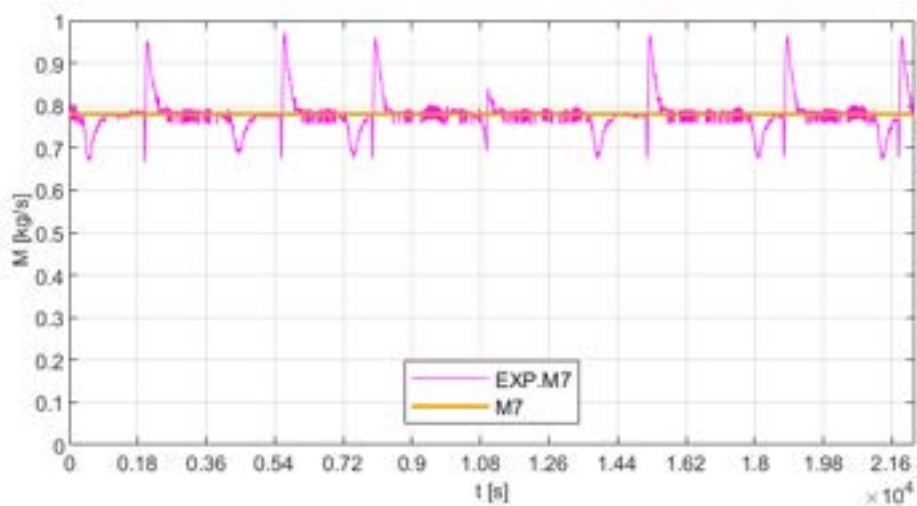


Figura 3.43. Prova dinamica 3. Portata $M_7=M_5$ del sistema di generazione che scambia potenza termica con l'utenza in S2

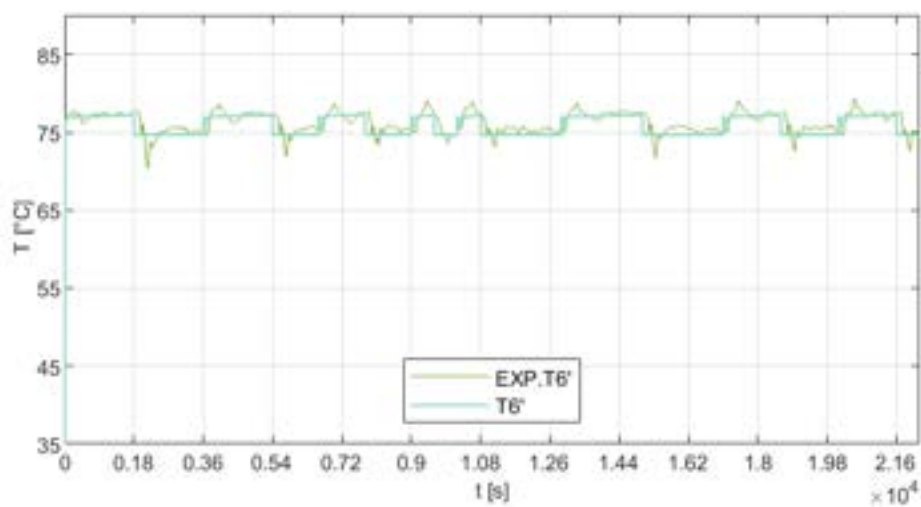


Figura 3.44. Prova dinamica 3. Temperatura T6' del sistema di generazione in seguito allo scambio termico con l'utenza

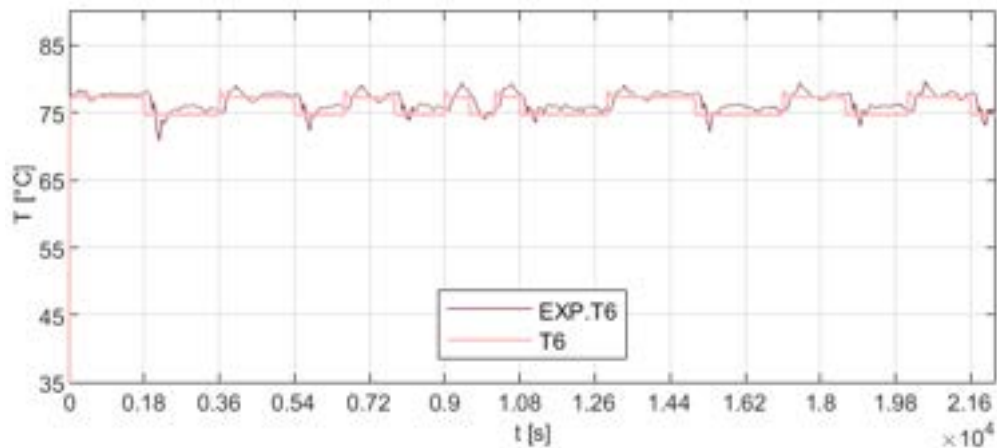


Figura 3.45. Prova dinamica 3. Temperatura T6 successiva al mescolamento tra la corrente a temperatura T5 e la corrente a temperatura T6'

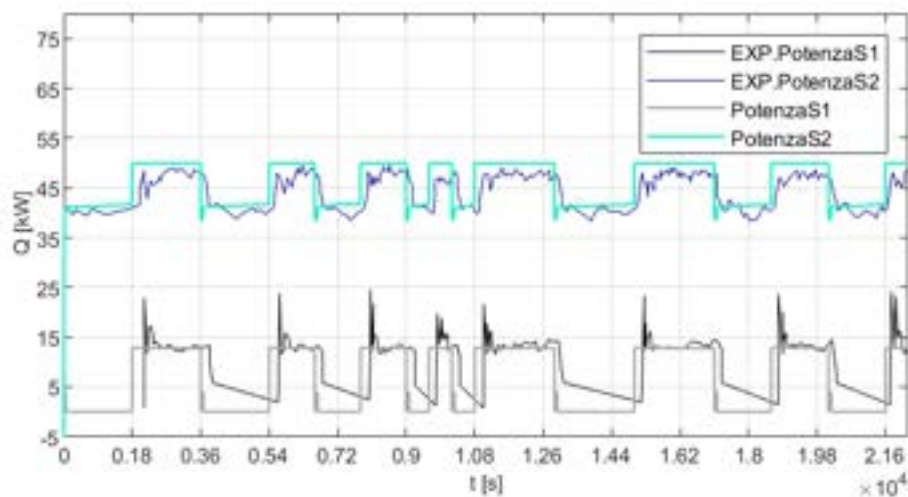


Figura 3.46. Prova dinamica 3. Potenza termica scambiata in S1 (rete di teleriscaldamento-utenza) e in S2 (sistema di generazione-utenza)

Per completezza viene riportato l'andamento dell'efficienza sia per lo scambiatore S1 che per lo scambiatore S2 in condizioni di off-design. Come si può notare da Figura 3.47, l'efficienza di S1 è nulla quando lo scambiatore è inattivo e sale a circa 0,93 quando è necessario lo scambio tra rete di teleriscaldamento e utenza. Mentre l'efficienza dello scambiatore S2 rimane sempre circa uguale a 0,4 con delle variazioni di qualche decimo in condizioni di richiesta massima.

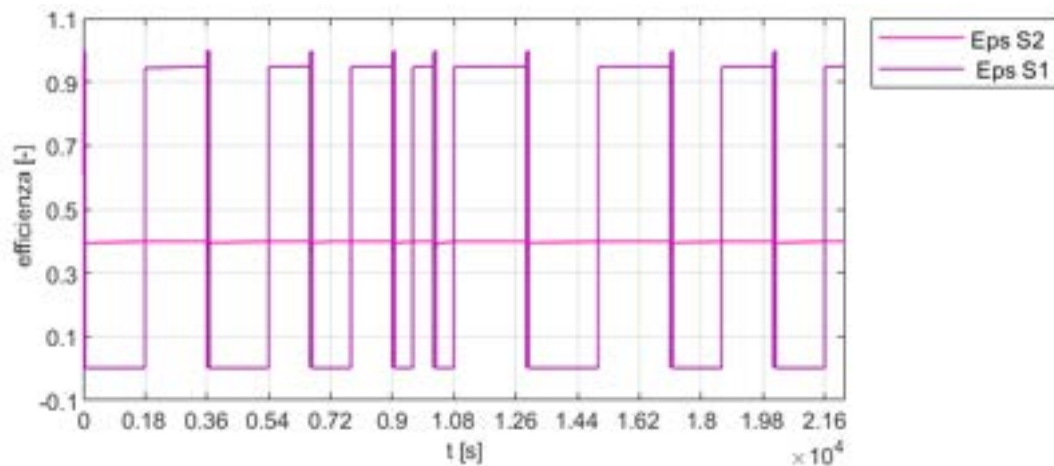


Figura 3.47. Prova dinamica 3. Efficienza in off-design dello scambiatore S1 e dello scambiatore S2

3.1.3.4 Prova dinamica 4

La prova dinamica 4 prevede il funzionamento degli scambiatori S1 (teleriscaldamento-utenza), S2 (sistema di generazione-utenza) ed S3 (sistema di generazione-teleriscaldamento) per diversi livelli di richiesta termica dell'utenza variabile tra richiesta in condizione di design, minima e nulla e diversi livelli di produzione da parte del sistema di generazione. Tale prova può essere considerata come una combinazione degli scenari 3 e 4 simulati in condizioni stazionarie, nei quali si era valutata l'interazione, invariante nel tempo, tra S1 ed S2 (scenario 4) e tra S2 ed S3 (scenario 3); in questo caso invece si indaga l'interazione contemporanea dei tre scambiatori che potrà variare nel tempo per via delle condizioni dinamiche.

I parametri inerenti alla simulazione che sono stati selezionati sono:

- Stop time: 25.200 secondi
- Interval length: 25.200 secondi
- Tolerance: 0,1

La tolleranza citata è la più bassa tra le tolleranze che portano a convergenza; con valori inferiori si verificano problemi numerici. Nonostante questo, 0.1 è in questo caso un valore di tolleranza sufficiente per ottenere risultati in linea con le prove sperimentali.

In Figura 3.48 e Figura 3.49 sono riportati gli andamenti della variazione dinamica di T8 e di M8 che rappresentano le possibili condizioni di lavoro dell'utenza. In questa prova vengono simulati anche diversi livelli di produzione del sistema di generazione che vengono rappresentati da una variazione dinamica della portata M5 il cui andamento è riportato in Figura 3.50.

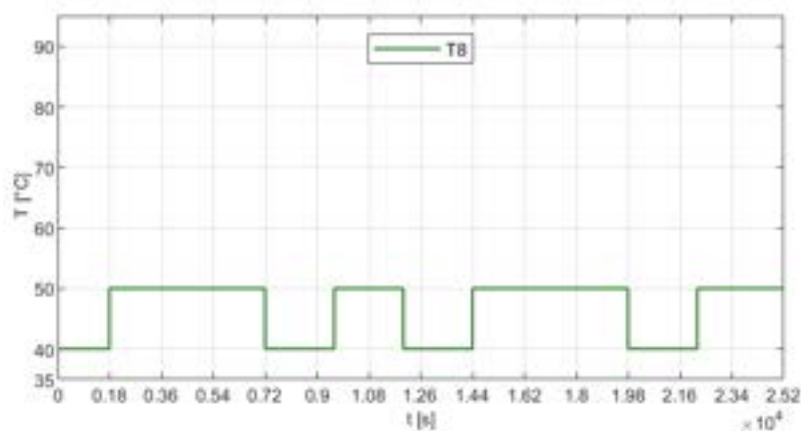


Figura 3.48. Prova dinamica 4. Variazione dinamica della temperatura T8 di ritorno dall'utenza

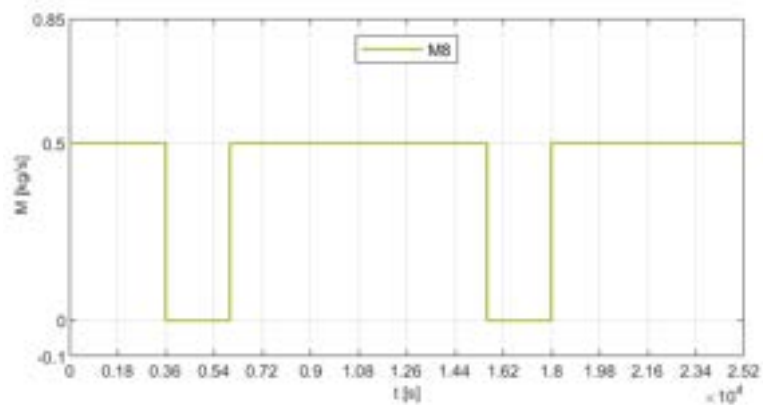


Figura 3.49. Prova dinamica 4. Variazione dinamica della portata M8 di ritorno dall'utenza

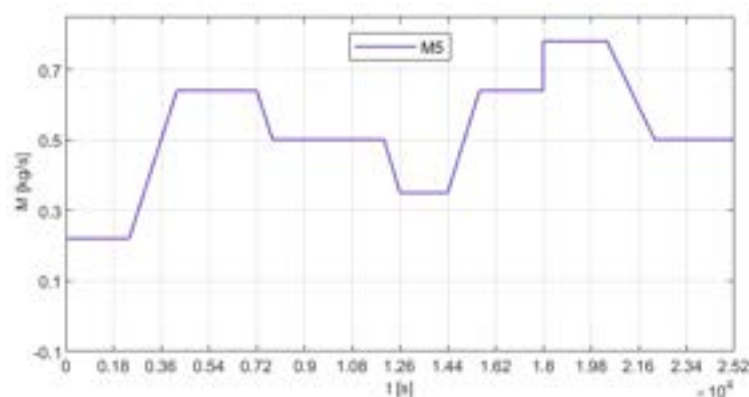


Figura 3.50. Prova dinamica 4. Portata M5 di mandata del sistema di generazione distribuita

Questo scenario è caratterizzato dalla variazione dinamica di tre grandezze e dall'interazione di tutti e tre gli scambiatori e di conseguenza di tutti i tre i controllori PI. Tali condizioni portano ad una discreta sensibilità sui parametri che governano i sistemi di controllo, per quanto riguarda il controllore PID 2 (controllore della temperatura T9) sono stati individuati i seguenti valori per la costante di guadagno e per la costante di tempo del blocco integratore: $K = 2,5$ e $T_i = 130$ secondi. Con valori inferiori in particolare $K = 1/100$ e $T_i = 100$ secondi si sono ottenute maggiore rapidità di risposta negli istanti iniziali, ma anche notevoli sovraelongazioni in corrispondenza delle variazioni dinamiche di T8, M8 e M5 con tempo di assestamento troppo elevati; pertanto si è preferito scegliere la coppia (K,Ti) che garantisse maggiore precisione sulle variazioni dinamiche a discapito di uno scostamento rispetto al riferimento nei primi istanti di tempo. Infatti come si può notare in Figura 3.51, la temperatura T9 sale lentamente nei primi 30 minuti e avrebbe bisogno di qualche altro minuto per raggiungere la condizione di regime. Da notare che negli istanti di tempo in cui la richiesta dell'utenza è nulla in quanto non si ha portata ($M8 = 0$), la temperatura T9 si porta al valore di T8 perché lo scambiatore S2 (sistema di generazione-utenza) è inattivo. Mentre quando la portata è non nulla e la richiesta è minima ($T8 = 50$ °C), S1 è attivo e il controllore è in grado di portare T9 al valore di riferimento (60 °C); quando invece la richiesta è in design ($T8 = 40$ °C), la produzione del sistema di generazione non è sufficiente, T9 è inferiore al set point e ci si aspetta l'attivazione dello scambiatore S1.

In Figura 3.52 è riportata la temperatura T6' in uscita dallo scambiatore S2 lato sistema di generazione. Come è già stato rilevato nello scenario 3 in condizioni stazionarie, la temperatura T6' risulta essere di circa 4 °C superiore in media nel calcolo numerico rispetto ai risultati sperimentali quando la richiesta dell'utenza è minima ($T8 = 50$ °C), mentre lo scostamento non è più rilevante quando la richiesta è in design ($T8 = 40$ °C). Infine si può notare che quando la portata dell'utenza è nulla, essendo inattivo S2, si ha che T6' corrisponde alla temperatura di mandata del sistema di generazione ($T5 = 90$ °C) e ci si aspetta che in tali condizioni venga attivato lo scambiatore S3 per cedere il surplus del sistema di generazione alla rete di teleriscaldamento.

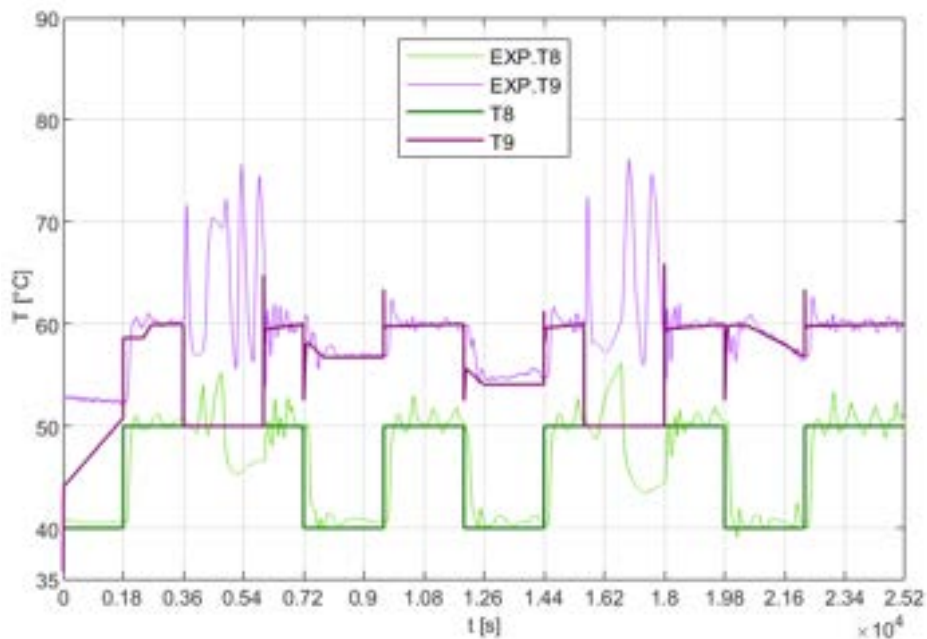


Figura 3.51. Prova dinamica 4. Temperatura T8 di ritorno dall'utenza e temperatura T9 dell'utenza in seguito allo scambio termico con il sistema di generazione

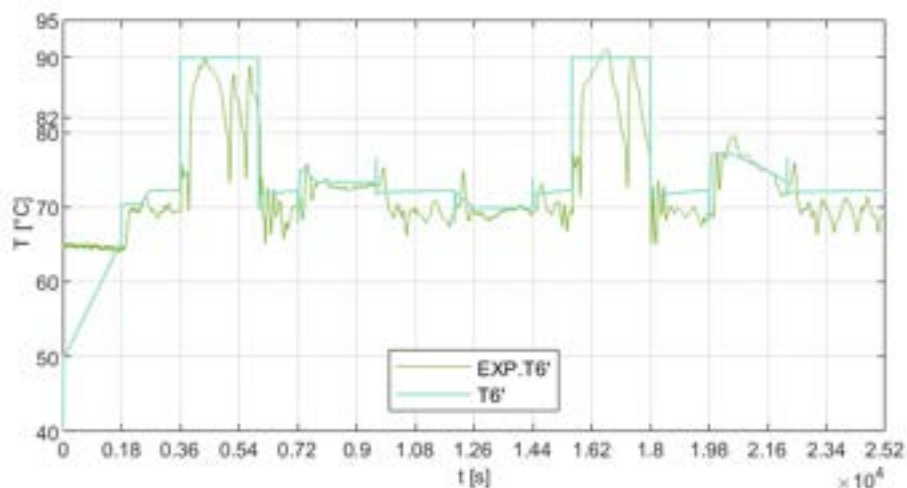


Figura 3.52. Prova dinamica 4. Temperatura T6' del sistema di generazione in seguito allo scambio termico con l'utenza

In Figura 3.53 è riportato l'andamento della temperatura T6 del sistema di generazione successiva al mescolamento tra la corrente a temperatura T5 e la corrente in uscita da S2 (a temperatura T6') in seguito allo scambio termico con l'utenza. Per confrontare l'andamento sperimentale e numerico di tale grandezza è importante considerare i valori raggiunti dalla temperatura T5. Infatti nel modello numerico T5 è una condizione al contorno e quindi mantiene il suo valore di riferimento (90 °C) per tutto il corso della simulazione, mentre nelle analisi sperimentali T5 presenta dei picchi che si ripercuotono sulla temperatura T6 essendo ottenuta dal mescolamento con T5 (Figura 3.54).

In Figura 3.55 è riportato l'andamento della temperatura T2' della rete di teleriscaldamento in uscita dallo scambiatore S1 in seguito allo scambio termico con l'utenza. Quando S1 non è attivo non vi è alcuna potenza scambiata e quindi non vi è alcuna differenza di temperatura tra fluido in ingresso e in uscita; per questo motivo T2' coincide con T9 (60 °C).

In Figura 3.56 è riportato l'andamento della temperatura T2; quando lo scambiatore S1 è inattivo T2 assume nel modello numerico il valore stabilito dalle condizioni al contorno. . Mentre quando S1 è attivo T2 si ottiene dal mescolamento tra la corrente a temperatura T1 e quella a temperatura T2'. Essendoci nell'andamento

sperimentale di T1 dei picchi rispetto al valore di riferimento (Figura 3.57), lo stesso si risconterà sull'andamento di T2.

In Figura 3.58 è riportato l'andamento della temperatura T10 di mandata all'utenza. Se la richiesta è nulla T10 coincide con T8 (50 °C) perché sia S1 che S2 sono inattivi. Se la portata dell'utenza è non nulla, T10 raggiunge sempre il proprio valore di set-point (60 °C): in particolare viene regolata dal PID 1 quando T8 = 40 °C e si attiva lo scambiatore S1, mentre coincide con T9 quando la richiesta è minima (T8 = 50 °C) e non è necessario attivare lo scambio con la rete di teleriscaldamento.

In Figura 3.59 è mostrata la portata M7 del sistema di generazione (segue l'andamento di riferimento di M5) che si occupa di scambiare potenza termica in S3 con la rete di teleriscaldamento se il vincolo sulla temperatura T6 è rispettato.

In Figura 3.60 è riportato l'andamento della temperatura T3. Come anticipato, l'attivazione dello scambiatore S3 dipende dal valore raggiunto da T6, che è diverso nel caso numerico rispetto a quello sperimentale a causa dell'andamento irregolare di quest'ultimo. Pertanto T3 raggiunge il valore di riferimento (50 °C) in alcuni istanti di tempo sia nel caso numerico che sperimentale, mentre in altri solo nel caso sperimentale. Infine, quando S3 non è attivo, il modello numerico assegna a T3 la temperatura definita dalle condizioni al contorno.

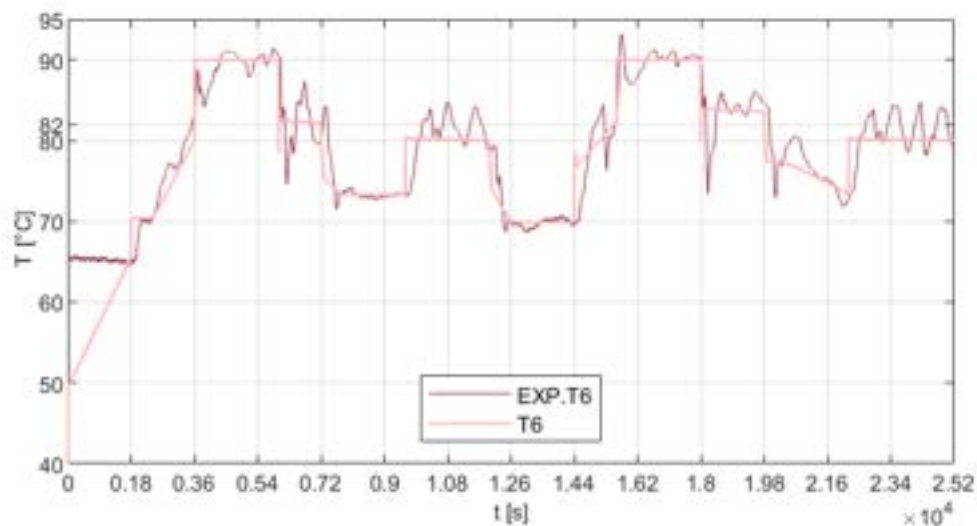


Figura 3.53. Prova dinamica 4. Temperatura T6 successiva al mescolamento tra la corrente a temperatura T8 e la corrente a temperatura T6'

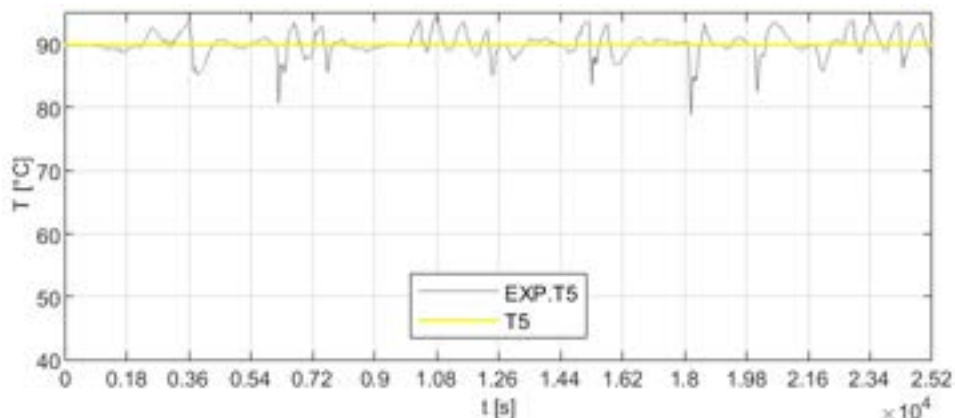


Figura 3.54. Prova dinamica 4. Temperatura T5 di mandata dal sistema di generazione distribuita

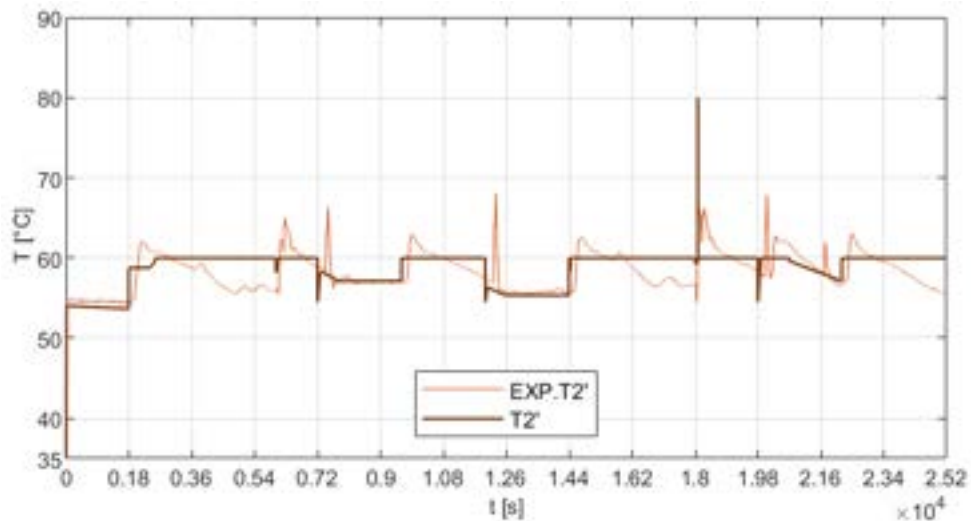


Figura 3.55. Prova dinamica 4. Temperatura T2' successiva al mescolamento tra la corrente a temperatura T1 e la corrente a temperatura T2'

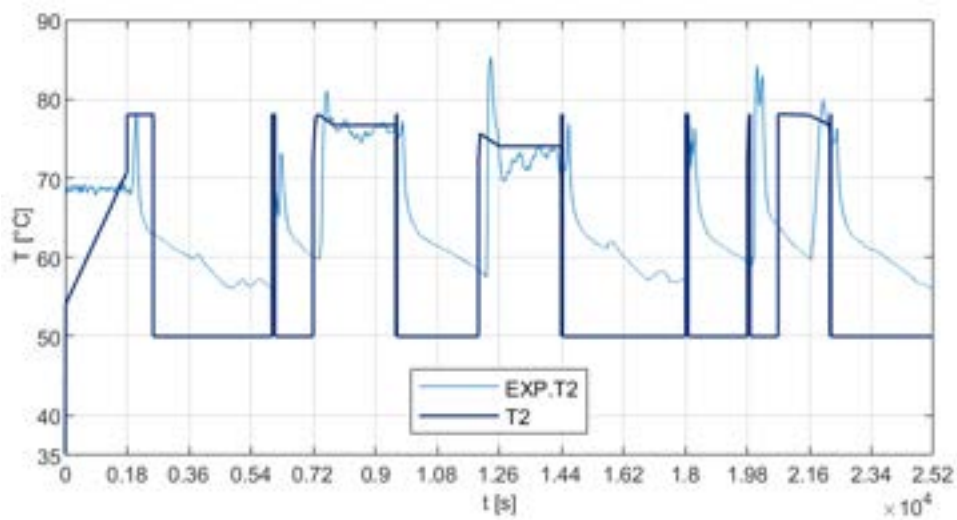


Figura 3.56. Prova dinamica 4. Temperatura T2 del sistema di generazione in seguito al mescolamento tra la corrente a temperatura T1 e la corrente a temperatura T2' in uscita da S1 (sistema di generazione-utenza)

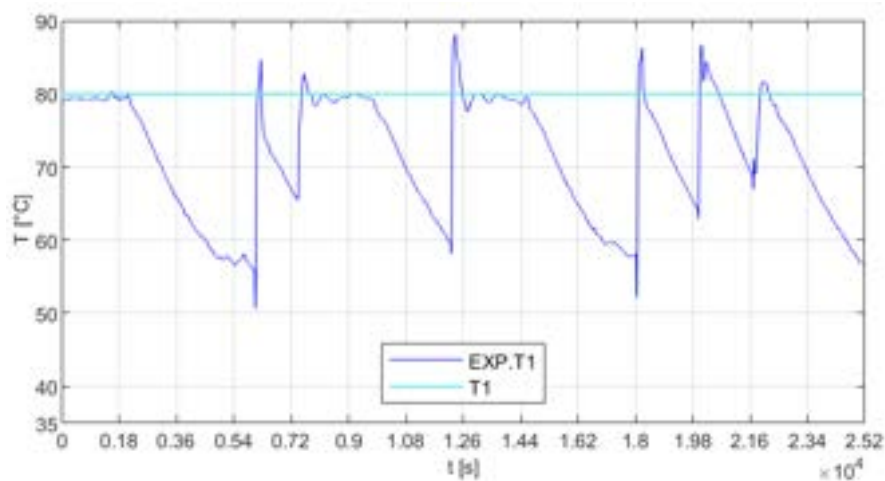


Figura 3.57. Prova dinamica 4. Temperatura T1 della corrente di mandata della rete di teleriscaldamento

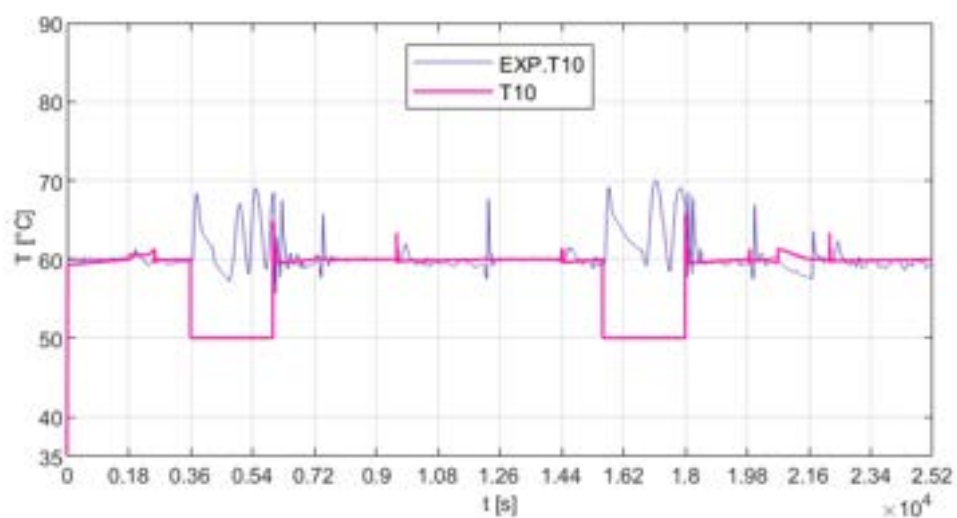


Figura 3.58. Prova dinamica 4. Temperatura T10 dell'utenza in seguito allo scambio termico con la rete di teleriscaldamento

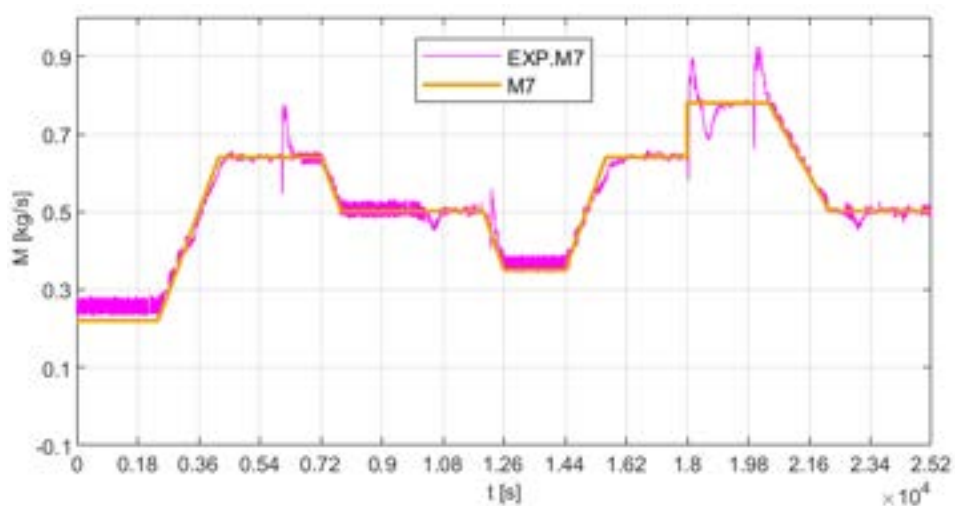


Figura 3.59. Prova dinamica 4. Portata M7 del sistema di generazione distribuita

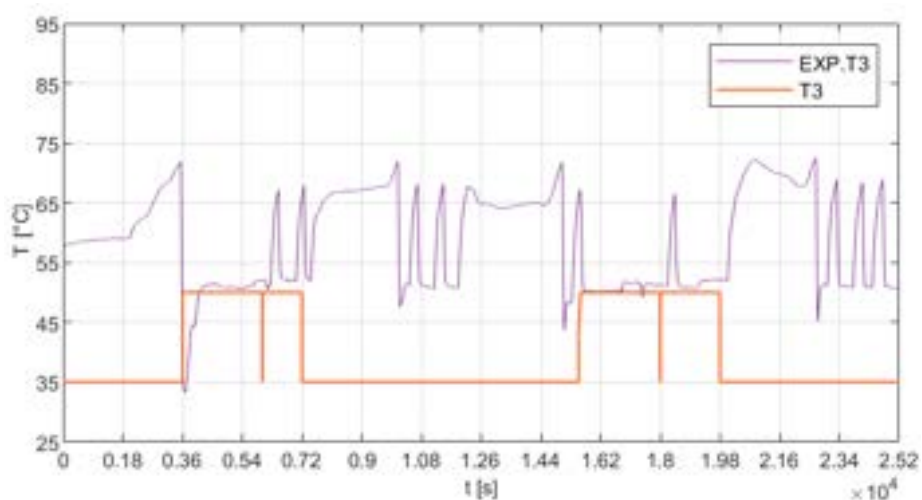


Figura 3.60. Prova dinamica 4. Temperatura T3 della corrente prelevata dal ritorno della rete di teleriscaldamento

In Figura 3.61 è riportato l'andamento della temperatura T4 del circuito della rete di teleriscaldamento in uscita dallo scambiatore S3, prima di essere reimpressa sulla mandata della rete. La temperatura T4 è in linea con l'andamento di T3: quando S3 è attivo, $T3 = 50\text{ °C}$ e il sistema di controllo sul ritorno della rete (blocco di controllo 3) regola la portata prelevata in modo da mantenere T4 al proprio valore di riferimento (80 °C).

In Figura 3.62 è mostrata la temperatura T7 del sistema di generazione in uscita da S3 in seguito allo scambio termico con la rete. L'andamento numerico e sperimentale per la temperatura T7 sono in linea, analogamente alla temperatura T6 prima dello scambio termico con la rete. L'unica eccezione è sui periodi di tempo in cui T6 sperimentale supera 82 °C e quindi si attiva lo scambio con S3, per poi portarsi ad una temperatura inferiore (cede potenza alla rete) e coincidente con la temperatura T6 calcolata numericamente che in quegli istanti coincide con T7 (S3 inattivo nel modello numerico).

In Figura 3.63 è riportato l'andamento della potenza termica scambiata in S1 (utenza-rete di teleriscaldamento) e in S2 (utenza-sistema di generazione). Come si può notare dagli andamenti sperimentali, nei primi 30 minuti della prova, lo scambiatore S1 fornisce circa 25 kW e lo scambiatore S2 i restanti 15 kW, per raggiungere la richiesta dell'utenza in condizioni di design (40 kW). Come già detto in precedenza, il controllore PID 2 del modello numerico presenta nel periodo iniziale della simulazione un tempo di salita piuttosto elevato e quindi anche la potenza fornita da S2 sarà inferiore rispetto al valore sperimentale e viene compensato dallo scambiatore S1, che fornisce la potenza necessaria a soddisfare la richiesta. Infine si può osservare che per portata dell'utenza nulla la potenza scambiata in S1 e in S2, calcolata numericamente è nulla (S1 e S2 inattivi), mentre se la portata M8 non è nulla l'andamento numerico segue quello sperimentale, a meno dell'incertezza di misura.

Infine in Figura 3.64 è riportato l'andamento della potenza scambiata in S3. Si nota che l'andamento numerico segue quello sperimentale, ma nel corso delle prove sperimentali lo scambiatore è attivo anche in periodi di tempo in cui il modello non lo prevede e questo si spiega con le considerazioni fatte in precedenza sui picchi di T5 e sulla temperatura T6.

Per completezza viene riportato l'andamento dell'efficienza in condizioni di off-design calcolata dal modello numerico, per lo scambiatore S1 (Figura 3.65), S2 (Figura 3.66) ed S3 (Figura 3.67) i cui andamenti seguono quelli delle potenze. Quando lo scambiatore S1 è inattivo l'efficienza è nulla mentre varia tra 0,95 e 0,98 circa quando è attivo. L'efficienza di S2 varia da 0,32 a 0,50 circa; quando lo scambiatore è inattivo il modello numerico porta l'efficienza al valore unitario perché le temperature di ingresso e uscita di entrambi i fluidi sono coincidenti. L'efficienza di S3 è nulla quando lo scambiatore è inattivo.

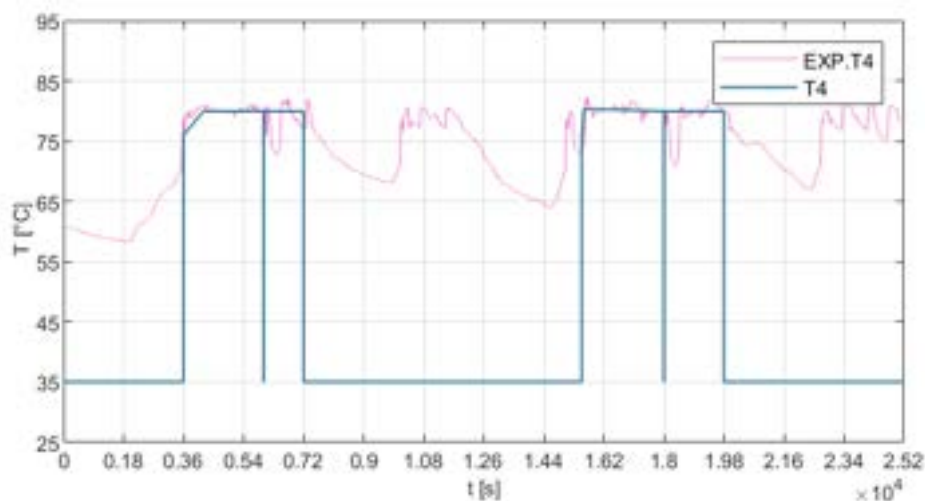


Figura 3.61. Prova dinamica 4. Temperatura T4 della corrente immessa sulla mandata della rete di teleriscaldamento in seguito allo scambio termico con il sistema di generazione

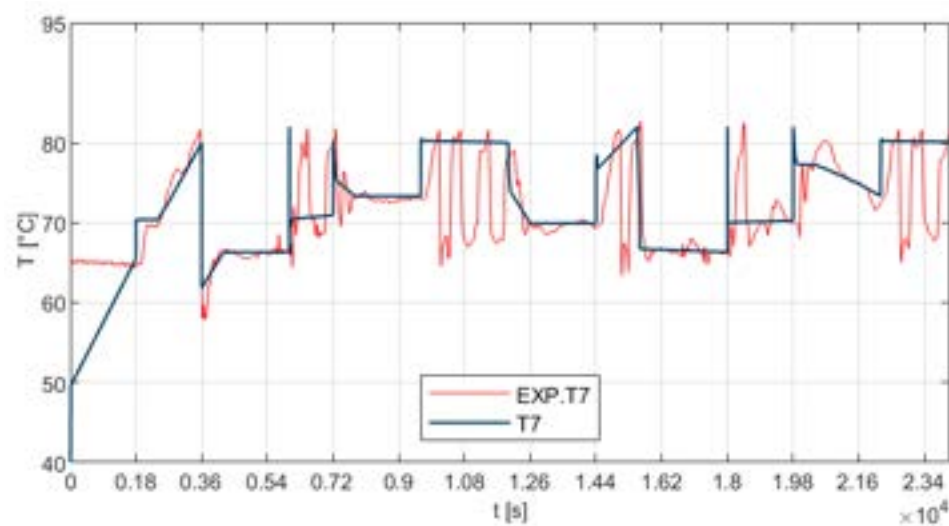


Figura 3.62. Prova dinamica 4. Temperatura T7 di ritorno del sistema di generazione in seguito allo scambio termico con la rete di teleriscaldamento

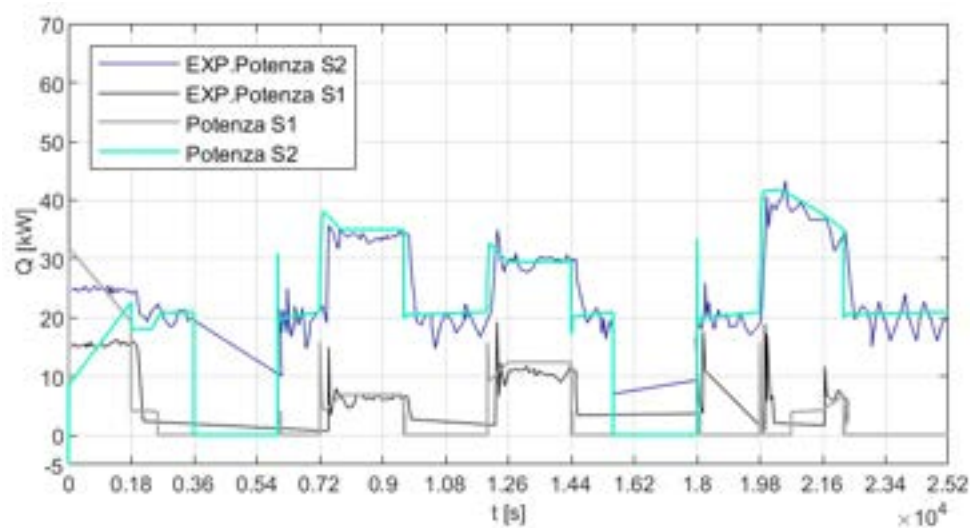


Figura 3.63. Prova dinamica 4. Potenza termica scambiata in S1 e in S2

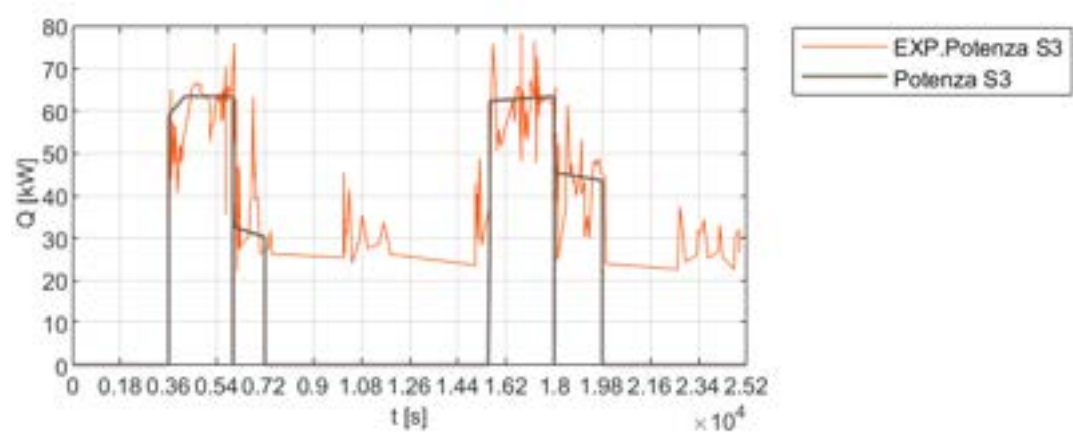


Figura 3.64. Prova dinamica 4. Potenza termica scambiata in S3

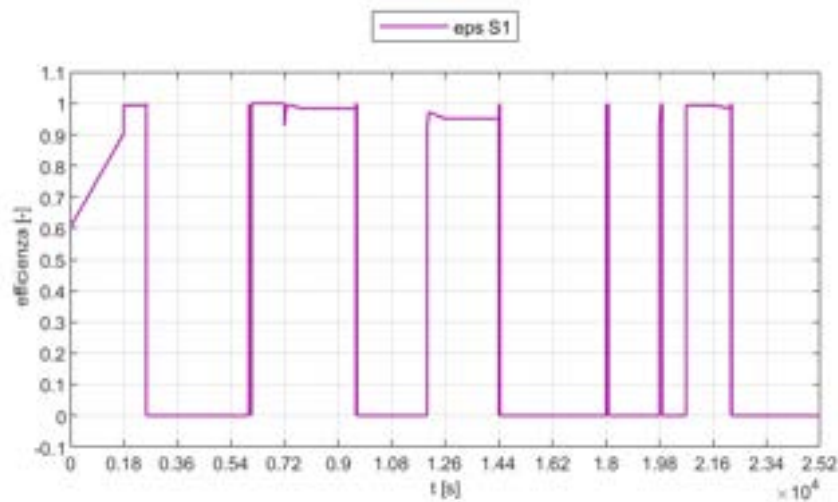


Figura 3.65. Prova dinamica 4. Efficienza in condizioni di off-design dello scambiatore S1

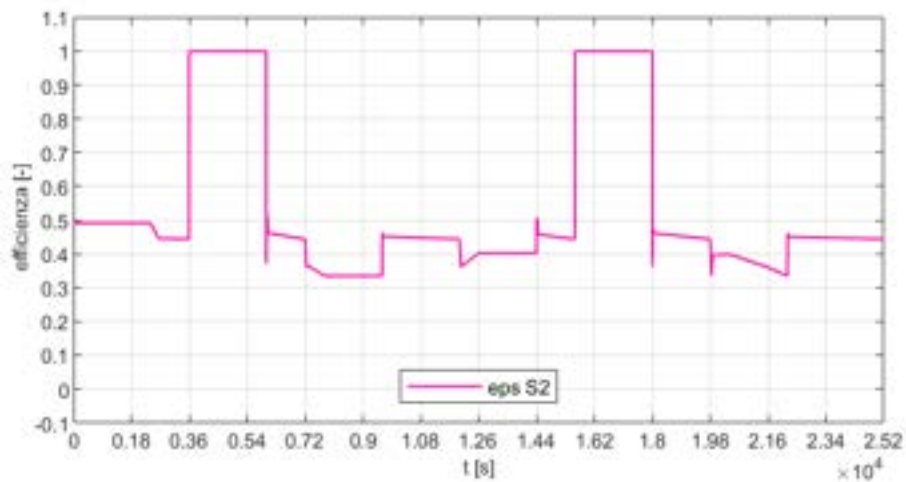


Figura 3.66. Prova dinamica 4. Efficienza in condizioni di off-design dello scambiatore S2

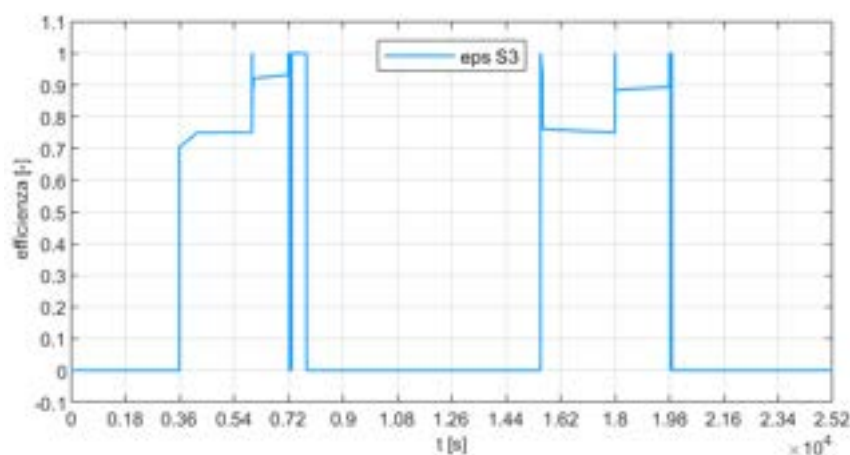


Figura 3.67. Prova dinamica 4. Efficienza in condizioni di off-design dello scambiatore S3

3.1.3.5 Prova dinamica 5

La prova dinamica 5 prevede il funzionamento del solo scambiatore S3 (sistema di generazione - teleriscaldamento) per diversi livelli di produzione del sistema di generazione. Tale prova può essere considerata come una variante dinamica dello scenario 5 simulato in regime stazionario. Infatti l'utenza si

trova in condizioni di richiesta nulla, ma il sistema di generazione ha una produzione non nulla che può cedere alla rete di teleriscaldamento attivando lo scambio termico su S3. L'andamento della variazioni dinamica della portata del sistema di generazione ($M5 = M7$) è riportato in Figura 3.68.

I parametri inerenti alla simulazione che sono stati selezionati sono:

- Stop time: 25.200 secondi
- Interval length: 25.200 secondi
- Tolerance: 0,0001

Il modello è in grado di simulare anche con tolleranze più basse, ma si è scelto il valore di default in quanto è sufficiente a raggiungere la precisione desiderata.

In Figura 3.69 è riportata la portata $M5 (= M7)$ del sistema di generazione in ingresso allo scambiatore S3 (sistema di generazione-rete) e come si può notare l'andamento sperimentale è circa coincidente con quello numerico e non presenta notevoli oscillazioni.

In Figura 3.70 è riportato l'andamento della temperatura T6 e T7 del sistema di generazione in ingresso e in uscita da S3 rispettivamente. Come si può notare, l'andamento sperimentale è in linea con quello numerico ad eccezione degli istanti di tempo in cui T6 presenta dei picchi discendenti rispetto al valore di riferimento ($90\text{ }^{\circ}\text{C}$) e di conseguenza negli stessi periodi temporali anche la temperatura T7 risulta inferiore rispetto al valore ottenuto con il modello numerico.

In Figura 3.71 è riportato l'andamento della temperatura T3 della corrente prelevata dal ritorno della rete di teleriscaldamento e della temperatura T4 in uscita dallo scambiatore S3 in seguito allo scambio termico con il sistema di generazione. La temperatura T3 misurata sperimentalmente segue il valore di riferimento ($50\text{ }^{\circ}\text{C}$) e anche la temperatura T4 presenta oscillazioni poco significative rispetto al valore di set point ($80\text{ }^{\circ}\text{C}$). Per quanto riguarda l'andamento numerico di T4 si può notare che la temperatura si porta rapidamente a circa $79\text{ }^{\circ}\text{C}$, per poi raggiungere con precisione il valore nominale ($80\text{ }^{\circ}\text{C}$) dopo circa 30 minuti. Tale andamento è il risultato di un compromesso nella scelta dei parametri che caratterizzano il controllore PID 3 del blocco di controllo 3. La costante di guadagno che è stata scelta è 0,6, mentre la costante di tempo del blocco integratore è 1 secondo; in questo modo, nonostante ci sia uno scostamento di circa $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ nei primi istanti di tempo, si ottiene una risposta molto rapida e priva di oscillazioni e sovraelongazioni durante le variazioni dinamiche.

In Figura 3.72 è riportato l'andamento della portata M3 prelevata dal ritorno della rete di teleriscaldamento il quale segue quello della portata M7 del sistema di generazione. Da notare che, avendo misurato una temperatura T3 di un paio di gradi superiore rispetto al riferimento, ad eccezione di un breve periodo di tempo, negli stessi istanti anche la portata M3 misurata sperimentalmente avrà un valore leggermente superiore. La Figura 3.73 mostra la potenza termica scambiata in S3 tra il sistema di generazione e la rete di teleriscaldamento.

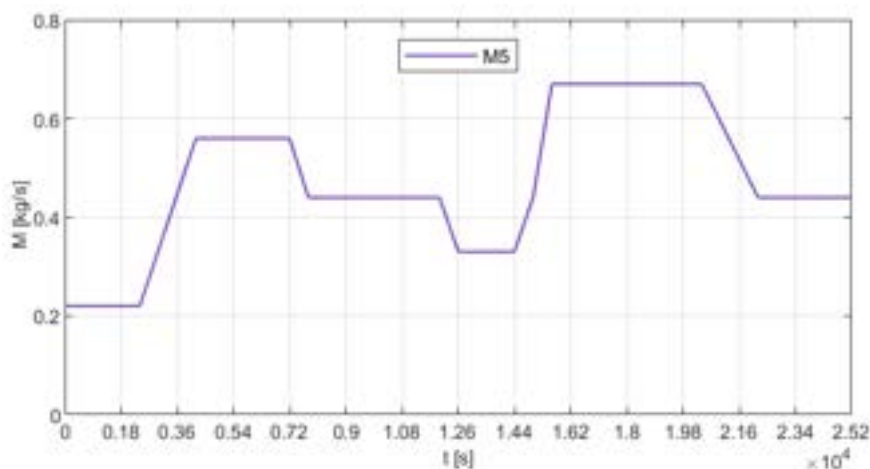


Figura 3.68. Prova dinamica 5. Variazione dinamica della portata M5 di mandata dal sistema di generazione

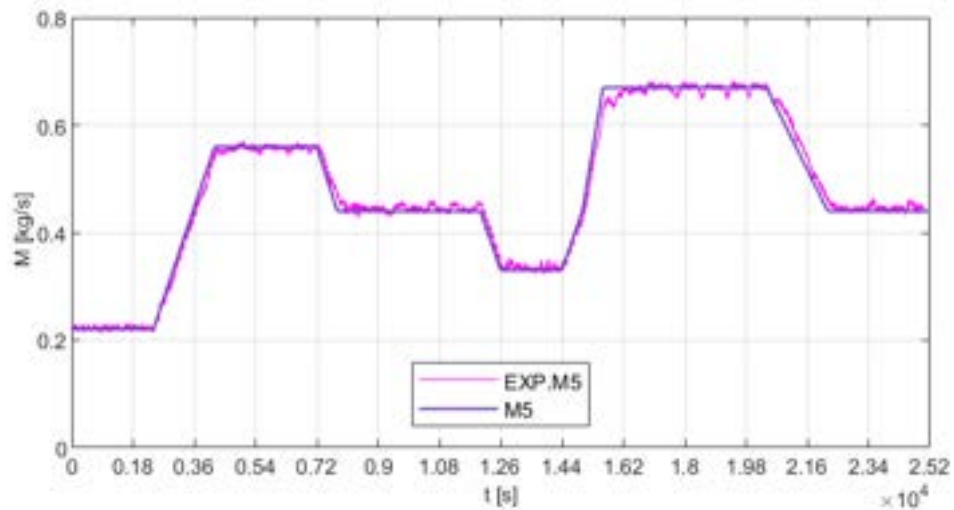


Figura 3.69. Prova dinamica 5. Confronto tra l'andamento numerico e sperimentale della portata M5 di mandata del sistema di generazione

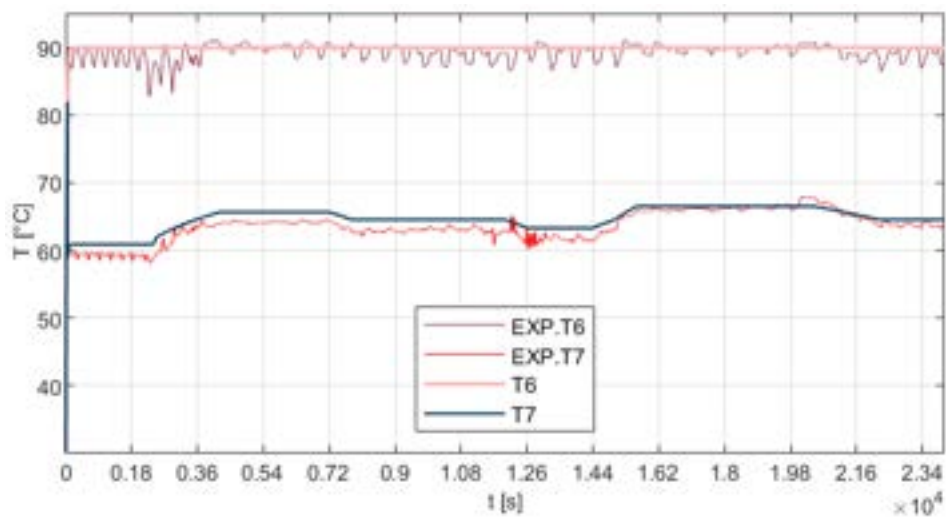


Figura 3.70. Prova dinamica 5. Temperatura T6 di mandata del sistema di generazione e temperatura T7 di ritorno del sistema di generazione in seguito allo scambio termico con la rete di teleriscaldamento

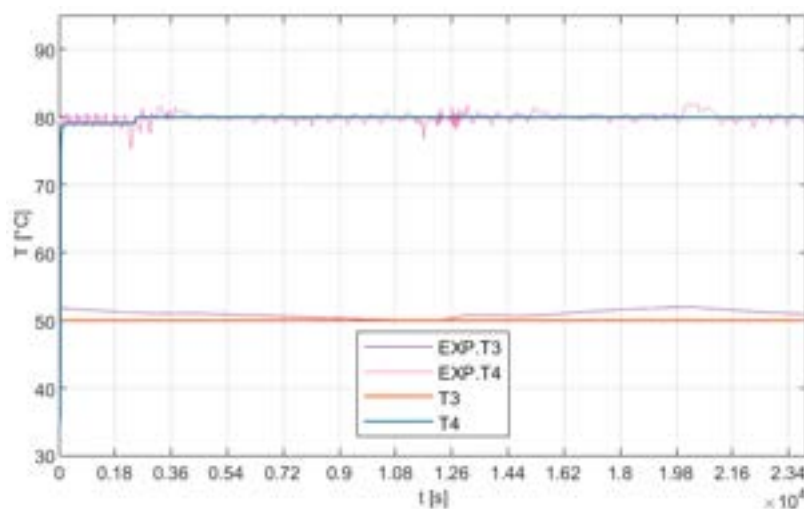


Figura 3.71. Prova dinamica 5. Temperatura T3 della corrente prelevata dal ritorno della rete di teleriscaldamento e temperatura T4 della corrente immessa nella mandata della rete di teleriscaldamento in seguito allo scambio termico con il sistema di generazione

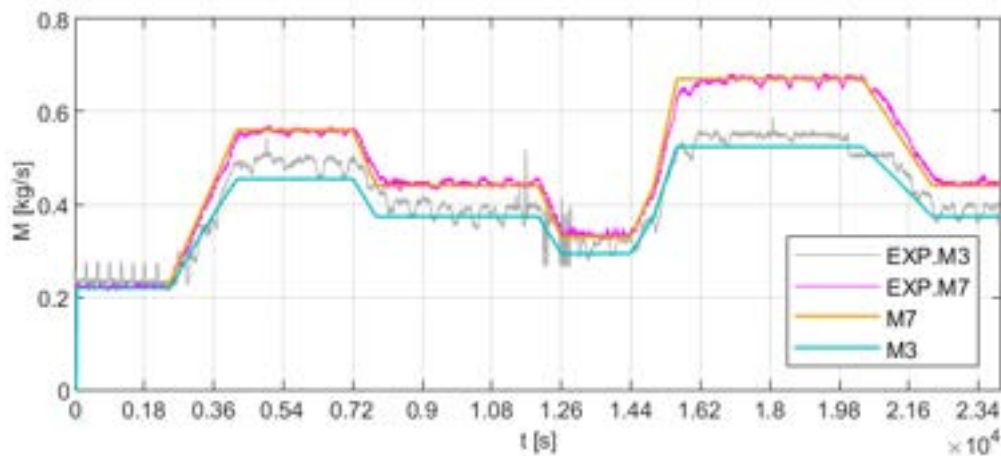


Figura 3.72. Prova dinamica 5. Portata M3 prelevata dal ritorno della rete di teleriscaldamento e portata M7 del sistema di generazione

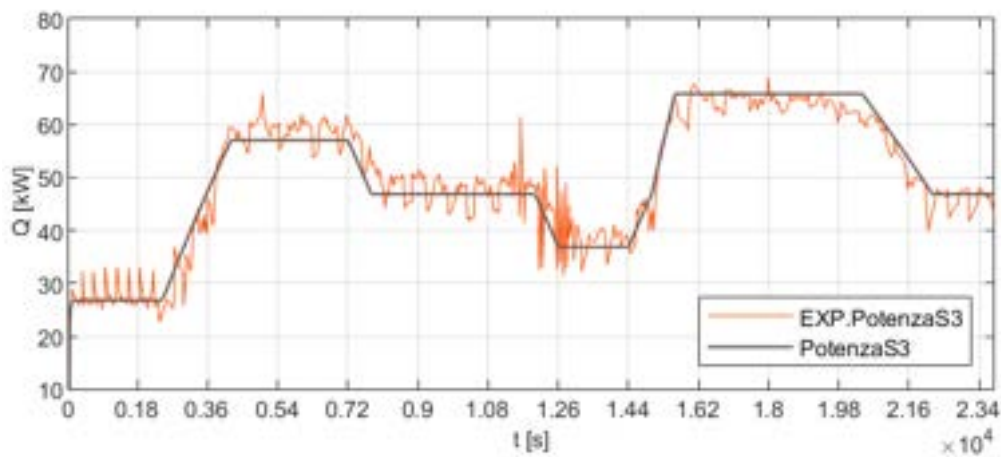


Figura 3.73. Prova dinamica 5. Potenza termica scambiata in S3 tra il sistema di generazione e la rete di teleriscaldamento

Per completezza è illustrato in Figura 3.74 l'andamento dell'efficienza dello scambiatore S3 (che segue l'andamento della temperatura T4, essendo T3 costante) in condizioni di off-design il quale si mantiene sempre tra 0,72 e 0,75 circa.

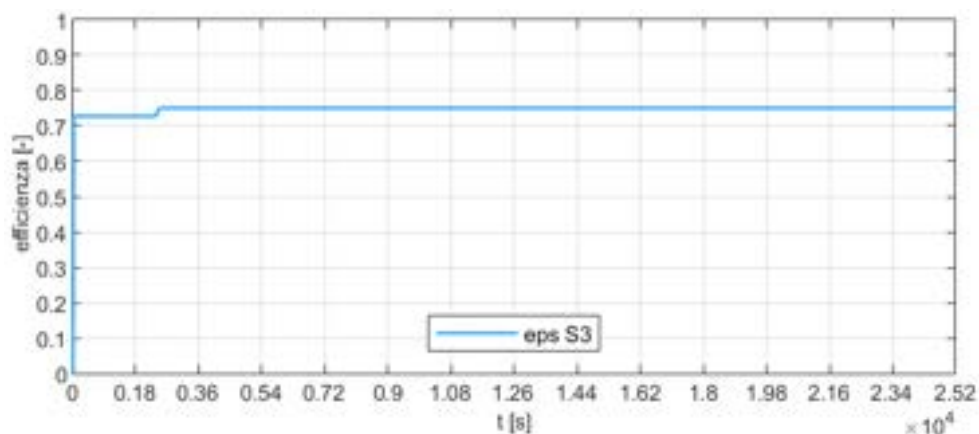


Figura 3.74. Prova dinamica 5. Efficienza in condizioni di off-design dello scambiatore S3

3.1.3.6 Prova dinamica 6

La prova dinamica 6 prevede il funzionamento degli scambiatori S1 (teleriscaldamento-utenza), S2 (sistema di generazione-utenza) ed S3 (sistema di generazione-teleriscaldamento) per diversi livelli di richiesta termica dell'utenza. Tale prova può essere considerata come una combinazione degli scenari 3 e 4 simulati in regime stazionario. In Figura 3.75 e Figura 3.76 è riportato l'andamento della variazione dinamica della portata M8 del circuito dell'utenza.

I parametri inerenti alla simulazione che sono stati selezionati sono:

- Stop time: 18.000 secondi
- Interval length: 18.000 secondi
- Tolerance: 0,0001

Il modello è in grado di simulare anche con tolleranze più basse, ma si è scelto il valore di default in quanto è sufficiente a raggiungere la precisione desiderata.

Da precisare che i grafici sperimentali che verranno riportati in seguito sono relativi al solo scambiatore S2, in quanto gli scambiatori S1 ed S3 si attivano solo per qualche minuto principalmente a causa delle oscillazioni che si hanno sul controllo della temperatura T5. Anche la portata M5 (= M7) di mandata del sistema di generazione (Figura 3.77) presenta un notevole picco rispetto al valore di riferimento (0,78 kg/s) nello stesso istante in cui si ha sulla temperatura T5.

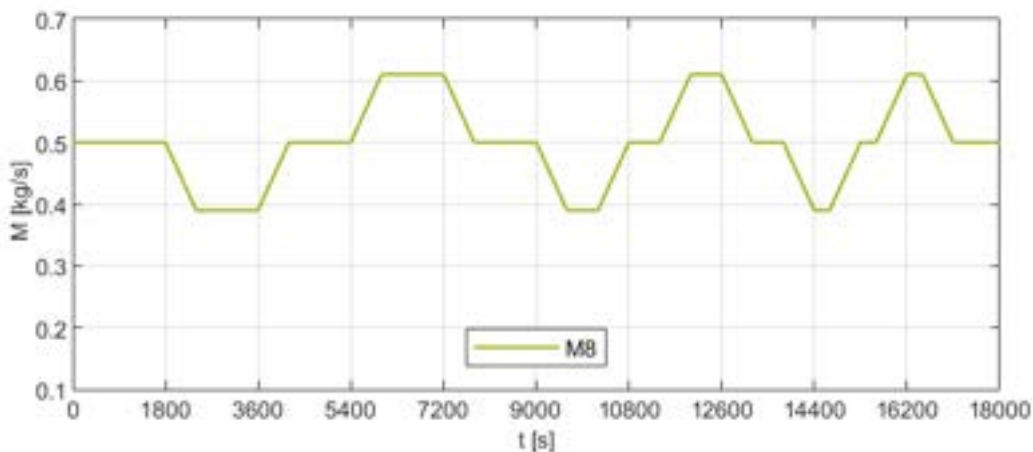


Figura 3.75. Prova dinamica 6. Variazione dinamica della portata M8 del circuito dell'utenza

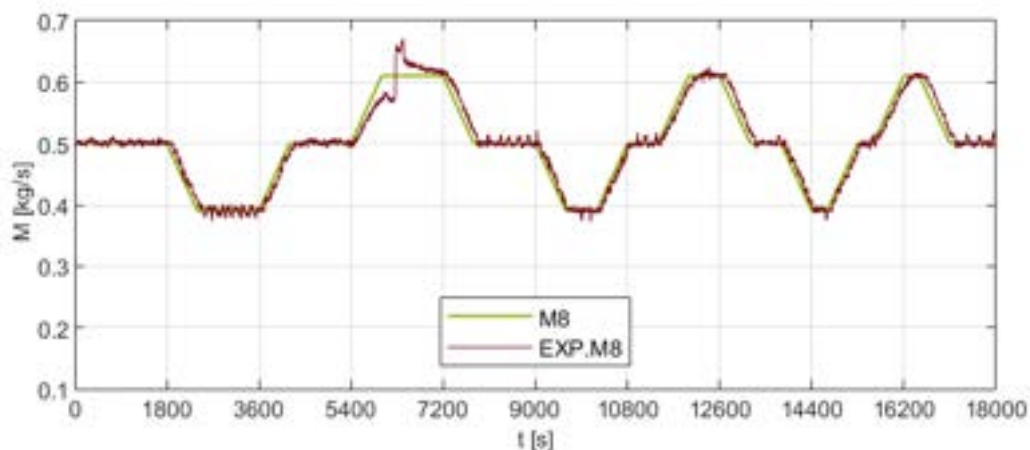


Figura 3.76. Prova dinamica 6. Portata M8 del circuito dell'utenza ottenuta nell'analisi sperimentale a confronto con il valore di riferimento

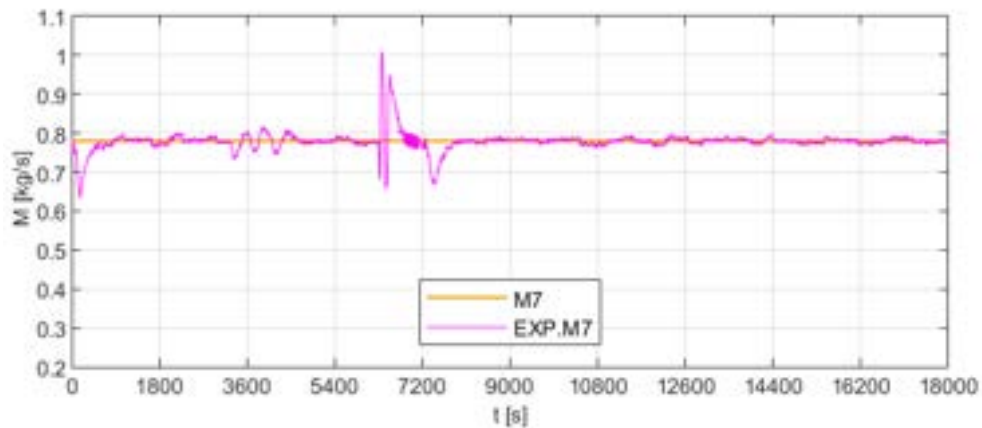


Figura 3.77. Prova dinamica 6. Portata M7 (=M5) di mandata del sistema di generazione

L'andamento della temperatura T5 del sistema di generazione è riportato in Figura 3.78, dove è possibile osservare due rilevanti oscillazioni: la prima dopo circa un'ora; la seconda dopo circa due ore, che porta la temperatura T5 fino a 6-7 °C al di sotto del valore di riferimento (90 °C). Anche la temperatura T6' presenta delle oscillazioni come conseguenza a quelle rilevate su T5. Poiché T5 nel modello numerico è costante tali oscillazioni non sono presenti nel corrispondente profilo, mentre la temperatura T6' ha un andamento irregolare sia nel caso sperimentale che numerico, dovuto al mancato raggiungimento del set point per la temperatura T9.

Infatti, come si può notare dalla Figura 3.79, la temperatura T9 è portata dal sistema di controllo al valore di riferimento (60 °C) durante la prova ad eccezione degli istanti di tempo in cui la portata dell'utenza M8 è massima; in quel caso T9 si discosta di qualche grado rispetto al set point.

L'andamento della temperatura T6 del sistema di generazione, derivante dal mescolamento tra la corrente a temperatura T5 e la corrente a temperatura T6', è riportato in Figura 3.80 con oscillazioni simili a quelle precedentemente descritte.

Le potenze termiche trasferite nello scambiatore S1, S2, ed S3 sono riportate in Figura 3.81. Come anticipato, per quanto riguarda l'andamento sperimentale degli scambiatori S1 ed S3 si può notare che essi si attivano solo per qualche minuto. Lo scambiatore S3 entra in gioco quando la temperatura T6 supera 82 °C, pertanto viene attivato solo in presenza del picco di temperatura che si verifica dopo circa un'ora; tale oscillazione non è stata osservata nell'andamento numerico infatti lo scambiatore S3 non si è mai attivato perché T6 non supera 82 °C. Mentre lo scambiatore S1 si attiva quando il sistema di generazione non è in grado di portare T9 al valore di riferimento (60 °C): come è stato mostrato in Figura 3.79 ci sono tre periodi di tempo in cui tale temperatura si discosta di qualche grado da 60 °C in particolare nel primo periodo. Nel modello numerico il valore limite oltre il quale entra in gioco lo scambio con la rete di teleriscaldamento è $T9 = 59,9$ °C, pertanto lo scambiatore S1 si attiva in tutti e tre i periodi citati. Il fatto che lo scambiatore S1 risulti attivo nell'analisi sperimentale solo nel primo periodo porta a ipotizzare che T9 non sia diminuita abbastanza nei successivi periodi, da superare il valore di riferimento del controllore PID 1 (si ricordi che sui controllori presenti sul prototipo della sottostazione è stato inserito un ciclo di isteresi).

Per completezza sono riportati gli andamenti dell'efficienza dei tre scambiatori di calore in condizioni di off-design calcolati con il modello numerico (Figura 3.82). Lo scambiatore S3 è sempre inattivo e quindi è stata calcolata un'efficienza nulla. Lo scambiatore S2 ha efficienza pari a 0,4 circa e cala di qualche decimo quando la portata dell'utenza M8 è massima e non è in grado di soddisfare da solo la richiesta dell'utenza; nello stesso momento si attiva lo scambiatore S1 che fornisce la potenza termica mancante lavorando con un'efficienza di 0,98 circa.

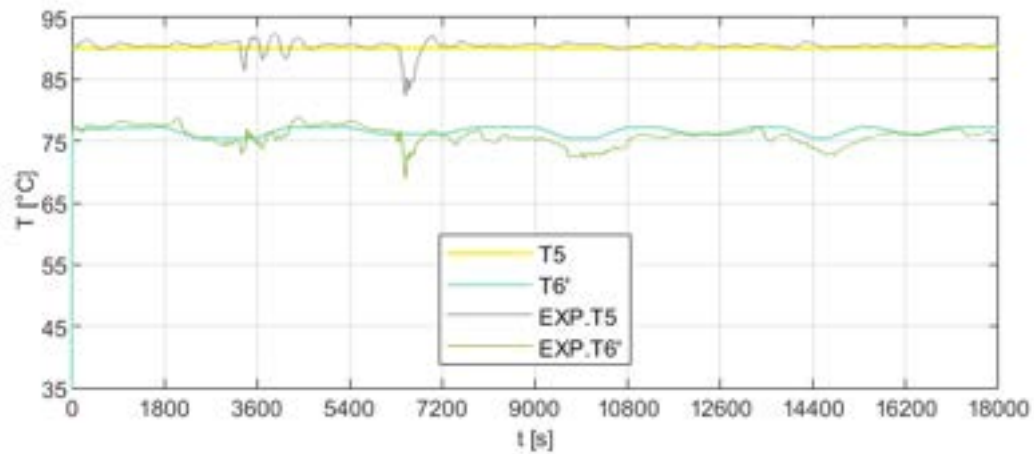


Figura 3.78. Prova dinamica 6. Temperatura T5 di mandata del sistema di generazione e temperatura T6' del sistema di generazione in uscita dallo scambiatore S2 in seguito allo scambio termico con l'utenza

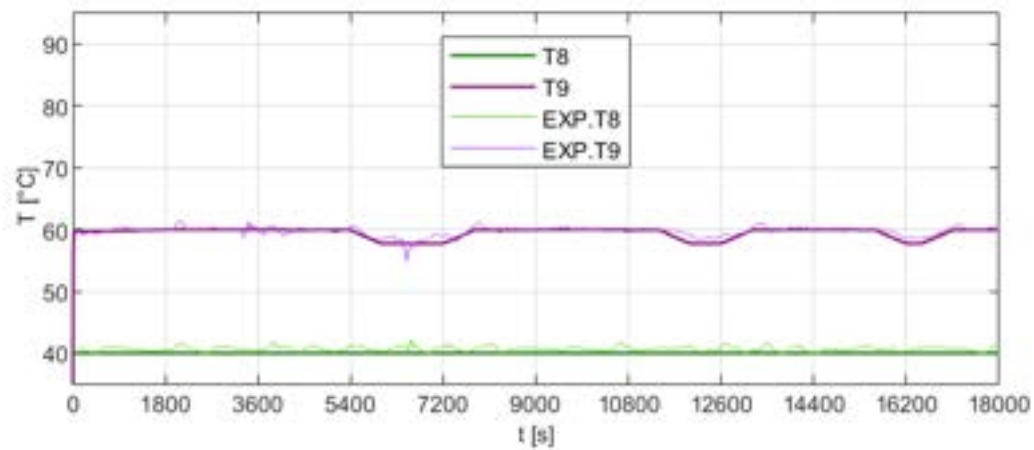


Figura 3.79. Prova dinamica 6. Temperatura T8 di ritorno dell'utenza e temperatura T9 dell'utenza in seguito allo scambio termico con il sistema di generazione

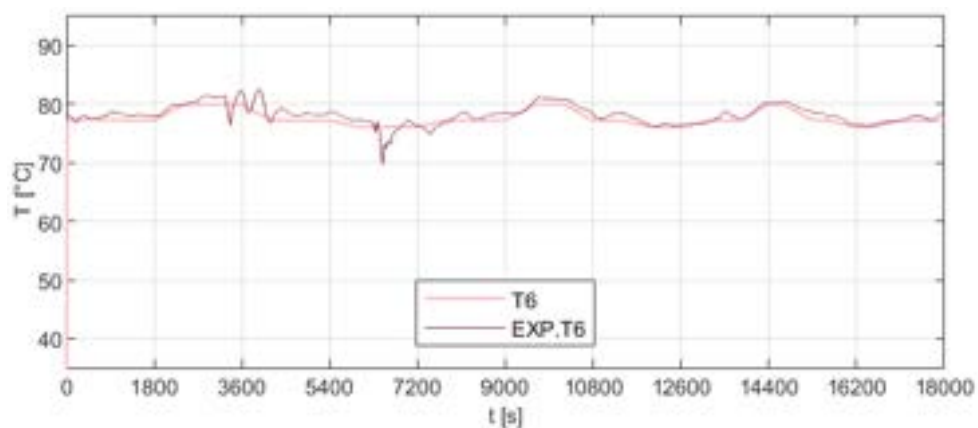


Figura 3.80. Prova dinamica 6. Temperatura T6 del sistema di generazione derivante dal mescolamento tra la corrente a temperatura T5 e la corrente a temperatura T6'

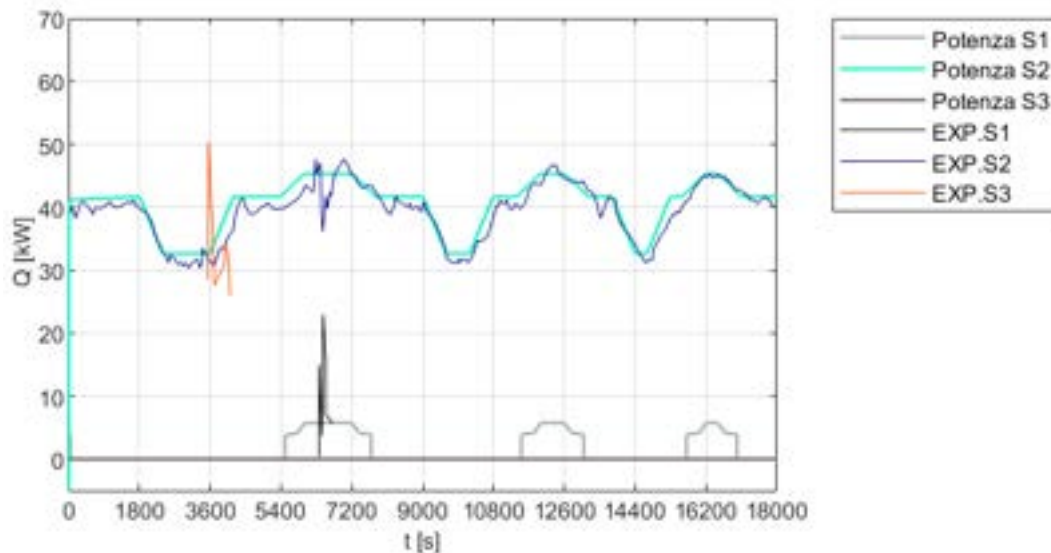


Figura 3.81. Prova dinamica 6. Potenze termiche scambiate in S1, S2 ed S3

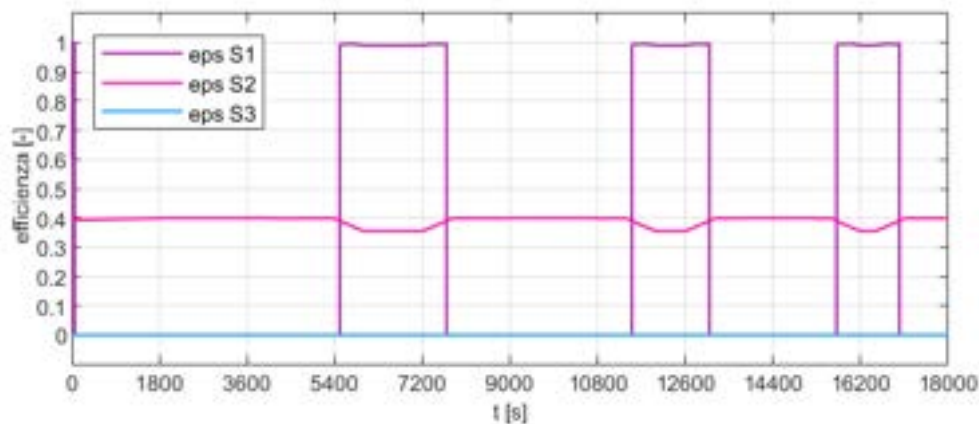


Figura 3.82. Prova dinamica 6. Efficienza in condizioni di off-design degli scambiatori S1, S2 ed S3

3.1.3.7 Prova dinamica 7

La prova dinamica 7 prevede il funzionamento del solo scambiatore S1 (teleriscaldamento-utenza) per diversi livelli di richiesta termica dell'utenza variabile tra richiesta minima, massima e in condizione di design. Tale prova può essere considerata come una riformulazione della prova dinamica 1 con delle variazioni di temperatura non a gradino, ma graduali con rampe di $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$ a crescere e a decrescere. La temperatura T_5 non è stata fissata a $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (valore nominale) perché lo scenario che si vuole simulare prevede il funzionamento del solo scambiatore S1 pertanto in presenza di una portata dell'utenza non nulla come in questo caso, l'unica possibilità per escludere lo scambiatore S2 e quindi anche S3 è quella di imporre una temperatura di mandata del sistema di generazione inferiore alla temperatura T_8 incrementata del salto minimo di temperatura ($10\text{ }^{\circ}\text{C}$). Come si può vedere dalla variazione dinamica della temperatura di ritorno dall'utenza (Figura 3.83, rappresentante i diversi livelli di richiesta termica), T_8 non scende mai sotto $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ pertanto impostando $T_5 = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ si è sicuri che i sistemi di controllo (blocco di controllo 2) escluderanno lo scambiatore S2 e quindi anche S1 rendendoli inattivi.

I parametri inerenti alla simulazione che sono stati selezionati sono:

- Stop time: 21.000 secondi
- Interval length: 21.000 secondi
- Tolerance: 0,0001

Il modello è in grado di simulare anche con tolleranze più basse, ma si è scelto il valore di default in quanto è sufficiente a raggiungere la precisione desiderata. In Figura 3.84 è riportata l'andamento numerico e misurato della portata M_8 del circuito dell'utenza.

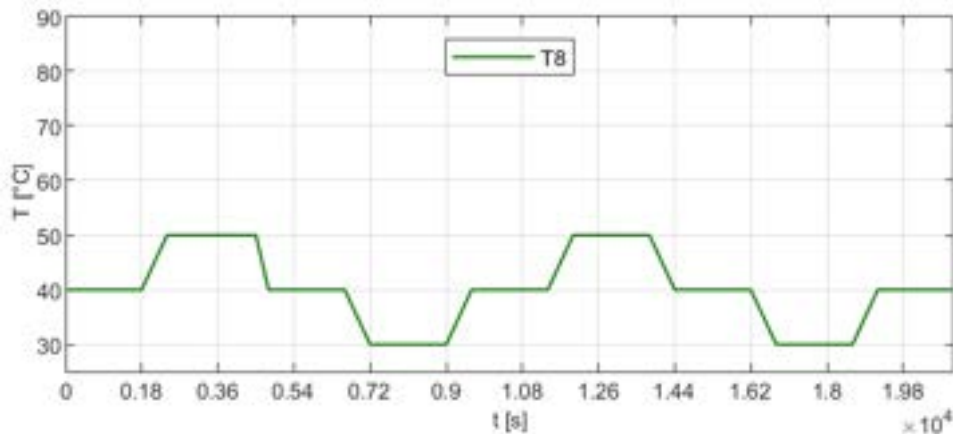


Figura 3.83. Prova dinamica 7. Temperatura T8 di ritorno dall'utenza

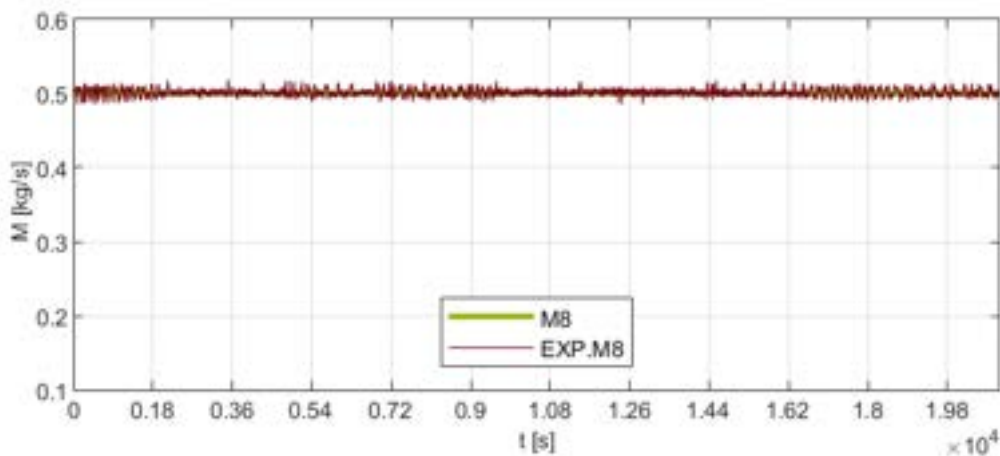


Figura 3.84. Prova dinamica 7. Portata M8 del circuito dell'utenza

In Figura 3.85 è riportato l'andamento della temperatura T8 e T9 del circuito dell'utenza. In questa prova lo scambiatore S2 (utenza-sistema di generazione) è inattivo, pertanto T8 e T9 sono coincidenti e infatti i due andamenti calcolati numericamente si sovrappongono. Per quanto riguarda gli andamenti sperimentali si nota un leggero ritardo rispetto a quelli numerici di riferimento, in particolare è stato misurato un $\Delta T8 = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ per 10 minuti che mediamente è la stessa differenza misurata nella prova dinamica 1. Tale scostamento si ripercuoterà sulle altre grandezze legate allo scambiatore S1 (utenza-rete di teleriscaldamento).

In Figura 3.86 è riportato l'andamento della temperatura T1 di mandata della rete di teleriscaldamento e della temperatura T2' della rete in uscita da S1. La temperatura T1 ottenuta sperimentalmente presenta continue oscillazioni rispetto al valore di riferimento con picchi che la portano ad avere un valore medio su tutta la prova di $79,37\text{ }^{\circ}\text{C}$. Infatti la temperatura T2' misurata sperimentalmente presenta un andamento circa coincidente con quello numerico e in alcuni tratti poco superiore.

Da notare che la curva relativa alla temperatura T2' ottenuta numericamente, negli istanti iniziali sale rapidamente oltre il valore che dovrebbe raggiungere; tale comportamento è legato al sistema di controllo che regola la temperatura di mandata dell'utenza. Infatti i parametri del controllore PID 1 che sono stati scelti sono $K = 1,3$ (guadagno) e $T_i = 10$ secondi (costante di tempo del blocco integratore); con tali valori si ottiene un tempo di salita molto breve e assenza di sovraelongazione e oscillazioni a regime. Con riferimento alla Figura 3.87, la temperatura T10 sale rapidamente fino a $59,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, ma poi impiega circa 20 minuti per assestarsi con precisione al valore di riferimento ($60\text{ }^{\circ}\text{C}$). Questo spiega l'andamento numerico iniziale della temperatura T2' e T2 (Figura 3.88).

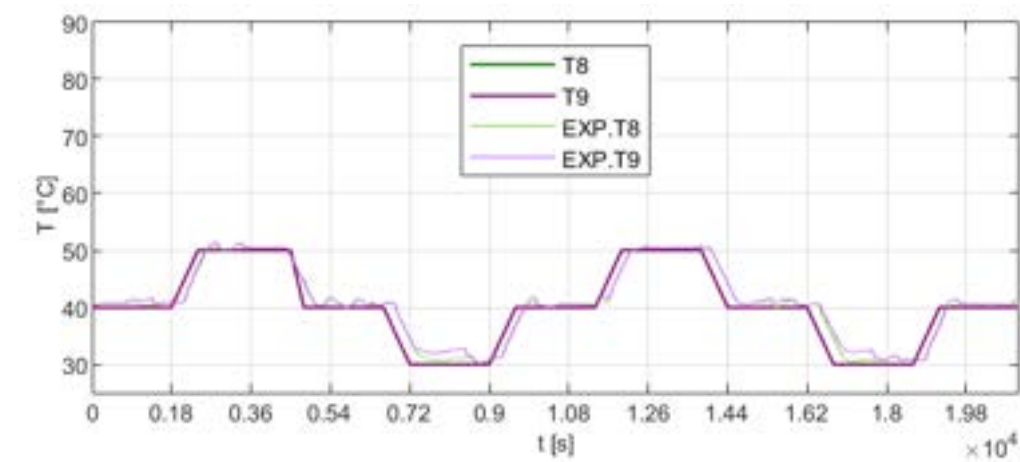


Figura 3.85. Prova dinamica 7. Temperatura T8 di ritorno dall'utenza e temperatura T9 in uscita da S2

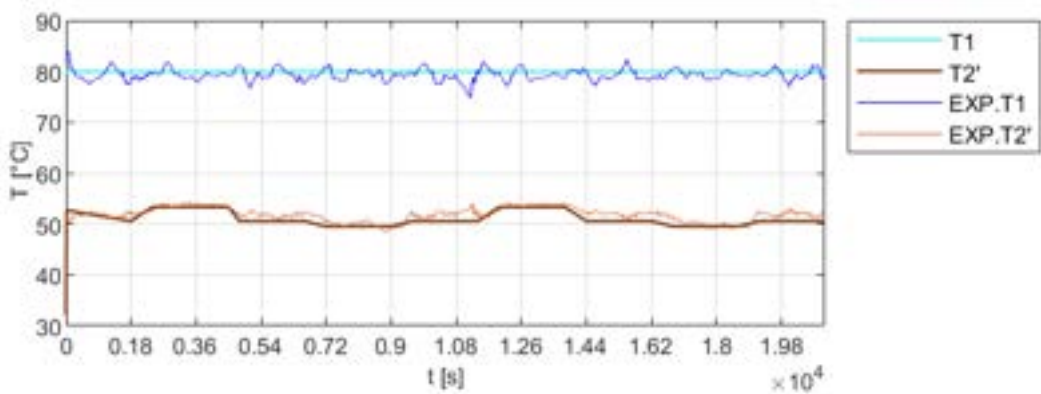


Figura 3.86. Prova dinamica 7. Temperatura T1 di mandata della rete di teleriscaldamento e temperatura T2' della rete in uscita dallo scambiatore S1 in seguito allo scambio termico con l'utenza

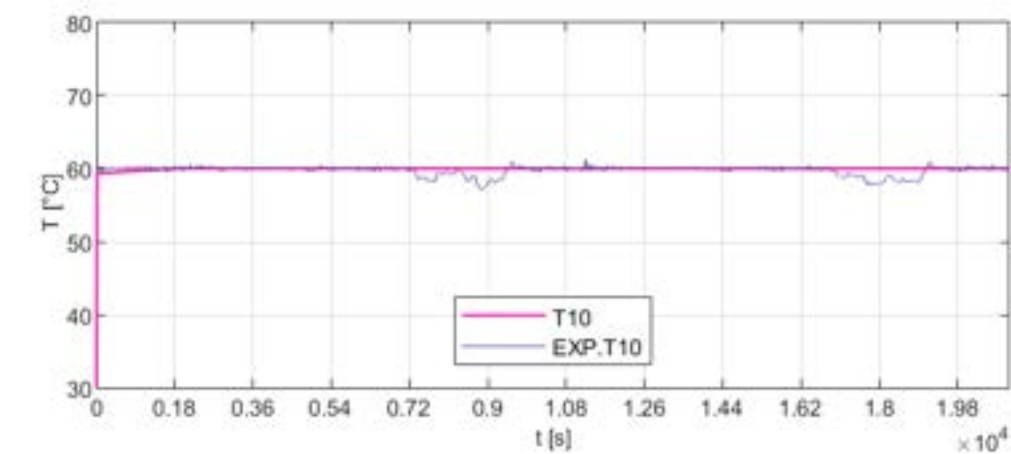


Figura 3.87. Prova dinamica 7. Temperatura T10 di mandata dell'utenza

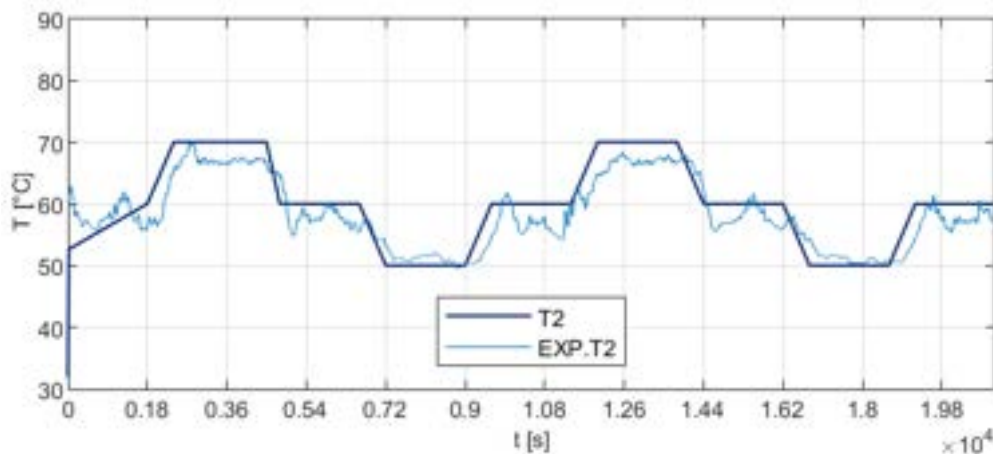


Figura 3.88. Prova dinamica 7. Temperatura T2 della rete di teleriscaldamento derivante dal mescolamento tra la corrente a temperatura T1 e la corrente a temperatura T2'

In Figura 3.89 è riportata la potenza termica scambiata in S1 tra rete di teleriscaldamento e utenza; la maggiore differenza tra l'andamento numerico e sperimentale si ha in corrispondenza della massima richiesta dell'utenza ($T_9 = 40\text{ °C}$) quando si è ottenuto anche il maggior scostamento (circa 3 °C) della temperatura T_9 rispetto al valore di riferimento.

Per completezza si riporta anche l'andamento dell'efficienza dello scambiatore S1 in condizioni di off-design (Figura 3.90); l'efficienza di S1 varia da 0,62 circa (massima richiesta dell'utenza) a 0,89 circa (minima richiesta dell'utenza).

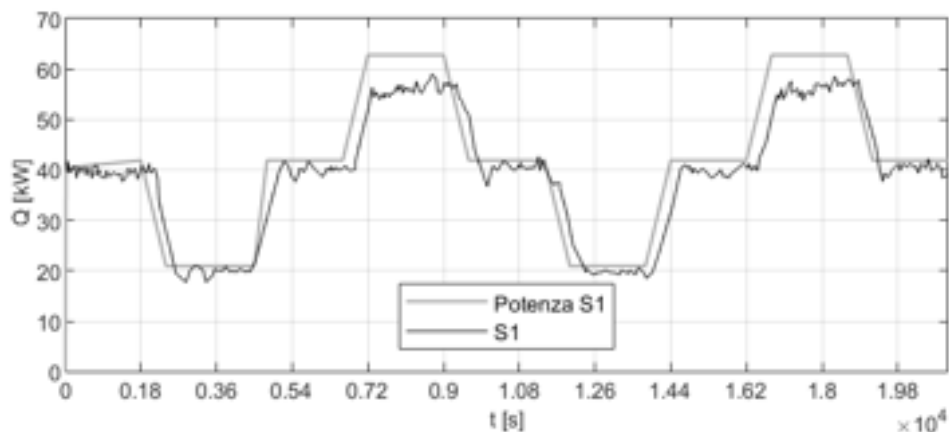


Figura 3.89. Prova dinamica 7. Potenza termica scambiata in S1

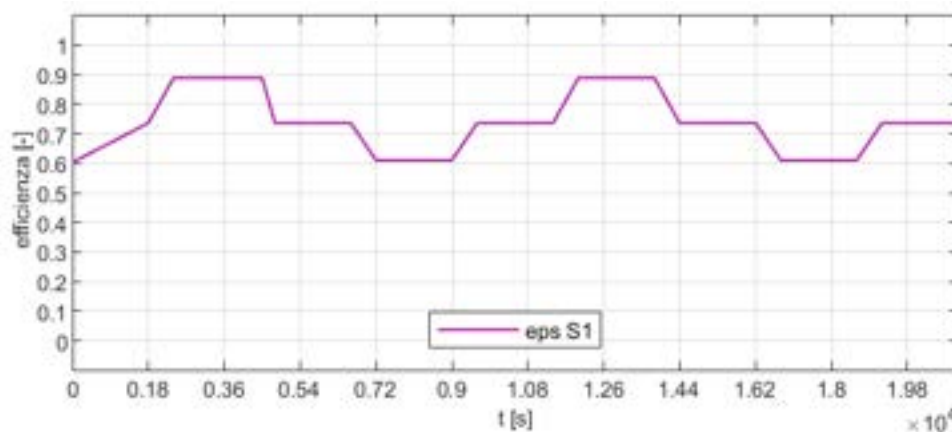


Figura 3.90. Prova dinamica 7. Efficienza in condizioni di off-design dello scambiatore S1

3.1.3.8 Prova dinamica 8

La prova dinamica 8 prevede il funzionamento degli scambiatori S1 (teleriscaldamento-utenza), S2 (sistema di generazione-utenza) ed S3 (sistema di generazione-teleriscaldamento) per diversi livelli di richiesta termica dell'utenza. Tale prova può essere considerata come una riformulazione della prova dinamica 6 al fine di individuare le condizioni dinamiche di funzionamento contemporaneo di S2 ed S3 per questo tipo di profilo di richiesta dell'utenza. I parametri inerenti alla simulazione che sono stati selezionati sono:

- Stop time: 19.200 secondi
- Interval length: 19.200 secondi
- Tolerance: 0,2

La tolleranza citata è la più bassa tra le tolleranze che portano a convergenza; con valori inferiori si verificano problemi numerici. Nonostante questo, la tolleranza scelta è sufficiente per ottenere risultati in linea con le prove sperimentali.

In questa prova viene indagato il comportamento della sottostazione per un determinato andamento della portata M8 (Figura 3.91), prima abbinato ad una temperatura T8 costante e pari a 50 °C e poi ad una temperatura T8 costante e pari a 40 °C. La variazione di T8 da 50 °C a 40 °C è riportata in Figura 3.92.

In Figura 3.93 è riportato il confronto dell'andamento sperimentale di T8 e di T9 con quello numerico di riferimento. La temperatura T8 misurata sperimentalmente presenta un ritardo di circa 10 minuti, mentre la temperatura T9 si mantiene quasi costantemente al valore di riferimento (60 °C) pertanto non sarà necessario attivare lo scambio termico con la rete di teleriscaldamento (S1) per soddisfare la richiesta. Di conseguenza si riportano di seguito i grafici inerenti agli andamenti ottenuti sperimentalmente solo per gli scambiatori S2 ed S3, poiché S1 non si attiva.

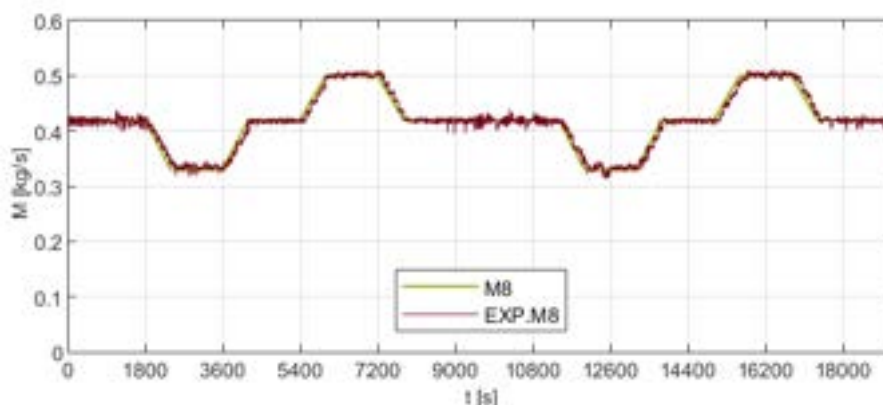


Figura 3.91. Prova dinamica 8. Portata M8 del circuito dell'utenza

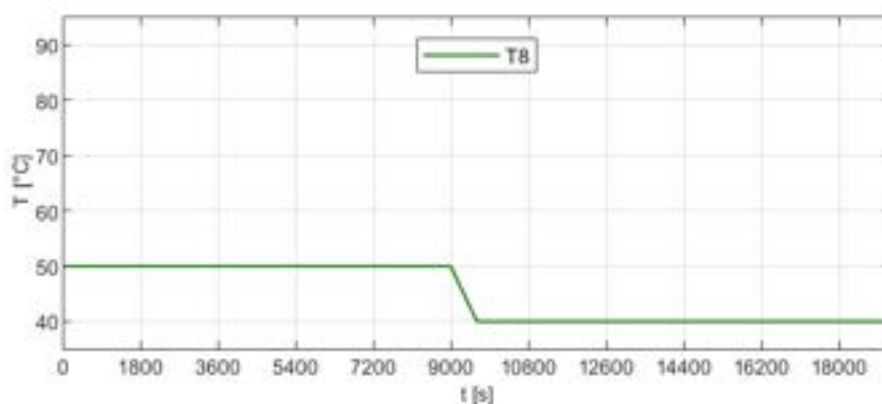


Figura 3.92. Prova dinamica 8. Temperatura T8 di ritorno dell'utenza

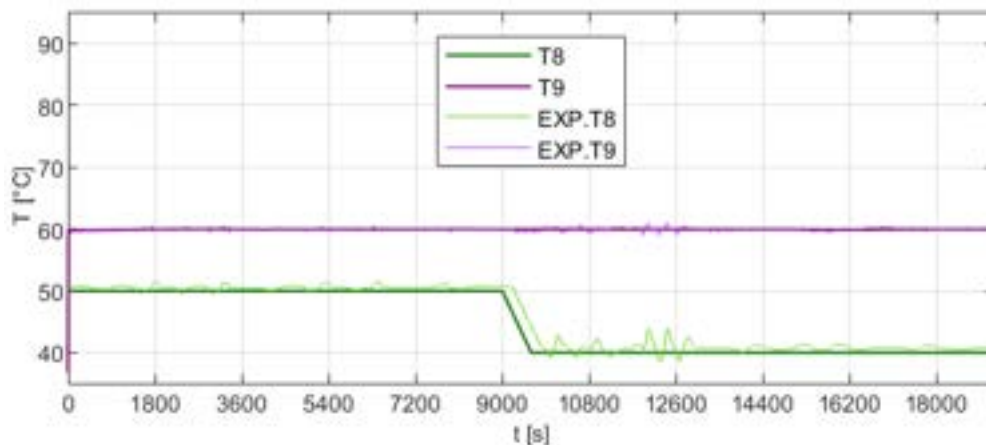


Figura 3.93. Prova dinamica 8. Temperatura T8 di ritorno dell'utenza e temperatura T9 dell'utenza in uscita dallo scambiatore S2

In Figura 3.94 è mostrato l'andamento della temperatura T5 di mandata del sistema di generazione (in ingresso in S2) e della temperatura T6' del sistema di generazione in uscita dallo scambiatore S2. L'andamento di T6' segue quello della temperatura T8 in ingresso a S3 lato utenza; le misure sperimentali presentano delle oscillazioni in seguito alla variazione di T8, prima su T5 e di conseguenza anche su T6'. Inoltre si nota lo stesso scostamento tra andamento numerico e sperimentale di 4 °C circa sulla temperatura T6', come già ottenuto nello scenario 3 stazionario e in altre prove dinamiche che riproducono condizioni di lavoro analoghe a quelle dello scenario 3.

In Figura 3.95 è riportata la temperatura T6 (in ingresso a S3), successiva al mescolamento tra la corrente a temperatura T5 e la corrente a temperatura T6', che presenta le stesse oscillazioni misurate per T5 e T6'. Infine è da notare che, con riferimento ai risultati numerici, fintanto che la richiesta è minima ($T8 = 50\text{ °C}$) la temperatura T6 è superiore a 82 °C, quindi lo scambiatore S3 è attivo e il sistema di generazione cede potenza termica alla rete fino ad abbassare la propria temperatura in ingresso da T6 a T7. Quando la richiesta è in condizioni di design ($T8 = 40\text{ °C}$) la temperatura T6 scende sotto 82 °C, S3 si disattiva e T7 coincide con T6 (gli andamenti si sovrappongono). Mentre per quanto riguarda le misure sperimentali, a causa delle oscillazioni rilevate su T5 e ripercosse su T6, si verificano dei picchi oltre 82 °C della temperatura T6 anche quando la richiesta è in design.

Come anticipato, in condizioni di design dell'utenza lo scambiatore S3 non viene mai attivato (calcolo numerico) e quindi la portata prelevata dal ritorno della rete di teleriscaldamento M3 è nulla (Figura 3.96). Diversamente, l'andamento sperimentale di M3 ha dei picchi anche in condizioni di design perché S3 si è attivato. Le stesse considerazioni si possono fare per tutte le grandezze legate allo scambiatore S3 quindi anche la temperatura T3 della corrente prelevata dal ritorno della rete e della temperatura T4 (Figura 3.97). Quando il sistema di generazione non ha un livello energetico tale da cedere potenza alla rete (S3 non attivo), la temperatura del circuito della rete di teleriscaldamento (sezioni 3 e 4) si porta al valore stabilito dalle condizioni al contorno, in questo caso 35 °C.

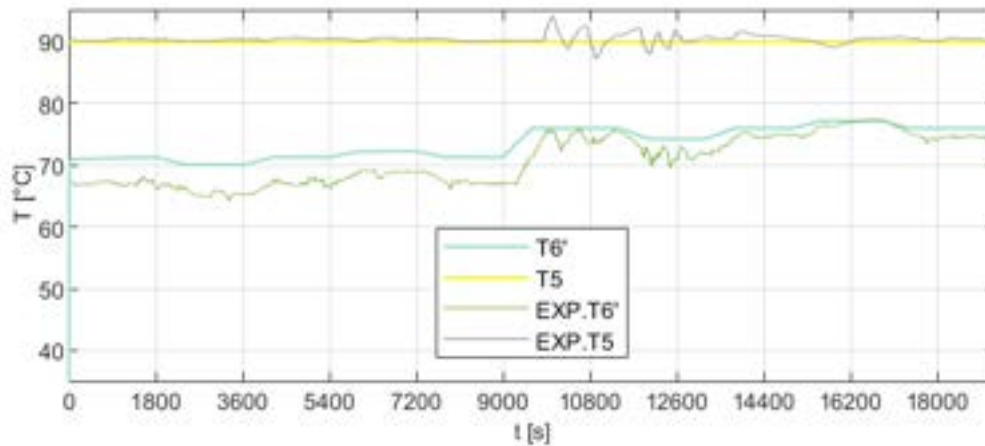


Figura 3.94. Prova dinamica 8. Temperatura T5 di mandata del sistema di generazione e temperatura T6' in uscita da S2 lato sistema di generazione

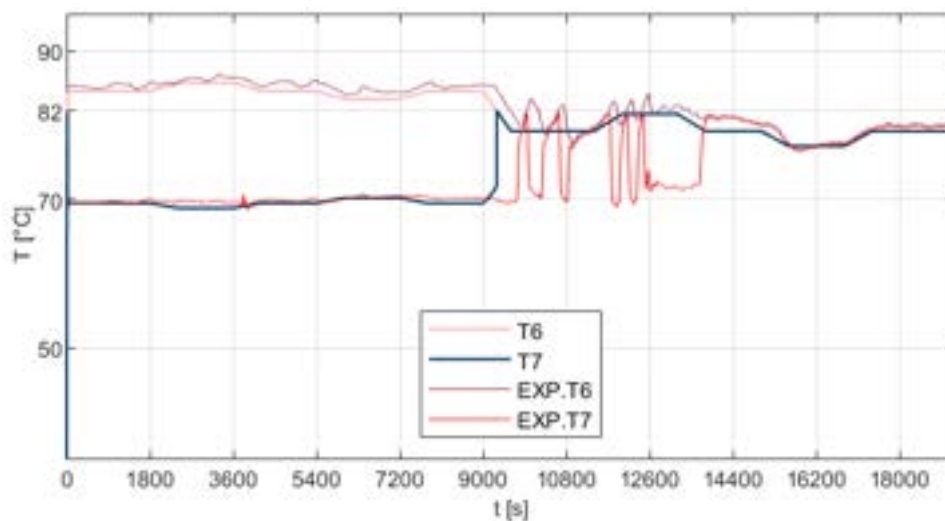


Figura 3.95 Prova dinamica 8. Temperatura T6 del sistema di generazione in ingresso in S3 e temperatura T7 del sistema di generazione in uscita da S3

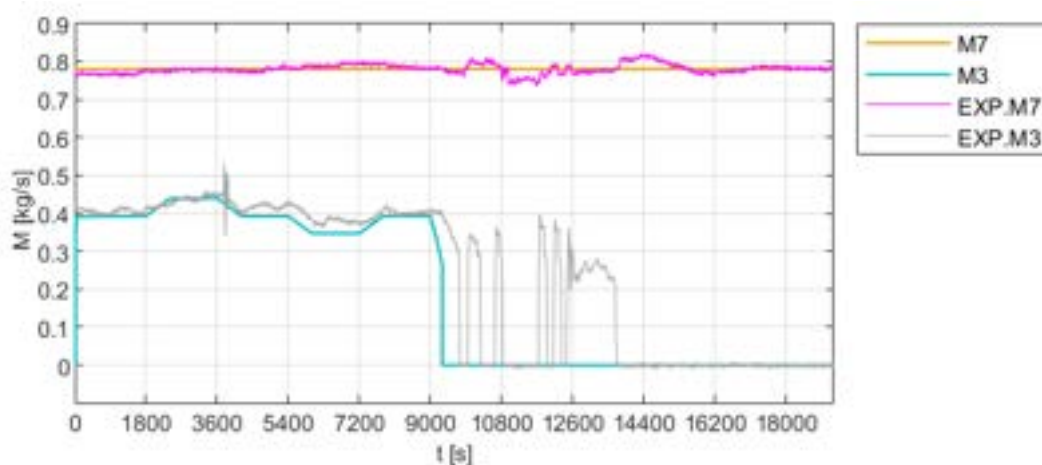


Figura 3.96. Prova dinamica 8. Portata M7 del sistema di generazione in ingresso allo scambiatore S3 e portata M3 prelevata dal ritorno della rete di teleriscaldamento per lo scambio termico in S3 con il sistema di generazione

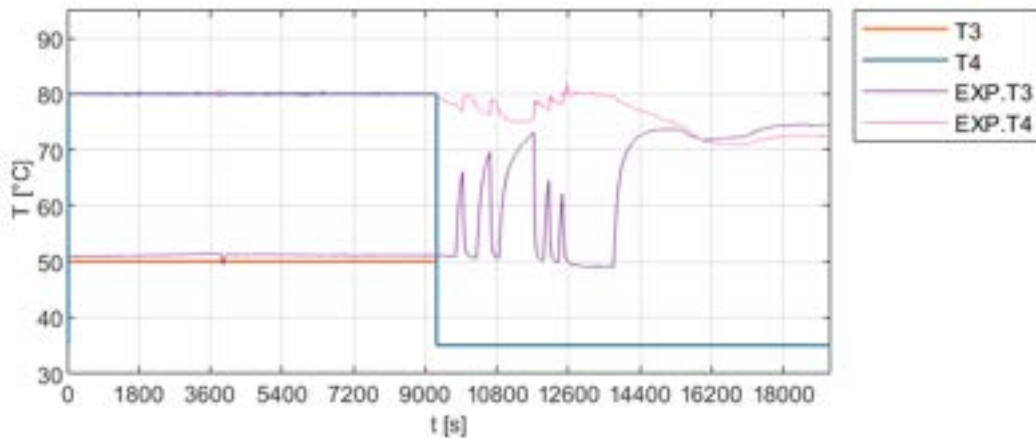


Figura 3.97. Prova dinamica 8. Temperatura T3 del ritorno della rete di teleriscaldamento e temperatura T4 della corrente immessa sulla mandata della rete di teleriscaldamento in seguito allo scambio termico in S3

In Figura 3.98 e Figura 3.99 è mostrato l'andamento della potenza termica scambiata in S2 e in S3 rispettivamente. Per completezza è riportata anche l'efficienza di entrambi gli scambiatori in condizioni di off-design, calcolata con il modello numerico (Figura 3.100). Quando S3 non è attivo il modello numerico impone un'efficienza nulla, mentre S2 lavora in condizioni di design e ha quindi un'efficienza pari a circa 0,4. Nei periodi di tempo in cui S2 ed S3 interagiscono si ottiene un'efficienza che varia tra 0,38 e 0,5 circa per S2 e tra 0,87 e 0,98 circa per S3.

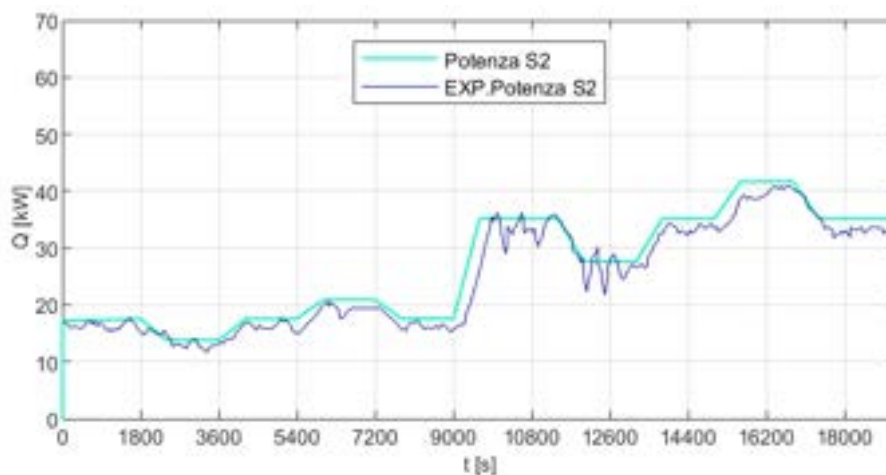


Figura 3.98. Prova dinamica 8. Potenza termica scambiata in S2

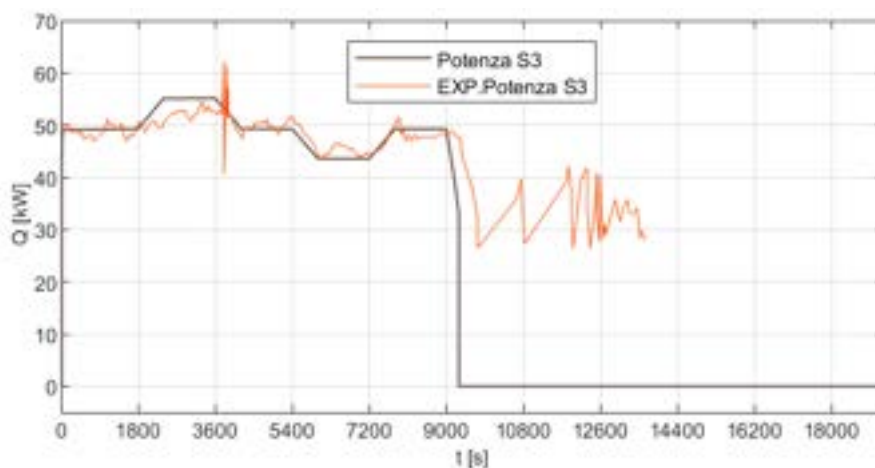


Figura 3.99. Prova dinamica 8. Potenza termica scambiata in S3

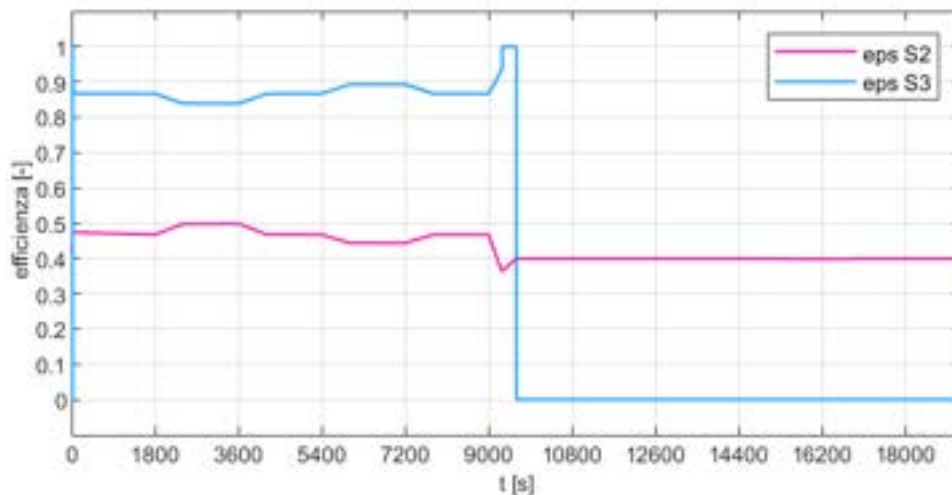


Figura 3.100. Prova dinamica 8. Efficienza in condizioni di off-design dello scambiatore S2 e dello scambiatore S3

3.1.4 Considerazioni finali sul modello di sottostazione

Gli scenari che sono stati presi in considerazione e descritti ai paragrafi precedenti vedono gli scambiatori lavorare autonomamente o in relazione l'uno con l'altro: questo ha permesso di verificare le interazioni e le ripartizioni dei flussi termici in base alla richiesta dell'utenza e alla produzione del sistema di generazione locale.

In una prima fase sono state eseguite *simulazioni stazionarie* (in assenza di sistemi di controllo), che rappresentano possibili condizioni di lavoro della sottostazione per diverse richieste termiche dell'utenza e della produzione del sistema di generazione. Il software Dymola, attraverso la possibilità di accedere in modo diretto al linguaggio Modelica, ha permesso l'implementazione di un nuovo scambiatore di calore adatto a simulare condizioni dinamiche. Il componente è stato validato all'interno di un modello semplificato per tre diversi scambiatori di calore che lavorano in condizioni di off-design differenti. L'inserimento di tale componente e dei sistemi di controllo hanno completato il modello della sottostazione, che è stata quindi validata con prove in regime dinamico (stesse condizioni di lavoro delle prove stazionarie, ma condizioni al contorno dell'utenza e del sistema di generazione caratterizzate da variazioni nel tempo a gradino). Le *simulazioni dinamiche* e le analisi fatte mostrano un modello particolarmente sensibile alle variazioni di richiesta e produzione e interazioni delicate tra gli scambiatori. Questi aspetti potrebbero attenuarsi o non verificarsi se il modello fosse sottoposto a variazioni gradualmente del contorno; in ogni caso i parametri caratteristici dei sistemi di controllo e di ciascun componente della sottostazione sono stati scelti e tarati in modo da fornire risposte stabili e non oscillatorie e il modello è stato portato a convergenza per ogni condizione studiata.

È possibile concludere che il modello presenta un'elevata rapidità di interazione e precisione sulla ripartizione dei flussi termici; i risultati ottenuti sulle potenze scambiate, sulle temperature e sulle portate dei vari circuiti della sottostazione sono in linea con i dati sperimentali. Sulla base delle analisi effettuate è stato rilevato come il modello è in grado di rispondere correttamente alle variazioni dinamiche sia di richiesta che di produzione e i sistemi di controllo implementati seguono, come previsto, la logica di dare priorità alla produzione del sistema di generazione e successivamente alla rete di teleriscaldamento. La ripartizione dei flussi termici tra i tre scambiatori è risultata in linea con gli andamenti sperimentali; in particolare la sottostazione è in grado di trasferire potenza termica alla rete (scambio attivo) e di cedere potenza termica all'utenza (scambio passivo), ovvero genera flussi bidirezionali tra rete e utenza in base ai livelli energetici di ciascuna di esse.

Il modello è un sistema compatto costituito principalmente da scambiatori di calore, sistemi di controllo e componentistica idraulica che ha come unici gradi di libertà le condizioni al contorno dell'utenza (portata e temperatura di ritorno), del sistema di generazione (temperatura e portata di mandata) e della rete di distribuzione (temperatura di mandata, di ritorno e portata). Una volta realizzati gli opportuni adattamenti e miglioramenti del modello (es. pompa funzionale al ritorno su mandata e l'implementazione di alcuni

controlli), l'inserimento in rete della sottostazione, per come è stata modellata, consentirebbe di indagare anche le risposte del sistema a variazioni dinamiche graduali delle condizioni al contorno. Questo risulta di particolare interesse in uno scenario in continua evoluzione come quello delle reti di teleriscaldamento, dove il passaggio verso nuove generazioni porta a integrare reti che lavorano a livelli di temperatura differenti, con sistemi di generazione ibridi. In questo modo si ha la possibilità di avere un modello completo in cui è possibile variare solo l'accoppiamento utenza-sistema di generazione-rete, e se necessario implementare nuove condizioni sui componenti esistenti o crearne di nuovi più adatti alla rete di teleriscaldamento in esame.

3.2 Sviluppo della sottostazione come componente in linguaggio Modelica

Una volta definita la prima versione del sotto-sistema e validata come descritto al paragrafo precedente, è stato approfondita la simulazione in Dymola/Modelica con l'obiettivo di integrare la sottostazione in un modello di rete di teleriscaldamento. Di seguito sono descritti i principali step di implementazione, mentre tutti i modelli sono resi disponibili inviando una richiesta ai contatti riportati nel Sommario.

3.2.1 Modellazione del blocchetto Modelica

Per la modellazione del blocchetto Modelica è stato necessario eseguire una serie di azioni per razionalizzare il modello esistente; ciò ha permesso di ottenere il risultato mostrato in Figura 3.101. In particolare:

- pulizia modello originale con riorganizzazione delle 3 logiche di controllo in blocchetti separati;
- organizzazione strutturata dei parametri nella mascherina del modello;
- check della consistenza dei risultati rispetto al modello di partenza (Figura 3.102).

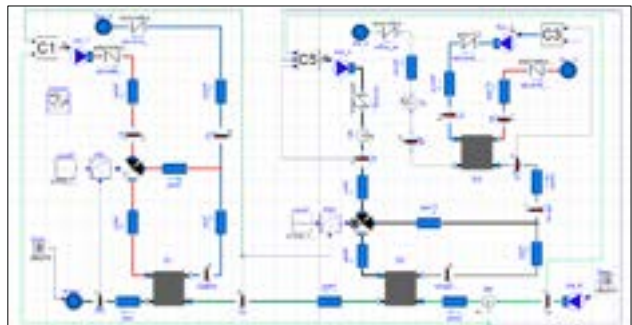
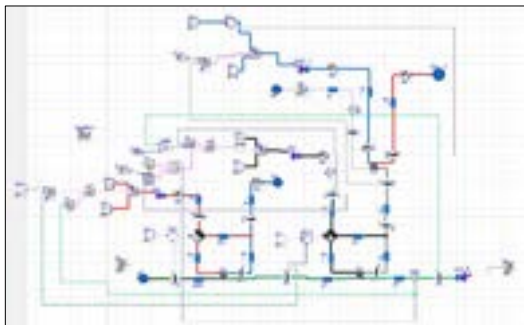


Figura 3.101. Razionalizzazione del modello di sottostazione (versione originale a sinistra, migliorata a destra)

Ottenuto un modello strutturato che replicasse, a pari condizioni, lo stesso comportamento di quello di partenza, si è proseguito come di seguito:

- Estrazione di un modello di sottostazione come blocchetto Modelica in modo da essere integrato successivamente in un modello di rete (Figura 3.103). Questo ha comportato:
 - esposizione delle interfacce del modello verso l'esterno in termini di porte fluide e segnali di output per i controllori;
 - logiche di controllo lasciate all'esterno del modello;
 - creazione dell'interfaccia grafica (graphical user interface GUI) del modello di sotto-stazione con i parametri caratteristici dei vari componenti organizzati per tab tematici;
 - generalizzazione dei *pipe* con costruito *replaceable*: possibilità di ridichiarare i modelli di pipe con scelta tra *StaticPipe* e *DynamicPipe*;
 - impostazione di un'icona rappresentativa della sottostazione.
- Test del modello con stesse condizioni al contorno del test precedente (Figura 3.104); le logiche di controllo sono esterne al blocchetto sviluppato.

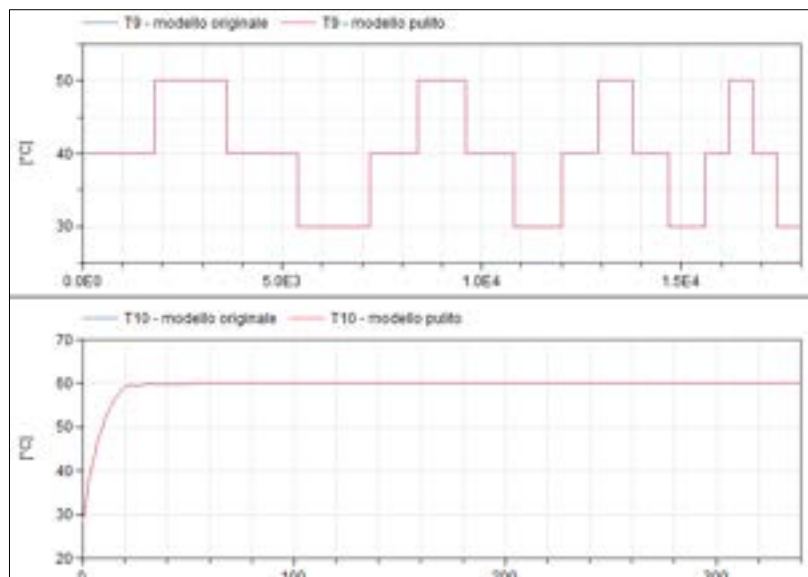


Figura 3.102. Confronto risultati modello originale vs modello riordinato

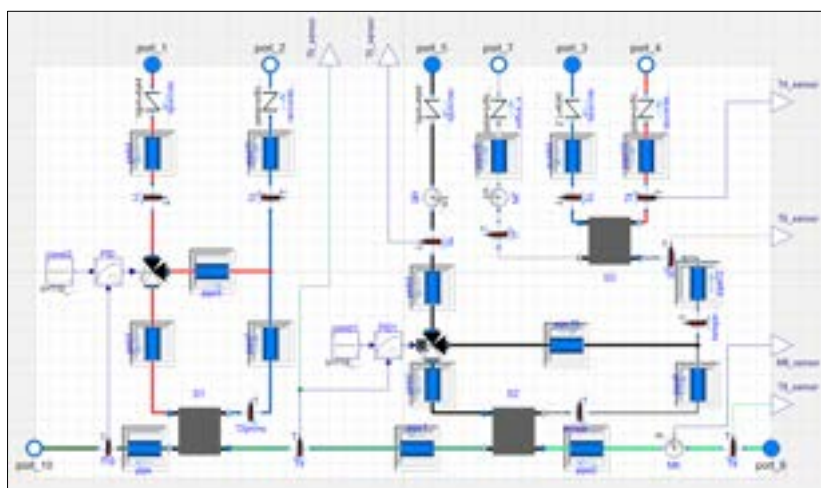


Figura 3.103. Blocchetto sottostazione

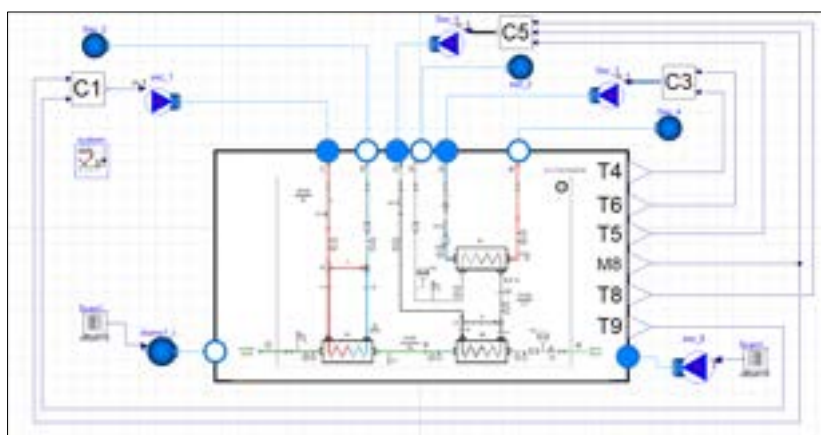


Figura 3.104. Modello di test del blocchetto sottostazione

- Validazione del modello rispetto ai dati sperimentali. I dati sono stati forniti come condizione al contorno del modello sotto forma di tabelle lette da file esterni (Figura 3.105). In questa fase sono state riscontrate delle problematiche di robustezza, che sono state gestite nel seguente modo:

- inserimento di limiti minimi di portata nei blocchetti dei controllori per gestire portate prossime allo zero;
 - imposizione di valori minimi di portata che circola nei rami della sottostazione in caso di valvola completamente chiusa; questi valori sono settabili da parametri appositi nei controllori;
 - limitazione del segnale di portata in ingresso dall'utenza in modo che non sia mai negativo, ma al più un valore sufficientemente piccolo;
 - inserimento di blocchetti *FirstOrder* della MSL a valle degli switch nei controllori per garantire una transizione più "smooth" del segnale; l'utilizzo di questi blocchetti è legato ad un parametro booleano definibile dall'utente;
 - regolazione, con procedura "trial and error", delle condizioni iniziali dei blocchetti PID delle due valvole a 3 vie.
- Confronto dei risultati con i dati sperimentali, come mostrato in Figura 3.106.
 - Validazione del modello di sotto-stazione con gli stessi dati sperimentali in input, ma con la sostituzione degli *StaticPipe* con i *DynamicPipe*. Sono state riscontrate numerose problematiche di robustezza del modello che si sono cercate di gestire con procedura di "trial and error", con esito negativo. Si rendono pertanto necessarie ulteriori indagini con un approccio più strutturato.

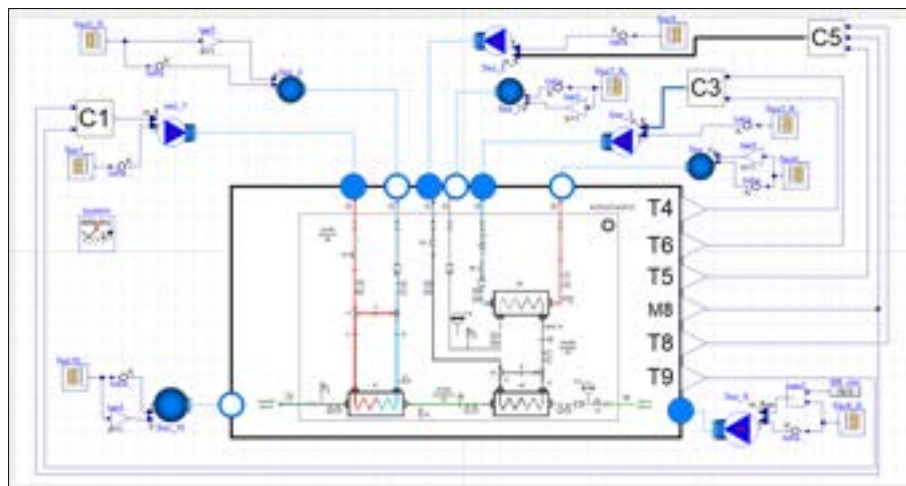


Figura 3.105. Test di validazione del modello di sottostazione

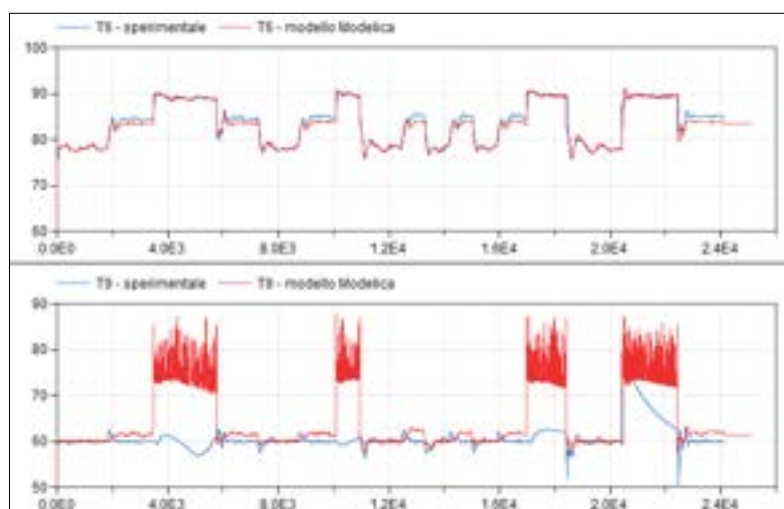


Figura 3.106. Confronto risultati modello con dati sperimentali

3.2.2 Inserimento del modello di sottostazione nella rete di TLR

Questa fase ha previsto l'inserimento del modello di sottostazione all'interno del modello Modelica della rete di TLR del Campus Universitario di Parma, implementato nell'annualità precedente e descritto nel Report RdS/PTR2020/144. La sottostazione sostituisce il blocchetto "substation" della precedente implementazione. L'inserimento della sottostazione nel modello di edificio ha evidenziato una problematica importante di layout: la modalità di allacciamento originaria del singolo edificio con la rete non permette, con il modello di sottostazione implementato, l'allacciamento della parte attiva. Pertanto il layout di partenza è stato modificato e applicato su due reti semplificate, aventi rispettivamente 1 e 2 edifici, come mostrato in Figura 3.107.

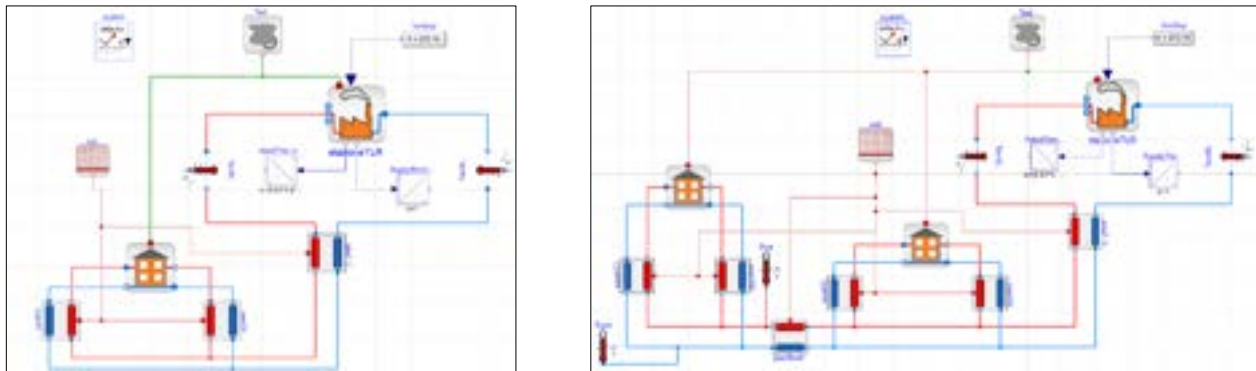


Figura 3.107. Modelli semplificati di rete TLR, con 1 edificio (sinistra) e 2 edifici (destra)

Il modello di edificio è stato modificato nel seguente modo:

- Inserimento di una pompa della libreria standard di Modelica (Modelica Standard Library MSL) per poter re-immettere nella rete l'acqua riscaldata sulla linea calda.
- Valvole C1A e C1 inglobate in un'unica valvola a 3 vie per gestire il by-pass del flusso nel caso la domanda dell'edificio sia nulla. Questo ha comportato la modifica del controllore C1 in modo da considerare le logiche delle due valvole precedentemente separate. L'output del controllore C1 viene normalizzato in modo che il segnale risultante riesca a governare direttamente l'apertura della valvola a 3 vie.
- Domanda dell'edificio espressa solamente in termini delle richieste di riscaldamento (definite da tabella di funzionamento fornita), con l'esclusione della parte sanitaria.
- Risoluzione dei problemi di singolarità dovuti a non corretta formulazione del modello con inserimento di un blocchetto *Boundary* della MSL per definire la pressione di riferimento del circuito dell'utenza.
- Generazione locale di calore (es. solare termico) semplificata con una portata gestita da un controllore, mantenendo la temperatura costante.
- Blocchetto *DemandRCloop* modificato nel seguente modo:
 - eliminazione componenti superflui con semplificazione del layout;
 - inserimento di un blocchetto *FirstOrder* a valle dello switch per regolarizzare il salto di portata;
 - modifica di *RCbuiding* in modo che il valore iniziale della temperatura della stanza (capacità termica) sia settabile con un parametro.

Il modello di edificio revisionato, confrontato con quello originale, è mostrato in Figura 3.108; Figura 3.109 riporta invece la revisione del modello *DemandRCloop*.

Il test della rete, semplificata con un solo edificio, ha riportato diversi problemi di robustezza e stabilità, che sono stati investigati in termini di:

- limiti delle portate minime;
- presenza di *FirstOrder*;
- inizializzazione del blocchetto pompa (*DynamicFreeInitial*).

Il modello fornito riesce a superare queste problematiche e quindi simulare il sistema fino a raggiungere lo *stopTime* imposto di 15807600 s, i cui risultati sono riportati in Figura 3.110.

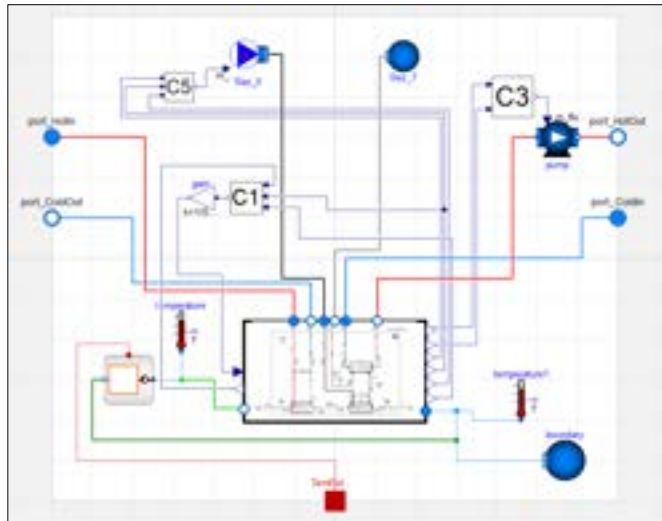
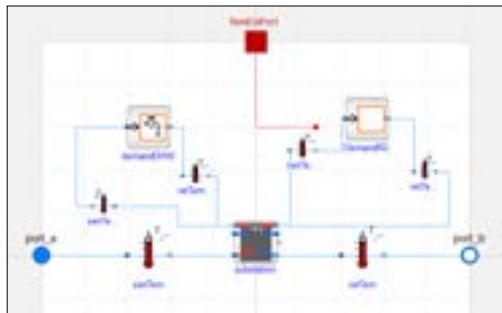


Figura 3.108. Modello edificio, originale (sinistra) e rivisto (destra)



Figura 3.109. Modello DemandRCloop rivisto

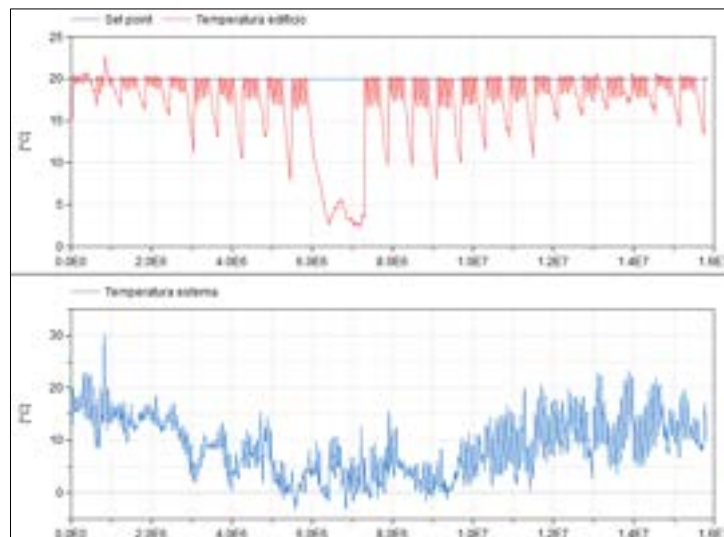


Figura 3.110. Risultati simulazione rete TLR con 1 edificio

Le condizioni operative utilizzate sono ispezionabili dalla GUI del blocchetto di edificio contenuto nel modello semplificato di rete “ReteNuovaSudParma_1Building” (Figura 3.111).

Ulteriori approfondimenti si rendono necessari per investigare il funzionamento del modello in condizioni diverse dalle suddette.

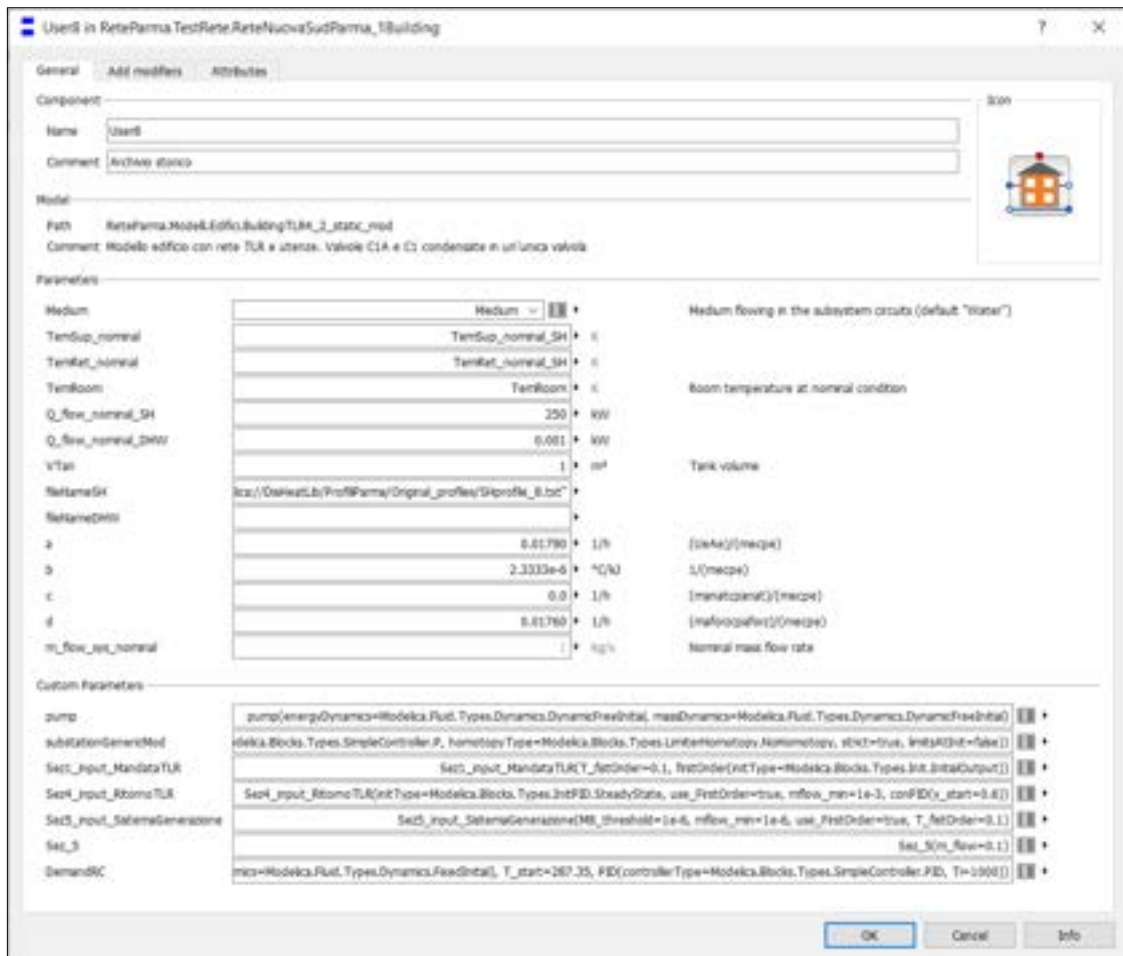


Figura 3.111. Settaggi modello edificio

3.3 Parametri e condizioni al contorno imposte per la sessione di prove sperimentali

In questo paragrafo vengono descritte le condizioni al contorno e le assunzioni considerate nella modellazione dell'edificio usato per i test presso il laboratorio EURAC Energy Exchange Lab di Bolzano. Come meglio specificato successivamente, tali prove hanno lo scopo di caratterizzare il funzionamento di un prototipo di sottostazione di scambio termico bidirezionale per teleriscaldamento in regime dinamico, secondo profili di carico reale.

Dal punto di vista delle caratteristiche della rete di teleriscaldamento considerata (temperatura di mandata e di ritorno) e dell'edificio preso in esame, l'attività ha previsto due campagne di test denominate sessione A e sessione B:

- Nella prima campagna di test (sessione A) è stata considerata una rete di teleriscaldamento avente temperature di mandata e ritorno rispettivamente pari a 80 °C e 50 °C. L'edificio considerato in questa campagna di test è rappresentativo di un tipico condominio piccolo costruito nel periodo 1970-1980 nel clima europeo continentale.
- Nella seconda campagna di test (sessione B) è stata considerata una rete di teleriscaldamento avente temperature di mandata e ritorno rispettivamente pari a 60 °C e 30 °C. In questo secondo caso, l'edificio considerato è lo stesso del test sessione A dal punto di vista delle caratteristiche geometriche (area netta, superficie finestrata, rapporto S/V), mentre l'involucro presenta migliori caratteristiche termofisiche (ridotta trasmittanza termica) per simulare un avvenuto risanamento.

3.3.1 Modellazione dell'edificio

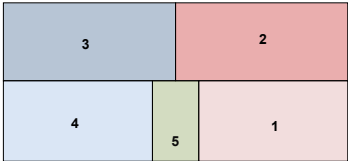
3.3.1.1 Caratteristiche dell'involucro

L'edificio modellato è un edificio residenziale multifamiliare con cinque piani e due appartamenti per piano con superficie netta di 50 m² l'uno per un'area complessiva ai piani di 500 m². L'altezza dei locali netta è pari a 2,48 m per tutti i locali. Sia la parte di edificio, sia la parte di impianto simulata, è stata modellata utilizzando il software per simulazione dinamica TRNSYS [1].

La Tabella 3.10 riporta una vista 3D del modello di edificio e un'immagine dell'edificio esistente da cui è stato sviluppato il modello (per un maggior dettaglio a riguardo dell'orientamento dell'edificio vedere Figura 3.112). Inoltre, nella stessa tabella è mostrata la pianta di un piano (uguale per tutti i piani) con la relativa suddivisione in zone termiche. Infine, vengono riportate alcune grandezze caratteristiche dell'edificio considerato. Come si vede dalla planimetria in Tabella 3.10, il modello di edificio prevede la divisione di ognuno dei due appartamenti in due zone termiche. Queste rappresentano rispettivamente la zona giorno (zone 2 e 3) e la zona notte (zone 1 e 4) degli appartamenti, permettono una simulazione sufficientemente accurata del comportamento termico degli stessi senza incidere negativamente in maniera significativa sul tempo necessario per la simulazione. Infine, l'ulteriore zona termica (zona 5) rappresenta il vano scale, spazio considerato non riscaldato.

Ad influenzare le caratteristiche termiche e i risultati in termini di performance energetica di un edificio, oltre alle temperature di set, contribuisce il rapporto S/V, i.e. superficie lorda disperdente dell'involucro S rispetto al volume lordo riscaldato V (successivamente è riportata una più precisa definizione e il calcolo). Il rapporto S/V dell'edificio considerato (5 piani) risulta pari a 0,56, valore tipicamente riscontrabile in condomini italiani.

Tabella 3.10. Principali caratteristiche geometriche dell'edificio utilizzato (da progetto iNSPiRe, Deliverable D2.1c [2])

s-MFH		
Modello 3D e immagine		
Zone termiche		
Numero di piani	5 (da 3 a 7)	
Area netta per appartamento	50 m ²	
Numero appartamenti per piano	2	
Altezza soffitto	2,5 / 3,0 m	
Larghezza/profondità edificio	16,3 / 7,6 m	

La simulazione è stata eseguita in ogni caso su un modello con 3 piani: l'ultimo piano, il piano terra ed un piano intermedio. Tale piano intermedio è caratterizzato da profili di occupazione, utilizzo delle apparecchiature elettriche e illuminazione mediati tra tutti i piani intermedi dell'edificio (3 piani intermedi) allo scopo di effettuare una simulazione il più possibile aderente al caso reale considerando le possibili differenze e/o sfasamenti temporali legati al diverso utilizzo di diversi appartamenti da parte degli occupanti. Per quanto riguarda invece le stratigrafie dei vari elementi componenti l'involucro dell'edificio utilizzato per la sessione di test A, queste sono state assunte dal database sviluppato nell'ambito del progetto iNSPiRe [2].

In tale database è stata fatta una classificazione del parco edifici europeo in base a periodo di costruzione, tipologia di edificio e zona climatica considerata. Seguendo questa suddivisione le stratigrafie scelte sono quelle usate in genere in edifici residenziali multifamiliari piccoli, costruiti nel periodo 1970 – 80 nel clima europeo continentale. Per quanto concerne le stratigrafie dei vari elementi dell'involucro dell'edificio considerato per la sessione di test B, esse sono state ottenute partendo dall'edificio utilizzato per la sessione di test A. Le differenze in termini riguardano l'aggiunta di uno strato di isolante (polistirene) sulle pareti opache verticali e sul tetto piano (in entrambi i casi è stato aggiunto uno strato di isolante dello spessore di 8 cm) e la sostituzione delle finestre con infissi caratterizzati da valori inferiori di trasmittanza termica. Tali interventi rappresentano quelli generalmente svolti nel caso di risanamenti energetici di questo genere di edifici. Questi permettono di ridurre il fabbisogno termico dell'edificio e, a parità di terminali di emissione (in questo caso radiatori), di utilizzare temperature di mandata più basse garantendo comunque il confort negli appartamenti. L'utilizzo di temperature di mandata ridotte ai sistemi di emissione, rispetto al caso pre-risanamento, permette altresì un eventuale interfacciamento con reti di teleriscaldamento aventi temperatura di mandata inferiori, rispetto a quanto considerato nella sessione di test A.

Essendo lo scopo di questo lavoro valutare il funzionamento della sottostazione bidirezionale in regime dinamico, per la sessione di test B le caratteristiche termiche dell'involucro dell'edificio risanato sono state definite in modo da avere un fabbisogno di riscaldamento massimo pari alla massima potenza che può essere fornita dagli stessi radiatori considerati nell'edificio esistente non risanato, ma operanti con una temperatura di mandata pari a 55 °C. Tale valore rappresenta la temperatura massima realisticamente ottenibile ai radiatori considerando la connessione a una rete di teleriscaldamento avente temperatura di mandata pari a 60 °C.

Tale approccio non considera i vincoli in termini di caratteristiche termiche dell'involucro (trasmittanza termica) da rispettare nel caso di interventi di risanamento dell'involucro termico come indicato dal D.M. 26/06/2015 "Requisiti minimi" [3] (anche di seguito chiamato "decreto" per brevità). È stato in ogni caso svolto un confronto comparando i valori di trasmittanza termica dei vari elementi costituenti l'involucro dell'edificio risanato utilizzato nella sessione di test B e i rispettivi valori limite indicati nel decreto per la zona climatica E (zona climatica della località considerata in questo lavoro, per maggiori dettagli si faccia riferimento al paragrafo 5.1), come mostrato in Tabella 3.11. Questa riporta inoltre i valori di trasmittanza termica dei vari elementi dell'involucro dell'edificio degli anni 1970-1980 considerato nella sessione di test A. Essendo i valori di trasmittanza termica dell'edificio considerato nella sessione di test B maggiori dei valori limite previsti dal decreto, si può affermare che, a parità di altre condizioni al contorno, il fabbisogno di riscaldamento dell'edificio considerato nella sessione di test B sarà maggiore (sia in termini di fabbisogno energetico annuale, sia in termini di fabbisogno termico di picco) del fabbisogno di riscaldamento di un edificio reale sottoposto a risanamento dell'involucro per il quale andranno rispettati i vincoli imposti da decreto. Sulla base di ciò si può quindi affermare che, essendo la sottostazione bidirezionale in grado di garantire la copertura dei fabbisogni dell'edificio considerato nella sessione di test B, a maggior ragione sarà in grado di garantire la copertura dei fabbisogni di un edificio reale risanato che presenta un fabbisogno di riscaldamento ridotto rispetto al caso considerato nella sessione di test B.

Tabella 3.11. Valori di trasmittanza termica [W/m²/K] dei vari elementi dell'involucro dell'edificio non risanato, dell'involucro dell'edificio risanato e valori limite riportati nel decreto per la zona E

ELEMENTO	TRASMITTANZA EDIFICIO NON RISANATO	TRASMITTANZA EDIFICIO RISANATO	TRASMITTANZA LIMITE
Muro esterno	0,88	0,36	0,26
Solaio piano terra	1,37	1,37	0,26
Tetto piano	0,96	0,37	0,22
Finestra (doppio vetro 4/16/4 mm) ²	3,10	1,79	1,40

² Calcolato in base a EN ISO 10077-1: 2017 considerando, nel caso della sessione di test A: $U_{\text{vetro}} = 2,83 \text{ W/m}^2/\text{K}$, $U_{\text{telaio}} = 4,20 \text{ W/m}^2/\text{K}$, nel caso della sessione di test B: $U_{\text{vetro}} = 1,40 \text{ W/m}^2/\text{K}$, $U_{\text{telaio}} = 3,34 \text{ W/m}^2/\text{K}$. In entrambi i casi rapporto superficie telaio / superficie finestra = 0,2

Per quanto riguarda le caratteristiche geometriche dell'edificio, valide per entrambi gli edifici usati nelle sessioni di test A e B, la superficie totale opaca dell'edificio risulta pari a 943 m², mentre la superficie finestrata disperdente risulta pari a 84,7 m². Come superficie lorda disperdente dell'involucro si considera la somma delle superfici delle facciate esterne, del tetto piano e del solaio del primo piano, in contatto con una zona non riscaldata, mentre come volume lordo riscaldato si considera il volume lordo somma dei dieci appartamenti. Essendo il vano scala non riscaldato, esso non entra nel calcolo del volume lordo riscaldato. Superficie lorda disperdente e volume lordo riscaldato sono calcolati con riferimento alle misure esterne dell'edificio. La Tabella 3.12 riassume le caratteristiche geometriche dell'edificio.

Tabella 3.12. Caratteristiche geometriche dell'edificio modellato

GRANDEZZA	VALORE	UNITÀ DI MISURA
Volume lordo riscaldato	1693	m ³
Superficie netta ai piani	500	m ²
Superficie lorda disperdente facciate	696	m ²
Superficie lorda disperdente tetto piano	123	m ²
Superficie lorda disperdente solaio contro terra	123	m ²
Superficie lorda disperdente dell'involucro	943	m ²
Superficie finestrata	84,7	m ²
S/V	0,56	m ⁻¹

La planimetria dell'edificio, mostrata in Tabella 3.10 e visibile con maggiori dettagli in Figura 3.112, fa riferimento ad un edificio reale (Figura 3.113) ristrutturato qualche anno fa da EURAC nell'ambito del progetto INSPiRe. Ogni appartamento è formato da tre stanze, un soggiorno, una cucina, un corridoio e un bagno per un totale di sette locali. Come già menzionato, per simulare correttamente il comportamento termico degli appartamenti senza aumentare eccessivamente la complessità del modello si è deciso di modellare, per ogni appartamento, due zone termiche. Queste rappresentano rispettivamente la zona giorno (orientata principalmente verso sud) e la zona notte (orientata principalmente verso nord) dell'appartamento. In Figura 3.112 è riportata la pianta dell'edificio (uguale per tutti i piani) con le varie destinazioni dei locali.

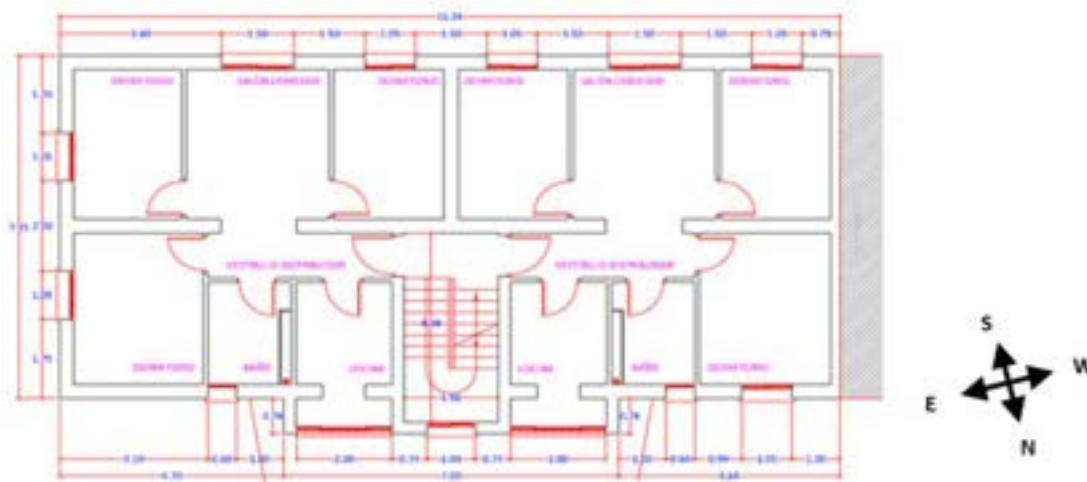


Figura 3.112. Distribuzione dei locali all'interno degli appartamenti di un piano (uguale per tutti i piani)

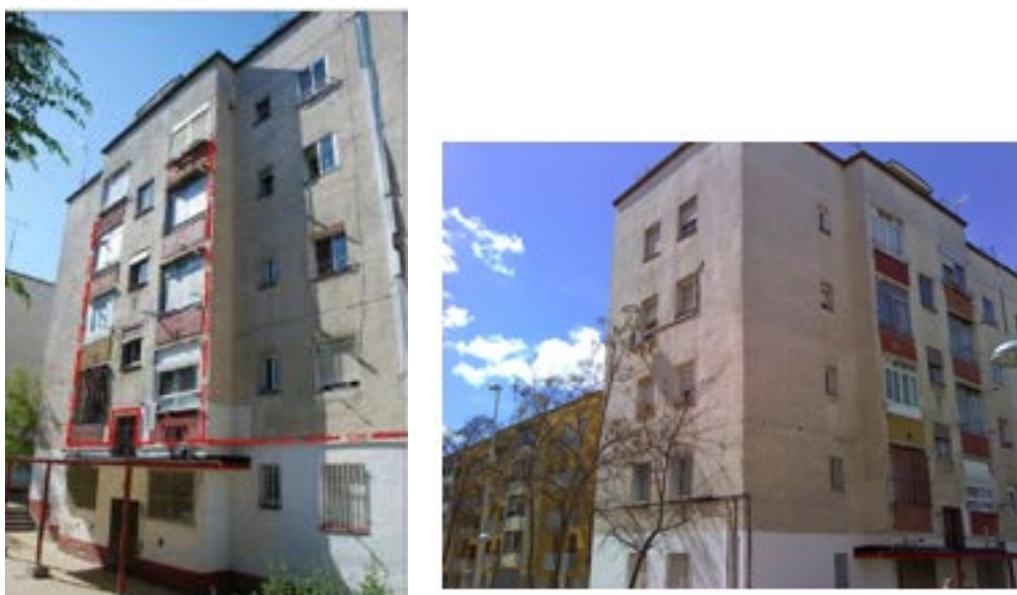


Figura 3.113. Edificio reale usato come modello

3.3.1.2 Guadagni e perdite

I valori di guadagni e perdite riportati nelle seguenti sottosezioni, così come gli orari di riscaldamento considerati, sono da considerarsi validi per entrambi gli edifici utilizzati (edificio costruito negli anni 1970-1980 e utilizzato nella sessione di test A e edificio risanato utilizzato nella sessione di test B).

Perdite per Infiltrazione/ventilazione

L'infiltrazione d'aria esterna nell'edificio modellato è stata considerata utilizzando un valore di infiltrazione pari a 0,1 ach/h (ricambi d'aria per ora). Per quanto riguarda invece la ventilazione, essa viene considerata del tipo naturale e il valore di ricambi d'aria per ora viene assunto pari a 0,4 ach/h. I due coefficienti sopra riportati si considerano costanti durante tutto l'anno.

Guadagni interni dati dalla presenza di persone

Come detto in precedenza l'edificio è stato modellato considerando due zone termiche per ogni appartamento. Per considerare i guadagni interni legati alla presenza di persone sono stati utilizzati tre inputs:

- Numero di persone occupanti il singolo appartamento (si è supposto che tutti gli appartamenti siano occupati da 3 persone).
- Profili di occupazione stocastici delle due zone termiche di ogni appartamento (profilo diverso per diversi giorni dell'anno e per le stesse zone termiche di diversi appartamenti). Tali profili possono presentare tre valori: 1, occupanti presenti e non dormenti; 0,6, occupanti dormenti; 0, occupanti non presenti. Il fatto di considerare profili di occupazione diversi (e stocastici) per diversi appartamenti mira a simulare una situazione il più possibile vicina al caso reale. Infatti, diversi appartamenti presentano generalmente diversi profili di occupazione dovuti alle diverse abitudini degli occupanti.
- Contributo di ogni persona, considerato pari a 126 W/pers³ e diviso in contributo convettivo (42%) radiativo (18%) e latente (40%). Questo contributo viene scalato come detto al punto precedente nelle ore notturne per tener conto della minore attività metabolica durante il sonno (60%).

In Figura 3.114 e Figura 3.116 sono riportati rispettivamente, a titolo di esempio, i profili di occupazione di un giorno tipo per la zona giorno e la zona notte di uno degli appartamenti. Inoltre, per evidenziare l'utilizzo di diversi profili di occupazione per le zone giorno e le zone notte di diversi appartamenti in Figura 3.115 e Figura 3.117 sono riportati, a titolo di esempio, diversi profili di occupazione rispettivamente per le zone giorno e le zone notte di diversi appartamenti in un giorno tipo.

³ Tipico valore di generazione di calore dovuto alla presenza di persone per attività lieve da: Ashrae handbook of fundamentals 2009

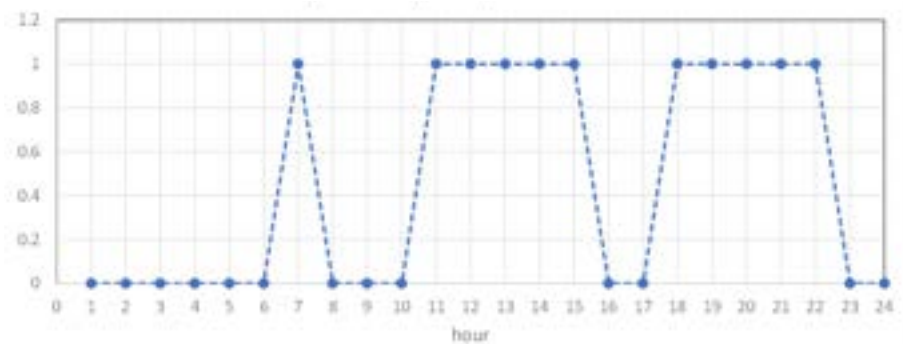


Figura 3.114. Profilo giornaliero di occupazione di una zona giorno per un giorno tipo

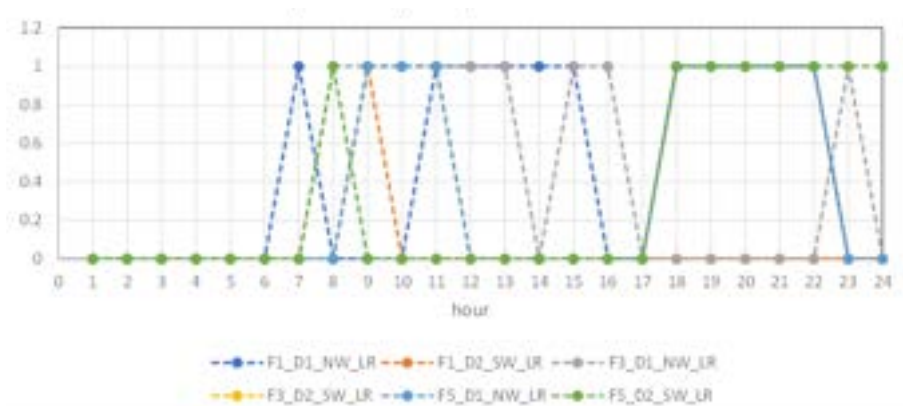


Figura 3.115. Profili di occupazione di diverse zone giorno (diversi appartamenti) per un giorno tipo

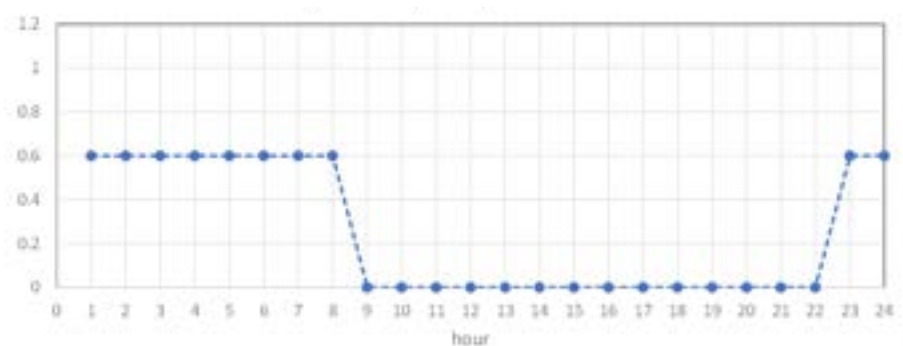


Figura 3.116. Profilo giornaliero di occupazione di una zona notte per un giorno tipo

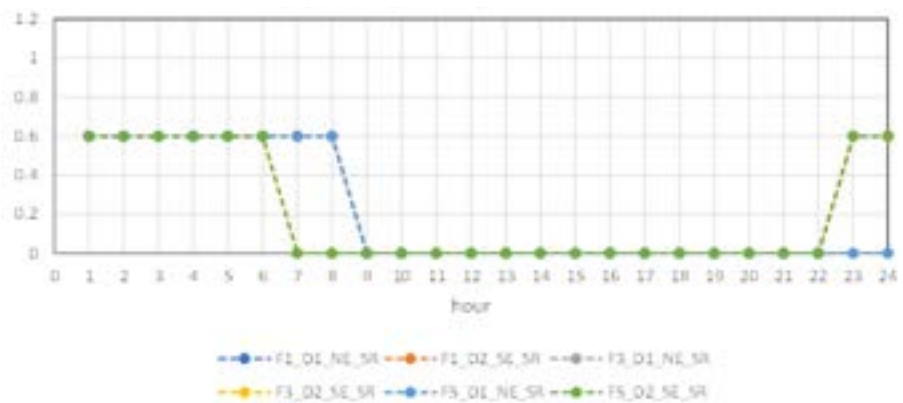


Figura 3.117. Profili di occupazione di diverse zone notte (diversi appartamenti) per un giorno tipo

Guadagni interni dati dalla presenza di apparecchiature elettriche

I guadagni interni dati da apparecchiature elettriche presenti all'interno delle varie zone termiche sono stati modellati unendo il valore specifico per questo tipo di guadagni (10 W/m^2 ⁴) con dati relativi al profilo di utilizzo, profilo che può presentare i seguenti valori: 0,2, dispositivi in stand-by; 0,6, alcuni dispositivi attivi. Come per il caso dei profili di occupazione, anche i profili di utilizzo delle apparecchiature elettriche sono diversi per diversi giorni dell'anno nonché diversi per le stesse zone termiche di diversi appartamenti. A titolo di esempio anche in questo caso si riportano, in Figura 3.118 e Figura 3.120 il profilo di utilizzo delle apparecchiature elettriche rispettivamente per una zona giorno e una zona notte di uno degli appartamenti in un giorno tipo. In Figura 3.119 e Figura 3.121 sono inoltre riportati rispettivamente i profili di utilizzo delle apparecchiature elettriche per diverse zone giorno e diverse zone notte di diversi appartamenti per un giorno tipo.

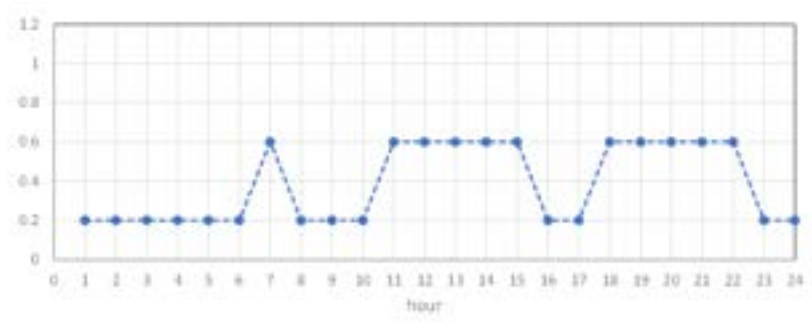


Figura 3.118. Profilo giornaliero di utilizzo delle apparecchiature elettriche di una zona giorno per un giorno tipo

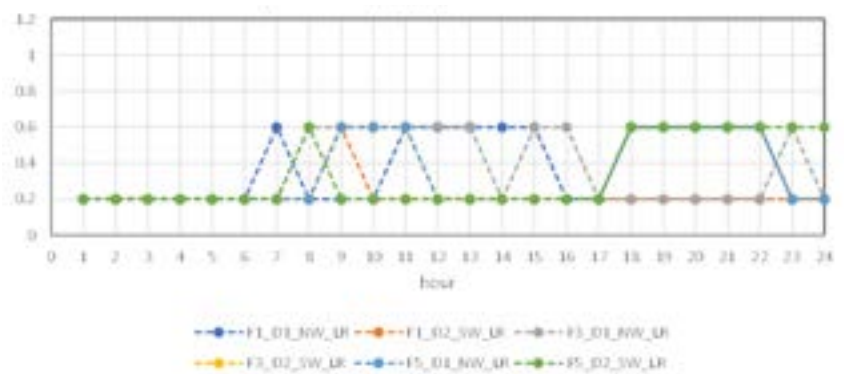


Figura 3.119. Profili di utilizzo delle apparecchiature elettriche di diverse zone giorno (diversi appartamenti) per un giorno tipo

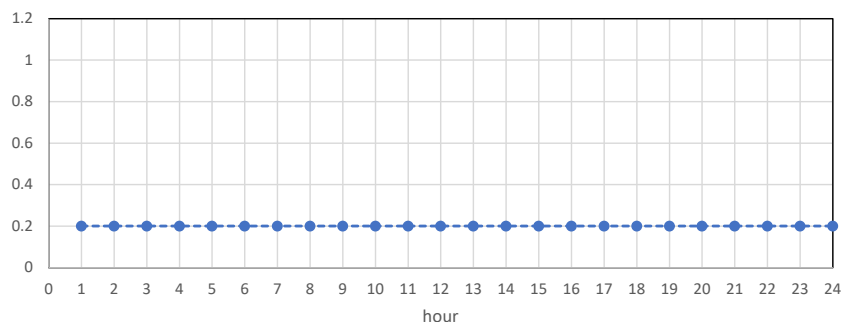


Figura 3.120. Profilo giornaliero di utilizzo delle apparecchiature elettriche di una zona notte per un giorno tipo

⁴ Valore da standard SIA 2024:2015

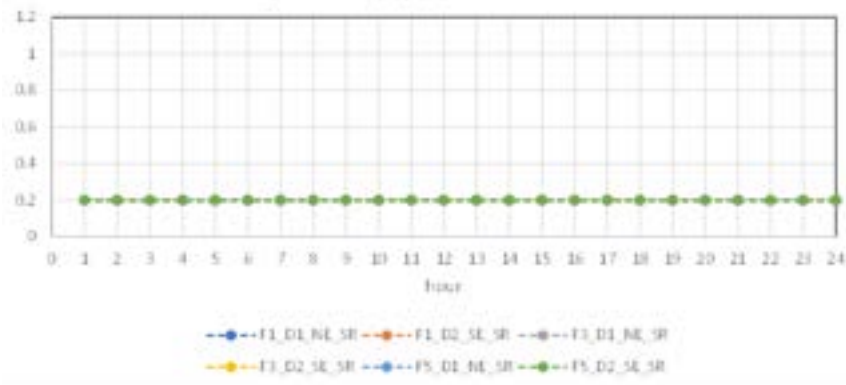


Figura 3.121. Profili di utilizzo delle apparecchiature elettriche di diverse zone notte (diversi appartamenti) per un giorno tipo

Guadagni interni dati dall'utilizzo dell'illuminazione

I guadagni interni dati dall'utilizzo dell'illuminazione all'interno delle varie zone termiche sono stati modellati unendo il valore specifico per questo tipo di guadagni ($2,7 \text{ W/m}^2$) con dati relativi al profilo di utilizzo. Per quanto riguarda il profilo di utilizzo, le luci si considerano accese se le tre seguenti condizioni risultano contemporaneamente verificate:

- le persone sono presenti nella zona considerata;
- le persone non stanno dormendo;
- l'irraggiamento sulla facciata principale della zona considerata è inferiore a 140 W/m^2 .

Come fatto per i profili di occupazione e di utilizzo delle apparecchiature elettriche, anche nel caso dell'utilizzo delle luci sono stati utilizzati differenti profili di utilizzo per diversi giorni dell'anno, nonché diversi per le stesse zone termiche di diversi appartamenti.

A titolo di esempio anche in questo caso si riportano, in Figura 3.122 e Figura 3.124 il profilo di utilizzo delle luci rispettivamente per una zona giorno e una zona notte di uno degli appartamenti in un giorno tipo. Inoltre, Figura 3.123 e Figura 3.125 mostrano rispettivamente i profili di utilizzo delle luci per diverse zone giorno e diverse zone notte di diversi appartamenti per un giorno tipo allo scopo di evidenziarne le differenze.

Guadagni interni, valutazioni globali

La somma dei guadagni interni dovuti alla presenza di persone, all'utilizzo di apparecchiature elettriche e all'utilizzo dell'illuminazione è stata confrontata con valori indicati nella normativa UNI/TS 11300-1:2014 [4]. Come si evince da Figura 3.126 il valore considerato (TOT) e il valore da normativa risultano simili.

Orari di riscaldamento

Per quanto riguarda la limitazione temporale del riscaldamento si considerano le limitazioni date per legge [5] per la zona E, che prevedono un tempo di accensione massimo di 14 ore al giorno nella fascia oraria 5:00 – 23:00 nel periodo dal 15 ottobre al 15 aprile. All'interno della fascia oraria indicata per legge le 14 ore possono essere divise in più intervalli di accensione. Si è deciso di garantire l'accensione nelle fasce orarie 6:00 – 12:00 e 14:00 – 22:00. Le Figura 3.127 e Figura 3.128 mostrano rispettivamente questi intervalli di tempo in cui è consentito l'uso del riscaldamento e il periodo di riscaldamento per la zona E. La temperatura di set point interna considerata in tutto questo lavoro è sempre pari a 20°C .

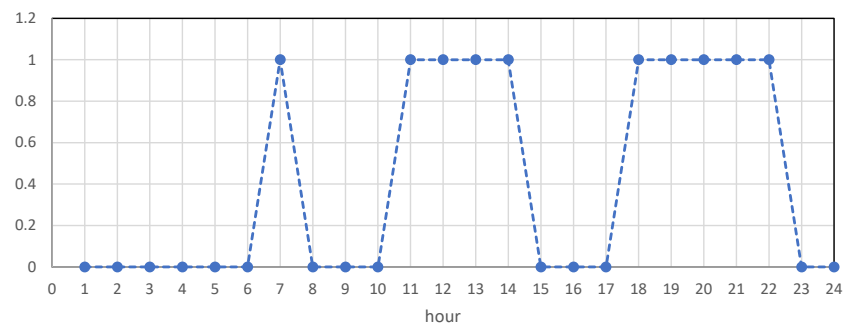


Figura 3.122. Profilo giornaliero di utilizzo delle luci di una zona giorno per un giorno tipo

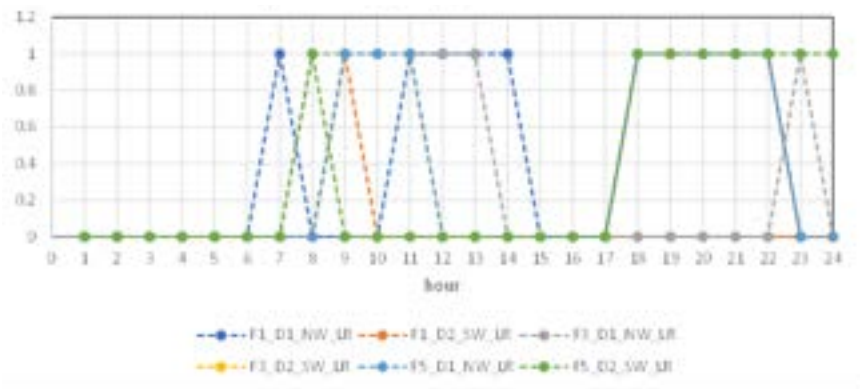


Figura 3.123. Profili di utilizzo delle luci di diverse zone giorno (diversi appartamenti) per un giorno tipo

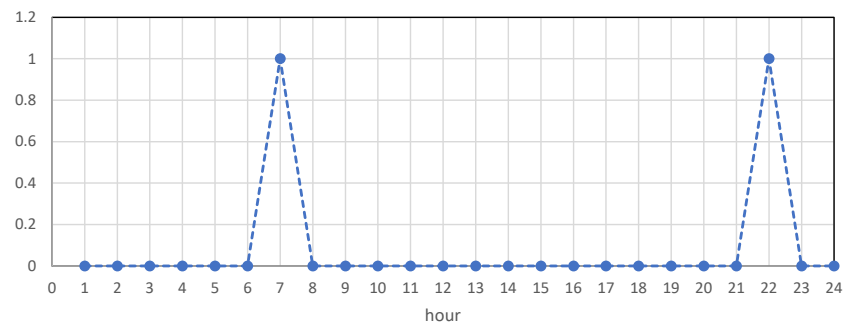


Figura 3.124. Profilo giornaliero di utilizzo delle luci di una zona notte per un giorno tipo

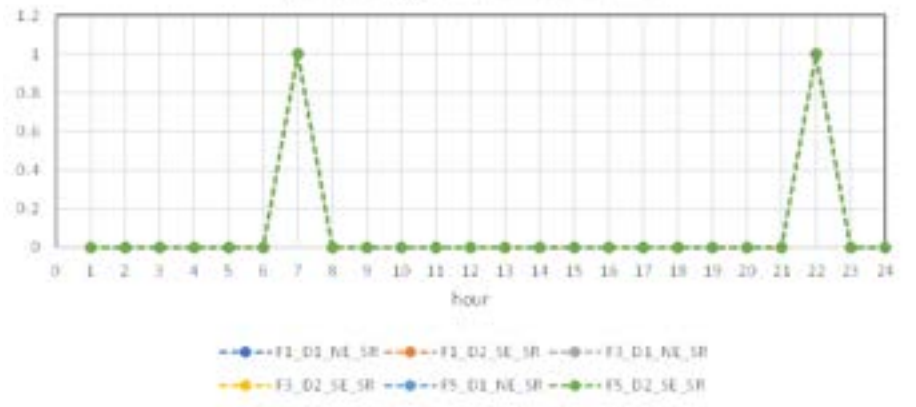


Figura 3.125. Profili di utilizzo delle luci di diverse zone giorno (diversi appartamenti) per un giorno tipo

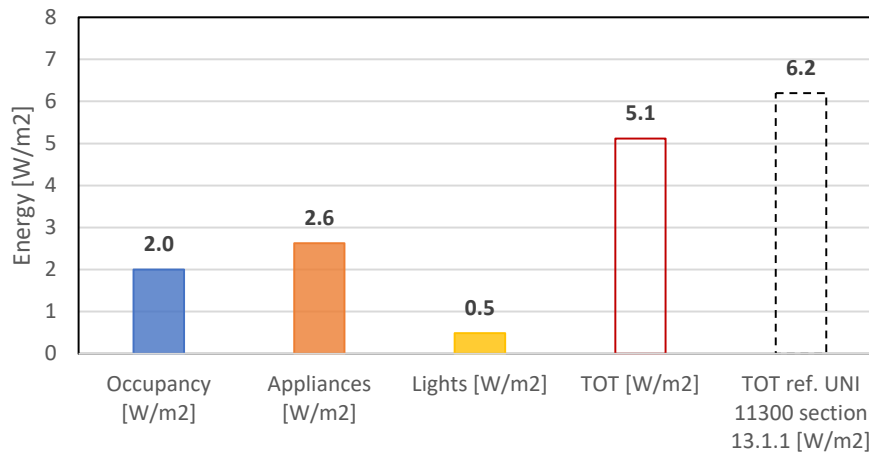


Figura 3.126. Guadagni interni dovuti alla presenza di persone, utilizzo delle apparecchiature elettriche e delle luci, valore totale e confronto con valore indicato nella norma UNI/TS 11300-1:2014 [4]

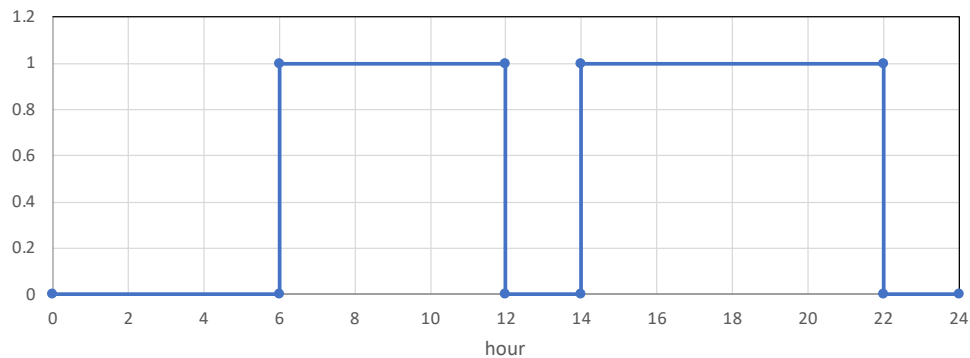


Figura 3.127. Schedule giornaliero riscaldamento (max 14 ore al giorno per la zona E)

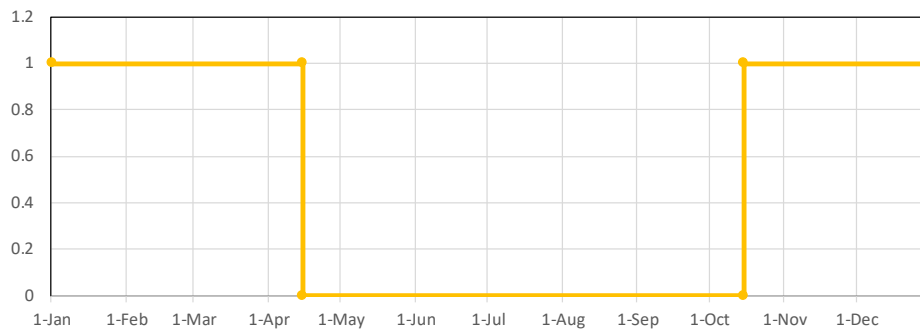


Figura 3.128. Periodo di riscaldamento per la zona E

3.3.2 Condizioni climatiche e selezione dei giorni di riferimento

Il file climatico utilizzato per le simulazioni è preso dal database Meteonorm [6] e fa riferimento ad un anno climatico medio per il comune di Castenaso, comune della città metropolitana di Bologna. Tutti i valori riportati in tale file meteo sono riportati con cadenza oraria.

Da tale file meteo sono stati scelti sei giorni di riferimento (usati per i test). I sei giorni di riferimento scelti sono quelli che meglio rappresentano la variabilità di condizioni climatiche dell'intero anno e permettono di conseguenza una successiva estrapolazione relativamente al funzionamento del sistema edificio/impianto su scala annuale. La selezione dei giorni di riferimento è stata eseguita tramite una procedura [7] che prevede il raggruppamento dei giorni dell'anno in sei insiemi "coerenti" per temperatura e irraggiamento medi giornalieri e l'identificazione degli insiemi con il medoide (punto più vicino al centroide) dell'insieme stesso.

L'estrapolazione dei dati all'intero anno è eseguita "pesando" le prestazioni dell'impianto relative ad ognuno dei sei giorni rispetto al numero di giorni contenuti nel rispettivo raggruppamento, mostrati in Tabella 3.13.

Tabella 3.13. Temperatura media giornaliera (°C) e irraggiamento medio giornaliero (W/m²) nei sei giorni di riferimento; si riporta inoltre (ultima colonna a destra) il numero di giorni di ogni raggruppamento

GIORNO DELL'ANNO	TEMPERATURA [°C]	IRRAGGIAMENTO MEDIO GIORNALIERO [W/m ²]	NUMERO DI GIORNI RAGGRUPPAMENTO
5 gennaio	3,7	63	83
21 marzo	9,9	156	42
9 aprile	15,8	243	47
24 maggio	20,1	153	67
1 agosto	24,4	287	74
5 novembre	10,1	58	52

3.3.3 Impianto termico

3.3.3.1 Schema di impianto

Lo schema di impianto considerato (uguale per entrambe le sessioni di test svolte A e B) è riportato in Figura 3.129. Come si vede da tale figura l'impianto è composto da una parte fisicamente presente in laboratorio (delimitata dalla linea tratteggiata viola, LAB CV) e da una parte simulata (delimitata dalla linea tratto-punto nera, Simulation CV). Si nota che la sottostazione bidirezionale è connessa agli impianti di riscaldamento e ACS attraverso un separatore idraulico simulato in TRNSYS (parte destra dello schema) e all'impianto solare, anch'esso simulato in TRNSYS, attraverso l'accumulo solare (parte sinistra dello schema).

Sono riportati inoltre nella stessa figura dei limiti tratteggiati in linea grigia caratterizzati dalla sigla EH*. Ognuno di questi elementi, chiamati Energy Hub (EH) e caratterizzati da un numero crescente rappresenta un box contenente una serie di elementi idraulici (sensori di temperatura e portata, valvole, pompe, scambiatori di calore) utilizzato in impianti simulati, ma anche in impianti reali, per connettere diverse parti del sistema. Sia nell'ambiente di simulazione che in quello reale, questa modularità garantisce la facile e veloce connessione di varie parti dell'impianto. In Figura 3.129 sono inoltre presenti delle linee tratteggiate verdi caratterizzate ognuna da un riferimento composto dalla lettera P e un numero crescente. Tali linee tratteggiate rappresentano delle sezioni di controllo nelle quali viene valutata la potenza termica (P) transitante. L'integrazione di tale potenza nel tempo permette inoltre di conoscere l'energia termica transitante nelle diverse sezioni di controllo. Nella stessa figura, infine, sono riportati in rosso i principali sensori utilizzati per il controllo del sistema. Come si può vedere, gran parte delle misure effettuate sono misure di temperatura (T), portata (M) e irraggiamento (I). Per un maggior dettaglio a riguardo delle informazioni scambiate tra laboratorio e ambiente di simulazione si faccia riferimento alla sezione relativa alle prove svolte.

3.3.3.2 Impianto di riscaldamento e sua modellazione

La distribuzione modellata nella simulazione è in entrambi i casi (sessione di test A e B) un impianto a radiatori e lo schema impiantistico con evidenziato in rosso il circuito di riscaldamento è riportato in Figura 3.130. In particolare, nel modello è stato scelto di mettere un radiatore per ogni appartamento. La scelta di considerare un solo radiatore per appartamento permette di limitare il numero di componenti e quindi la complessità del modello, garantendo al contempo una rappresentazione fedele del funzionamento di un impianto a radiatori caratteristico del tipo di edificio esaminato. Tale radiatore "fittizio" modellato rappresenta tutti i radiatori presenti nei vari locali dell'appartamento considerato ed è in grado di emettere una potenza, in condizioni nominali, pari alla somma delle potenze nominali dei singoli radiatori installati nei vari locali dell'appartamento. Il controllo simulato non considera la presenza di alcun termostato (né di zona, né di appartamento), ma solo la presenza di valvole termostatiche sui radiatori. I radiatori sono sempre

Per quanto riguarda il tipo di radiatore considerato si è fatto riferimento al modello “Plattella NT” della DeLonghi (maggiori dettagli al paragrafo 5.2). Tale radiatore è caratterizzato da una potenza nominale di 1.989 W/radiatore ottenuta considerando come temperatura di ingresso, uscita e ambiente rispettivamente 75, 65 e 20 °C. Sebbene in scheda tecnica si riporti il valore di potenza nominale considerando una temperatura di ingresso di 75 °C generalmente, nel regolare funzionamento si tende a non superare il valore di 70 °C come temperatura in ingresso ai radiatori, come si evince anche dalla curva climatica considerata e riportata al paragrafo 5.1.3. Per tale motivo nel dimensionamento dei radiatori è stato considerato il valore di potenza che viene fornito in corrispondenza di temperatura di ingresso, uscita e ambiente rispettivamente di 70, 60 e 20 °C.

Per il dimensionamento dei radiatori dei singoli appartamenti si è partiti dai valori di fabbisogno termico di picco ottenuti da una simulazione di un intero anno dell’edificio non risanato considerato nella sessione di test A. Inoltre, un coefficiente di sovradimensionamento k posto pari a 1,5 è stato considerato per avere un certo margine di sicurezza relativamente alla copertura dei fabbisogni di riscaldamento. I valori di fabbisogno termico di picco delle varie zone termiche dell’edificio non risanato considerato nella sessione di test A sono riportati in Tabella 3.14 (valori fuori parentesi).

Inoltre, essendo il modello di edificio composto da cinque piani dimensionalmente uguali, il calcolo per il dimensionamento dei radiatori è stato fatto considerando l’appartamento del piano più sfavorito e lo stesso radiatore (stessa dimensione del radiatore e quindi stessa potenza emessa a parità di condizioni di funzionamento) è stato utilizzato anche negli altri appartamenti identici ma posti su piani diversi. Questo approccio porta a un certo sovradimensionamento dei radiatori, in particolare di quelli posti negli appartamenti ai piani intermedi, dove la presenza di zone riscaldate superiormente e inferiormente riduce le perdite termiche e conseguentemente il fabbisogno termico. Tuttavia, è stato seguito questo approccio in quanto esso rappresenta la procedura generalmente utilizzata in condomini risalenti agli anni 1970-80.

Per quanto riguarda invece il dimensionamento dei radiatori dei singoli appartamenti dell’edificio risanato utilizzato nella sessione di test B si è considerato, per ogni appartamento, lo stesso radiatore (stessa dimensione del radiatore e quindi stessa potenza emessa a parità di condizioni di funzionamento) utilizzato nell’edificio non risanato considerato nella sessione di test A. La riduzione della potenza emessa dai radiatori (necessaria a coprire il minor fabbisogno di riscaldamento dell’edificio risanato) viene ottenuta modificando la curva climatica considerata. Per valutare i fabbisogni termici sia a livello di singoli appartamenti che a livello di intero edificio è stata eseguita, anche in questo caso, una simulazione dell’edificio risanato sull’intero anno considerato. I fabbisogni di picco di riscaldamento dei vari appartamenti sono riportati tra parentesi sempre in Tabella 3.14. Nella stessa tabella sono anche riportate, sempre tra parentesi, le potenze emesse dai radiatori dei singoli appartamenti considerando non più le temperature di ingresso, uscita e ambiente considerate nella sessione di test A (rispettivamente 70, 60, 20 °C), ma quelle relative alla sessione di test B (rispettivamente 55, 45, 20 °C).

La scelta di mantenere gli stessi radiatori e di agire sulla temperatura di alimentazione degli stessi modificando la curva climatica utilizzata, rappresenta la soluzione comunemente utilizzata nei casi di risanamento di edifici come quello considerato in cui si interviene solo sull’involucro, senza interessare l’impianto (es. sostituzione dei terminali di emissione).

Tabella 3.14. Fabbisogno termico di picco e potenza termica installata nei vari appartamenti dell’edificio non risanato considerato nella sessione di test A (valori fuori parentesi) e dell’edificio risanato considerato nella sessione di test B (valori tra parentesi)

APPARTAMENTO	FABBISOGNO DI PICCO [W]	POTENZA RADIATORE INSTALLATA [W]
1F_1	2.233 (1.465)	4.678 (2.705)
1F_2	2.261 (1.495)	4.440 (2.568)
3F_1	2.003 (1.181)	4.678 (2.705)
3F_2	1.991 (1.165)	4.440 (2.568)
5F_1	3.119 (1.641)	4.678 (2.705)
5F_2	2.961 (1.599)	4.440 (2.568)

La portata nominale di acqua circolante nei radiatori nella sessione di test A, a livello di appartamento, in condizioni nominali risulta dell'ordine di 0,37 m³/h per una portata globale a livello di intero edificio (dieci appartamenti dimensionalmente uguali) dell'ordine di 3,7 m³/h. Questa portata, a livello di singolo appartamento, garantisce la copertura del fabbisogno di picco di riscaldamento dell'appartamento termicamente più sfavorito dell'edificio non risanato considerando come temperatura di mandata, ritorno e ambiente rispettivamente 70, 60 e 20 °C e garantendo al contempo un margine di sicurezza k pari a 1,5.

Nella sessione di test B, invece, la portata nominale a livello di appartamento viene ridotta a circa 0,23 m³/h, per una portata globale a livello di intero edificio (dieci appartamenti dimensionalmente uguali) dell'ordine di 2,3 m³/h. La riduzione della portata rispetto alla sessione di test A risulta necessaria per mantenere, a livello dei singoli radiatori, una differenza di temperatura del fluido circolante tra ingresso e uscita di 10 °C. Tale portata, a livello di singolo appartamento, garantisce la copertura del fabbisogno di picco di riscaldamento dell'appartamento termicamente più sfavorito dell'edificio risanato, considerando come temperatura di mandata, ritorno e ambiente rispettivamente 55, 45 e 20 °C e garantendo al contempo un margine di sicurezza k pari a 1,5. Infine, come detto in precedenza, la portata circolante nei radiatori dei vari appartamenti viene ridotta, in entrambe le sessioni di test A e B, ad un valore pari al 20% della portata nominale al raggiungimento del set point di temperatura dell'appartamento (20 °C + 0,25 °C isteresi). In questa condizione la rimanente frazione di acqua (80%) semplicemente bypassa i radiatori dell'appartamento considerato.

3.3.3.3 Fabbisogni termici dell'intero edificio e a livello di singolo appartamento

Al fine di poter valutare il fabbisogno di riscaldamento a livello di intero edificio e a livello di singolo appartamento si riportano nelle seguenti Tabella 3.15 e Tabella 3.16 i valori dei vari contributi del bilancio termico a livello di intero edificio⁵ rispettivamente per l'edificio non risanato usato nella sessione di test A e per l'edificio risanato usato nella sessione di test B. Il fabbisogno di riscaldamento per l'edificio non risanato da Tabella 3.15 risulta essere dell'ordine di 70 kWh/m²/anno, mentre per l'edificio risanato tale fabbisogno risulta dell'ordine di 30 kWh/m²/anno. Inoltre, in Figura 3.131 e Figura 3.132 sono riportati, rispettivamente per l'edificio non risanato usato nella sessione di test A e per l'edificio risanato usato nella sessione di test B, i profili di fabbisogno di riscaldamento (linea continua arancione) e raffrescamento (linea continua blu) a livello di intero edificio e a livello di singoli appartamenti (linee tratteggiate) per un intero anno. Infine, in Figura 3.133 e Figura 3.134 sono riportate le curve di durata dei fabbisogni di riscaldamento (linea continua arancione) e raffrescamento (linea continua blu) a livello di intero edificio e a livello di singoli appartamenti (linee tratteggiate) rispettivamente per l'edificio non risanato e per l'edificio risanato. Come si nota da Figura 3.133 il massimo fabbisogno per riscaldamento a livello di intero edificio per l'edificio non risanato è dell'ordine di 45 Wh/m², mentre gli appartamenti più sfavoriti (in questo caso gli appartamenti all'ultimo piano a contatto con l'aria esterna attraverso il tetto piano) presentano valori massimi di fabbisogno di riscaldamento dell'ordine di 60 Wh/m². Per l'edificio risanato i suddetti fabbisogni si riducono a 25 Wh/m² e 30 Wh/m² rispettivamente. In definitiva, si può notare come il risanamento considerato porti all'incirca al dimezzamento del fabbisogno di riscaldamento sia in termini di fabbisogno termico annuale che di fabbisogno termico di picco a livello di intero edificio e di appartamento più sfavorito.

Tabella 3.15. Contributi bilancio energetico a livello di intero edificio (in grassetto domanda di riscaldamento e di raffrescamento), edificio non risanato, sessione di test A

Yearly BAL4 contributions for entire building												
Thermal zone	QBAL=	DQAIRdT	QHEAT	QCOOL	QINF	QVENT	QCOUP	QTRANS	QGINT	QWGAIN	QSOL	QSOLAIR
ENTIRE BUILDING [kWh]	0	2389	33831	-12183	-2999	-11996	0	-65217	23333	0	31730	0
ENTIRE BUILDING [kWh/m ² /y]	0.0	4.8	67.7	-24.4	-6.0	-24.0	0.0	-130.4	46.7	0.0	63.5	0.0

⁵ Legenda dei vari contributi (i valori positivi indicano guadagni, i valori negativi indicano dispersioni). QBAL: bilancio energetico dell'edificio (valore pari o comunque all'incirca 0), DQAIRdT: variazione di energia interna dell'edificio, QHEAT: fabbisogno di riscaldamento dell'edificio, QCOOL: fabbisogno di raffrescamento dell'edificio, QINF: contributo dovuto a infiltrazione, QVENT: contributo dovuto a ventilazione, QCOUP: contributo dovuto all'accoppiamento tra zone termiche (=0 in questo caso), QTRANS: contributo dovuto a trasmissione del calore attraverso l'involucro, QGINT: contributo dovuto a guadagni interni, QWGAIN: eventuale guadagno dato da pareti radianti (=0 in questo caso), QSOL: contributo solare, QSOLAIR: contributo solare dovuto alla parte di radiazione entrante attraverso le finestre e subito trasformato in contributo convettivo (pari a 0).

Tabella 3.16. Contributi bilancio energetico a livello di intero edificio (in grassetto domanda di riscaldamento e di raffrescamento), edificio risanato, sessione di test B

Thermal zone	Yearly BAL4 contributions for entire building											
	QBAL=	DQAIRdT	QHEAT	QCOOL	QINF	QVENT	QCOUP	QTRANS	QGINT	QWGAIN	QSOL	QSOLAIR
ENTIRE BUILDING [kWh]	0	2309	14563	-12681	-3166	-12665	0	-39734	23333	0	27592	0
ENTIRE BUILDING [kWh/m2/y]	0.0	4.6	29.1	-25.4	-6.3	-25.3	0.0	-79.5	46.7	0.0	55.2	0.0

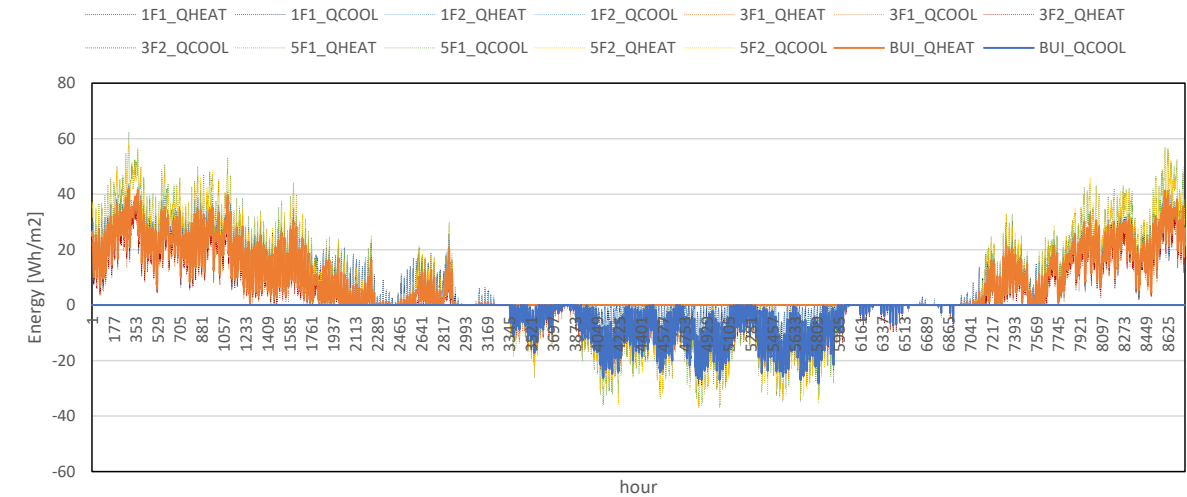


Figura 3.131. Profilo di domanda termica per riscaldamento (arancione) e raffrescamento (blu) a livello di intero edificio e a livello di singolo appartamento (linee tratteggiate), edificio non risanato, sessione di test A

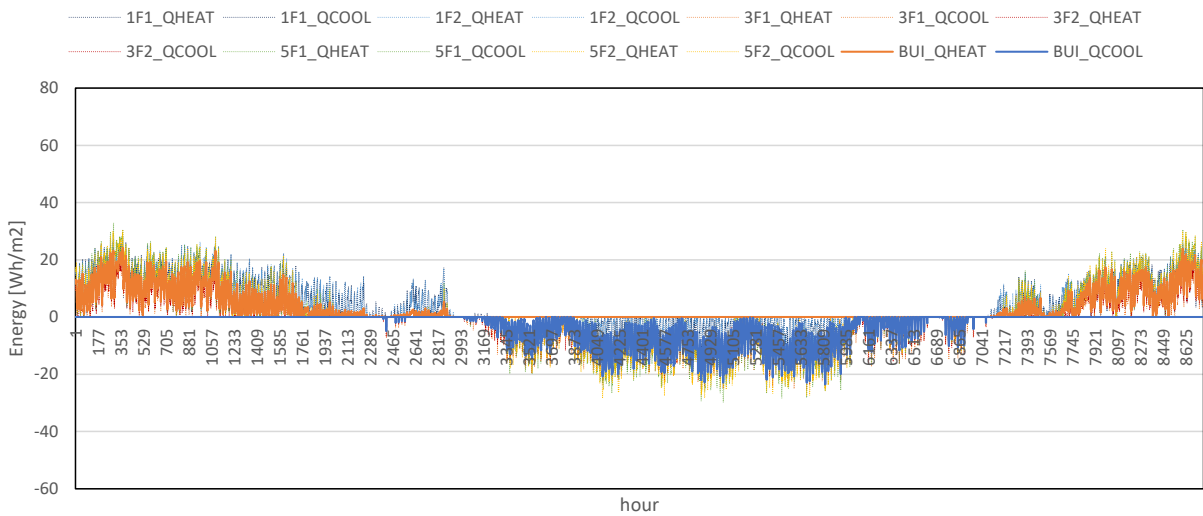


Figura 3.132. Profilo di domanda termica per riscaldamento (arancione) e raffrescamento (blu) a livello di intero edificio e a livello di singolo appartamento (linee tratteggiate), edificio risanato, sessione di test B

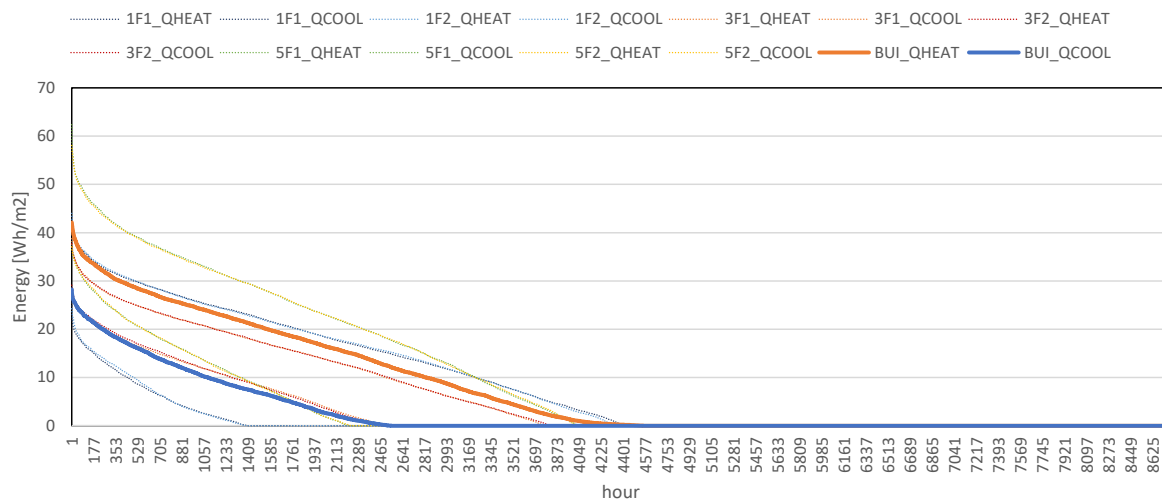


Figura 3.133. Curve di durata di domanda termica per riscaldamento (arancione) e raffrescamento (blu) a livello di intero edificio e a livello di singolo appartamento (linee tratteggiate) edificio non risanato, sessione di test A

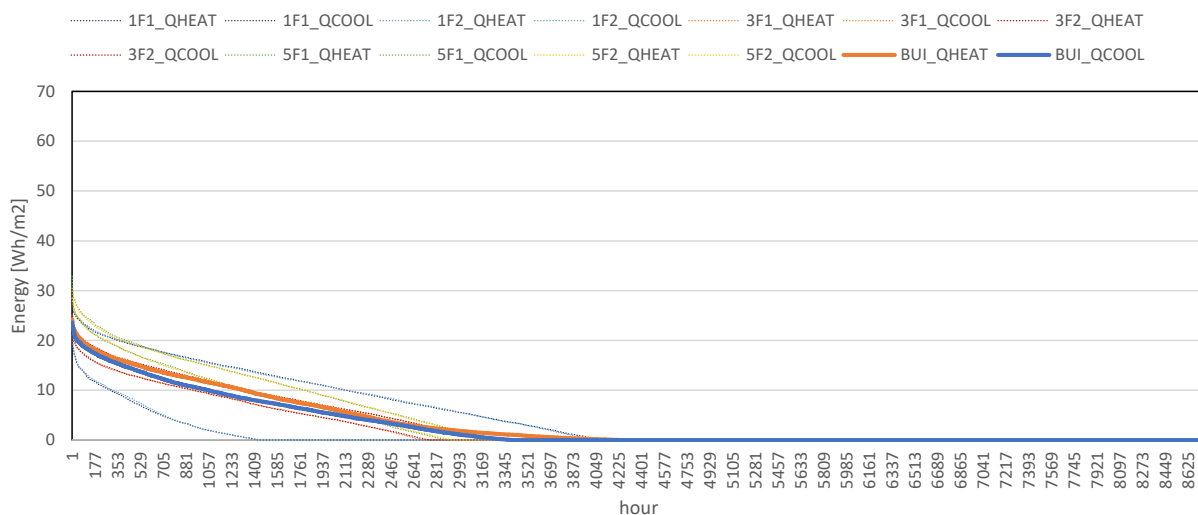


Figura 3.134. Curve di durata di domanda termica per riscaldamento (arancione) e raffrescamento (blu) a livello di intero edificio e a livello di singolo appartamento (linee tratteggiate), edificio risanato, sessione di test B

3.3.3.4 Impianto ACS e sua modellazione

L'impianto per la produzione di ACS in un edificio residenziale multifamiliare come quello esaminato è generalmente provvisto di accumulo e circuito di ricircolo come mostrato in Figura 3.135. La capacità dell'accumulo in questo caso è stata fissata pari a 1.100 litri. Questo valore è stato calcolato in base alla seguente formula:

$$V = \frac{V_{min}}{1 - H_{T1 TES}} \quad (3.1)$$

Dove:

- V è il volume dell'accumulo (in l);
- V_{min} è il volume minimo calcolato secondo la norma UNI 9182:2010 [8] (in l);
- $H_{T1 TES}$ è l'altezza a cui è posizionato il sensore di temperatura usato per la gestione della carica dell'accumulo (posto ad un'altezza di circa il 60% dal basso).

L'unica differenza riguardante il circuito ACS tra la sessione di test A e B riguarda la gestione della temperatura nell'accumulo ACS. Infatti, nella sessione di test A, il caricamento dell'accumulo ACS si attiva quando la temperatura all'interno dell'accumulo ad un'altezza di circa il 60% dal basso (misurata dal sensore T1_TES in Figura 3.135) raggiunge il valore di 55 °C e rimane attiva fino a quando la stessa temperatura raggiunge i 60 °C. Differentemente, nella sessione di test B, a causa della ridotta temperatura della rete di teleriscaldamento considerata (pari a 60 °C) e, conseguentemente, della ridotta temperatura dell'acqua inviata dalla sottostazione all'edificio per la copertura dei carichi di riscaldamento e ACS (55 °C) non è possibile caricare l'accumulo ACS fino a 60 °C. Per questo motivo, nella sessione di test B, il caricamento dell'accumulo ACS si attiva quando la temperatura misurata dal sensore T1_TES raggiunge il valore di 48 °C e rimane attiva fino a quando la stessa temperatura raggiunge i 53 °C. Nonostante nella sessione di test B la temperatura nell'accumulo sia mantenuta in un range inferiore rispetto ai test della sessione A per i motivi sopra citati, è stato verificato che la temperatura dell'acqua distribuita all'utente è conforme al valore di confort indicato nella UNI/TS 11300-2:2019 [9] e pari a 40 °C per la quasi totalità del tempo di prelievo (per più del 99 % del tempo di prelievo durante l'intero anno).

In entrambe le sessioni di test la portata del circuito di caricamento dell'accumulo ACS è fissa e pari a $1 \text{ m}^3/\text{h}$. La Figura 3.135 mostra lo schema di impianto con evidenziato in rosso il circuito di caricamento dell'accumulo ACS.

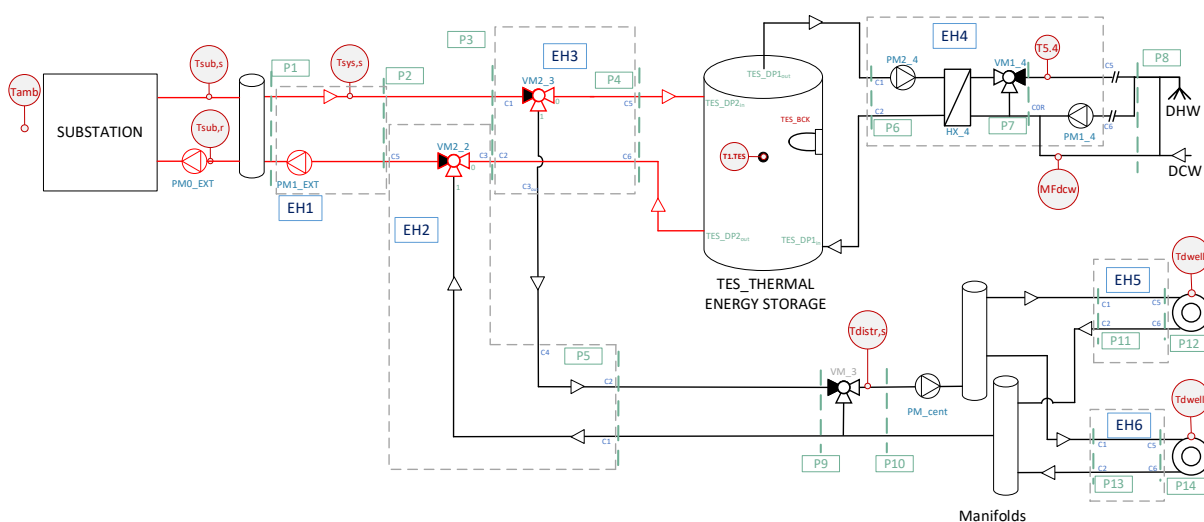


Figura 3.135. Schema impiantistico considerato; in rosso è evidenziato il circuito di caricamento dell'accumulo ACS

Per quanto riguarda invece il circuito di distribuzione dell'ACS all'utenza questo è evidenziato in rosso in Figura 3.136. In entrambe le sessioni di test l'acqua presente nell'accumulo è acqua tecnica, prelevata dalla sommità dello stesso, elaborata dalla pompa PM2_4 e inviata al primario dello scambiatore di calore (HX_4 in Figura 3.136). Tale scambiatore di calore è utilizzato per separare i due circuiti contenenti acqua tecnica uno e ACS l'altro. La pompa PM2_4 è considerata a velocità variabile e portata nominale pari a 2,7 m³/h. La velocità di tale pompa viene variata allo scopo di garantire una differenza di temperatura tra ingresso e uscita al lato primario dello scambiatore di calore HX_4 costante e pari a 15 °C. A valle dello scambiatore di calore (lato secondario) è presente il circuito di ricircolo avente lo scopo di garantire la distribuzione di ACS alla temperatura di confort (42 °C) all'utenza in tempi limitati. Nel caso di un prelievo da parte dell'utenza di una certa quantità di ACS, la stessa quantità di acqua viene immessa nel circuito di ricircolo attraverso la connessione con l'acquedotto rappresentata in Figura 3.136 nel punto COR. L'acqua fredda proveniente dall'acquedotto viene indicata con la sigla DCW (Domestic Cold Water). L'acqua nel circuito di ricircolo viene elaborata dalla pompa PM1_4, anch'essa a velocità variabile. Per la conformazione del circuito essa funziona sempre a velocità costante pari alla velocità minima (10% della portata nominale, elaborando 0,27 m³/h), mentre la regolazione della temperatura dell'ACS inviata al circuito di ricircolo e all'utenza (misurata dal sensore T5.4 e impostata pari a 42 °C) viene gestita dalla valvola con controllo termostatico VM1_4. Per quanto riguarda invece la lunghezza dei tubi del circuito di ricircolo ACS, questa è stata posta pari a 15 metri

per mandata (e quindi anche per il ritorno). Questo valore è stato ottenuto moltiplicando il numero di piani dell'edificio (5) per l'altezza totale dei singoli piani (assunta per semplicità pari a 3 m). Altre caratteristiche come sezione e proprietà termiche dei materiali sono riportate in Tabella 3.17.

Per simulare nel modo più fedele alla realtà possibile il fabbisogno di ACS sono stati sommati dieci profili (uno per ogni appartamento) di richiesta ACS. Tali profili sono stocastici e costruiti utilizzando un apposito software (DHW Calc), che permette di impostare la maggiore/minore probabilità di prelievo attorno a specifiche ore del giorno e specifici giorni della settimana. In Figura 3.137 è riportato, a titolo di esempio, il profilo di prelievo totale (derivante dalla somma dei dieci profili di appartamento) per cinque giorni consecutivi. Come si può vedere il picco di domanda si ha generalmente al mattino, in una fascia oraria compresa all'incirca tra le 6 e le 9.

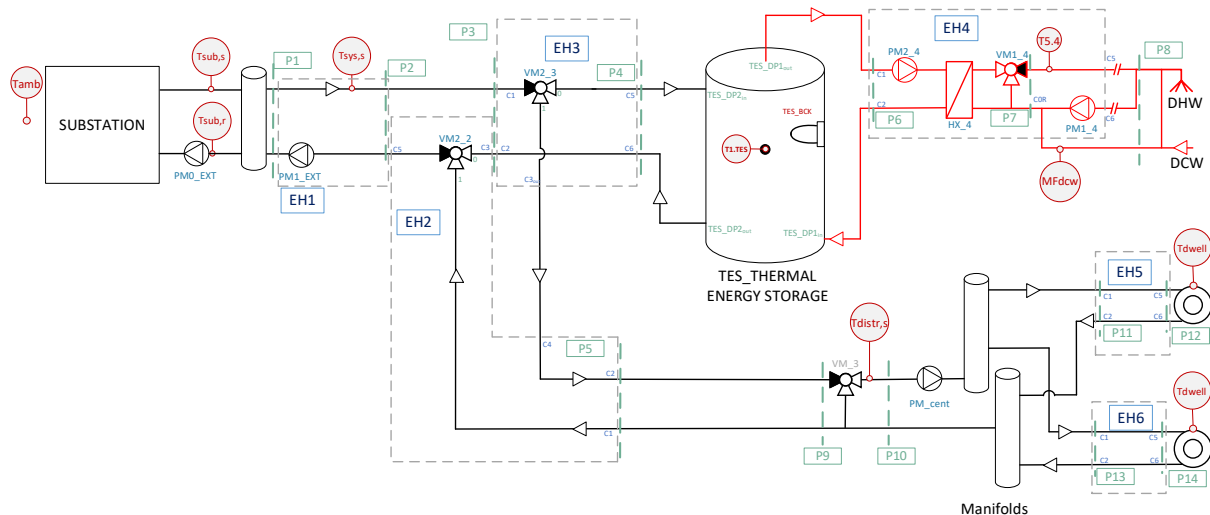


Figura 3.136. Schema impiantistico considerato. In rosso è evidenziato il circuito di ricircolo ACS

Tabella 3.17. Parametri dei tubi del circuito di ricircolo ACS

GRANDEZZA	VALORE	UNITÀ DI MISURA
Lunghezza tubo mandata	15	m
Diametro interno	0,032	m
Spessore tubo	0,002	m
Spessore isolante	0,03	m
Conducibilità termica tubo	150	W/m/K
Conducibilità termica isolante	0,04	W/m/K

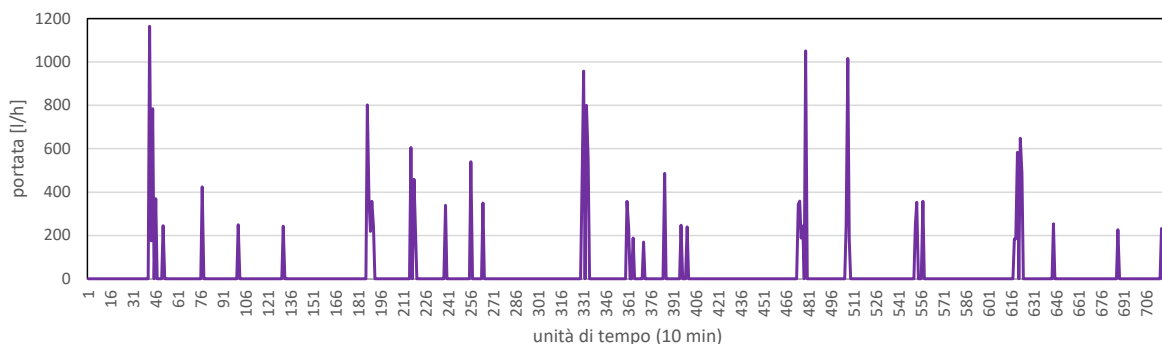


Figura 3.137. Profilo di richiesta ACS somma di tutti gli appartamenti per 5 giorni tipo consecutivi

Il fabbisogno energetico risultante da tale richiesta, calcolato considerando una temperatura in ingresso (dall'acquedotto) pari a 10 °C e un'uscita all'utenza di 42 °C è di 20,1 kWh/mq/anno, in accordo con quanto indicato nella normativa SIA 2024:2015 [10] per la stessa tipologia di edificio (i.e. 19,8 kWh/m²/anno). Il valore di temperatura in uscita all'utenza pari a 42 °C è stato assunto per garantire all'utente finale la temperatura di confort che da normativa UNI/TS 11300-2:2019 risulta pari a 40 °C.

3.3.3.5 Carichi termici complessivi

Per quanto riguarda la sessione di test A, la potenza termica installata per il riscaldamento degli ambienti (potenza nominale dei radiatori presenti nell'intero edificio) è pari a circa 45 kW, mentre il carico di picco relativo al consumo per ACS è pari a circa 23 kW. Dovendo questo sistema garantire la produzione di ACS contemporaneamente alla copertura del carico di riscaldamento, la potenza termica nominale della sottostazione da installare teoricamente dovrà essere pari alla somma aritmetica di questi due contributi, cioè dell'ordine dei 69 kW. La Tabella 3.18 riassume i valori di potenza di riscaldamento installata, potenza di picco ACS e la loro somma aritmetica. Si fa altresì notare che nella definizione della potenza installata per riscaldamento, il calcolo è stato eseguito considerando l'appartamento termicamente più sfavorito e lo stesso radiatore (stessa dimensione del radiatore e quindi stessa potenza emessa a parità di condizioni di funzionamento) è stato utilizzato anche negli altri appartamenti identici, ma posti su piani diversi. Inoltre, nel dimensionamento, come già descritto in precedenza, è stato considerato un coefficiente di sicurezza k pari a 1,5. Queste assunzioni portano a valori di potenza termica di picco da soddisfare da parte della sottostazione relativamente gravosi (69 kW). Tuttavia, soprattutto per quanto riguarda la parte di riscaldamento, la potenza installata (45 kW) è superiore al massimo fabbisogno di riscaldamento dell'edificio (dell'ordine di 25 kW). La sottostazione bidirezionale testata, avente potenza termica nominale pari all'incirca a 60 kW, risulta quindi ben in grado di coprire i fabbisogni dell'edificio e rappresenta una possibile scelta impiantistica per edifici simili a quello considerato in questi test.

Per quanto concerne invece la sessione di test B, la potenza termica installata per il riscaldamento degli ambienti (potenza nominale dei radiatori presenti nell'intero edificio, nelle condizioni di funzionamento relative alla sessione di test B) risulta ridotta rispetto alla sessione di test A e dell'ordine di 26 kW, mentre il carico di picco relativo al consumo per ACS non presenta variazioni apprezzabili rispetto alla sessione di test A e risulta quindi pari a circa 23 kW. Anche in questo secondo caso al sistema è richiesto di garantire la produzione di ACS contemporaneamente alla copertura del carico di riscaldamento. La potenza termica nominale della sottostazione da installare teoricamente dovrà quindi essere pari alla somma aritmetica di questi due contributi, cioè dell'ordine dei 50 kW. La Tabella 3.18 riassume i valori di potenza di riscaldamento installata, potenza di picco ACS e la loro somma aritmetica relativi alla sessione di test B. Si fa notare anche in questo caso che nella definizione della potenza installata per riscaldamento, il calcolo è stato eseguito considerando l'appartamento termicamente più sfavorito e lo stesso radiatore è stato utilizzato anche negli altri appartamenti identici, ma posti su piani diversi. Inoltre, anche in questo caso, come descritto in precedenza è stato considerato un coefficiente di sicurezza k pari a 1,5. Queste assunzioni portano a valori di potenza termica di picco da soddisfare da parte della sottostazione anche nel caso della sessione di test B relativamente gravosi (50 kW).

Tuttavia, anche in questa seconda sessione di test, la potenza installata per riscaldamento (circa 26 kW) è superiore al massimo fabbisogno di riscaldamento dell'edificio (dell'ordine di 13 kW). Come meglio specificato nella sessione riguardante le prove, la potenza termica che la sottostazione bidirezionale può inviare all'edificio per la copertura dei fabbisogni di riscaldamento e ACS nella sessione di test B risulta dell'ordine di 23 kW. Tale riduzione rispetto alla sessione di test A è principalmente dovuta alle diverse condizioni di funzionamento degli scambiatori di calore lato utente della sottostazione bidirezionale. È stato in ogni caso verificato che la sottostazione bidirezionale riesce a garantire la copertura dei fabbisogni di riscaldamento e ACS dell'edificio anche nel giorno più critico (primo giorno di test, 5 gennaio).

Tabella 3.18. Potenza termica installata per riscaldamento, potenza di picco ACS e potenza di picco somma [kW]

SESSIONE	POTENZA INSTALLATA RISCALDAMENTO	POTENZA DI PICCO ACS	POTENZA DI PICCO SOMMA (INSTALLATA RISC. + ACS)
Test A	45,5	23,5	69,0
Test B	26,3	23,5	49,8

3.3.4 Circuito solare

Il sistema considerato in entrambe le sessioni di test (A e B) prevede anche la presenza di un impianto solare termico formato da collettori solari piani avente come scopo lo sfruttamento di energia solare per la copertura totale o parziale dei carichi termici dell'edificio (riscaldamento, ACS) e, in caso di surplus di produzione, l'immissione di energia termica nella rete di teleriscaldamento attraverso la sottostazione bidirezionale. È stato scelto di considerare un impianto solare termico avente una potenza nominale pari all'incirca alla potenza nominale della sottostazione bidirezionale alle condizioni di funzionamento della sessione di test A, quindi dell'ordine di 60 kW. Il campo solare prevede pannelli inclinati a 45 ° per migliorarne le performance nel periodo di riscaldamento e con orientamento verso Sud. Il modello di collettore solare piano considerato è ökoTech GS (vedere per maggiori dettagli la scheda tecnica e il certificato di prova al paragrafo 5.2). Avendo questo collettore un'efficienza in condizioni nominali del 61%, l'area necessaria per fornire una potenza nominale di 60 kW risulta essere dell'ordine di 100-110 m². Considerando l'area del singolo collettore (2,2 m²) e considerando un numero di collettori in serie pari a 5 per evitare un eccessivo incremento delle perdite di carico il numero di stringhe di collettori connesse in parallelo risulta pari a 10. La Tabella 3.19 riassume le principali caratteristiche del campo solare.

Tabella 3.19. Caratteristiche dei collettori e del campo solare considerato

GRANDEZZA	VALORE	UNITÀ DI MISURA
Modello collettori	ökoTech GS	
Inclinazione collettori	45	°
Orientamento collettori	Sud	
Efficienza nominale collettori	0.61	
Area totale singolo collettore	2.2	m ²
N° collettori in serie	5	
N° stringhe in parallelo	10	
Area totale campo solare	110	m ²

I collettori solari sono stati modellati in TRNSYS utilizzando la type 1b. Avendo disponibili i parametri caratteristici del collettore solare considerato è stata fatta una calibrazione del modello per ottenere, in condizioni di funzionamento nominali⁶, risultati in accordo con quanto previsto dalla scheda tecnica del componente riportata al paragrafo 5.2. La Figura 3.138 riporta i valori di temperatura ambiente (linea fucsia), temperatura in ingresso ai collettori (linea rossa), temperatura in uscita dai collettori (linea blu) e valore di efficienza (linea grigia) in condizioni nominali. Il valore di efficienza, pari a 0,61, risulta in accordo con quanto indicato nella scheda tecnica.

Per quanto riguarda la struttura impiantistica e i sensori utilizzati per il controllo del sistema solare, essi sono mostrati in Figura 3.139. Il campo solare è connesso, attraverso uno scambiatore di calore (HX_STC in Figura 3.139), ad un accumulo termico (SOLAR_TES o STES in Figura 3.139) avente un volume pari a 1000 litri. Il dimensionamento dell'accumulo termico è stato fatto considerando la superficie del campo solare (circa 100 m²) e un valore specifico di volume dell'accumulo di 10 litri per m² di collettori. L'accumulo termico è poi a

⁶ Condizioni nominali di test considerate: irraggiamento sul piano dei collettori pari a 1000 W/mq, differenza di temperatura tra collettori e ambiente pari a 40°C (temperatura dei collettori calcolata come media tra la temperatura del fluido in ingresso e la temperatura del fluido in uscita).

sua volta connesso alla sottostazione bidirezionale per inviare l'energia termica raccolta dal campo solare, in primo luogo, all'utente per la copertura totale o parziale dei fabbisogni di riscaldamento e ACS e, in secondo luogo, in caso di surplus di produzione, alla rete di teleriscaldamento. Il fatto di utilizzare un accumulo termico specificamente solo per la connessione del campo solare alla sottostazione bidirezionale, oltre a rappresentare la reale soluzione impiantistica utilizzata in impianti di questo tipo, è dovuto a molteplici ragioni. In primo luogo, tale accumulo termico garantisce una certa inerzia al sistema, aumentando la stabilità (in termini di potenza) e la durata dei periodi in cui viene inviata energia termica alla sottostazione bidirezionale, evitando così un funzionamento caratterizzato da frequenti on/off e alta variabilità della potenza immessa. In secondo luogo, si ricorda che l'impianto solare considerato, per dimensioni (e quindi per potenza nominale), va inteso come un impianto avente come scopo principale l'interazione con la locale rete di teleriscaldamento attraverso l'immissione di energia termica tramite la sottostazione bidirezionale più che specificamente progettato per garantire la copertura di una certa frazione dell'energia termica per riscaldamento e ACS richiesta dall'edificio.

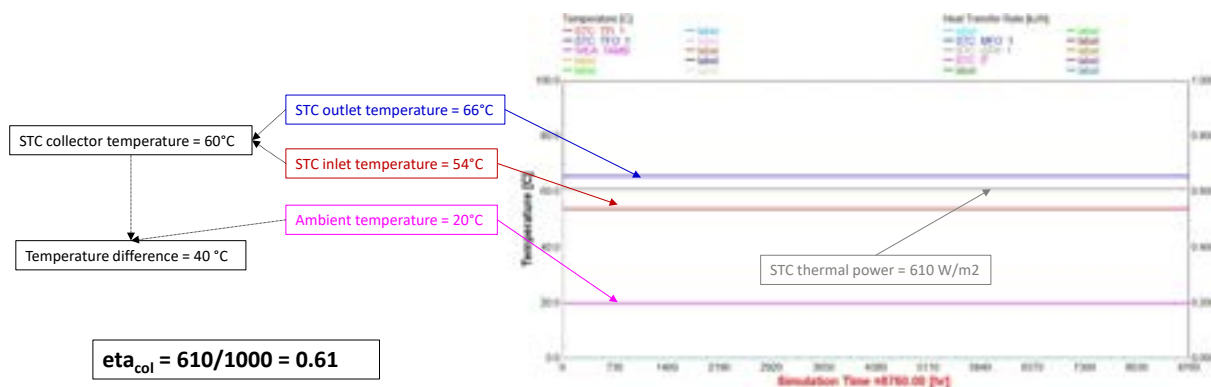


Figura 3.138. Temperatura ambiente (linea fucsia), temperatura ingresso collettori (linea rossa), temperatura uscita collettori (linea blu) ed efficienza dei collettori (linea grigia)

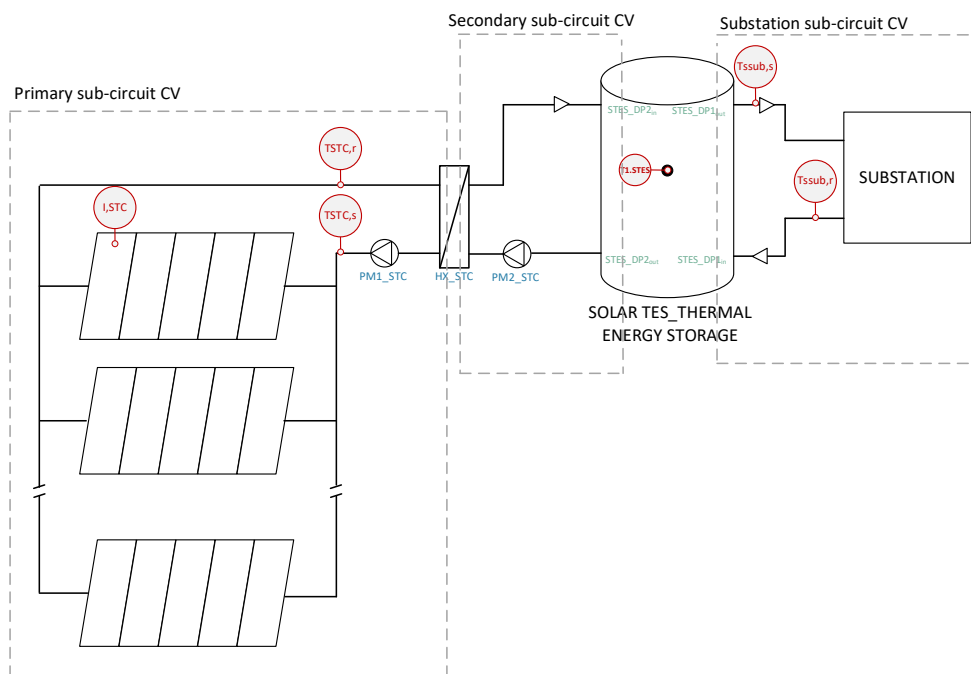


Figura 3.139. Schema impiantistico semplificato del circuito solare con evidenziati, in linea tratteggiata, i tre sotto-circuiti considerati; sono inoltre riportati i sensori di temperatura (T) e irraggiamento sul piano dei collettori (I) usati per il controllo dell'impianto solare

Il funzionamento dell'impianto considerato in entrambe le sessioni di test (A e B) viene descritto di seguito evidenziando le differenze, in termini di controllo, tra le due sessioni di test. Per semplicità, si divide l'impianto nei seguenti tre sotto-circuiti visibili in Figura 3.139:

- sotto-circuito primario (campo solare – scambiatore di calore);
- sotto-circuito secondario (scambiatore di calore – accumulo);
- sotto-circuito lato sottostazione (accumulo – sottostazione bidirezionale).

La pompa PM1_STC, e quindi il sotto-circuito primario, risulta attiva se le tre seguenti condizioni sono contemporaneamente soddisfatte:

- Irraggiamento sul piano dei collettori (misurato dal sensore I,STC in Figura 3.139) maggiore del valore di setpoint (150 W/m^2 con isteresi avente limiti superiore e inferiore rispettivamente pari a $+50 \text{ W/m}^2$ e 0 W/m^2).
- Temperatura in uscita dai collettori solari (misurata dal sensore TSTC,r in Figura 3.139) maggiore della temperatura in ingresso ai collettori (misurata dal sensore TSTC,s in Figura 3.139) (con isteresi avente limiti superiore e inferiore rispettivamente pari a $+2 \text{ }^\circ\text{C}$ e $0 \text{ }^\circ\text{C}$).
- Temperatura in uscita dai collettori solari (misurata dal sensore TSTC,r in Figura 3.139) minore della temperatura di stagnazione dei collettori ($170 \text{ }^\circ\text{C}$ con isteresi avente limiti superiore e inferiore rispettivamente pari a $+0 \text{ }^\circ\text{C}$ e $-5 \text{ }^\circ\text{C}$).

La pompa PM2_STC, e quindi il sotto-circuito secondario, si attiva se le seguenti quattro condizioni risultano contemporaneamente soddisfatte:

- Irraggiamento sul piano dei collettori (misurato dal sensore I,STC in Figura 3.139) maggiore del valore di setpoint (150 W/m^2 con isteresi avente limiti superiore e inferiore rispettivamente pari a $+50 \text{ W/m}^2$ e 0 W/m^2).
- Temperatura in uscita dai collettori solari (misurata dal sensore TSTC,r in Figura 3.139) minore della temperatura di stagnazione dei collettori ($170 \text{ }^\circ\text{C}$ con isteresi avente limiti superiore e inferiore rispettivamente pari a $+0 \text{ }^\circ\text{C}$ e $-5 \text{ }^\circ\text{C}$).
- Temperatura in uscita dai collettori solari (misurata dal sensore TSTC,r in Figura 3.139) maggiore della temperatura presente ad un'altezza di circa il 60% dell'accumulo (misurata dal sensore T1.STES in Figura 3.139) (con isteresi avente limiti superiore e inferiore rispettivamente pari a $+7 \text{ }^\circ\text{C}$ e $+2 \text{ }^\circ\text{C}$).
- Temperatura nella parte alta dell'accumulo (in corrispondenza dell'uscita verso la sottostazione bidirezionale) minore della temperatura di stagnazione dell'accumulo ($98 \text{ }^\circ\text{C}$ con isteresi avente limiti superiore e inferiore rispettivamente pari a $+0 \text{ }^\circ\text{C}$ e $-2 \text{ }^\circ\text{C}$).

La scarica dell'accumulo, e quindi l'invio di energia termica alla sottostazione bidirezionale viene gestita in modo differente nelle due sessioni di test, in particolare, essa si attiva se:

- Sessione di test A: la temperatura nella parte alta dell'accumulo, in corrispondenza dell'uscita verso la sottostazione bidirezionale raggiunge gli $80 \text{ }^\circ\text{C}$ (con isteresi avente limiti superiore e inferiore rispettivamente pari a $+2 \text{ }^\circ\text{C}$ e $0 \text{ }^\circ\text{C}$).
- Sessione di test B: la temperatura nella parte alta dell'accumulo, in corrispondenza dell'uscita verso la sottostazione bidirezionale raggiunge i $60 \text{ }^\circ\text{C}$ (con isteresi avente limiti superiore e inferiore rispettivamente pari a $+2 \text{ }^\circ\text{C}$ e $0 \text{ }^\circ\text{C}$).

Tale differenza è dovuta alla diversa temperatura di mandata della rete di teleriscaldamento che consente, nel caso della sessione di test B, l'invio in rete di un eventuale surplus di produzione dal campo solare termico a temperature ben inferiori rispetto agli $80 \text{ }^\circ\text{C}$ e dell'ordine di $62 \text{ }^\circ\text{C}$.

Per quanto riguarda le performance del circuito solare nella sessione di test A, di seguito in Tabella 3.20 si riporta un'analisi a livello annuale dei flussi energetici. Come si nota, della quantità di energia teoricamente disponibile (irraggiamento sul piano dei collettori solari) solo una frazione pari al 21% viene convertita in energia utile estratta attraverso i collettori solari. Il rimanente 80% circa viene invece perso in gran parte (58%) a causa delle perdite termiche presenti durante il funzionamento dell'impianto. Tali perdite termiche rappresentano la quantità di energia teoricamente disponibile durante il funzionamento del campo solare che non viene convertita in energia termica utile dai collettori solari; sono calcolate come differenza tra l'irraggiamento sul piano dei collettori e l'energia termica utile estratta dai collettori quando l'impianto è in funzione (portata di fluido circolante nei collettori solari maggiore di zero). Una parte minore, ma comunque rilevante (22%), viene invece persa a causa del mancato utilizzo dell'impianto. Quest'ultima condizione si

verifica ogni qualvolta c'è irraggiamento solare sul piano dei collettori, ma almeno una delle tre condizioni per il funzionamento del sotto-circuito primario non è verificata. Ad esempio, ciò si verifica quando l'irraggiamento sul piano dei collettori è minore del valore di set point (150 W/m^2 , più eventualmente isteresi pari a 50 W/m^2). Un altro aspetto osservabile dalla stessa Tabella 3.20 riguarda le perdite termiche riscontrabili nei tubi e nell'accumulo solare. Esse risultano limitate (entrambe dell'ordine dell'1% rispetto al valore di irraggiamento sul piano dei collettori). Risulta quindi che l'energia disponibile per l'invio alla sottostazione bidirezionale è dell'ordine del 19% rispetto all'irraggiamento incidente sul piano dei collettori.

Tabella 3.20. Principali flussi energetici dell'impianto solare, valori annuali, T set point accumulo = 80°C , sessione di test A

Impianto solare, flussi energetici, analisi annuale								
	Irraggiamento sui collettori	Perdite mancato utilizzo campo	Perdite per inefficienza	Energia utile collettori	Perdite termiche nei tubi	Energia entrante accumulo	Perdite termiche accumulo	Energia uscente accumulo (data alla sottostazione)
[kWh]	172469	37549	99179	35741	2140	33601	1141	32404
[kWh/m ² /y]	1568	341	902	325	19	305	10	295
[%]	100%	22%	58%	21%	1%	19%	1%	19%

Il valore di energia utile estratta dai collettori solari ($325 \text{ kWh/m}^2/\text{anno}$) e il relativo valore in percentuale rispetto all'irraggiamento sul piano dei collettori (21%) risultano a prima vista relativamente bassi. Per questo motivo sono state eseguite anche analisi a livello mensile e orario delle performance in particolare del campo solare. La Figura 3.140 mostra i valori cumulati mensili di irraggiamento sul piano dei collettori (colonne gialle vuote), le perdite per mancato utilizzo del campo solare (colonne blu), le perdite per inefficienza (colonne azzurre) e l'energia utile estratta dai collettori (colonne gialle piene). Nella stessa figura, inoltre, si riportano i valori di efficienza calcolati mensilmente, come il rapporto tra l'energia utile estratta dai collettori e l'irraggiamento sugli stessi. Come si nota l'efficienza mensile varia da valori minimi attorno al 10%, riscontrabili nel periodo invernale, a valori massimi dell'ordine del 25-30%, ottenibili nel periodo estivo. Tali valori mensili sono in linea con i dati di monitoraggio di un campo solare simile monitorato nell'ambito di un altro progetto da EURAC e risultano quindi allineati con evidenze sperimentali. A ulteriore conferma della validità dei dati ottenuti è stata eseguita anche un'analisi dei valori di efficienza dei collettori solari su base oraria per l'intero anno considerato. La Figura 3.141 riporta questi valori di efficienza calcolati su base oraria e, come si può notare, l'efficienza risulta essere variabile in un range compreso tra circa il 10% e il 50%, valori attesi e consoni alla tecnologia considerata.

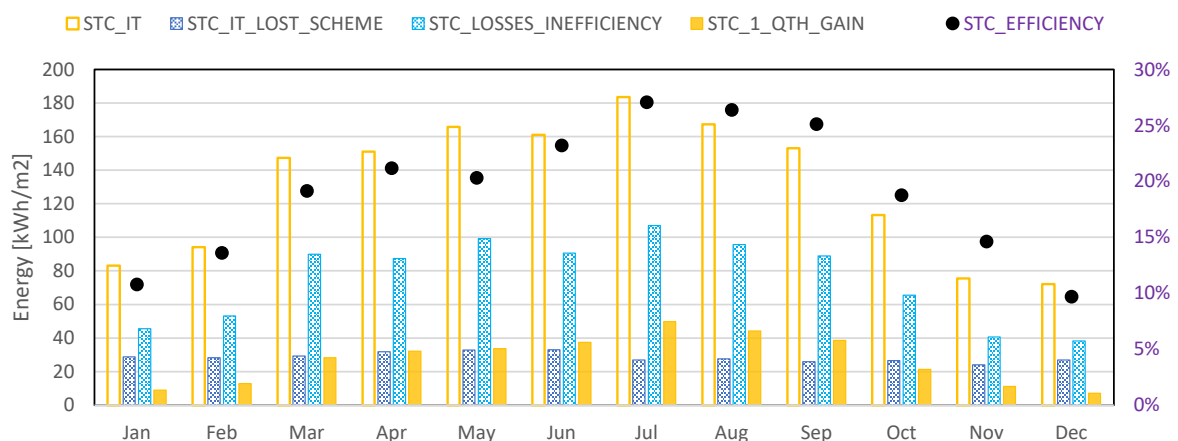


Figura 3.140. Irraggiamento solare cumulato mensile sul piano dei collettori (colonne gialle vuote), perdite termiche dovute a non utilizzo dei collettori (colonne blu) e a dispersioni termiche (colonne azzurre), energia utile in uscita dai collettori (colonne gialle piene) e efficienza mensile dei collettori; T set point accumulo = 80°C , sessione di test A

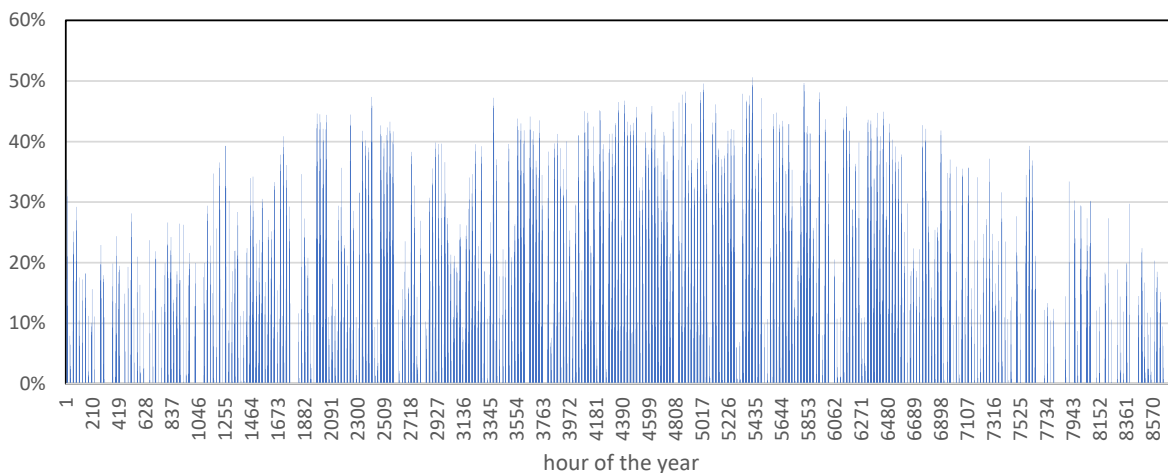


Figura 3.141. Efficienza dei collettori (valori orari per un intero anno); T set point accumulo = 80°C, sessione di test A

La spiegazione della relativamente bassa efficienza e conseguentemente delle relativamente alte perdite termiche a livello annuale va quindi ricercata non nella sottostima delle prestazioni dell'impianto solare, ma piuttosto nelle condizioni di funzionamento dello stesso impianto e, in particolare, nella gestione della scarica verso la sottostazione bidirezionale. Come già riportato, infatti, la temperatura minima per inviare energia dall'accumulo solare alla sottostazione bidirezionale risulta relativamente alta (80°C). Questo valore è dovuto alla configurazione impiantistica del laboratorio utilizzata in questo test, così come descritto nel paragrafo relativo alle prove (3.4). Questa condizione porta a una temperatura di funzionamento mediamente elevata dell'impianto solare e, di conseguenza a elevate perdite termiche e scarsa efficienza. A riprova di questa affermazione sono state eseguite delle simulazioni annuali solo al computer variando la temperatura alla quale viene scaricato l'accumulo verso la sottostazione bidirezionale (in particolare sono state effettuate delle simulazioni considerando non più 80 °C come temperatura di set point, ma 60 °C e 40 °C). Conformemente a quanto atteso, con queste nuove condizioni l'efficienza dell'impianto solare risulta migliorata, passando da un valore pari al 21%, quando il valore di set point nell'accumulo è pari a 80 °C, al 33% e 47%, quando la temperatura di set point nell'accumulo viene ridotta rispettivamente a 60 °C e 40 °C rispettivamente.

Per quanto riguarda infine le performance del circuito solare nella sessione di test B, anche in questo caso la Tabella 3.21 riporta un'analisi dei flussi energetici. Come già accennato in precedenza, rispetto alle condizioni considerate nella sessione di test A, il ridotto livello di temperatura a cui viene scaricato l'accumulo solare verso la rete di teleriscaldamento attraverso la sottostazione bidirezionale (circa 60 °C) porta a un aumento dell'energia utile estratta dai collettori solari e inviata alla rete (energia utile estratta dai collettori pari a 514 kWh/m²/anno, equivalente al 33% dell'energia disponibile sul piano dei collettori). Inoltre, comparando i risultati di Tabella 3.20 e Tabella 3.21 è possibile notare come nella sessione di test B la maggiore energia utile estratta dai collettori sia principalmente legata alla riduzione delle perdite per mancato utilizzo del campo solare, mentre le perdite per inefficienza risultano simili (differenza tra le sessioni A e B di test dell'ordine del 3% rispetto all'energia teoricamente disponibile sul piano dei collettori). Inoltre, anche nella sessione di test B, le perdite termiche nei tubi e nell'accumulo solare risultano limitate (dell'ordine circa dell'1%). Risulta quindi che l'energia disponibile per l'invio alla sottostazione bidirezionale nella sessione di test B è dell'ordine del 32% rispetto all'irraggiamento incidente sul piano dei collettori.

Come fatto per la sessione di test A, anche in questo caso le performance del campo solare sono state valutate non solo su base annuale, ma anche su base mensile e oraria. Anche l'analisi fatta su base mensile indica un generale aumento dell'energia utile estratta dai collettori rispetto alla sessione di test A. Tale miglioramento si verifica in generale per tutti i mesi dell'anno, come si può notare comparando rispettivamente Figura 3.140 con Figura 3.142. Infine, anche l'analisi su base oraria conferma la maggiore efficienza dei collettori solari nelle condizioni di funzionamento della sessione di test B con dei valori di picco dell'ordine del 60%; tale miglioramento è ben visibile comparando Figura 3.141 con Figura 3.143.

Tabella 3.21. Principali flussi energetici dell'impianto solare, valori annuali; T set point accumulo = 60°C, sessione di test B

Impianto solare, flussi energetici, analisi annuale								
	Irraggiamento sui collettori	Perdite mancato utilizzo campo	Perdite per inefficienza	Energia utile collettori	Perdite termiche nei tubi	Energia entrante accumulo	Perdite termiche accumulo	Energia uscente accumulo (data alla sottostazione)
[kWh]	172469	20270	95637	56563	1378	55184	753	54403
[kWh/m ² /y]	1568	184	869	514	13	502	7	495
[%]	100%	12%	55%	33%	1%	32%	0%	32%

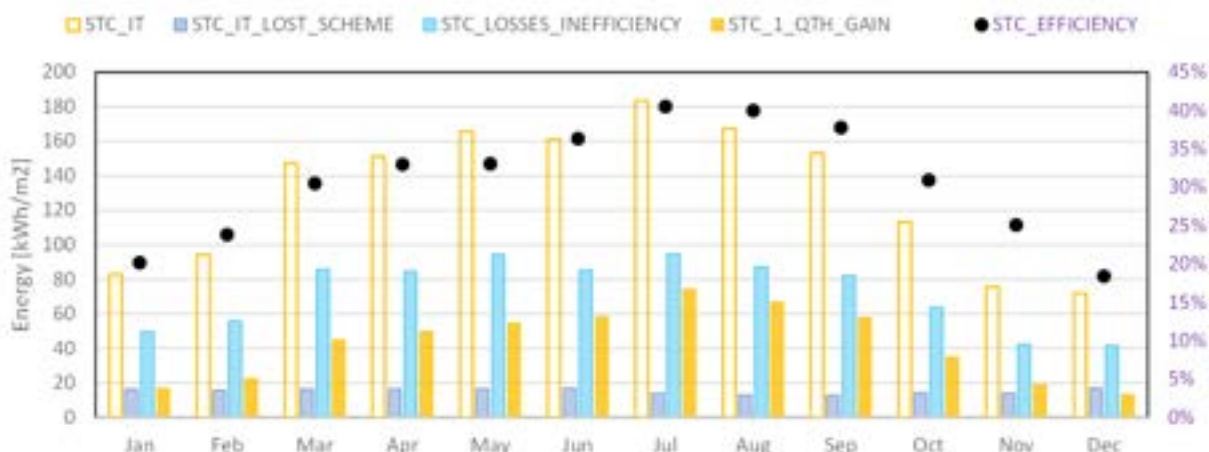


Figura 3.142. Irraggiamento solare cumulato mensile sul piano dei collettori (colonne gialle vuote), perdite termiche dovute a non utilizzo dei collettori (colonne blu) e a dispersioni termiche (colonne azzurre), energia utile in uscita dai collettori (colonne gialle piene) e efficienza mensile dei collettori; T set point accumulo = 60°C, sessione di test B

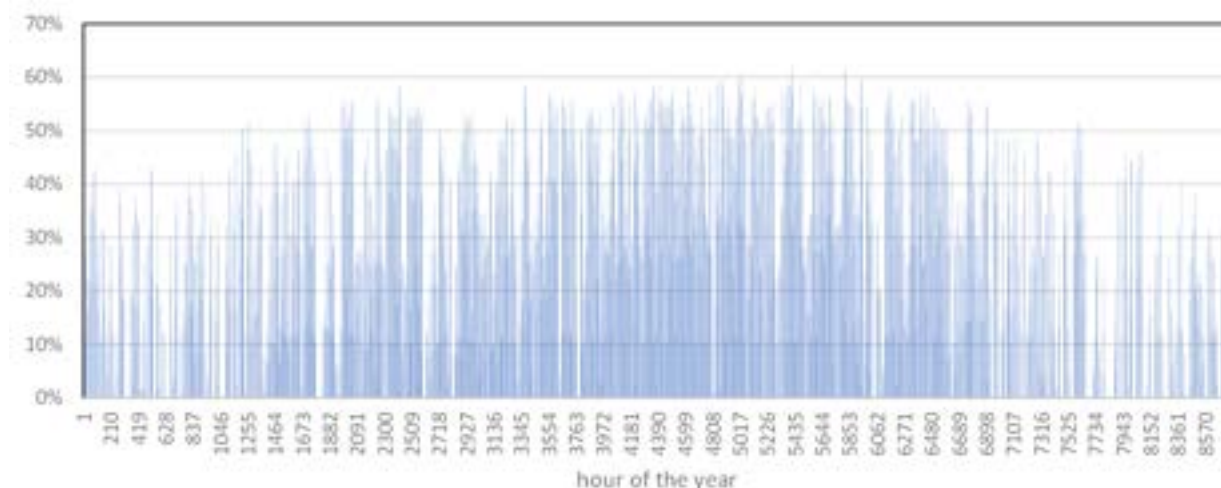


Figura 3.143. Efficienza dei collettori (valori orari per un intero anno); T set point accumulo = 60°C, sessione di test B

3.3.5 Controllo della sottostazione

Le logiche di controllo della sottostazione, già descritte nei Report RdS/PTR2019/057 e RdS/PTR2020/144, si basano essenzialmente sul controllo di temperature e portate nei vari circuiti della sottostazione mediante l'utilizzo delle valvole motorizzate e del circolatore (o pompa). Le valvole basano il loro funzionamento sulla lettura delle temperature e delle portate nei vari rami del circuito interessati. Per il controllo è necessaria la definizione di grandezze di set-up ed i loro relativi valori nominali, così come riportato nel seguito (Figura 3.2):

- Portata nominale del sistema di generazione ($M_{7,nom}$): 1,11 kg/s = 4 m³/h;

- Portata prelevata dalla rete TLR per scambio convenzionale ($M_{2,nom}$): 0,50 kg/s = 1,8 m³/h;
- Portata nominale del circuito utenza ($M_{8,nom}$): 0,56 kg/s = 2 m³/h;
- Portata minima di immissione in rete TLR per scambio attivo ($M_{3,min}$): 0,11 kg/s = 0,4 m³/h;
- Temperatura obiettivo mandata utenza ($T_{10,nom}$): 70 °C;
- Temperatura immissione in rete TLR per scambio attivo ($T_{4,nom}$): 80 °C;
- Temperatura rete TLR ramo di ritorno ($T_{3,nom}$): 50 °C;
- Differenza di temperatura minima sistema di generazione -utenza ($\Delta T_{5,min}$): 10 °C;
- Temperatura minima sistema di generazione per immissione in rete ($T_{min,immTLR}$): 83 °C;

Tutte le grandezze di set up previste sono impostabili nel software di controllo.

In particolare, la portata nominale del sistema di generazione è gestita secondo due livelli al fine di poter cedere alla rete di TLR la potenza prodotta dal campo solare in base alle prestazioni dello scambiatore S3 installato ed evitare quindi la condizione di stagnazione nel campo solare stesso:

- 3 m³/h quando la potenza termica prodotta dal campo solare è inferiore ai 20 kW;
- 4 m³/h quando la potenza termica prodotta dal campo solare è superiore ai 20 kW.

In relazione alle logiche di controllo presenti nella sottostazione è necessario sottolineare che la circolazione o meno di fluido nel circuito di generazione è gestita dalla logica di controllo dell'accumulo solare: se la temperatura nell'accumulo è superiore a 82 °C, allora viene dato il consenso di circolazione nel circuito di generazione della sottostazione finché la temperatura non scende sotto gli 80 °C. A tal fine, la valvola C2' non viene chiusa completamente, ma limitata alla posizione 2 (nel range 0-10) in modo da consentire un minimo passaggio di fluido ogniquale volta si ha disponibilità solare e permettere, quindi, il riscaldamento del fluido nel circuito e l'attivazione degli scambiatori S2 ed S3 a seconda del livello di temperatura e delle logiche di controllo delle valvole C2, C3 e della pompa P.

3.3.6 Incertezza di misura e grandezze derivate

A seguito della taratura dei sensori di temperatura avvenuta a chiusura dell'attività (descritta nel Report RdS/PTR2020/144), si riportano alcune considerazioni legate alle relative incertezze di misura e alle grandezze derivate usate per la valutazione delle prestazioni della sottostazione:

- Sensori di temperatura. I sensori installati sono del tipo Pt100 Classe B. Il range di temperatura nell'applicazione considerata è 30-90 °C. In tale range, l'incertezza di misura (σ_T) del solo sensore di temperatura risultante dalla taratura è pari a 0,14°C.
- Differenza di temperatura. Al fine di valutare le potenze termiche scambiate dalla sottostazione, è necessario valutare le differenze di temperatura nei diversi punti del circuito. Considerando una

differenza di temperatura $\Delta T = T_1 - T_2$, la relativa incertezza propagata è $\sigma_{\Delta T} = \sqrt{\sigma_{T_1}^2 + \sigma_{T_2}^2}$.

In Tabella 3.22 sono riportati diversi valori di temperature tipiche per i test considerati, con le relative differenze di temperatura e incertezze su tali differenze. Si può notare che per $\Delta T \approx 20^\circ\text{C}$ l'incertezza è dell'ordine del 1%, mentre per $\Delta T \approx 10^\circ\text{C}$ l'incertezza è dell'ordine del 2%.

Tabella 3.22. Differenze di temperatura e incertezza di misura

T1 [°C]	σ_T [°C]	T2 [°C]	σ_T [°C]	$\sigma_{\Delta T}$ [°C]	ΔT [°C]	$\sigma_{\Delta T}$ [%]
30	0,14	50	0,14	0,20	20	0,99%
40	0,14	60	0,14	0,20	20	0,99%
50	0,14	60	0,14	0,20	10	1,98%
60	0,14	80	0,14	0,20	20	0,99%
80	0,14	90	0,14	0,20	10	1,98%

3.4 Seconda campagna di prove sperimentali

Le attività qui di seguito descritte sono volte alla sperimentazione in condizioni di funzionamento realistiche e controllate di laboratorio della sottostazione bidirezionale di scambio termico, che permette di utilizzare l'energia prodotta localmente (es. fonte solare o calore di scarto) per soddisfare la richiesta dell'utenza, di cederne il surplus alla rete di teleriscaldamento quando il fabbisogno sia minore della disponibilità, e infine di ricorrere alla rete come sorgente di calore in assenza di produzione locale.

La campagna di misura sperimentale è stata suddivisa in due sessioni e condotta da EURAC:

- Sessione A. Nel corso della sessione A sono stati eseguiti dei test considerando una rete di TLR operante in condizioni standard, con temperatura di mandata e di immissione in rete per scambio attivo ($T_{4,nom}$) pari a 80 °C, e temperatura di ritorno ($T_{3,nom}$) pari a 50 °C.
- Sessione B. Nel corso della sessione B sono stati eseguiti dei test considerando una rete di TLR operante in condizioni di bassa temperatura, con temperatura di mandata e di immissione in rete per scambio attivo ($T_{4,nom}$) pari a 60 °C, e temperatura di ritorno ($T_{3,nom}$) pari a 30 °C.

La sottostazione è dotata di diversi sensori per poter monitorare e acquisire i flussi energetici e diversi attuatori che permettono di controllare tali flussi energetici. Maggiori informazioni sulla sottostazione, le dotazioni della stessa, il sistema di controllo e le logiche di gestione sono contenute nei report RdS/PTR2019/057 e RdS/PTR2020/144. In Figura 3.144 è riportato uno schema della sottostazione con l'indicazione della strumentistica installata e suo posizionamento.

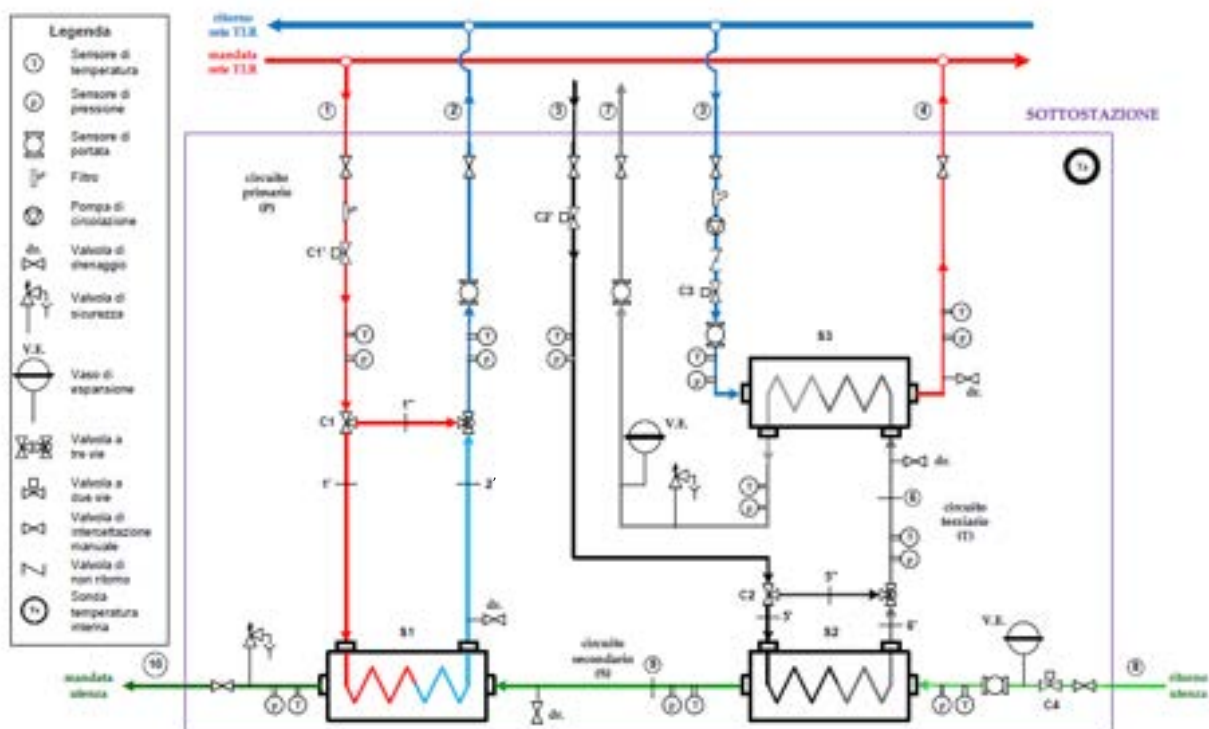


Figura 3.144. Schema della sottostazione

3.4.1 Test preliminari

La campagna di prove è stata preceduta dalla verifica del corretto setup del sistema a valle degli interventi di miglioramento descritti nel Report RdS/PTR2020/144. Con riferimento alla sostituzione dello scambiatore S3, la temperatura di ingresso lato freddo è stata rilevata leggermente più bassa di quella di progetto (50 °C), con una potenza scambiata di 53 kW (anziché 60 kW), che porta ad avere una temperatura di uscita al secondario di circa 75 °C, anziché 80 °C, valore di progetto necessario per immettere energia in una rete di teleriscaldamento. In questa fase si è deciso di procedere comunque con i test della sessione A in quanto questa differenza di circa il 12% tra le prestazioni di design e quelle reali dello scambiatore risulta accettabile: per i giorni di test individuati e descritti di seguito è infatti prevista una potenza massima prodotta dal campo

solare di circa 40 kW. Nel contempo, le verifiche condotte relativamente alla difformità tra le prestazioni reali e quelle dichiarate hanno portato all'individuazione di uno scambiatore sostitutivo che rispettasse le condizioni di progetto, installato per i test della sessione B, così come descritto al paragrafo 3.4.3.1.

L'installazione del nuovo scambiatore di dimensioni ridotte rispetto a quello precedente, la presenza di nuovi raccordi e una gestione di prove complesse – a causa di una maggiore dinamicità del carico termico dell'utenza e della produzione da parte del sistema di generazione distribuito – ha causato problematiche nella gestione di portate di 4,5 m³/h nel circuito generazione della sottostazione (S2/S3). Tale valore era stato individuato in fase di progettazione della sottostazione ipotizzando un funzionamento della stessa in accoppiamento ad un impianto solare della potenzialità di 60 kW e operante con una differenza di temperatura di circa 10 °C. Nella configurazione impiantistica scelta per i test descritti, il campo solare (emulato) non è direttamente collegato alla sottostazione, in quanto non sarebbe possibile emulare con la test facility temperature di mandata dal campo solare inferiori alla temperatura di mandata del TLR (a causa dei limiti tecnici descritti al paragrafo 5.3). Si è deciso di collegare il campo solare ad un accumulo emulato e lo stesso alla test facility/sottostazione: questa configurazione permette di avere una separazione idraulica tra campo solare e sottostazione e quindi è possibile avere una portata nel circuito generazione diversa da quella di progetto, ma tale da consentire un corretto funzionamento degli scambiatori. In base a queste considerazioni, per i test della sessione A, la portata nel circuito generazione considerata è di 3 m³/h quando si ha una potenza prodotta dal campo solare inferiore a 20 kW e di 4 m³/h quando la potenza è superiore a 20 kW. I due valori di portata sono stati scelti in base alle prestazioni dello scambiatore S3, al fine di poter scambiare la potenza prodotta dal campo solare per livelli di temperatura compresi nel range 80 °C ÷ 90 °C.

3.4.2 Test sessione A

Come anticipato, nel corso della sessione A sono stati eseguiti dei test considerando una rete di TLR operante in condizioni standard, con temperatura di mandata e di immissione in rete per scambio attivo (T_{4,nom}) pari a 80 °C, e temperatura di ritorno (T_{3,nom}) pari a 50 °C.

Tramite apposita interfaccia, sviluppata da EURAC, sono stati utilizzati modelli TRNSYS inseriti nell'hardware-in-the-loop per la gestione e controllo della sottostazione bidirezionale. I modelli sono stati forniti da EURAC e utilizzati per generare in condizioni dinamiche:

- Il profilo di carico termico per riscaldamento e ACS di una utenza residenziale (tramite Type 56) compatibile con la potenza termica nominale della sottostazione bidirezionale, ovvero 60 kW. L'utenza residenziale usata durante i test è costituita da un edificio residenziale multifamiliare pluripiano con un'area complessiva di 500 m². La distribuzione modellata nella simulazione è un impianto a radiatori. La temperatura di ritorno dall'utenza sul circuito secondario (T₈) è stata controllata in regime dinamico dalla test facility sulla base del modello TRNSYS. La temperatura di mandata all'utenza (T₁₀) è stata controllata dalla sottostazione ad un valore di riferimento pari a 70 °C. La sottostazione è inoltre collegata all'impianto di riscaldamento e produzione di ACS dell'edificio considerato tramite un separatore idraulico che è incluso nel modello. Questo permette di gestire il circuito utente della sottostazione (secondario scambiatori S1 e S2) ad una portata costante e pari a 2 m³/h.
- Il profilo dinamico della potenza termica generata da un impianto a pannelli solari piani installato presso il prosumer e connesso alla rete di TLR tramite la stessa sottostazione bidirezionale. Il modello è dotato anche di un accumulo termico e del relativo sistema di controllo accoppiato all'impianto, che prevede l'invio di energia termica alla sottostazione solo quando la temperatura nell'accumulo supera gli 82 °C. Il profilo di generazione termica è compatibile con la potenza nominale della sottostazione bidirezionale sperimentale, ovvero 60 kW. La potenza scambiata dai generatori termici locali con la rete di TLR tiene in conto della potenza termica autoconsumata localmente dal prosumer.

Una descrizione dettagliata dei modelli numerici utilizzati per l'edificio e per il circuito solare è riportata al paragrafo 3.3, mentre quella del collegamento della sottostazione con la test facility e dei modelli con la sottostazione/test facility è riportata al paragrafo 5.3.

Come introdotto precedentemente (rif. 3.3.2), al fine di avere una stima realistica delle prestazioni annuali della sottostazione sono stati individuati sei giorni non consecutivi che meglio rappresentano la variabilità di

condizioni climatiche dell'intero anno. Le condizioni climatiche di tali giorni sono state utilizzate come input ai modelli TRNSYS inseriti nell'hardware in-the-loop per emulare in real-time il carico termico dell'edificio e il profilo di generazione dell'impianto a fonte rinnovabile scelto. La durata complessiva di questa sessione di test è stata di sei giorni. L'estrapolazione dei dati all'intero è stata eseguita "pesando" le prestazioni dell'impianto relative ad ognuno dei sei giorni rispetto al numero di giorni contenuti nel rispettivo raggruppamento. In Figura 3.145 si riportano i giorni dell'intero anno rappresentati in funzione della temperatura ambiente media giornaliera (T_{amb}) e della radiazione media giornaliera sul piano orizzontale (GHI) e raggruppati in sei insiemi. Ogni insieme è caratterizzato da un colore differente e viene indicato il giorno rappresentativo di ogni insieme, facente parte della sequenza di giorni di test considerata. In Tabella 3.23 si riportano i 6 giorni dell'anno risultanti dalla procedura di selezione, la temperatura ambiente media giornaliera (T_{amb}), la radiazione media giornaliera sul piano orizzontale (GHI) e il numero di giorni per ogni insieme.

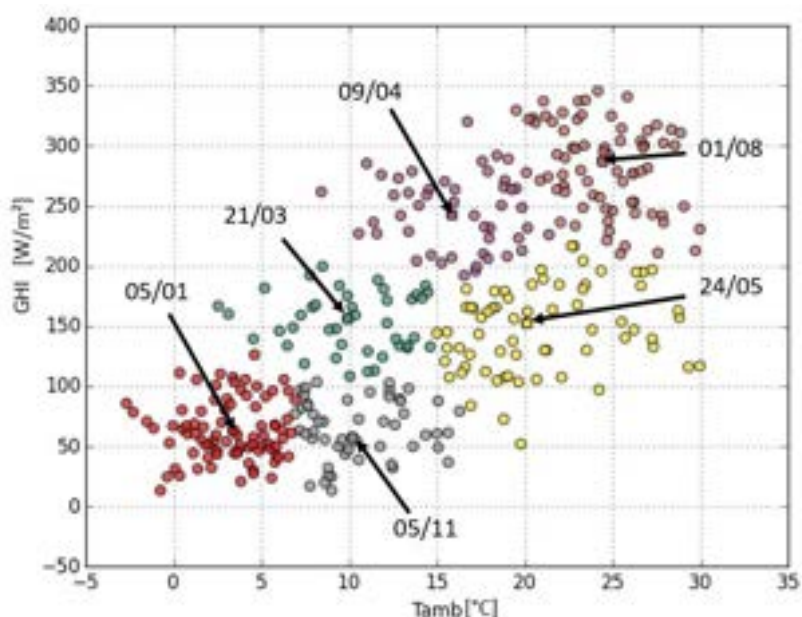


Figura 3.145. Giorni dell'intero anno rappresentati in funzione della temperatura ambiente media giornaliera (T_{amb}) e della radiazione media giornaliera sul piano orizzontale (GHI) e raggruppati in sei insiemi di colore differente con indicazione del giorno rappresentativo di ogni insieme

Tabella 3.23. Giorni di test risultanti dalla procedura di selezione, temperatura ambiente (T_{amb}) e radiazione media giornaliera sul piano orizzontale (GHI), numero di giorni per ogni insieme

Giorno di test	Giorno dell'anno	T_{amb} [°C]	GHI [W/m²]	N.giorni
1	05/01	3,36	63	83
2	21/03	9,92	156	42
3	09/04	15,85	243	47
4	24/05	20,08	153	67
5	01/08	24,39	287	74
6	05/11	10,19	58	52

L'avviamento della sottostazione, che si traduce in uno scambio di energia negli scambiatori della sottostazione, è regolato da tre comandi:

- Richiesta termica da parte dell'utente per soddisfare i fabbisogni di riscaldamento. L'accensione del riscaldamento è prevista dalle 6 alle 12 e dalle 14 alle 22 nelle giornate per le quali è prevista l'accensione del riscaldamento, ovvero tra il 15 Ottobre e il 15 Aprile, così come descritto al paragrafo 3.3.1.2.
- Richiesta termica da parte dell'utente per caricare l'accumulo di ACS. Il caricamento dell'accumulo ACS si attiva quando la temperatura all'interno dell'accumulo, ad un'altezza di circa il 60% dal basso,

raggiunge il valore di 55 °C e rimane attiva fino a quando la stessa temperatura raggiunge i 60 °C, così come descritto al paragrafo 3.3.3.4.

- Disponibilità di energia solare che può essere utilizzata per soddisfare le richieste termiche dell'utente o può essere inviata nella rete di TLR. La disponibilità di energia solare, che corrisponde alla scarica dell'accumulo collegato al circuito solare, si ha quando la temperatura nella parte alta dell'accumulo raggiunge gli 80 °C (con isteresi avente limiti superiore e inferiore rispettivamente pari a +2 °C e 0 °C), così come descritto al paragrafo 3.3.4.

Nel dettaglio si analizzano le prestazioni della sottostazione sulla base di queste tre richieste di avviamento. Di seguito sono mostrati i risultati dei test eseguiti nei giorni 1, 3 e 5, rappresentativi delle condizioni invernali, intermedie ed estive; quando acquisito per i giorni 2, 4 e 6 è riportato in Appendice. Da notare infine che le grandezze nei grafici a seguire fanno riferimento ai valori istantanei acquisiti con un tempo di campionamento di 1 secondi.

3.4.2.1 Giorno 1

Il giorno di test 1 è il 05/01 per il quale sono presenti richieste di ACS e riscaldamento da parte dell'utente, rientrando nel periodo di riscaldamento.

In Figura 3.146 viene mostrato, nel grafico inferiore, in nero il comando di avvio della sottostazione per richiesta da parte dell'utente sia per riscaldamento che per ACS, in verde le richieste di caricamento dell'accumulo di ACS e in arancione la disponibilità di energia solare nell'accumulo solare che può essere utilizzata dalla sottostazione. Nel grafico superiore si riporta in magenta la potenza termica fornita dallo scambiatore S1 e in rosso quella fornita dallo scambiatore S2 per soddisfare le richieste termiche. Nel grafico centrale si riporta in viola la potenza termica fornita dallo scambiatore S3 alla rete di teleriscaldamento.

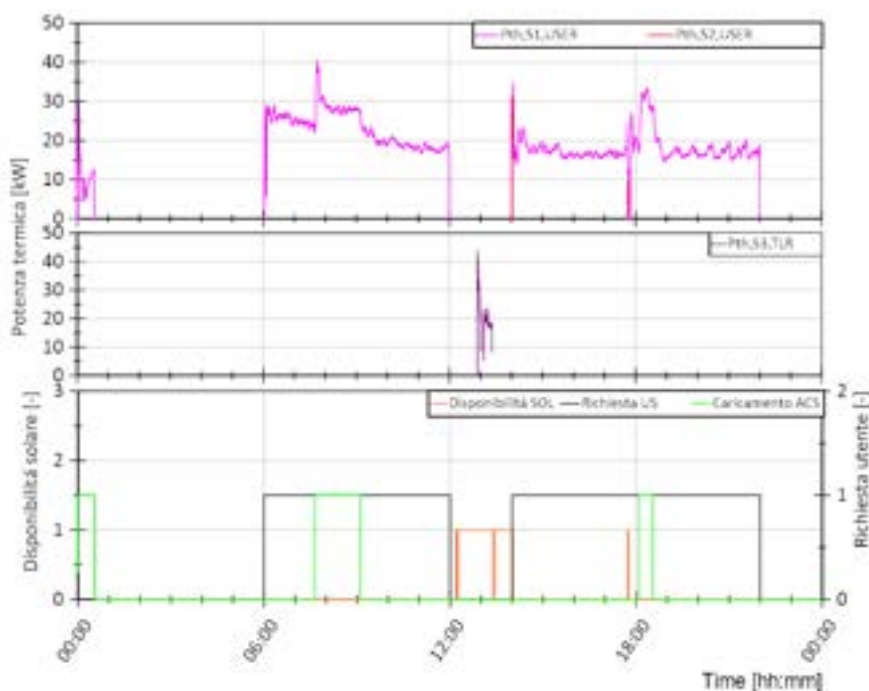


Figura 3.146. Sessione A, Giorno 1. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità energia solare nell'accumulo (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

Dal confronto tra i tre grafici si può notare che le richieste termiche dell'utente sono principalmente soddisfatte dallo scambiatore S1 e quindi dalla rete di TLR. All'avviamento della sottostazione e quando si hanno richieste di caricamento dell'accumulo di ACS si registrano degli incrementi improvvisi nelle potenze termiche scambiate per effetto sia di variazione dinamiche di temperature e portata tipiche dell'avviamento, che di un'effettiva maggiore richiesta da parte dell'utente dovuta al caricamento dell'accumulo di ACS. Inoltre,

la disponibilità di energia solare nell'accumulo solare è solo in piccola parte contemporanea alla richiesta termica dell'utente: tramite lo scambiatore S2, parte della potenza termica richiesta dall'utente viene fornita dall'impianto solare e ciò avviene due volte e per circa 3 minuti. La restante disponibilità solare viene immessa nella rete di TLR tramite lo scambiatore S3 che ha un funzionamento intermittente basato sul livello di temperatura alla quale l'energia solare è inviata alla sottostazione in ingresso a tale scambiatore, ovvero si avvia quando T6 è maggiore di 84 °C e resta attivo finché tale temperatura è superiore a 82 °C. In Figura 3.147 viene riportato un ingrandimento della Figura 3.146 al fine di visualizzare in dettaglio le ore di funzionamento degli scambiatori S2 ed S3, ovvero tra le 09:00 e le 17:00. Lo scambiatore S3 immette energia nella rete di TLR quando questa è disponibile e non si hanno richieste da parte dell'utente, ovvero la le 12:50 e le 13:30 circa. Non si verifica, quindi, un funzionamento contemporaneo di S2 ed S3.

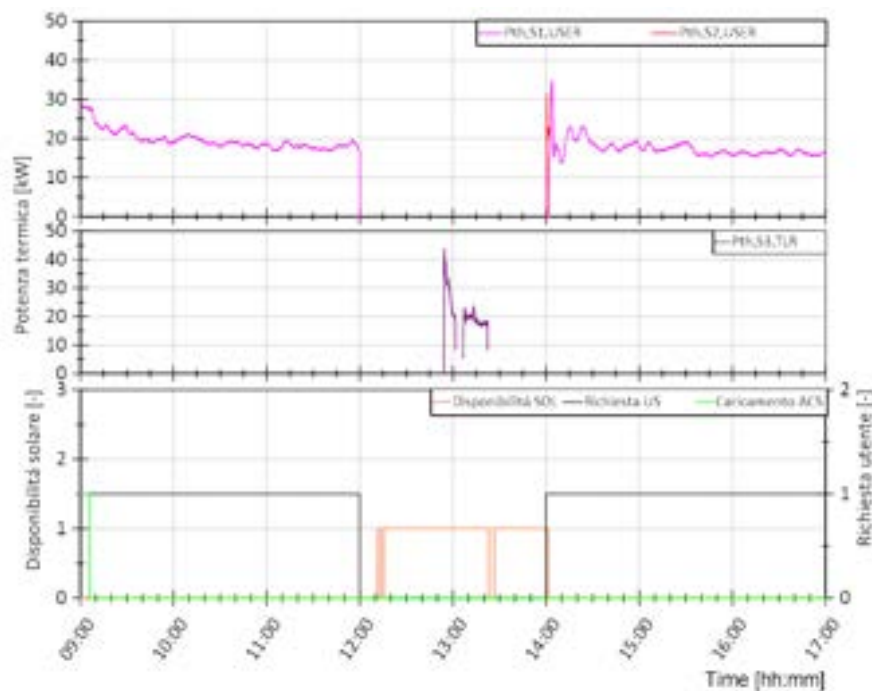


Figura 3.147. Sessione A, Giorno 1 - Dettaglio. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, Andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità energia solare nell'accumulo (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

Si riportano di seguito gli andamenti delle temperature di ingresso e uscita al primario e al secondario degli scambiatori S1 ed S3 e le portate quando questi sono in funzione (Figura 3.148-Figura 3.149). Non si riportano gli andamenti delle temperature per S2 dato il suo quasi nullo funzionamento. In particolare per lo scambiatore S3 si utilizza una scala temporale basata sui momenti di funzionamento al fine di facilitarne la lettura.

Con riferimento alla Figura 3.150 si può notare come l'andamento del valore misurato T1 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa ± 2 °C quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento o caricamento dell'accumulo di ACS. Le prime sono dovute al controllo di temperatura della test facility a monte del punto di collegamento 1-2 con la sottostazione, così come descritto nel capitolo 5.3.1; le seconde sono dovute a improvvise variazioni di richieste termiche da parte dell'utente che generalmente richiedono tra i 15 e i 30 minuti di tempo per essere controllate da parte della test facility. Nel caso in esame, per il primo avviamento mattutino sono richieste circa 2 ore per controllare T1 ad una temperatura superiore a 75 °C a causa delle elevate perdite termiche nel circuito di collegamento e delle richieste termiche dell'edificio. Così come descritto nel seguito, tali oscillazioni compromettono solo parzialmente il soddisfacimento delle richieste termiche dell'utente.

Con riferimento alla Figura 3.151 si può notare come l'andamento del valore misurato T5 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa ± 5 °C quando si ha un funzionamento stazionario

del sistema e maggiori in caso di avviamento. Le prime sono dovute al controllo di temperatura della test facility a monte del punto di collegamento 5-7 con la sottostazione, così come descritto nel capitolo 5.3.1 e sono accentuate dalla distanza circuitale che tra il punto in cui tale temperatura viene controllata e il punto in cui T5 è posizionato; le seconde sono dovute prevalentemente alle perdite termiche che si hanno nel circuito di collegamento tra sottostazione e test facility e richiedono tra i 15 e i 45 minuti di tempo per essere controllate da parte della test facility.

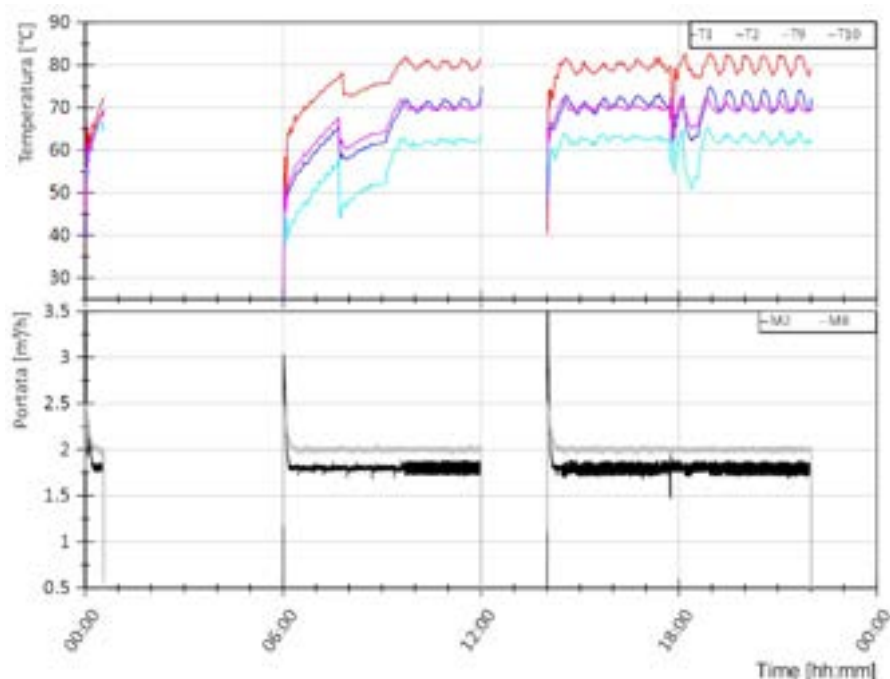


Figura 3.148. Sessione A, Giorno 1. Andamento delle temperature lato teleriscaldamento (mandata dal teleriscaldamento T1, ritorno al teleriscaldamento T2) e lato utenza (uscita dallo scambiatore S2 T9, mandata all'utenza T10) dello scambiatore S1 (grafico superiore); andamento della portata lato teleriscaldamento (M2) e lato utenza (M8) dello scambiatore S1 (grafico inferiore)

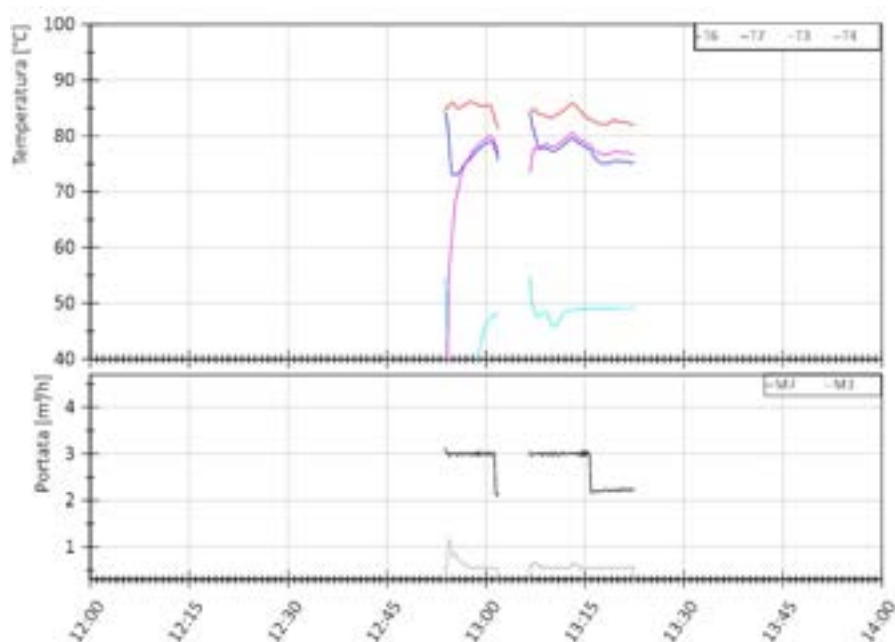


Figura 3.149. Sessione A, Giorno 1 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (ingresso scambiatore S3 T6 e ritorno al sistema di generazione T7) e lato TLR (ritorno dal TLR T3, mandata al TLR T4) dello scambiatore S3 (grafico superiore); andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato TLR (M3) dello scambiatore S3 (grafico inferiore)

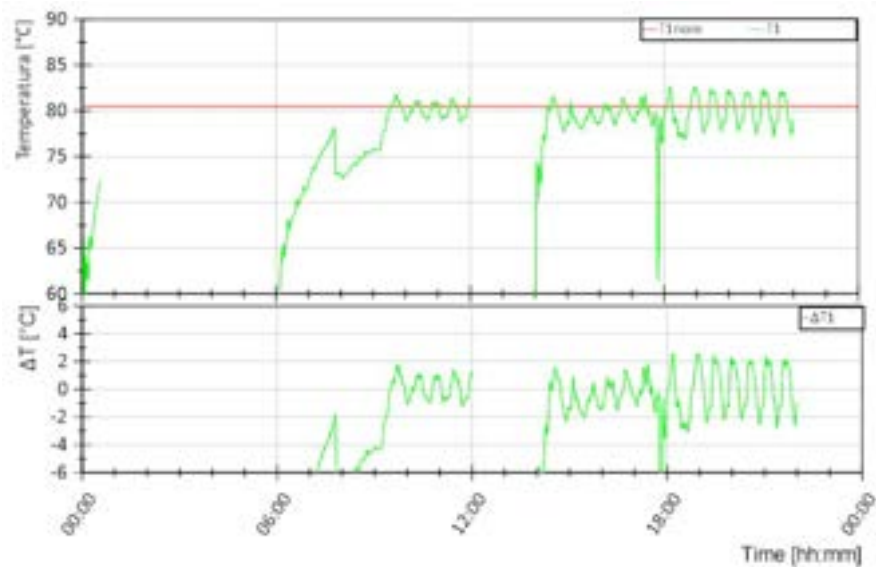


Figura 3.150. Sessione A, Giorno 1. Andamento della temperatura di mandata dal teleriscaldamento T1 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T1nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

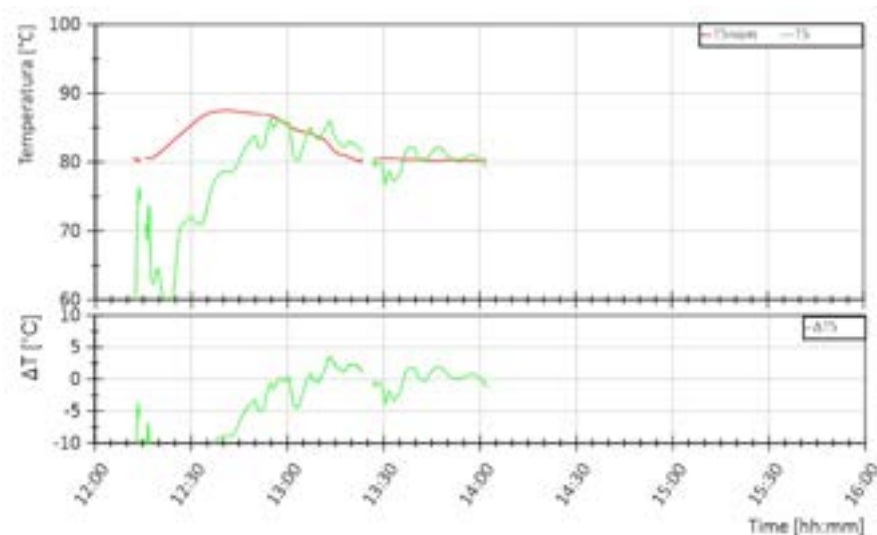


Figura 3.151. Sessione A, Giorno 1 - Dettaglio. Andamento della temperatura di mandata dal sistema di generazione T5 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T5nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

Con riferimento alla Figura 3.152 , si può notare come l'andamento del valore misurato T8 (curva verde nel grafico superiore) sia in ritardo rispetto all'andamento del valore di riferimento T8nom (curva rossa nel grafico superiore). Questo ritardo è dovuto essenzialmente alla distanza circuitale tra il punto della test facility in cui T8 viene controllata al valore di riferimento e il punto della sottostazione in cui T8 viene misurata. Di conseguenza si hanno scostamenti assoluti rilevanti rispetto al valore di riferimento in corrispondenza di una brusca variazione del valore di riferimento ma contenuti in $\pm 1^\circ\text{C}$ nel funzionamento in condizioni stabili. Con riferimento alla Figura 3.153 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T10nom e il valore misurato T10 sia inferiore a $\pm 1^\circ\text{C}$ per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T10 da parte della sottostazione, nonostante le oscillazioni registrate in ingresso allo scambiatore S1 ed S2. Si ha una maggiore discrepanza nella condizione di richiesta massima da parte dell'utenza e all'avviamento: in questa condizione si registrano anche degli abbassamenti maggiori di 5°C nella temperatura T1 e quindi gli scambiatori S1 ed S2 operano in condizioni di funzionamento diverse da quelle di progetto non riuscendo a garantire 70°C in uscita, ma comunque

riuscendo a soddisfare le richieste termiche dell'utente, come risulta dai grafici in Figura 3.155 e Figura 3.156 riportati nel seguito.

Con riferimento alla Figura 3.154 si può notare come, nei 20 minuti di funzionamento di S3, la differenza tra il valore di riferimento $T4_{nom}$ e il valore misurato $T4$ sia inferiore a $\pm 2^\circ\text{C}$ per parte del tempo. Si ha una maggiore discrepanza all'avviamento e nei momenti in cui la temperatura di ingresso lato generazione ($T6$) è prossima ad 82°C . Per quanto riguarda l'avviamento, in questa condizione si ha una temperatura in ingresso $T3$ (lato TLR) che è inferiore alla temperatura nominale a causa del raffreddamento del fluido nel circuito per inutilizzo dello scambiatore ed è un evento tipico del funzionamento di uno scambiatore e del circuito al quale esso è collegato. Per quanto riguarda la seconda causa di discrepanza, quando la temperatura $T6$ è prossima ad 82°C , non si riesce ad ottenere una temperatura $T4$ superiore a 78°C , ma pari a circa 77°C . Il valore di 82°C deriva dalla logica di controllo implementata per regolare l'accensione di S3: al fine di evitare un funzionamento ad alta intermittenza dello scambiatore a causa delle oscillazioni in $T5$ e allo stesso tempo massimizzarne l'utilizzo, l'isteresi che ne controlla l'accensione è impostata tra 82°C e 84°C .

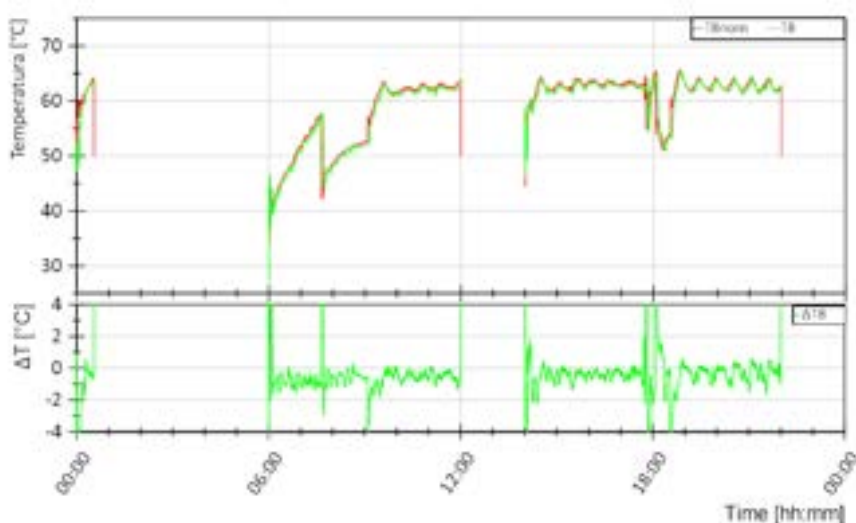


Figura 3.152. Sessione A, Giornata 1. Andamento della temperatura di ritorno dall'utenza T8 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento $T8_{nom}$ in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

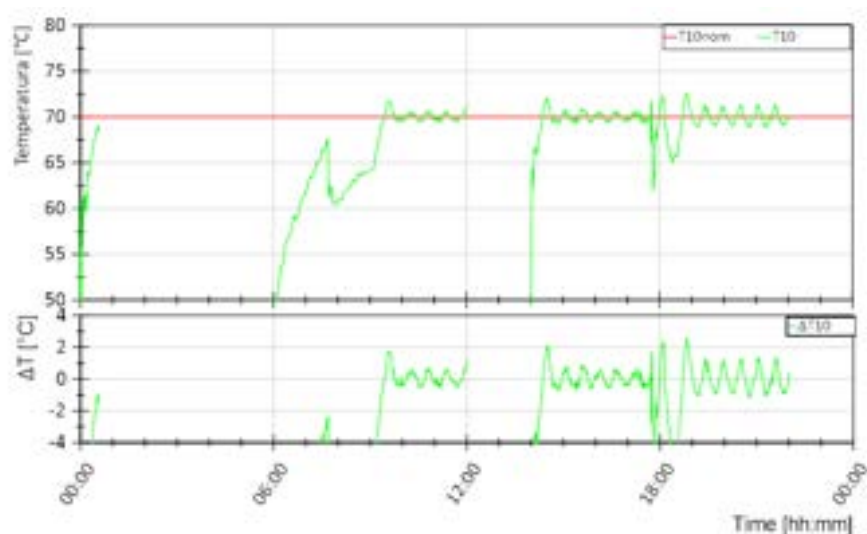


Figura 3.153. Sessione A, Giornata 1. Andamento della temperatura di mandata all'utenza T10 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento $T10_{nom}$ in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

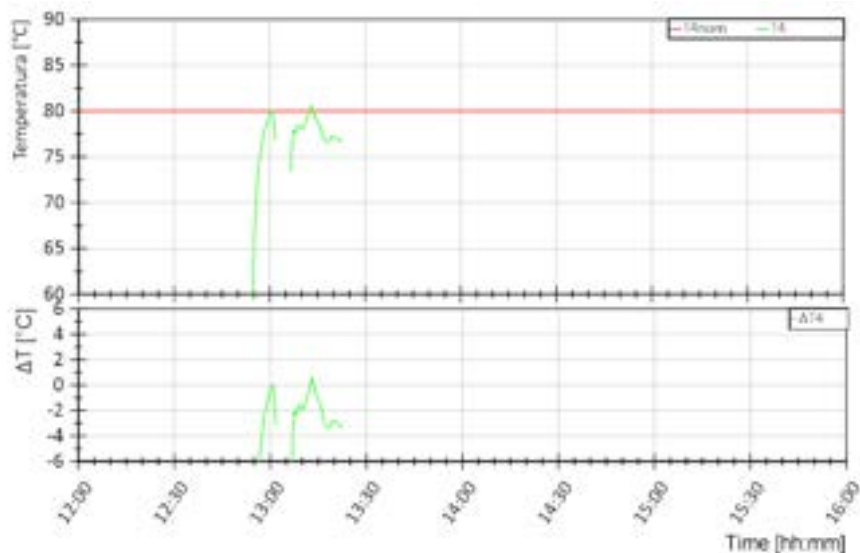


Figura 3.154. Sessione A, Giornata 1 - Dettaglio. Andamento della temperatura di immissione in rete T4 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T4nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

In Figura 3.155 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio e la temperatura ambiente e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo di ACS (in grigio) nonché la portata di caricamento (in arancione) e di ricircolo (in blu). Si può notare dal grafico superiore come la temperatura all'interno degli appartamenti sia tenuta essenzialmente sopra i 19 °C durante le ore di riscaldamento. Inoltre, dalla Figura 3.156 risulta che la valvola miscelatrice presente nel modello riesce a controllare la temperatura di mandata al riscaldamento secondo curva climatica teorica per la gran parte del tempo, nonostante le oscillazioni che si hanno all'avviamento in T1 e T5. Si verifica solo all'avviamento delle 6:00 che, per circa 40 minuti, la sottostazione non riesce a soddisfare la richiesta dell'utente a causa di una bassa temperatura T1. Per quanto riguarda l'ACS, si può notare come la temperatura dell'accumulo aumenta ogni qualvolta avviene una carica, fino a raggiungere i 60 °C, e diminuisce per effetto delle perdite termiche o richiesta da parte dell'utente che si verifica in corrispondenza di una portata di ricircolo maggiore di 0,27 m³/h.

In Figura 3.157 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in ingresso e uscita dal campo solare e la portata circolante e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo solare (in grigio) e l'intervallo di scarica (in arancione) che indica il periodo in cui l'energia solare viene inviata dall'accumulo alla sottostazione. Dal grafico superiore si evince che in una prima fase di avviamento del campo solare non si ha un caricamento dell'accumulo: la temperatura di uscita dal campo solare è infatti inferiore rispetto alla temperatura nell'accumulo; la carica inizia quando questa temperatura diventa superiore alla temperatura nell'accumulo. Ciò emerge anche dalla Figura 3.158, confrontando la potenza termica prodotta dal campo solare e quella in ingresso all'accumulo solare (rispettivamente in rosso e magenta). Con riferimento alla Figura 3.157, nei momenti in cui si ha la carica dell'accumulo, si assiste ad un aumento della temperatura dello stesso. Tale temperatura può diminuire in corrispondenza di una scarica se la potenza richiesta dalla sottostazione è superiore a quella immessa nell'accumulo in quell'istante o può aumentare in caso contrario. Nel caso in esame, non appena si avvia la scarica con invio di energia termica alla sottostazione, utilizzata dallo scambiatore S3 (curva in rosso nel grafico inferiore), la temperatura nell'accumulo diminuisce. Si nota, inoltre, che tra le 13:20 e le 14:00 circa l'accumulo si scarica pur non essendoci un utilizzo diretto da parte di S2 ed S3: questo accade per effetto delle perdite termiche che si hanno nel circuito S2-S3 della sottostazione lato generazione. In questo periodo di tempo, infatti, l'acqua continua a circolare nella sottostazione ma non è ad una temperatura adatta per essere inviata in rete né vi è richiesta di ACS da parte dell'utente.

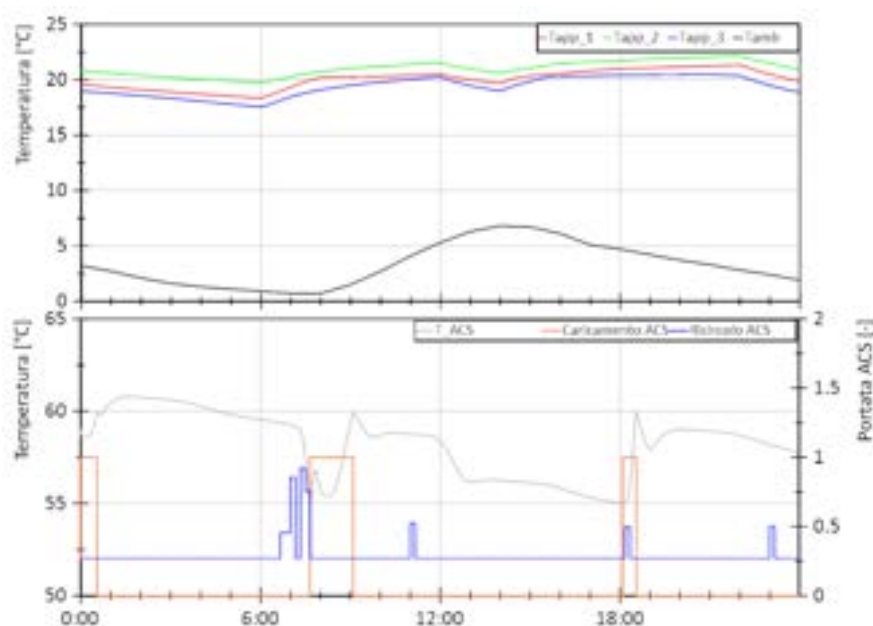


Figura 3.155. Sessione A, Giorno 1. Andamento della temperatura in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio (curve in blu, verde e rosso del grafico superiore) e temperatura esterna (curva in nero grafico superiore); andamento della temperatura nell'accumulo di ACS e portata di caricamento e riciccolo dell'accumulo di ACS (rispettivamente curva un grigio, in arancione e in blu del grafico inferiore)

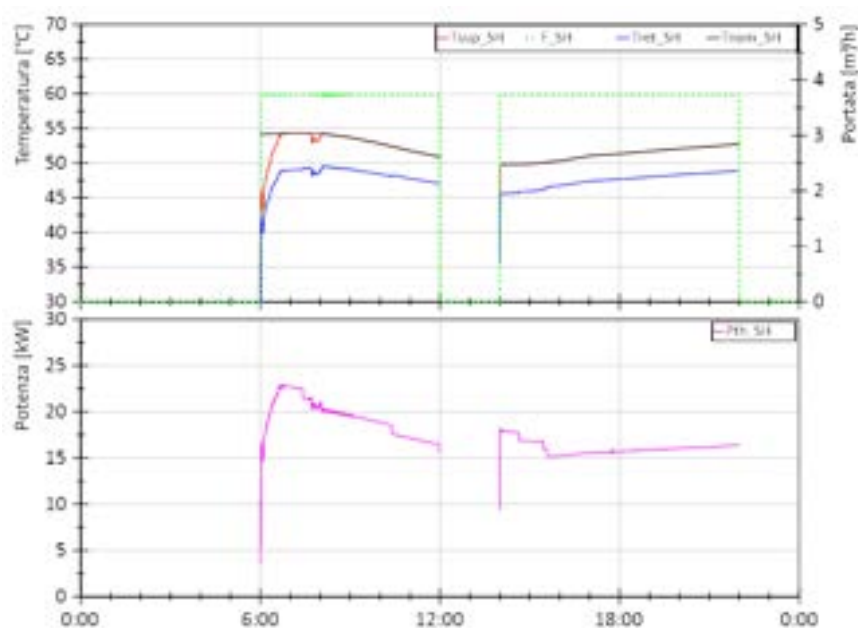


Figura 3.156. Sessione A, Giorno 1. Andamento della temperatura di mandata e ritorno e portata nel circuito di riscaldamento (curva in rosso, blu e tratteggiata verde nel grafico superiore rispettivamente) e andamento della temperatura di mandata al riscaldamento di riferimento (curva in nero); andamento della potenza termica per riscaldamento (curva in magenta grafico inferiore)

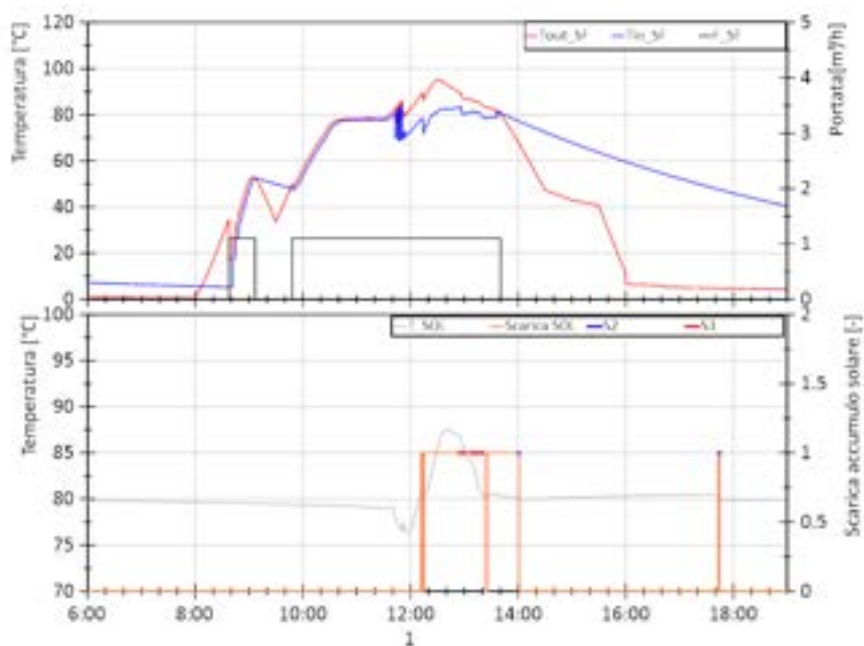


Figura 3.157. Sessione A, Giorno 1 - Dettaglio. Andamento della temperatura in uscita dal campo solare, in ingresso e la portata (rispettivamente curva in rosso, blu e nero del grafico superiore); andamento della temperatura nell'accumulo solare e intervallo di scarica dell'accumulo solare (rispettivamente curva un grigio e in arancione del grafico inferiore)

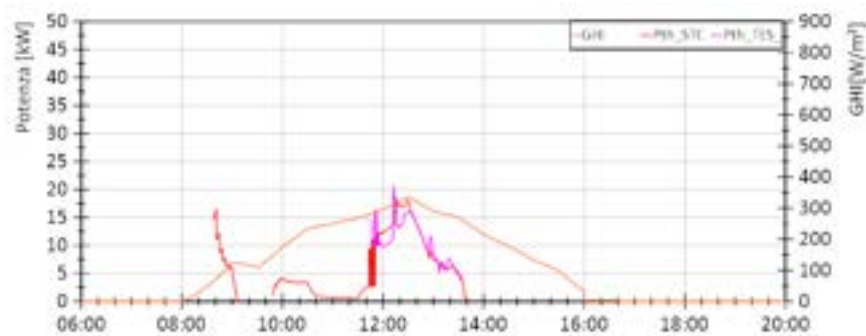


Figura 3.158. Sessione A, Giorno 1 - Dettaglio. Andamento della radiazione globale sul piano orizzontale (GHI in arancione), della potenza termica prodotta dal campo solare (in rosso) e di quella in ingresso all'accumulo solare (in magenta)

In Tabella 3.24 si riporta l'energia termica al primario e al secondario dei diversi scambiatori e le relative efficienze per la prova considerata.

Tabella 3.24. Sessione A, Giorno 1. Energie termiche al primario (lato teleriscaldamento, TLR, o sistema di generazione, GEN) e al secondario (lato teleriscaldamento, TLR, o utente, US) dei diversi scambiatori della sottostazione e relative efficienze

Eth,S1,TLR [kWh]	Eth,S1,US [kWh]	η_{S1} [%]	Eth,S2,GEN [kWh]	Eth,S2,US [kWh]	η_{S2} [%]	Eth,S3,GEN [kWh]	Eth,S3,US [kWh]	η_{S3} [%]
296,29	286,09	97%	0,78	0,63	81%	8,67	8,45	97%

3.4.2.2 Giorno 3

Il giorno di test 3 è il 09/04 per il quale sono presenti richieste di ACS e riscaldamento da parte dell'utente rientrando nel periodo di riscaldamento.

In Figura 3.159 viene mostrato, nel grafico inferiore, in nero il comando di avvio della sottostazione per richiesta da parte dell'utente sia per riscaldamento che per ACS, in verde le richieste di caricamento dell'accumulo di ACS e in arancione la disponibilità di energia solare nell'accumulo solare che può essere utilizzata dalla sottostazione. Nel grafico superiore si riporta in magenta la potenza termica fornita dallo scambiatore S1 e in rosso quella fornita dallo scambiatore S2 per soddisfare le richieste termiche. Nel grafico centrale si riporta in viola la potenza termica fornita dallo scambiatore S3 alla rete di teleriscaldamento.

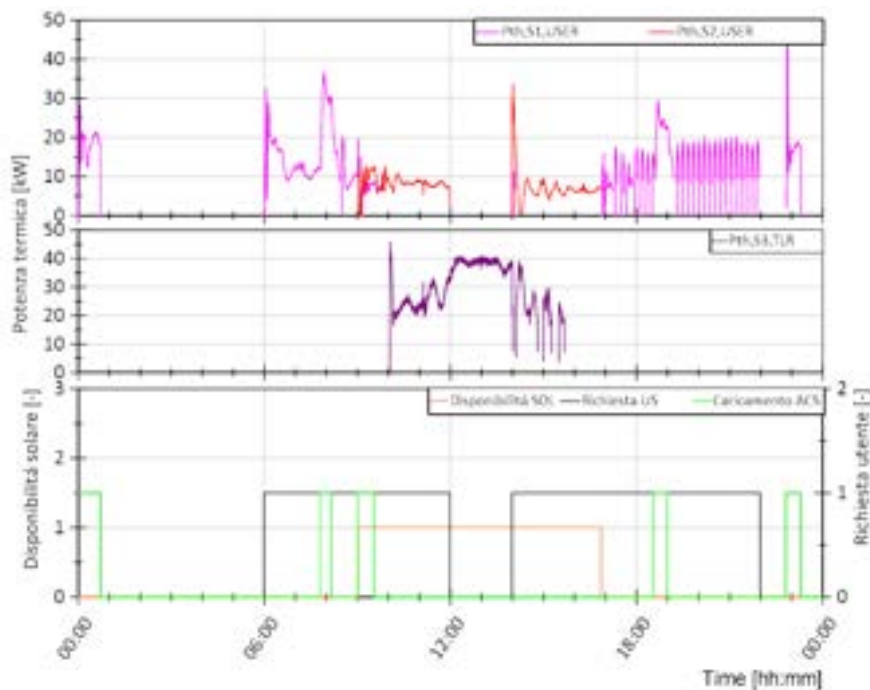


Figura 3.159. Sessione A, Giornata 3. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità energia solare nell'accumulo (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

Dal confronto tra i tre grafici si può notare che le richieste termiche dell'utente sono principalmente soddisfatte dallo scambiatore S1 e quindi dalla rete di TLR. All'avviamento della sottostazione e quando si hanno richieste di caricamento dell'accumulo di ACS si registrano degli incrementi improvvisi nelle potenze termiche scambiate per effetto sia di variazione dinamiche di temperature e portata tipiche dell'avviamento, che di un'effettiva maggiore richiesta da parte dell'utente dovuta al caricamento dell'accumulo di ACS. Tra le 17:00 e le 22:00 si verifica un funzionamento intermittente dello scambiatore S1 che verrà analizzato nel seguito. Inoltre, la disponibilità di energia solare nell'accumulo solare è in parte contemporanea alla richiesta termica dell'utente: tramite lo scambiatore S2, parte della potenza termica richiesta dall'utente viene fornita dall'impianto solare. La restante disponibilità solare viene immessa nella rete di TLR tramite lo scambiatore S3 che in alcuni momenti ha un funzionamento intermittente basato sul livello di temperatura alla quale l'energia solare è inviata alla sottostazione in ingresso a tale scambiatore, ovvero si avvia quando T_6 è maggiore di $84\text{ }^{\circ}\text{C}$ e resta attivo finché tale temperatura è superiore a $82\text{ }^{\circ}\text{C}$. In Figura 3.160 viene riportato un ingrandimento della Figura 3.159 al fine di visualizzare in dettaglio le ore di funzionamento degli scambiatori S2 ed S3, ovvero tra le 09:00 e le 17:00. Si nota che durante i primi 40 minuti di accensione dello scambiatore S2 (09:00-09:40 circa) si ha un funzionamento in contemporanea allo scambiatore S1 con potenze comparabili. Successivamente funziona solo lo scambiatore S2 che copre le richieste termiche dalle 09:40 alle 12:00 e dalle 14:00 alle 17:00 per poi spegnersi per esaurimento di disponibilità solare. Lo scambiatore S3 immette energia nella rete di TLR quando questa è disponibile e non è completamente utilizzata dallo scambiatore S2. Si ha un funzionamento in contemporanea di S2 ed S3 tra le 10:00 e le 12:00 e tra le 14:00 e le 16:00 circa, mentre funziona esclusivamente S3 tra le 12:00 e le 14:00.

Si riportano nel seguito gli andamenti delle temperature di ingresso e uscita al primario e al secondario degli scambiatori S1, S2 ed S3 e le portate quando questi sono in funzione (Figura 3.161-Figura 3.164). In particolare per gli scambiatori S2 ed S3 si utilizza una scala temporale basata sui momenti di funzionamento al fine di facilitarne la lettura.

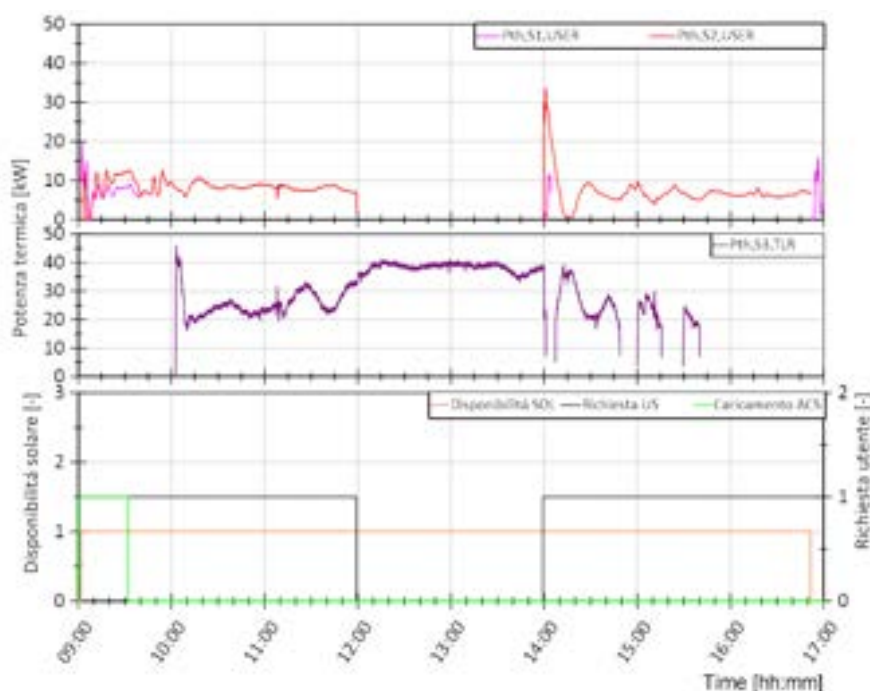


Figura 3.160. Sessione A, Giorno 3 - Dettaglio. Andamento della potenza termica lato utente dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità energia solare nell'accumulo (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

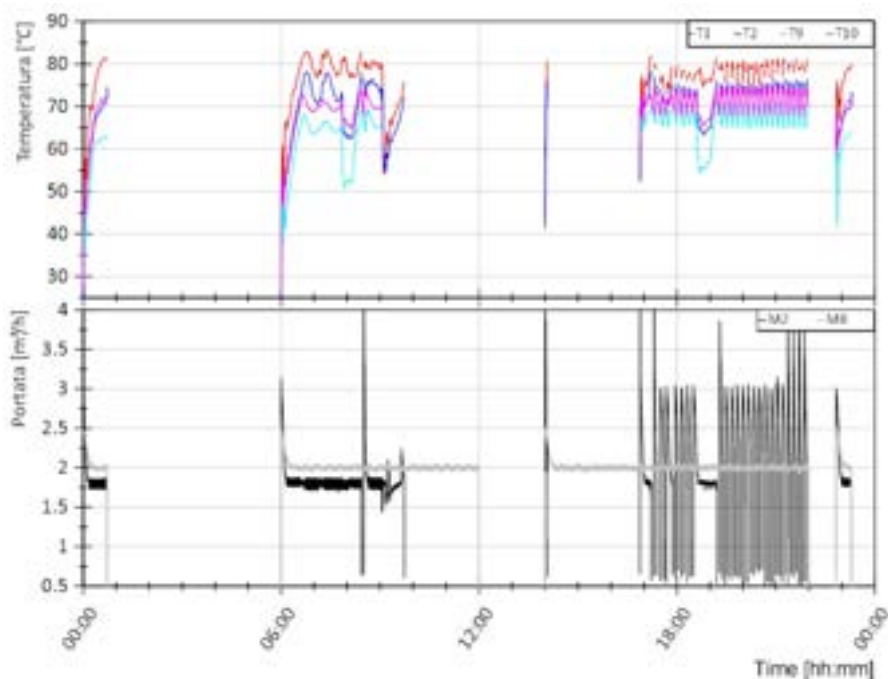


Figura 3.161. Sessione A, Giorno 3. Andamento delle temperature lato teleriscaldamento (mandata dal teleriscaldamento T1, ritorno al teleriscaldamento T2) e lato utente (uscita dallo scambiatore S2 T9, mandata all'utente T10) dello scambiatore S1 (grafico superiore); andamento della portata lato teleriscaldamento (M2) e lato utente (M8) dello scambiatore S1 (grafico inferiore).

Come accennato precedentemente, tra le 17:00 e le 22:00 si verifica un funzionamento intermittente di S1, così come risulta anche osservando l'andamento di M2 in Figura 3.161. In particolare, in Figura 3.162 viene riportato un ingrandimento di Figura 3.161 al fine di analizzare nel dettaglio il funzionamento di S1. L'intermittenza di S1 è dovuta a tre fattori:

- logica di controllo che ne regola l'accensione al fine di evitare sovrapposizioni con S2;
- oscillazioni nel controllo di T1 e quindi T10;
- basse richieste termiche da parte dell'utente per riscaldamento.

Lo scambiatore S1 si attiva quando la temperatura T9 è inferiore a 68 °C e si spegne quando questa temperatura è superiore a 69,5 °C, come si può notare osservando l'andamento di T9 ed M2. Nell'intervallo di tempo considerato le richieste dell'utente variano tra 5 e 7 kW circa che corrispondono ad una differenza di temperatura lato utente della sottostazione nel range 2 °C ÷ 3 °C. Accade quindi che quando la temperatura T10, per effetto delle oscillazioni in T1 e del controllo della sottostazione stessa, arriva a valori di 72 °C – 73 °C, la temperatura T8, e quindi T9, sarà pari a 69 °C – 70 °C e quindi S1 si spegne per effetto della logica di controllo descritta. In ogni caso, anche se al primario di S1 non circola fluido, si ha comunque circolazione al secondario (M8 è maggiore di zero) e quindi le richieste dell'utente continuano ad essere soddisfatte.

I tre grafici riportanti le temperature e le portate nei tre scambiatori mettono in luce alcune caratteristiche relative ai controlli di temperatura e portata sia della test facility che della sottostazione, così come esposto per il giorno 1. Nel seguito si riportano alcune considerazioni riguardo il controllo di temperatura da parte della test facility in T1, T5 e T8 e il controllo di temperatura da parte della sottostazione in T4 e T10.

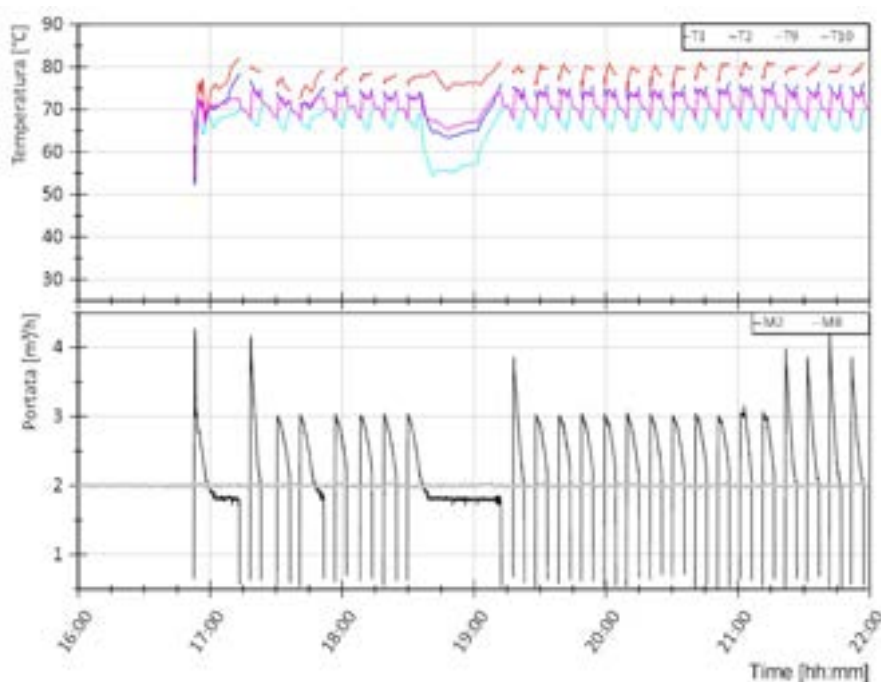


Figura 3.162. Sessione A, Giorno 3 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato teleriscaldamento (mandata dal teleriscaldamento T1, ritorno al teleriscaldamento T2) e lato utenza (ritorno dall'utenza T9, mandata all'utenza T10) dello scambiatore S1 (grafico superiore) tra le 16:00 e le 22:00; andamento della portata lato teleriscaldamento (M2) e lato utenza (M8) dello scambiatore S1 (grafico inferiore)

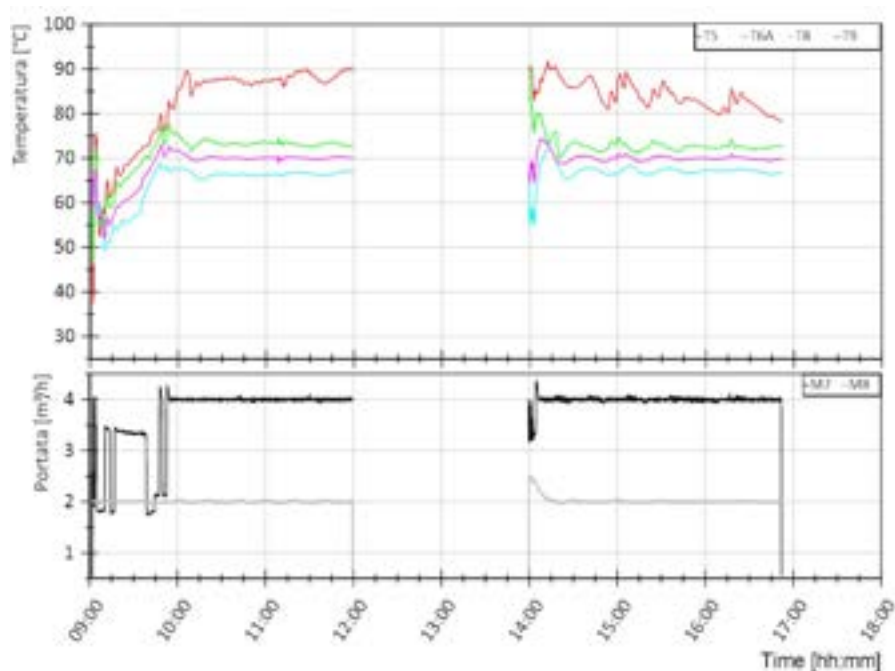


Figura 3.163. Sessione A, Giorno 3 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (mandata dal sistema di generazione T5, ritorno al sistema di generazione T6 e uscita scambiatore S2 T6A) e lato utenza (ritorno dall'utenza T8, mandata all'utenza T9) dello scambiatore S2 (grafico superiore); andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato utenza (M8) dello scambiatore S2 (grafico inferiore)

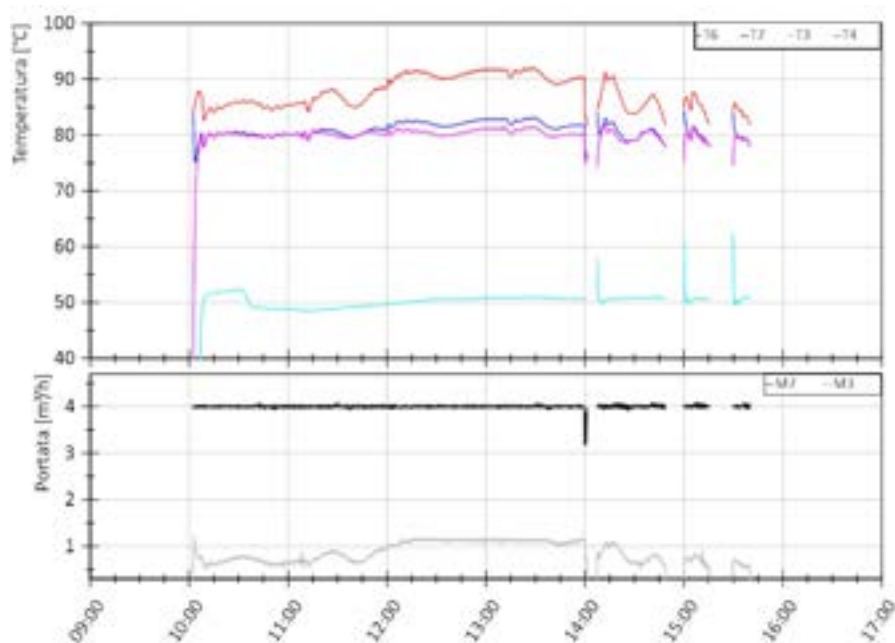


Figura 3.164. Sessione A, Giorno 3 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (ingresso scambiatore S3 T6 e ritorno al sistema di generazione T7) e lato TLR (ritorno dal TLR T3, mandata al TLR T4) dello scambiatore S3 (grafico superiore); andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato TLR (M3) dello scambiatore S3 (grafico inferiore)

Con riferimento alla Figura 3.165 si può notare come l'andamento del valore misurato T1 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa $\pm 2^{\circ}\text{C}$ quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento o caricamento dell'accumulo di ACS. Le prime sono dovute al

controllo di temperatura della test facility a monte del punto di collegamento 1-2 con la sottostazione, così come descritto nel capitolo 5.3.1; le seconde sono dovute a improvvise variazioni di richieste termiche da parte dell'utente che richiedono tra i 15 e i 30 minuti di tempo per essere controllate da parte della test facility. Così come descritto nel seguito, tali oscillazioni non compromettono il soddisfacimento delle richieste termiche dell'utente. C

on riferimento alla Figura 3.166 si può notare come l'andamento del valore misurato T5 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa $\pm 5^\circ\text{C}$ quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento. Le prime sono dovute al controllo di temperatura della test facility a monte del punto di collegamento 5-7 con la sottostazione, così come descritto nel capitolo 5.3.1 e sono accentuate dalla distanza circuitale che tra il punto in cui tale temperatura viene controllata e il punto in cui T5 è posizionato; le seconde sono dovute prevalentemente alle perdite termiche che si hanno nel circuito di collegamento tra sottostazione e test facility e richiedono tra i 15 e i 45 minuti di tempo per essere controllate da parte della test facility.

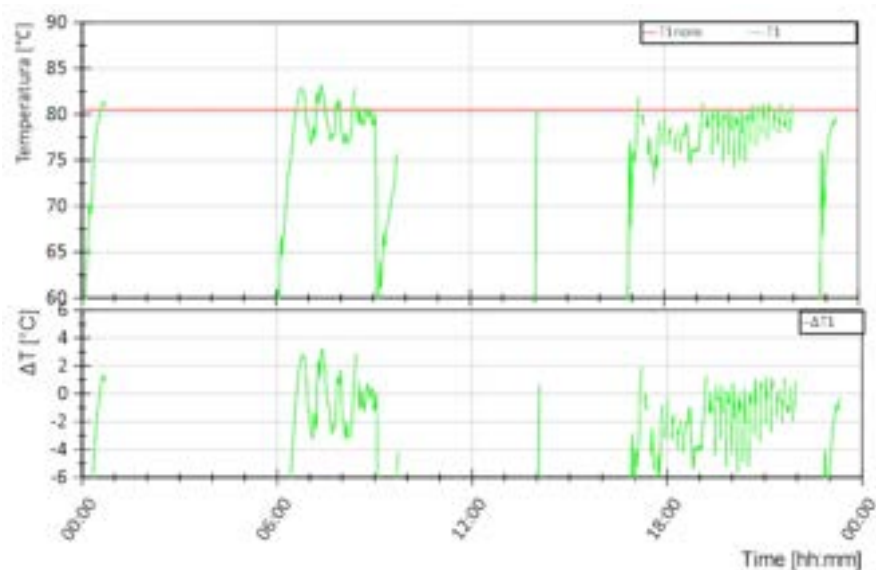


Figura 3.165. Sessione A, Giorno 3. Andamento della temperatura di mandata dal teleriscaldamento T1 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T1nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

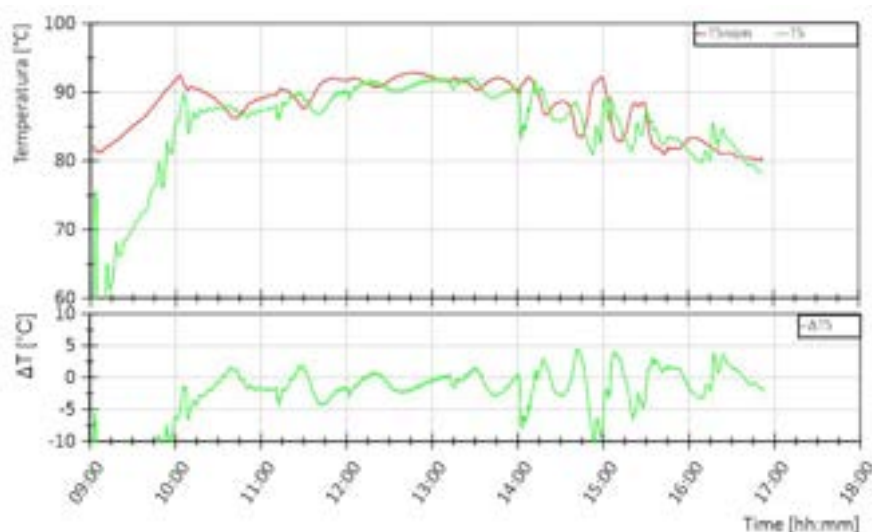


Figura 3.166. Sessione A, Giorno 3 - Dettaglio. Andamento della temperatura di mandata dal sistema di generazione T5 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T5nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

Con riferimento alla Figura 3.167, si può notare come l'andamento del valore misurato T8 (curva verde nel grafico superiore) sia in ritardo rispetto all'andamento del valore di riferimento T8nom (curva rossa nel grafico superiore). Questo ritardo è dovuto essenzialmente alla distanza circuitale tra il punto della test facility in cui T8 viene controllata al valore di riferimento e il punto della sottostazione in cui T8 viene misurata. Di conseguenza si hanno scostamenti assoluti rilevanti rispetto al valore di riferimento in corrispondenza di una brusca variazione del valore di riferimento ma contenuti in ± 1 °C nel funzionamento in condizioni stabili. Inoltre, si possono notare evidenti oscillazioni tra le 17:00 e le 22:00 causate dal funzionamento intermittente di S1, così come descritto in precedenza.

Con riferimento alla Figura 3.168 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T10nom e il valore misurato T10 sia inferiore a ± 1 °C nella prima parte del test, nonostante le oscillazioni registrate in ingresso allo scambiatore S1 ed S2. Si ha una maggiore discrepanza nella condizione di richiesta massima da parte dell'utenza, all'avviamento e quando si ha un funzionamento intermittente di S1: in questa condizione si registrano anche degli abbassamenti maggiori di 5 °C nella temperatura T1 e quindi gli scambiatori S1 ed S2 operano in condizioni di funzionamento diverse da quelle di progetto non riuscendo a garantire 70 °C in uscita, ma comunque riuscendo a soddisfare le richieste termiche dell'utente, come risulta dai grafici in Figura 3.170 e Figura 3.171 riportati di seguito.

Con riferimento alla Figura 3.169 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T4nom e il valore misurato T4 sia inferiore a ± 2 °C per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T4 da parte della sottostazione, nonostante le oscillazioni registrate in ingresso allo scambiatore S3. Si ha una maggiore discrepanza all'avviamento e nei momenti in cui la temperatura di ingresso lato generazione (T6) è prossima ad 82 °C, così come descritto per il giorno 1.

In Figura 3.170 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio e la temperatura ambiente e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo di ACS (in grigio) nonché la portata di caricamento (in arancione) e di ricircolo (in blu). Si può notare dal grafico superiore come la temperatura all'interno degli appartamenti sia tenuta essenzialmente sopra i 20 °C durante le ore di riscaldamento anche per effetto di una buona radiazione e alte temperature esterne. Inoltre, dalla Figura 3.171 risulta che la valvola miscelatrice presente nel modello riesce a controllare la temperatura di mandata al riscaldamento secondo curva climatica teorica, nonostante le oscillazioni che si hanno all'avviamento in T1 e T5. Tali oscillazioni non compromettono il soddisfacimento delle richieste dell'utente. Per quanto riguarda l'ACS, si può notare come la temperatura dell'accumulo aumenta ogni qualvolta avviene una carica fino a raggiungere i 60 °C, e diminuisce per effetto delle perdite termiche o richiesta da parte dell'utente che si verifica in corrispondenza di una portata di ricircolo maggiore di 0,27 m³/h.

In Figura 3.172 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in ingresso e uscita dal campo solare e la portata circolante e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo solare (in grigio) e l'intervallo di scarica (in arancione) che indica il periodo in cui l'energia solare viene inviata dall'accumulo alla sottostazione. Dal grafico superiore si evince che in una prima fase di avviamento del campo solare non si ha un caricamento dell'accumulo: la temperatura di uscita dal campo solare è infatti inferiore rispetto alla temperatura nell'accumulo; la carica inizia quando questa temperatura diventa superiore alla temperatura nell'accumulo. Ciò emerge anche dalla Figura 3.173 confrontando la potenza termica prodotta dal campo solare e quella in ingresso all'accumulo solare (rispettivamente in rosso e magenta). Con riferimento alla Figura 3.172, nei momenti in cui si ha la carica dell'accumulo, si assiste ad un aumento della temperatura dello stesso. Tale temperatura può diminuire in corrispondenza di una scarica se la potenza richiesta dalla sottostazione è superiore a quella immessa nell'accumulo in quell'istante o può aumentare in caso contrario. Nel caso in esame, non appena si avvia la scarica con invio di energia termica alla sottostazione, utilizzata dallo scambiatore S2 (curva in blu nel grafico inferiore) ed S3 (curva in rosso nel grafico inferiore), la temperatura nell'accumulo si mantiene essenzialmente costante per buona parte del test, per poi diminuire quando la produzione solare è in fase di esaurimento.

In Tabella 3.25 si riporta l'energia termica al primario e al secondario dei diversi scambiatori e le relative efficienze per la prova considerata.

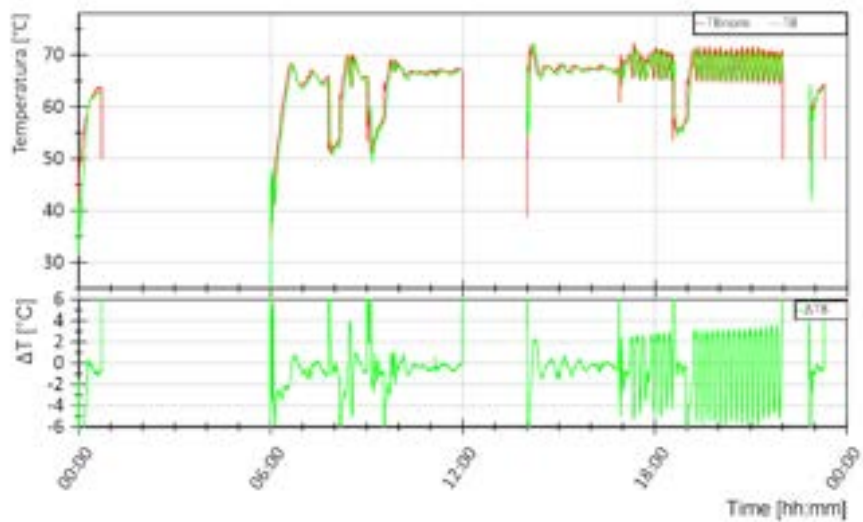


Figura 3.167. Sessione A, Giorno 2. Andamento della temperatura di ritorno dall'utenza T8 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T8nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

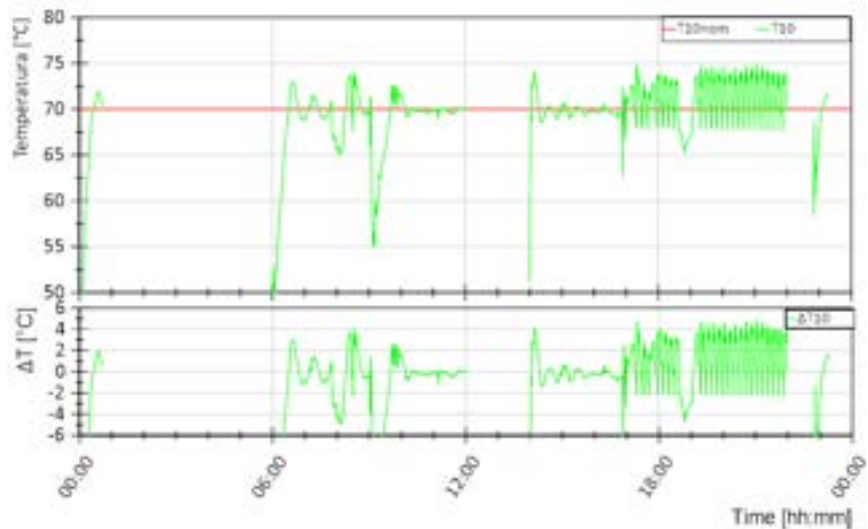


Figura 3.168. Sessione A, Giorno 3. Andamento della temperatura di mandata all'utenza T10 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T10nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

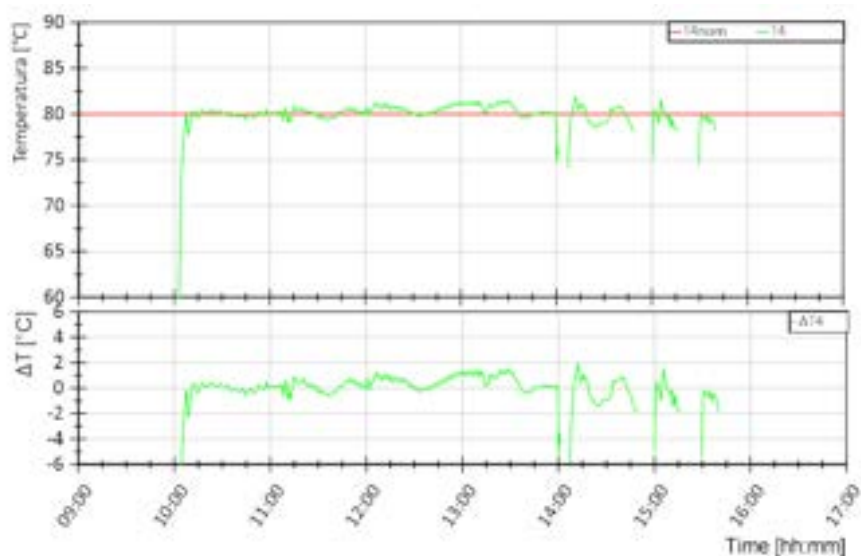


Figura 3.169. Sessione A, Giorno 3 - Dettaglio. Andamento della temperatura di immissione in rete T4 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T4nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

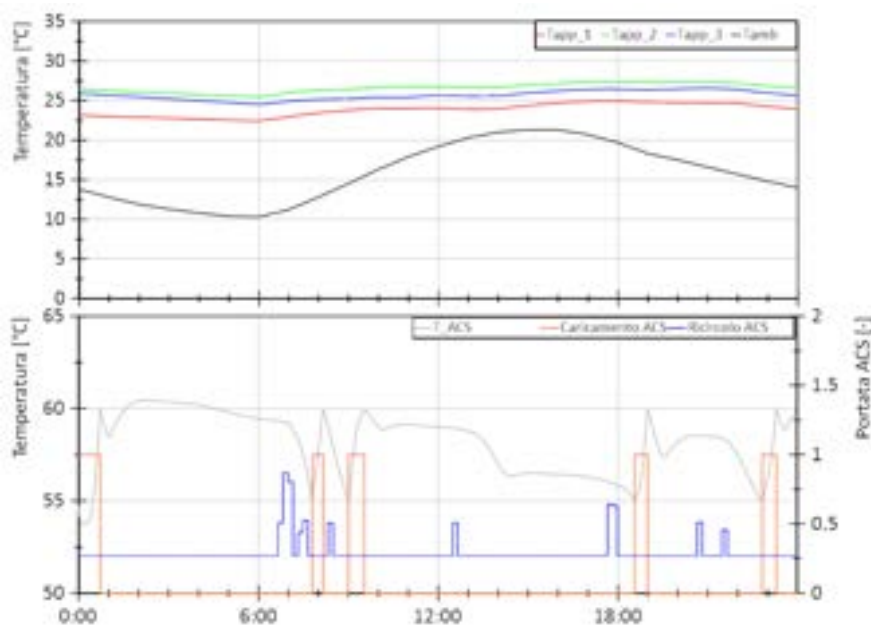


Figura 3.170. Sessione A, Giorno 3. Andamento della temperatura in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio (curve in blu, verde e rosso del grafico superiore) e temperatura esterna (curva in nero grafico superiore); andamento della temperatura nell'accumulo di ACS e portata di caricamento e ricircolo dell'accumulo di ACS (rispettivamente curva un grigio, in arancione e in blu del grafico inferiore)

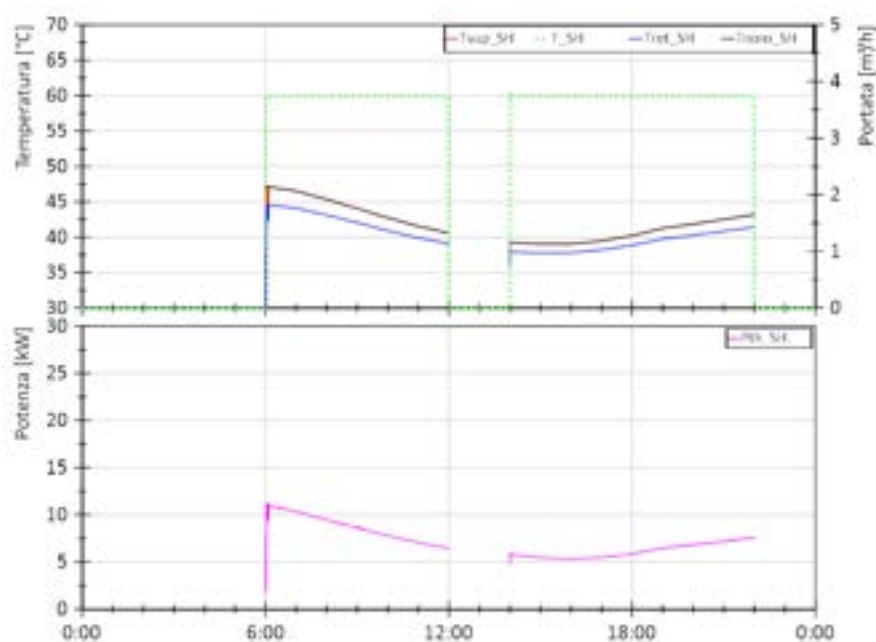


Figura 3.171. Sessione A, Giorno 3. Andamento della temperatura di mandata e ritorno e portata nel circuito di riscaldamento (curva in rosso, blu e tratteggiata verde nel grafico superiore rispettivamente) e andamento della temperatura di mandata al riscaldamento di riferimento (curva in nero); andamento della potenza termica per riscaldamento (curva in magenta grafico inferiore)

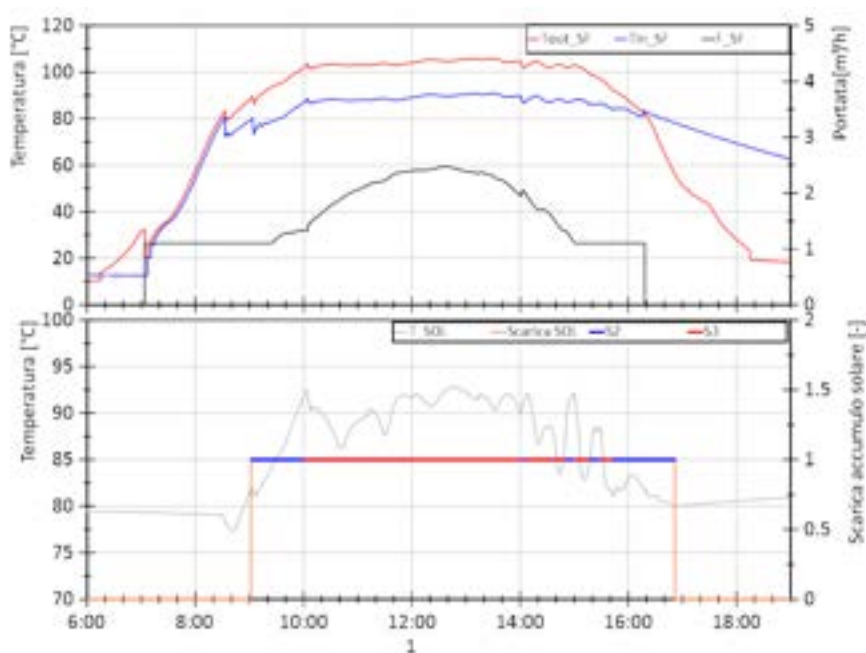


Figura 3.172. Sessione A, Giorno 3 - Dettaglio. Andamento della temperatura in uscita dal campo solare, in ingresso e la portata (rispettivamente curva in rosso, blu e nero del grafico superiore); andamento della temperatura nell'accumulo solare e intervallo di scarica dell'accumulo solare (rispettivamente curva un grigio e in arancione del grafico inferiore)

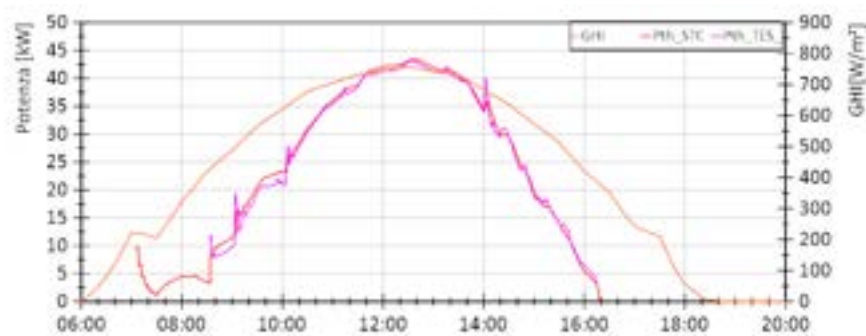


Figura 3.173. Sessione A, Giorno 3 - Dettaglio. Andamento della radiazione globale sul piano orizzontale (GHI in arancione), della potenza termica prodotta dal campo solare (in rosso) e di quella in ingresso all'accumulo solare (in magenta)

Tabella 3.25. Sessione A, Giorno 3. Energie termiche al primario (lato teleriscaldamento, TLR, o sistema di generazione, GEN) e al secondario (lato teleriscaldamento, TLR, o utente, US) dei diversi scambiatori della sottostazione e relative efficienze

Eth,S1,TLR [kWh]	Eth,S1,US [kWh]	η_{S1} [%]	Eth,S2,GEN [kWh]	Eth,S2,US [kWh]	η_{S2} [%]	Eth,S3,GEN [kWh]	Eth,S3,US [kWh]	η_{S3} [%]
123,53	115,24	93%	45,84	44,87	98%	157,83	155,1	98%

3.4.2.3 Giorno 5

Il giorno di test 5 è il 01/08 per il quale sono presenti solo richieste di ACS da parte dell'utente essendo tale giorno al di fuori del periodo di riscaldamento.

In Figura 3.174 viene mostrato, nel grafico inferiore, in nero il comando di avvio della sottostazione per richiesta da parte dell'utente che coincide con le richieste di caricamento dell'accumulo di ACS e in arancione la disponibilità di energia solare nell'accumulo solare che può essere utilizzata dalla sottostazione. Nel grafico superiore si riporta in magenta la potenza termica fornita dallo scambiatore S1 e in rosso quella fornita dallo scambiatore S2 per soddisfare le richieste termiche. Nel grafico centrale si riporta in viola la potenza termica fornita dallo scambiatore S3 alla rete di teleriscaldamento.

Dal confronto tra i tre grafici si può notare che le richieste termiche dell'utente sono principalmente soddisfatte dallo scambiatore S1 e quindi dalla rete di TLR. Inoltre, la disponibilità di energia solare nell'accumulo solare è solo parzialmente contemporanea alla richiesta termica dell'utente: tramite lo scambiatore S2, parte della potenza termica richiesta dall'utente viene fornita dall'impianto solare. La restante disponibilità solare viene immessa nella rete di TLR tramite lo scambiatore S3 il cui funzionamento è basato sul livello di temperatura alla quale l'energia solare è inviata alla sottostazione in ingresso a tale scambiatore: si avvia quando T6 è maggiore di 84 °C e resta attivo finché tale temperatura è superiore a 82 °C. In Figura 3.175 viene riportato un ingrandimento della Figura 3.174 al fine di visualizzare in dettaglio le ore di funzionamento degli scambiatori S2 ed S3, ovvero tra le 09:00 e le 17:00. Si nota che durante i primi 20 minuti di accensione dello scambiatore S2 si ha un funzionamento in contemporanea allo scambiatore S1 con potenze comparabili. Successivamente funziona solo lo scambiatore S2 per terminare la carica dell'accumulo ACS. Lo scambiatore S3 immette energia nella rete di TLR quando questa è disponibile e non si hanno richieste da parte dell'utente, ovvero la le 09:00 e le 16:30 circa. Non si verifica, quindi, un funzionamento contemporaneo di S2 ed S3.

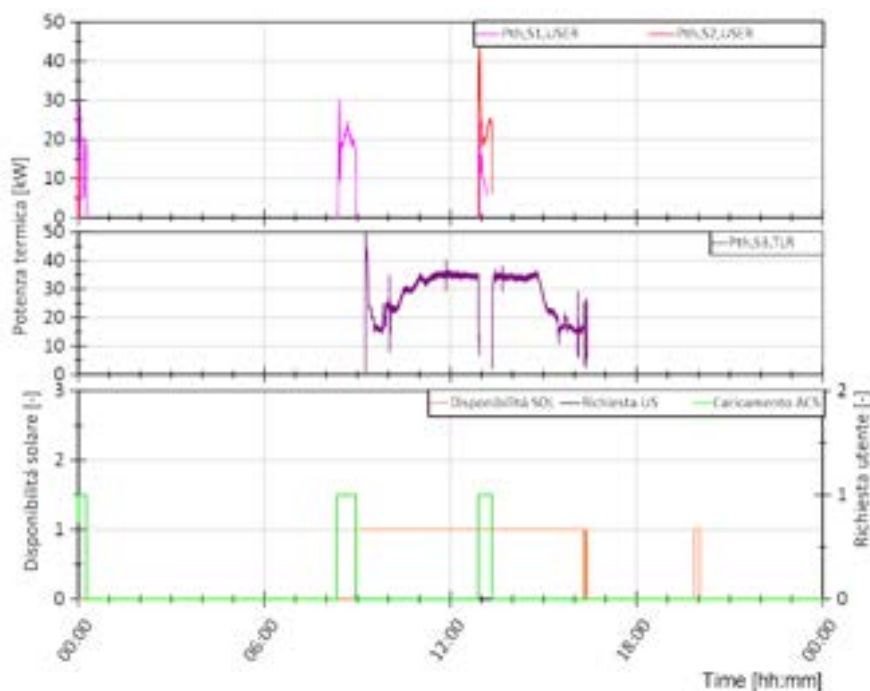


Figura 3.174. Sessione A, Giorno 5. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità energia solare nell'accumulo (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

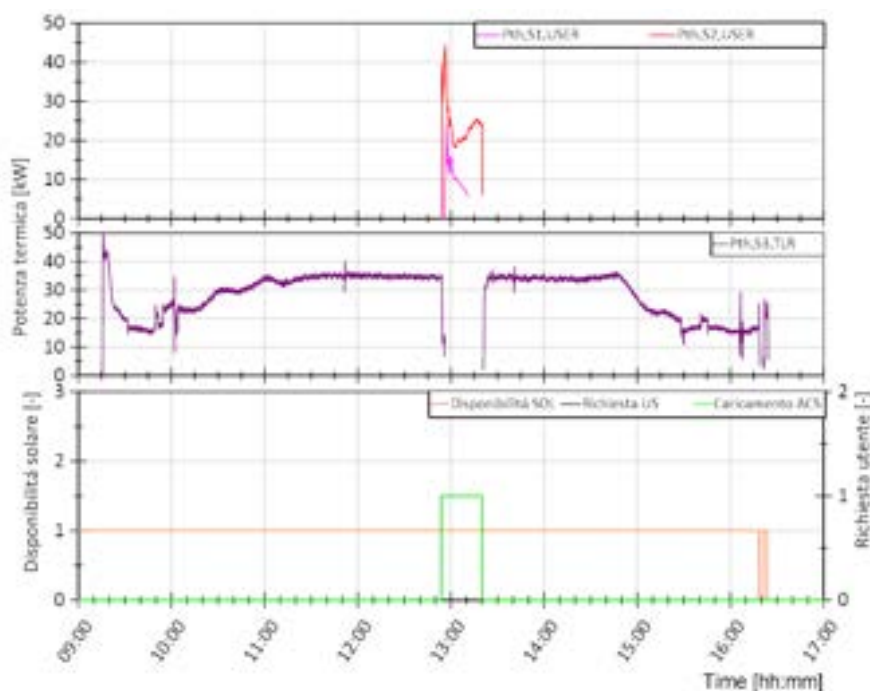


Figura 3.175. Sessione A, Giorno 5 - Dettaglio. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità energia solare nell'accumulo (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

Si riportano nel seguito gli andamenti delle temperature di ingresso e uscita al primario e al secondario degli scambiatori S1, S2 ed S3 e le portate quando questi sono in funzione (Figura 3.176-Figura 3.178). In particolare per gli scambiatori S2 ed S3 si utilizza una scala temporale basata sui momenti di funzionamento al fine di facilitarne la lettura.

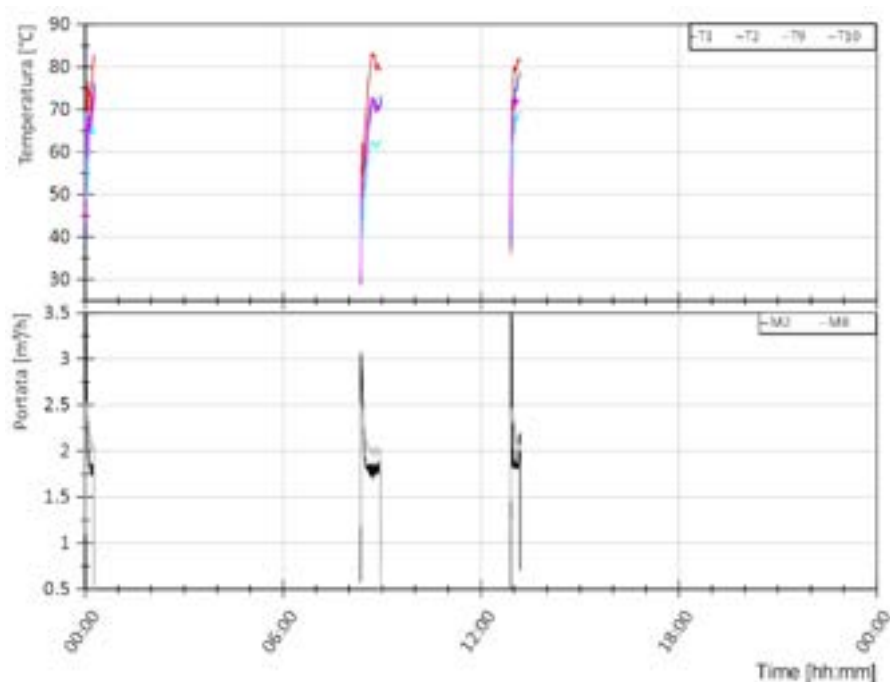


Figura 3.176. Sessione A, Giorno 5. Andamento delle temperature lato teleriscaldamento (mandata dal teleriscaldamento T1, ritorno al teleriscaldamento T2) e lato utenza (uscita dallo scambiatore S2 T9, mandata all'utenza T10) dello scambiatore S1 (grafico superiore); andamento della portata lato teleriscaldamento (M2) e lato utenza (M8) dello scambiatore S1 (grafico inferiore)

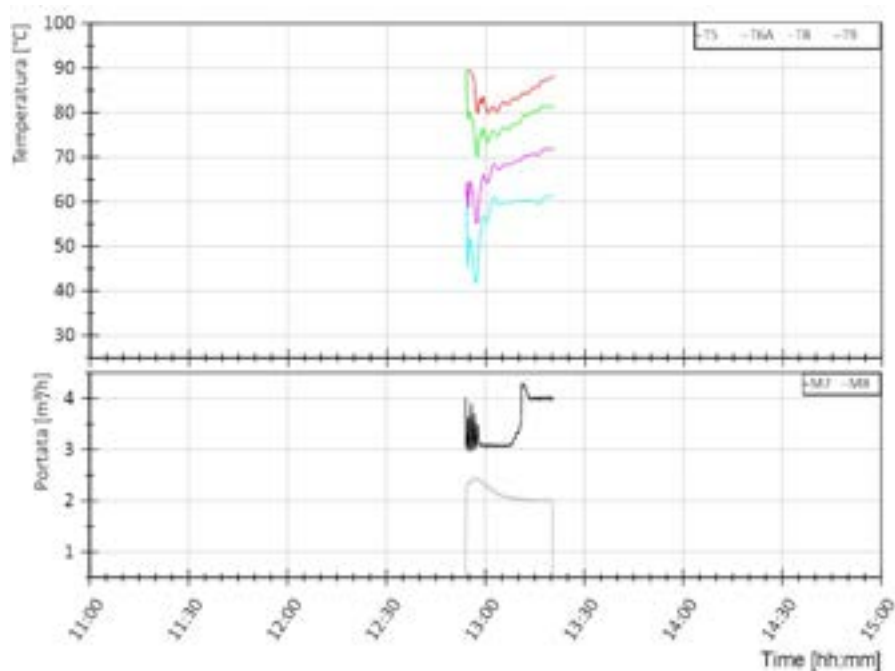


Figura 3.177. Sessione A, Giorno 5 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (mandata dal sistema di generazione T5, ritorno al sistema di generazione T6 e uscita scambiatore S2 T6A) e lato utenza (ritorno dall'utenza T8, mandata all'utenza T9) dello scambiatore S2 (grafico superiore); andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato utenza (M8) dello scambiatore S2 (grafico inferiore)

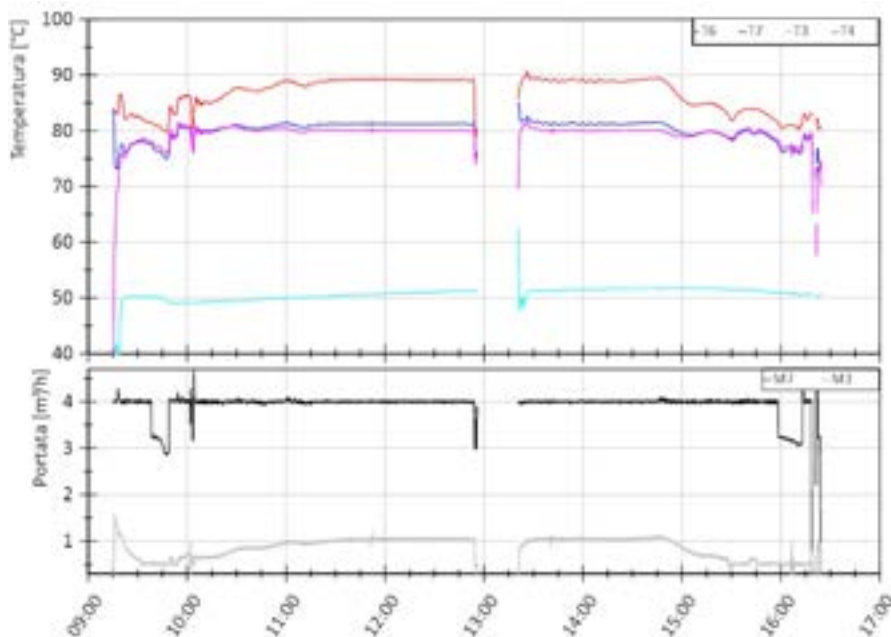


Figura 3.178. Sessione A, Giorno 5 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (Ingresso scambiatore S3 T6 e ritorno al sistema di generazione T7) e lato TLR (ritorno dal TLR T3, mandata al TLR T4) dello scambiatore S3 (grafico superiore); andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato TLR (M3) dello scambiatore S3 (grafico inferiore)

Nel seguito si riportano alcune considerazioni riguardo il controllo di temperatura da parte della test facility in T1, T5 e T8 e il controllo di temperatura da parte della sottostazione in T4 e T10.

Con riferimento alla Figura 3.179 si può notare come l'andamento del valore misurato T1 (curva verde nel grafico superiore) sia caratteristico dell'avviamento dell'impianto (come descritto per i giorni precedenti) e non si stabilizza a causa della breve durata di una carica dell'accumulo di ACS (circa 30 minuti). Pur non riuscendo a controllare la temperatura T1 ad 80 °C, valore nominale durante la carica, si riescono comunque a soddisfare le richieste dell'utente.

Con riferimento alla Figura 3.180 si può notare come l'andamento del valore misurato T5 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa ± 5 °C quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento e quando la temperatura di riferimento supera i 90 °C. Le prime sono dovute al controllo di temperatura della test facility a monte del punto di collegamento 5-7 con la sottostazione, così come descritto nel capitolo 5.3.1 e sono accentuate dalla distanza circuitale che tra il punto in cui tale temperatura viene controllata e il punto in cui T5 è posizionato; le seconde sono dovute prevalentemente alle perdite termiche che si hanno nel circuito di collegamento tra sottostazione e test facility e richiedono tra i 15 e i 45 minuti di tempo per essere controllate da parte della test facility e alla difficoltà di controllare temperature superiori a 92°C per questioni di sicurezza della test facility. Pur non riuscendo a garantire il controllo della temperatura in uscita dall'accumulo solare ad un valore superiore a 92°C, si garantisce il bilancio di energia e quindi viene trasmessa alla sottostazione tutta l'energia disponibile nell'accumulo solare, come emerge dai bilanci energetici riportati in Tabella 3.28.

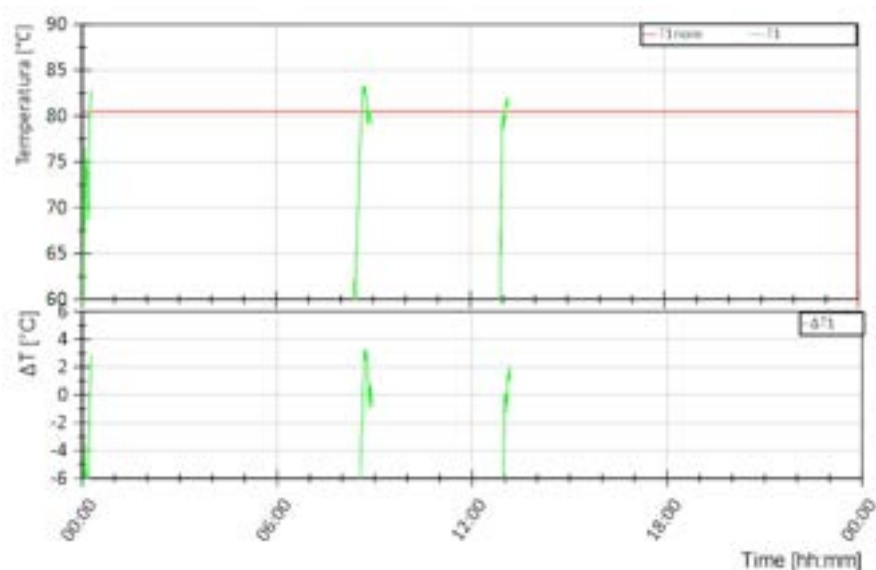


Figura 3.179. Sessione A, Giorno 5. Andamento della temperatura di mandata dal teleriscaldamento T1 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T1nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

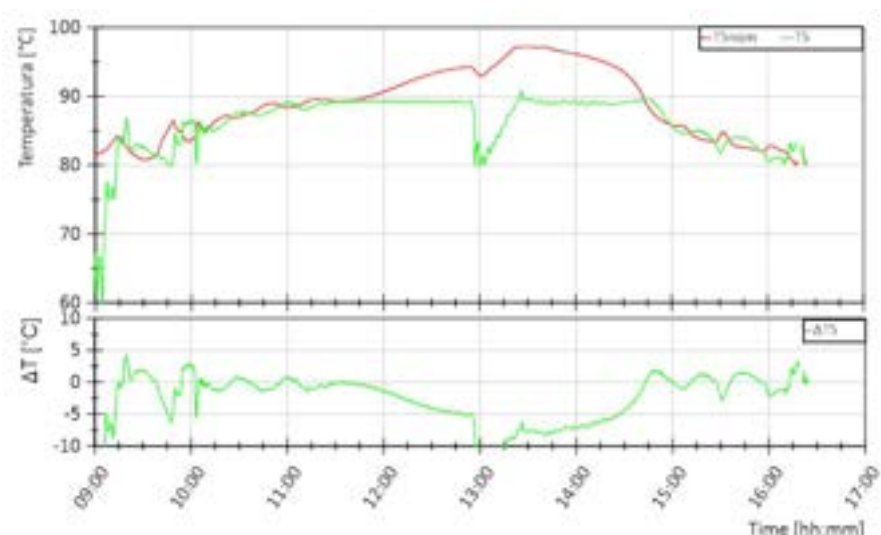


Figura 3.180. Sessione A, Giorno 5 - Dettaglio. Andamento della temperatura di mandata dal sistema di generazione T5 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T5nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

Con riferimento alla Figura 3.181, si può notare come l'andamento del valore misurato T8 (curva verde nel grafico superiore) sia in ritardo rispetto all'andamento del valore di riferimento T8nom (curva rossa nel grafico superiore). Questo ritardo è dovuto essenzialmente alla distanza circuitale tra il punto della test facility in cui T8 viene controllata al valore di riferimento e il punto della sottostazione in cui T8 viene misurata. Di conseguenza si hanno scostamenti assoluti rilevanti rispetto al valore di riferimento in corrispondenza di una brusca variazione del valore di riferimento ma contenuti in ± 1 °C nel funzionamento in condizioni stabili. Con riferimento alla Figura 3.182 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T10nom e il valore misurato T10 sia caratteristica dell'avviamento dell'impianto e non si riesce a raggiungere un funzionamento a regime per la breve durata della carica dell'accumulo di ACS. Si riesce comunque a soddisfare le richieste termiche dell'utente andando a caricare l'accumulo di ACS, come risulta dai grafici in Figura 3.184 riportati nel seguito.

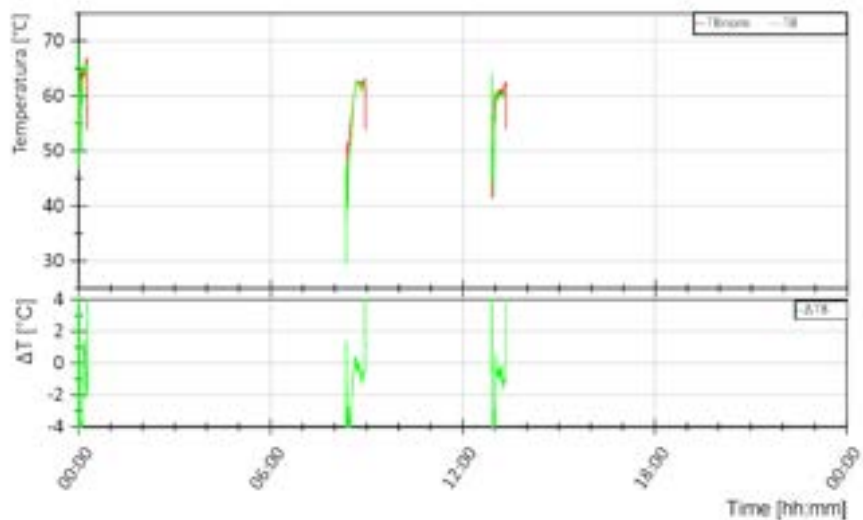


Figura 3.181. Sessione A, Giorno 5. Andamento della temperatura di ritorno dall'utenza T8 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T8nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

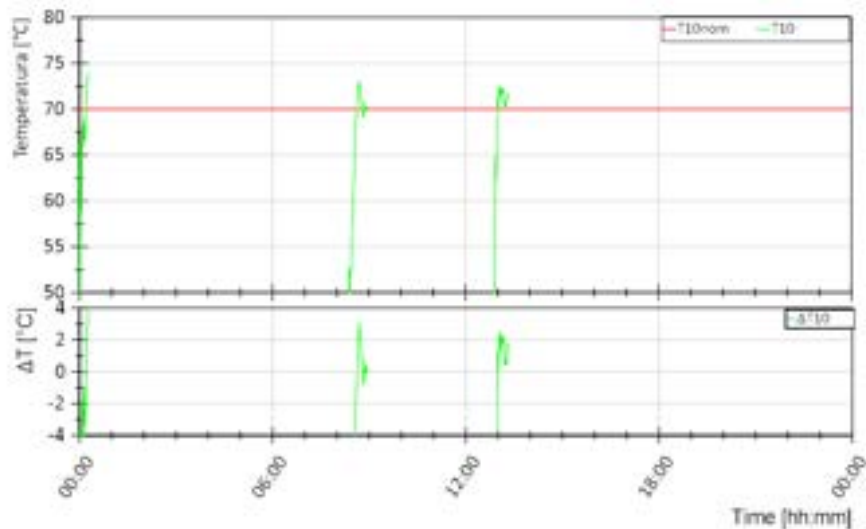


Figura 3.182. Sessione A, Giorno 5. Andamento della temperatura di mandata all'utenza T10 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T10nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

Con riferimento alla Figura 3.183 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T4nom e il valore misurato T4 sia inferiore a ± 2 °C per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T4 da parte della sottostazione, nonostante le oscillazioni registrate in ingresso allo scambiatore S3. Si ha una maggiore discrepanza all'avviamento e nei momenti in cui la temperatura di ingresso lato generazione (T6) è prossima ad 82 °C, così come descritto per il giorno 1.

In Figura 3.184 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio e la temperatura ambiente e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo di ACS (in grigio) nonché la portata di caricamento (in arancione) e di ricircolo (in blu). Per quanto riguarda l'ACS, si può notare come la temperatura dell'accumulo aumenta ogni qualvolta avviene una carica fino a raggiungere i 60 °C, e diminuisce per effetto delle perdite termiche o richiesta da parte dell'utente che si verifica in corrispondenza di una portata di ricircolo maggiore di 0,27 m³/h. Inoltre, la temperatura nell'accumulo non scende mai sotto i 55 °C, pur non riuscendo a garantire un controllo ottimale della temperatura T10 a 70 °C a causa delle dinamiche di avviamento della test facility e/o variazioni importanti di richieste termiche.

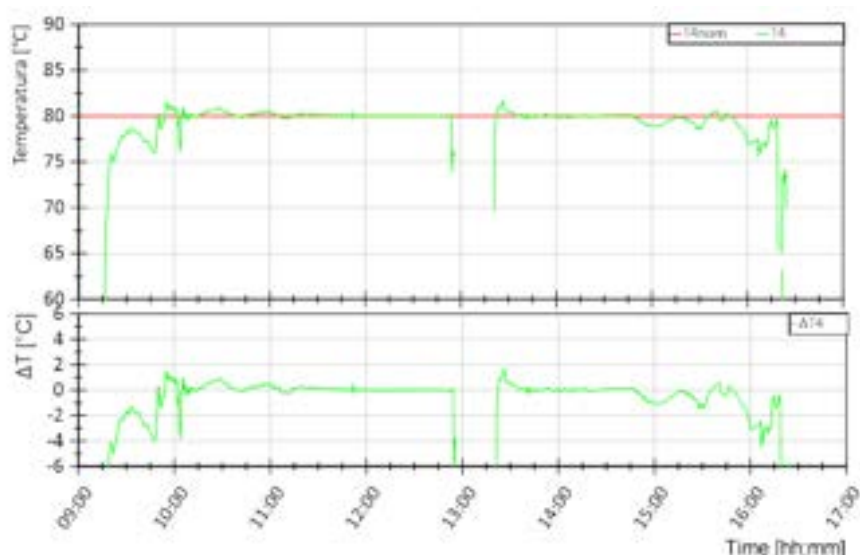


Figura 3.183. Sessione A, Giorno 5 - Dettaglio. Andamento della temperatura di immissione in rete T4 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T4nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

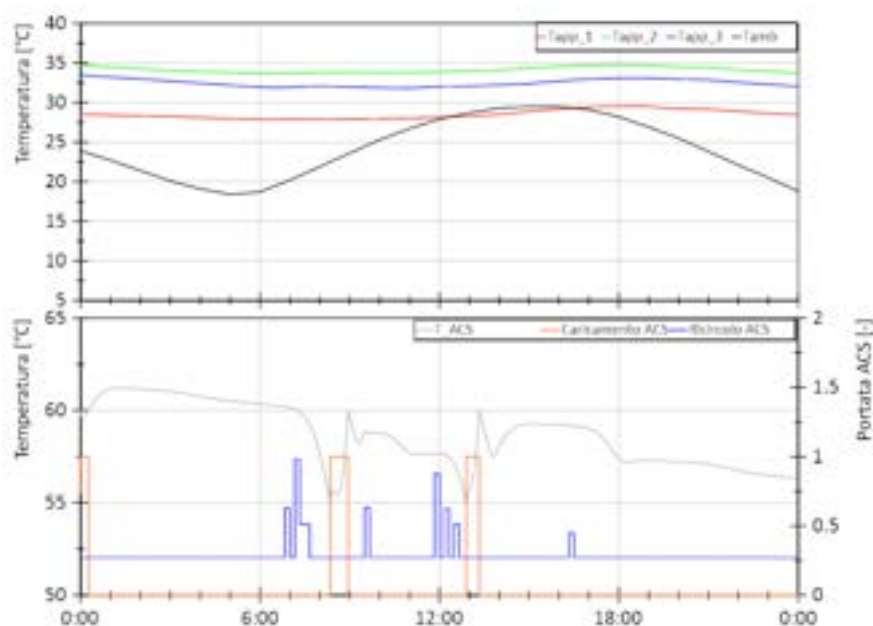


Figura 3.184. Sessione A, Giorno 5. Andamento della temperatura in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio (curve in blu, verde e rosso del grafico superiore) e temperatura esterna (curva in nero grafico superiore); andamento della temperatura nell'accumulo di ACS e portata di caricamento e ricircolo dell'accumulo di ACS (rispettivamente curva un grigio, in arancione e in blu del grafico inferiore)

In Figura 3.185 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in ingresso e uscita dal campo solare e la portata circolante e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo solare (in grigio) e l'intervallo di scarica (in arancione) che indica il periodo in cui l'energia solare viene inviata dall'accumulo alla sottostazione. Dal grafico superiore si evince che in una prima fase di avviamento del campo solare non si ha un caricamento dell'accumulo: la temperatura di uscita dal campo solare è infatti inferiore rispetto alla temperatura nell'accumulo; la carica inizia quando questa temperatura diventa superiore alla temperatura nell'accumulo. Ciò emerge anche dalla Figura 3.186 confrontando la potenza termica prodotta dal campo solare e quella in ingresso all'accumulo solare (rispettivamente in rosso e magenta). Con riferimento alla Figura 3.185, nei momenti in cui si ha la carica dell'accumulo, si assiste ad un aumento della temperatura dello stesso. Tale temperatura può diminuire in corrispondenza di una scarica se la potenza richiesta dalla

sottostazione è superiore a quella immessa nell'accumulo in quell'istante o può aumentare in caso contrario. Nel caso in esame, non appena si avvia la scarica con invio di energia termica alla sottostazione, utilizzata dallo scambiatore S2 (curva in blu nel grafico inferiore) ed S3 (curva in rosso nel grafico inferiore), la temperatura nell'accumulo dapprima diminuisce per poi iniziare ad aumentare fino a raggiungere un valore di circa 97 °C. La massima potenza scambiabile con S3 è di circa 35 kW come si evince dalla Figura 3.175, mentre il campo solare tra le 11:00 e le 14:00 circa produce nel range 35 ÷ 45 kW, come emerge da Figura 3.186.

In Tabella 3.26 si riporta l'energia termica al primario e al secondario dei diversi scambiatori e le relative efficienze per la prova considerata.

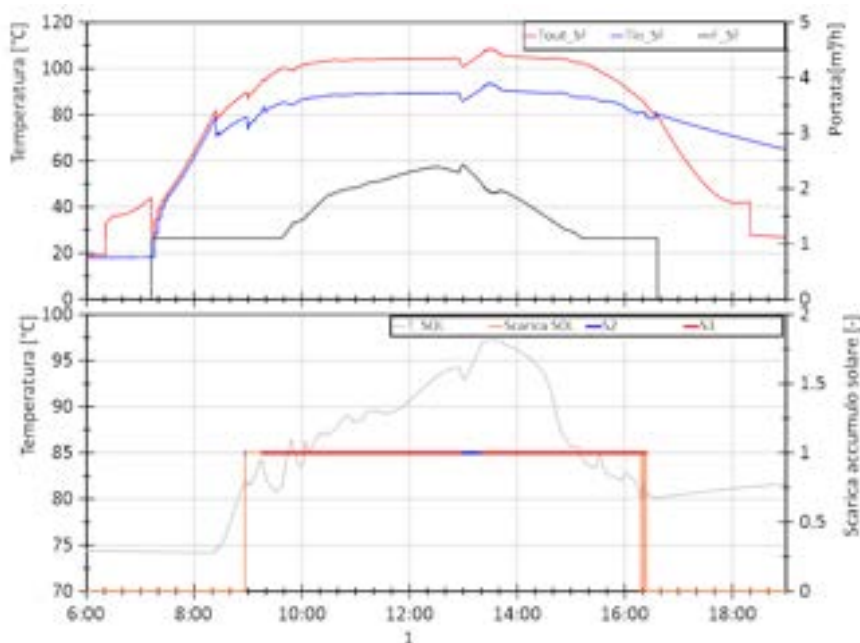


Figura 3.185. Sessione A, Giorno 5 - Dettaglio. Andamento della temperatura in uscita dal campo solare, in ingresso e la portata (rispettivamente curva in rosso, blu e nero del grafico superiore); andamento della temperatura nell'accumulo solare e intervallo di scarica dell'accumulo solare (rispettivamente curva un grigio e in arancione del grafico inferiore)

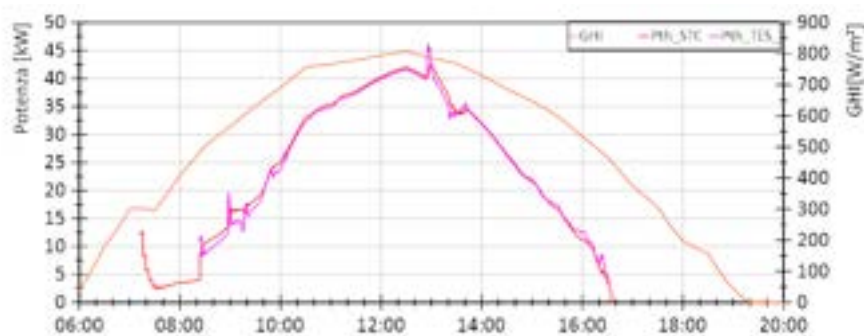


Figura 3.186. Sessione A, Giorno 5 - Dettaglio. Andamento della radiazione globale sul piano orizzontale (GHI in arancione), della potenza termica prodotta dal campo solare (in rosso) e di quella in ingresso all'accumulo solare (in magenta)

Tabella 3.26. Sessione A, Giorno 5. Energie termiche al primario (lato teleriscaldamento, TLR, o sistema di generazione, GEN) e al secondario (lato teleriscaldamento, TLR, o utente, US) dei diversi scambiatori della sottostazione e relative efficienze

Eth,S1,TLR [kWh]	Eth,S1,US [kWh]	η_{s1} [%]	Eth,S2,GEN [kWh]	Eth,S2,US [kWh]	η_{s2} [%]	Eth,S3,GEN [kWh]	Eth,S3,US [kWh]	η_{s3} [%]
18,26	16,15	88%	10,73	10,64	99%	196,43	190,86	97%

3.4.2.4 Prestazioni energetiche ed indicatori per la sessione A

Si riporta nel seguito un'analisi delle prestazioni energetiche della sottostazione per i 6 giorni di test considerati al fine di valutare i flussi energetici e la bontà dell'accoppiamento tra i modelli numerici di edificio e campo solare con il laboratorio. In Tabella 3.27 sono riportate l'energia ceduta all'impianto di riscaldamento, energia ceduta all'impianto di caricamento dell'accumulo ACS e l'energia ceduta al primario del separatore idraulico per i 6 giorni di test, calcolate sulla base degli andamenti delle temperature e portate elaborate dal modello numerico durante i test e per questo indicato con "S" (simulazione). È riportata, inoltre, l'energia ceduta al lato utente dalla sottostazione calcolata sulla base degli andamenti delle temperature e portate elaborate dalla sottostazione durante i test (T8, T10 ed M8) e per questo indicato con "L" (laboratorio) e il fattore di accoppiamento simulazione/laboratorio per i 6 giorni di test calcolato come:

$$\text{Fattore accoppiamento} \frac{S}{L} = \frac{\text{Energia primario separatore idraulico (S)}}{\text{Energia lato utente sottostazione (L)}} * 100 \quad (3.2)$$

Per una descrizione del collegamento sottostazione/test facility con modello numerico e quindi dettagli sui punti di misura per la valutazione delle energie, si rimanda al capitolo 5.3.2.

Tabella 3.27. Sessione A - Energia ceduta all'impianto di riscaldamento, energia ceduta all'impianto di caricamento dell'accumulo ACS, energia ceduta al primario del separatore idraulico, energia ceduta al lato utente dalla sottostazione e fattore di accoppiamento simulazione/laboratorio per i 6 giorni di test

Giorno di test		1	2	3	4	5	6
Giorno dell'anno		05 Gen	21 Mar	09 Apr	24 Mag	01 Ago	05 Nov
Energia riscaldamento (S)	[kWh]	244,57	160,63	101,2	0	0	171,45
Energia ACS (S)	[kWh]	22,18	28,2	34,81	25,35	20,66	32,31
Energia primario separatore idraulico (S)	[kWh]	275,56	194,46	139,54	25,82	21,06	209,56
Energia lato utente sottostazione (S1+S2) (L)	[kWh]	286,72	202,88	160,11	29,93	26,79	229,25
Fattore accoppiamento S/L	[%]	96%	96%	87%	86%	79%	91%

Il primario del separatore idraulico rappresenta il punto di collegamento tra sottostazione (laboratorio) e modello numerico, per la parte relativa all'edificio. In un funzionamento ideale, l'energia al primario del separatore idraulico coinciderebbe con l'energia lato utente della sottostazione in quanto la temperatura di mandata della sottostazione (T10) coinciderebbe con la temperatura di ingresso al primario separatore idraulico, la temperatura di uscita dal primario del separatore idraulico coinciderebbe con la temperatura di ingresso alla sottostazione (T8) e la portata al lato utente della sottostazione coinciderebbe con la portata al primario del separatore idraulico. Durante i test eseguiti, la temperatura in ingresso alla sottostazione (T8) è controllata dal laboratorio al fine di emulare il valore di temperatura in uscita dal primario del separatore idraulico risultante dalla simulazione. Come emerge dalla descrizione dei diversi giorni di test, non è sempre possibile ottenere una differenza nulla tra variabile di riferimento e variabile controllata. In alcune condizioni di funzionamento si hanno delle discrepanze che si ripercuotono sui bilanci energetici, come si nota dalla valutazione del fattore di accoppiamento in tabella. Tale valore varia tra il 87% e il 96%. Si ha un miglior accoppiamento, e di conseguenza un miglior controllo della T8, nei giorni in cui il funzionamento del sistema è stabile ed è presente una richiesta di riscaldamento e ACS, come accade per il giorno 1, 2 e 6; si ha un

accoppiamento peggiore nei giorni in cui si ha un funzionamento meno stabile del sistema, tipico dei giorni con solo richiesta di ACS o con funzionamento intermittente di S1 per bassa richiesta da parte dell'utente. Allo stesso tempo, le giornate con fattore di accoppiamento peggiore (3, 4 e 5) sono caratterizzate da scambi energetici inferiori rispetto alle altre e nella valutazione del fattore di accoppiamento globale avranno un peso minore. Risulta infatti un fattore di accoppiamento globale, calcolato sulla base dei valori estrapolati a tutto l'anno, del 108%.

Con riferimento allo schema del modello di circuito solare, in Tabella 3.28 sono riportate l'energia totale prodotta dal campo solare, energia da solare in ingresso all'accumulo solare e l'energia da solare in uscita dall'accumulo solare, per i 6 giorni di test. Tali energie sono calcolate sulla base degli andamenti delle temperature e portate elaborate dal modello numerico durante i test e per questo indicato con "S" (simulazione). È riportata, inoltre, l'energia da solare in ingresso alla sottostazione calcolata sulla base degli andamenti delle temperature e portate elaborate dalla sottostazione durante i test (T5, T7 ed M2) e per questo indicato con "L" (laboratorio) e il fattore di accoppiamento simulazione/laboratorio per i 6 giorni di test calcolato come:

$$\text{Fattore accoppiamento } \frac{S}{L} = \frac{\text{Energia da solare in uscita dall'accumulo solare (S)}}{\text{Energia da solare in ingresso alla sottostazione (L)}} * 100 \quad (3.3)$$

Tabella 3.28. Sessione A - Energia totale prodotta dal campo solare, energia da solare in ingresso all'accumulo solare, energia da solare in uscita dall'accumulo solare, energia da solare in ingresso alla sottostazione e fattore di accoppiamento simulazione/laboratorio per i 6 giorni di test

Giorno di test		1	2	3	4	5	6
Giorno dell'anno		05 Gen	21 Mar	09 Apr	24 Mag	01 Ago	05 Nov
Energia totale prodotta da solare (S)	[kWh]	27,46	50,17	224,8	29,89	225,47	24,46
Energia da solare in ingresso all'accumulo (S)	[kWh]	19,32	42,21	216,04	22,82	218,08	15,98
Energia da solare in uscita dall'accumulo (S)	[kWh]	13,36	37,54	209,15	21,77	210,16	12,42
Energia da solare in ingresso alla sottostazione (L)	[kWh]	12,72	39	206,77	21,84	212,48	11,72
Fattore accoppiamento S/L	[%]	105%	96%	101%	100%	99%	106%

Il secondario dell'accumulo solare rappresenta il punto di collegamento tra sottostazione (laboratorio) e modello numerico, per la parte relativa al solare. In un funzionamento ideale, l'energia in uscita dall'accumulo solare coinciderebbe con l'energia in ingresso alla sottostazione lato sistema di generazione (5-7) in quanto la temperatura di mandata della sottostazione (T7) coinciderebbe con la temperatura di ingresso al secondario dell'accumulo solare, la temperatura di uscita dal secondario dell'accumulo solare coinciderebbe con la temperatura di ingresso alla sottostazione (T5) e la portata al lato solare della sottostazione coinciderebbe con la portata al secondario dell'accumulo solare. Durante i test eseguiti, la temperatura in uscita dal secondario dell'accumulo solare è controllata dal laboratorio in T5 al fine di emulare il valore di temperatura risultante dalla simulazione. Come emerge dalla descrizione dei diversi giorni di test, non è sempre possibile ottenere una differenza nulla tra variabile di riferimento e variabile controllata. Nei primi test effettuati si è notata una differenza dell'ordine del 40% (maggiore l'energia in uscita dall'accumulo solare emulato rispetto a quella in ingresso alla sottostazione) dovuta principalmente alla differenza tra temperatura di riferimento e temperatura controllata. Si è deciso quindi di modificare la modalità di interazione tra laboratorio e modello, implementando un controllo in potenza ed evitare quindi di "distruggere" energia solare presente nell'accumulo solare, come descritto in appendice nel paragrafo 5.3.2. In alcune condizioni di funzionamento si possono comunque avere delle discrepanze tra la potenza in ingresso alla sottostazione e quella in uscita dall'accumulo che si ripercuotono sui bilanci energetici, come si nota dalla valutazione del fattore di accoppiamento in tabella. Tale valore varia tra il 96% e il 106%. Si ha comunque un miglior accoppiamento nei giorni di maggiore produzione da solare, ovvero il giorno 3 e 5 in cui il funzionamento del sistema è stabile; si ha un accoppiamento peggiore nei giorni in cui si ha un

funzionamento meno stabile del sistema, tipico dei giorni con minore produzione da solare. Queste giornate, essendo caratterizzate da scambi energetici inferiori, hanno un peso minore nella valutazione del fattore di accoppiamento globale. Risulta infatti un fattore di accoppiamento globale, calcolato sulla base dei valori estrapolati a tutto l'anno, del 100%. Nel seguito sono analizzati nel dettaglio i flussi energetici del circuito solare.

In Tabella 3.29 sono riportate, per i sei giorni di test:

- l'energia prelevata dalla rete di TLR e valutata al primario dello scambiatore S1 quando in funzione;
- l'energia prelevata dalla rete di TLR e ceduta all'utente, valutata al secondario dello scambiatore S1;
- l'energia ceduta all'utente prodotta dal campo solare, valutata al secondario dello scambiatore S2;
- l'energia immessa nella rete di TLR e prodotta dal campo solare, valutata al secondario dello scambiatore S3;
- la frazione di energia ceduta all'utente e proveniente da TLR e da solare, valutate come:

$$\text{Frazione energia all'utente da TLR} = \frac{\text{Energia utente da TLR(lato utente S1)}}{\text{Energia lato utente sottostazione}} * 100 \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} &\text{Frazione energia all'utente da solare} \\ &= \frac{\text{Energia utente da solare(lato utente S2)}}{\text{Energia lato utente sottostazione}} * 100 \quad (3.5) \end{aligned}$$

- la frazione di energia prodotta da solare e inviata all'utente e quella immessa in rete di TLR, valutate come:

$$\begin{aligned} &\text{Frazione energia solare all'utente} \\ &= \frac{\text{Energia utente da solare(lato utente S2)}}{\text{Energia totale prodotta da solare}} * 100 \quad (3.6) \end{aligned}$$

$$\text{Frazione energia solare al TLR} = \frac{\text{Energia al TLR da solare(lato TLR S3)}}{\text{Energia totale prodotta da solare}} * 100 \quad (3.7)$$

- la frazione di energia prodotta da solare e dispersa, valutata come il complementare della somma della frazione di energia solare all'utente e di quella al TLR rispetto ad 1. Tale quantità rappresenta l'energia prodotta da solare che non viene direttamente utilizzata dalla sottostazione. Tale energia include i seguenti contributi:
 - l'energia necessaria nella fase di preriscaldamento, che si avvia quando il campo solare entra in funzione e termina quando inizia il caricamento dell'accumulo solare; tale energia sarà tanto maggiore quanto minore è la temperatura ambiente e maggiore è la temperatura iniziale dell'accumulo;
 - l'energia di preriscaldamento dell'accumulo solare, necessaria per portare l'accumulo solare dalla sua temperatura iniziale (solitamente 78 °C) ad 80 °C, che rappresenta la minima temperatura utile di utilizzo dell'energia solare nell'accumulo da parte della sottostazione;
 - tutte le perdite termiche che ci sono nel circuito tra campo solare e secondario degli scambiatori S2 ed S3 (tra uscita campo solare e ingresso accumulo solare, tra ingresso e uscita accumulo solare, tra uscita accumulo solare e ingresso primario scambiatori S2 ed S3 e tra primario e secondario scambiatori S2 ed S3);
 - parte dell'energia solare presente nell'accumulo ad una temperatura compresa tra 82 °C e 80 °C (tale energia è ad un livello di temperatura idoneo per l'utilizzo da parte dell'utente e viene quindi fatta circolare nella sottostazione); in alcuni casi o non si ha una contemporanea richiesta termica da parte dell'utente e quindi tale energia viene dispersa, o resta inutilizzata nell'accumulo (a fine giornata la temperatura dell'accumulo è maggiore di 80 °C).

Le frazioni di energia sono riportate anche nelle Figura 3.187 e Figura 3.188, nelle quali è possibile notare rispettivamente in che misura le richieste termiche dell'utente siano soddisfatte dal TLR e da energia

prodotta da solare, e in che misura l'energia prodotta da solare sia inviata all'utente, immessa in rete o dispersa.

Tabella 3.29. Sessione A - Energia prelevata dalla rete di TLR (primario scambiatore S1), energia prelevata dalla rete di TLR e ceduta all'utente (secondario S1), energia ceduta all'utente prodotta dal campo solare (secondario S2), energia immessa nella rete di TLR e prodotta dal campo solare (secondario S3), frazione di energia all'utente da TLR e da solare, frazione di energia da solare inviata all'utente, immessa in rete di TLR e dispersa per i 6 giorni di test

Giorno di test		1	2	3	4	5	6
Giorno dell'anno		05 Gen	21 Mar	09 Apr	24 Mag	01 Ago	05 Nov
Energia all'utente da TLR-lato TLR (L)	[kWh]	296,29	191,55	123,53	27,45	18,26	225,09
Energia all'utente da TLR-lato US (L)	[kWh]	286,09	185,95	115,24	25,11	16,15	219,09
Energia all'utente da solare (L)	[kWh]	0,63	16,93	44,87	4,82	10,64	10,16
Energia al TLR da solare (L)	[kWh]	8,45	18,26	155,1	13,91	190,86	0
Frazione di energia all'utente da TLR	[%]	99,8%	91,7%	72,0%	83,9%	60,3%	95,6%
Frazione di energia all'utente da solare	[%]	0,2%	8,3%	28,0%	16,1%	39,7%	4,4%
Frazione energia solare inviata all'utente	[%]	2,3%	33,7%	20,0%	16,1%	4,7%	41,5%
Frazione energia solare immessa in rete	[%]	30,8%	36,4%	69,0%	46,5%	84,6%	0,0%
Frazione di energia solare dispersa	[%]	66,9%	29,9%	11,0%	37,3%	10,6%	58,5%

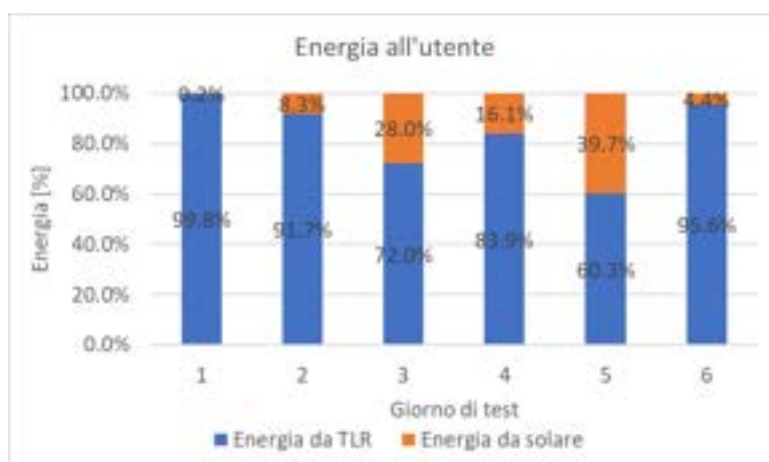


Figura 3.187. Sessione A - Percentuale di energia ceduta all'utente proveniente dal TLR (blu) e dal solare (arancione) rispetto all'energia totale ceduta all'utente

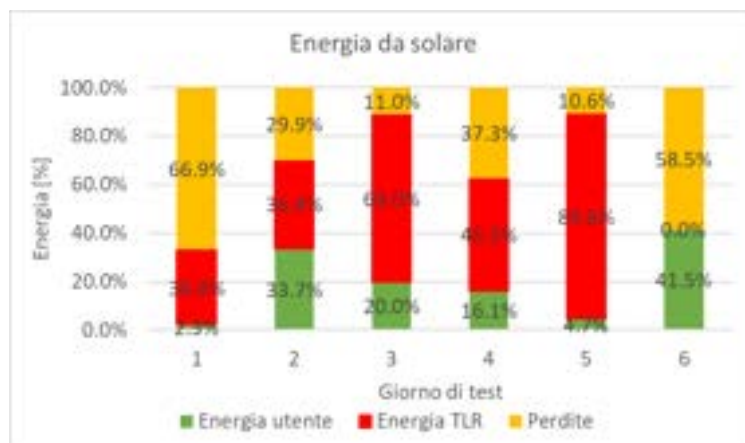


Figura 3.188. Sessione A - Percentuale di energia proveniente dal solare inviata all'utente (verde), immessa nella rete di TLR (rosso) e dispersa (giallo) rispetto all'energia totale prodotta dal campo solare

Nel seguito alcune considerazioni con riferimento alla Figura 3.187 e Figura 3.188 e alle tabelle precedenti:

- I giorni 1 e 6 sono giornate tipicamente invernali durante le quali si ha un'elevata richiesta da parte dell'utente per esigenze di riscaldamento e ACS e una bassa radiazione solare. Si verifica, quindi, che la richiesta dell'utente è soddisfatta principalmente dalla rete di TLR, rispettivamente per il 99,8% e 95,6%. Pur essendoci un'energia prodotta da solare comparabile (27,46 kWh e 24,46 kWh rispettivamente), essa è disponibile in due diversi momenti della giornata: per il giorno 1 è disponibile quando non vi sono richieste da parte dell'utente (tra le 12 e le 14) e viene quindi principalmente immessa in rete, mentre per il giorno 6 è disponibile in contemporanea alle richieste dell'utente e va a soddisfare parte del carico. Da notare che si ha per entrambi i giorni una percentuale rilevante di perdite termiche che corrispondono a circa 18 kWh e 14 kWh rispettivamente.
- I giorni 2 e 3 sono giornate primaverili con un buon andamento della radiazione solare e, allo stesso tempo, richieste termiche per riscaldamento e ACS da parte dell'edificio. In questi giorni si verifica che le richieste termiche dell'utente sono soddisfatte rispettivamente per il 91,7% e 72% dalla rete di TLR e per il 8,3% e 28% dal solare. In particolare, il giorno 3 presenta una produzione da solare che è circa 4 volte superiore al giorno 2 e di conseguenza anche la frazione di energia solare ceduta all'edificio è superiore. In entrambi i casi parte dell'energia solare è immessa nella rete di TLR e rispettivamente il 36,4 % e 69% della energia totale prodotta da solare; mentre per il giorno 2 l'immissione in rete si ha quando non si hanno richieste da parte dell'utente (tra le 12 e le 14), per il giorno 3 si ha anche un funzionamento contemporaneo degli scambiatori S2 ed S3 data l'elevata produzione da solare che arriva fino a 40 kW. Da notare che si ha per il giorno 2 il 30% di perdite che corrisponde a 15 kWh e per il giorno 3 il 11% che corrisponde a 25 kWh.
- I giorni 4 e 5 sono giornate estive per le quali non si hanno richieste di riscaldamento da parte dell'edificio, ma solo di ACS. Anche in questo caso le richieste termiche dell'utente vengono soddisfatte in parte dal TLR, rispettivamente per il 84% e 60,3% e in parte dal solare, rispettivamente per il 16,1% e 39,7%. Pur essendoci una produzione solare sufficiente per coprire il carico dell'utente, si ha comunque prelievo dalla rete data la non contemporaneità delle due. In entrambi i casi parte dell'energia solare è immessa nella rete di TLR e rispettivamente il 46,5% e 84,6% della energia totale prodotta da solare. Da notare che si ha per il giorno 4 il 37% di perdite che corrisponde a 11 kWh e per il giorno 5 il 11% che corrisponde a 24 kWh.
- Dall'analisi dell'energia solare dispersa emerge che essa è costituita da una quota pressoché fissa e necessaria a portare il sistema nelle condizioni di caricamento dell'accumulo stesso (fase di preriscaldamento del circuito solare). Questa quota ha un valore comparabile per tutti i giorni di test, ovvero circa 8 kWh. A questa si aggiunge una quota variabile dipendente dalle condizioni di funzionamento dell'impianto solare (energia totale prodotta, temperatura ambiente, temperatura iniziale e finale dell'accumulo, contemporaneità tra disponibilità solare e richiesta da parte dell'utente) che tiene in conto del preriscaldamento dell'accumulo solare, dei vari contributi di perdite termiche caratteristici del circuito (perdite termiche dell'accumulo, del circuito tra accumulo

e sottostazione e degli scambiatori) e dell'energia dispersa nella sottostazione o residua nell'accumulo per il non utilizzo da parte dell'utente (causate principalmente dalla circolazione di fluido nella stessa quando vi è disponibilità solare ma nessuna richiesta dell'utente e/o immissione in rete).

Le energie riportate nella Tabella 3.29, nonché le frazioni di energia riportate nelle Figura 3.187 e Figura 3.188 descritte precedentemente, sono state valutate considerando di utilizzare istantaneamente l'energia solare disponibile per soddisfare le richieste dell'utenza inviando il surplus nella rete di teleriscaldamento. Si può notare che, per alcuni giorni, si ha energia prodotta da solare ed immessa nella rete di teleriscaldamento pur potendo potenzialmente essere utilizzata per soddisfare parzialmente o totalmente le richieste giornaliere dell'utenza. Ciò accade a causa della non contemporaneità tra richiesta dell'utente e produzione da solare. Sulla base dei risultati ottenuti, ulteriori valutazioni sono state fatte in un'ipotesi di scambio sul posto termico giornaliero. Riprendendo la definizione utilizzate per le reti elettriche, si può definire scambio sul posto termico il meccanismo che permette ai produttori di energia da fonti rinnovabili, come il solare termico, di utilizzare la rete di teleriscaldamento a cui sono connessi come magazzino virtuale giornaliero per l'energia prodotta e non immediatamente autoconsumata in modo da riutilizzarla in un secondo momento della giornata. È stata quindi calcolata per i 6 giorni di test:

- l'energia che potenzialmente potrebbe essere fornita all'utente da solare in regime di scambio sul posto, che tiene in conto della quota di energia da solare immediatamente autoconsumata e della quota di energia da solare prelevata dalla rete di teleriscaldamento (usata come accumulo virtuale giornaliero e nella quale il surplus di produzione da solare viene immesso nell'arco della giornata);
- l'energia all'utente da teleriscaldamento "non proveniente da solare";
- l'energia da solare immessa nella rete di teleriscaldamento e non prelevata per soddisfare l'utente nell'arco della giornata (indicata come energia residua al TLR da solare);
- la frazione di energia ceduta all'utente prelevata da TLR "non proveniente da solare" e quella proveniente da solare in regime di scambio sul posto.

Le quantità appena descritte sono riportate in Tabella 3.30 e Figura 3.189.

Tabella 3.30. Sessione A - Energia prelevata dalla rete di TLR e ceduta all'utente non proveniente da solare (secondario S1), energia ceduta all'utente proveniente da solare in regime di scambio sul posto, energia prodotta da solare immessa nella rete di TLR e non prelevata per soddisfare l'utente (energia residua al TLR da solare), frazione di energia all'utente da TLR e da solare in regime di scambio sul posto per i 6 giorni di test

Giorno di test		1	2	3	4	5	6
Giorno dell'anno		05 Gen	21 Mar	09 Apr	24 Mag	01 Ago	05 Nov
Energia all'utente da TLR (no solare)-lato US	[kWh]	277,64	167,69	0	11,2	0	219,09
Energia all'utente da solare - scambio sul posto	[kWh]	9,08	35,19	160,11	1873	26,79	10,16
Energia residua al TLR da solare	[kWh]	0	0	39,86	0	174,71	0
Frazione di energia all'utente da TLR (no solare)	[%]	96,8%	82,7%	0,0%	37,4%	0,0%	95,6%
Frazione di energia all'utente da solare-scambio sul posto	[%]	3,2%	17,3%	100,0%	62,6%	100,0%	4,4%

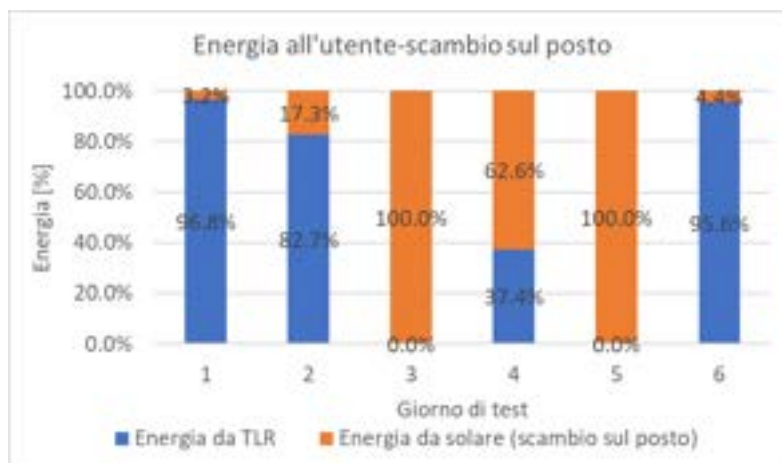


Figura 3.189. Sessione A - Percentuale di energia ceduta all'utente proveniente dal TLR (blu) e dal solare (arancione) rispetto all'energia totale ceduta all'utente calcolata in regime di scambio sul posto

Dall'analisi dei dati riportati in Tabella 3.30 e Figura 3.189 e confrontandoli con i dati di Tabella 3.29 e Figura 3.187 si può notare che:

- per il giorno 6 non si notano differenze nelle percentuali di energia proveniente da solare e da teleriscaldamento per soddisfare l'utente, in quanto tutta l'energia prodotta da solare viene istantaneamente autoconsumata dall'utente;
- per i giorni 1, 2 e 4 si nota un aumento rispettivamente del 3%, 9% e del 46,5% della frazione di energia all'utente da solare in regime di scambio sul posto, rispetto al considerare solo quella istantaneamente autoconsumata; inoltre, tutta l'energia da solare immessa nella rete di TLR viene prelevata nell'arco della giornata per soddisfare l'utente e non si ha, quindi, energia residua al TLR da solare;
- per i giorni 3 e 5 la frazione di energia all'utente da solare arriva al 100% con un aumento rispettivamente del 72% e del 83,9%, rispetto al considerare solo quella istantaneamente autoconsumata; inoltre, per entrambi i giorni, si ha una parte di energia da solare immessa nella rete di TLR che non viene prelevata nell'arco della giornata per soddisfare l'utente pari rispettivamente a 39,8 kWh e 174,7 kWh.

3.4.3 Test sessione B

La sessione di test B è stata suddivisa in due fasi. In entrambe sono stati eseguiti i test considerando una rete di TLR operante in condizioni di bassa temperatura, con temperatura di mandata e di immissione in rete per scambio attivo ($T_{4,nom}$) pari a 60 °C, e temperatura di ritorno ($T_{3,nom}$) pari a 30 °C.

Come per la sessione A, tramite apposita interfaccia sono stati utilizzati modelli TRNSYS inseriti nell'hardware-in-the-loop per la gestione e controllo della sottostazione bidirezionale. I modelli sono stati forniti da EURAC e sono stati utilizzati per generare in condizioni dinamiche il profilo di carico termico per riscaldamento e ACS della stessa utenza residenziale usata durante i test della sessione A, opportunamente risanata (involucro) al fine di poter garantire il soddisfacimento del fabbisogno con lo stesso sistema di emissione a radiatori, ma con temperature più basse e fino a 55 °C. La temperatura di ritorno dall'utenza sul circuito secondario (T_8) è stata controllata in regime dinamico dalla test facility sulla base del modello TRNSYS. La temperatura di mandata all'utenza (T_{10}) è stata controllata dalla sottostazione ad un valore costante di 55 °C, compatibilmente con le efficienze dello scambiatore. La sottostazione è inoltre collegata all'impianto di riscaldamento e produzione di ACS dell'edificio considerato tramite un separatore idraulico che è incluso nel modello. Questo permette di gestire il circuito utente della sottostazione (secondario scambiatori S1 ed S2) ad una portata costante e pari a 2 m³/h.

Le due fasi della sessione B hanno in comune lo stesso profilo di carico termico per riscaldamento e ACS e si differenziano per il profilo di generazione termica considerato, così come descritto nel seguito:

- Fase 1. Il profilo di generazione termica considerato è un profilo dinamico della potenza termica generata da un impianto a pannelli solari piani installato presso il prosumer e connesso alla rete di TLR tramite la stessa sottostazione bidirezionale. Il modello è lo stesso usato durante i test della sessione A, ma gestendo l'accumulo termico ad una temperatura superiore ai 60 °C, anziché 80 °C;
- Fase 2. Il profilo di generazione termica considerato è legato a un sistema di recupero di calore di scarto descritto nel paragrafo 3.4.3.6.

La durata complessiva di questa sessione di test è stata di dodici giorni, ovvero sei giorni di test per ognuna delle due fasi. I sei giorni considerati sono gli stessi giorni (numero e tipologia) di test della sessione A. L'estrapolazione dei dati all'intero anno è stata eseguita "pesando" le prestazioni dell'impianto relative ad ognuno dei sei giorni rispetto al numero di giorni contenuti nel rispettivo raggruppamento.

Sono stati eseguiti dei test preliminari sulla sottostazione al fine di valutarne le prestazioni in condizioni di funzionamento diverse da quelle di progetto iniziali, ovvero al servizio di una rete di TLR ad alta temperatura (80°C-50°C). Tali test hanno messo alla luce alcuni limiti prestazionali degli scambiatori utilizzati nella sessione A e reso necessario delle modifiche hardware per poter correttamente eseguire i test della sessione B. In particolare è stato sostituito sia lo scambiatore S1 con uno scambiatore di maggiori dimensioni già disponibile in loco e sia lo scambiatore S3 con un nuovo scambiatore più grande e compatibile con quelle che erano le prestazioni di progetto richieste inizialmente. Nel paragrafo 3.4.3.1 sono descritti nel dettaglio le prove preliminari eseguite e le modifiche apportate alla sottostazione.

Nel seguito saranno analizzate le prestazioni della sottostazione per i sei giorni di test per le due fasi della sessione B indicate come B1 (sessione B fase 1) e B2 (sessione B fase 2). L'avviamento della sottostazione, che si traduce in uno scambio di energia negli scambiatori della sottostazione, è regolato da quattro comandi:

- Richiesta termica da parte dell'utente per soddisfare i fabbisogni di riscaldamento. L'accensione del riscaldamento è prevista dalle 6 alle 12 e dalle 14 alle 22 nelle giornate per le quali è prevista l'accensione del riscaldamento, ovvero tra il 15 Ottobre e il 15 Aprile, così come descritto nel paragrafo 3.3.1.2.
- Richiesta termica da parte dell'utente per caricare l'accumulo di ACS. Il caricamento dell'accumulo ACS si attiva quando la temperatura all'interno dell'accumulo, ad un'altezza di circa il 60% dal basso, raggiunge il valore di 48 °C e rimane attiva fino a quando la stessa temperatura raggiunge i 53 °C, così come descritto nel paragrafo 3.3.3.4.
- Disponibilità di energia solare (per i test della fase 1) che può essere utilizzata per soddisfare le richieste termiche dell'utente o può essere inviata nella rete di TLR. La disponibilità di energia solare, che corrisponde alla scarica dell'accumulo collegato al circuito solare, si ha quando la temperatura nella parte alta dell'accumulo raggiunge i 60 °C (con isteresi avente limiti superiore e inferiore rispettivamente pari a +2 °C e 0 °C), così come descritto nel paragrafo 3.3.4.
- Disponibilità di calore di scarto (per i test della fase 2, indicato con WH *Waste Heat*) che può essere utilizzato per soddisfare le richieste termiche dell'utente o può essere inviata nella rete di TLR.

Nel dettaglio si analizzano le prestazioni della sottostazione sulla base di queste quattro richieste di avviamento.

3.4.3.1 Test preliminari sessione B

L'esecuzione dei test finali della sessione B è stata proceduta da una serie di verifiche e test preliminari con l'obiettivo di valutare l'adeguatezza degli scambiatori installati sulla sottostazione (durante la sessione A) per l'esecuzione dei test della sessione B caratterizzati da carichi termici, profili di generazione da solare/calore di scarto e livelli di temperatura differenti rispetto alla sessione A. Nel seguito si descrivono le prove effettuate sui diversi scambiatori e i risultati ottenuti.

Scambiatori S1 e S2

Per i test della sessione B la massima potenza prevista richiesta dall'edificio risanato durante i giorni di test è di circa 25 kW come riportato nel paragrafo 3.3.3.5. Tale potenza deve essere fornita all'edificio ad una temperatura di 55 °C e una portata di 2 m³/h (si suppone di avere la stessa portata della sessione A sulla base delle stesse considerazioni). È necessario, quindi, che lo scambiatore S1 riesca a fornire tale potenza all'utente con una temperatura in ingresso al primario pari a 60 °C (temperatura di mandata rete di TLR considerata) e una portata di 1,8 m³/h (stesso valore di progetto della sessione A) pena il non

soddisfacimento delle richieste dell'utente. Anche lo scambiatore S2 dovrebbe riuscire a fornire la potenza richiesta dall'utente con una temperatura in ingresso al primario superiore a 60 °C (dipendente dalla temperatura nell'accumulo solare o derivante da recupero di calore di scarto) e una portata di 3 m³/h. Dei test sono stati eseguiti al fine di verificare le prestazioni di tali scambiatori. È emerso quanto segue:

- Lo scambiatore S1 (modello CB30 24H) ha una potenzialità massima di 13 kW se operante con una temperatura di ingresso al primario di 60 °C e una portata di 1,8 m³/h al fine di ottenere al secondario 55 °C con una portata di 2 m³/h, come risulta da tabella seguente.

Tabella 3.31. Condizioni di funzionamento scambiatore S1 (modello CB30 24H)

	Tin [°C]	Tout [°C]	M [m³/h]	P [kW]
Primario (lato TLR)	60	53,5	1,8	13,6
Secondario (lato utente)	49,4	55	2	13

Tale scambiatore non risulta quindi adatto per soddisfare le richieste dell'utente previste per i giorni di test considerati.

- Lo scambiatore S2 (modello CB30 18L) è stato testato considerando una temperatura in ingresso al primario variabile tra 65 °C e 75 °C, come riportato in tabella seguente.

Tabella 3.32. Condizioni di funzionamento scambiatore S2 (modello CB30 18L)

Test		Tin [°C]	Tout [°C]	M [m³/h]	P [kW]
1	Secondario (lato utente)	48	54,4	1,93	14,4
	Primario (lato TLR)	65,2	61	3,05	14,9
2	Secondario (lato utente)	47,9	55,3	2	17,2
	Primario (lato TLR)	67,8	62,9	3	17,1
3	Secondario (lato utente)	43,6	53,9	2	24
	Primario (lato TLR)	71,7	64,8	3,05	24,5
4	Secondario (lato utente)	43,4	54,6	2	26,1
	Primario (lato TLR)	73,6	66	3,05	27
5	Secondario (lato utente)	42,4	54,4	2	27,9
	Primario (lato TLR)	74,7	66,7	3,05	28,4

Come si nota da tabella, lo scambiatore S2 ha una potenzialità di 14 kW e 28 kW se operante rispettivamente con una temperatura di ingresso al primario di 65 °C e 75 °C. Per temperature inferiore a 65 °C la potenza sarà sicuramente inferiore a 14 kW. Tale scambiatore riuscirebbe quindi a garantire il soddisfacimento delle richieste dell'utenza per la maggior parte delle condizioni di funzionamento. Nel caso dei test della sessione B1, sulla base di alcuni risultati delle simulazioni, durante le ore di produzione da solare si ha una richiesta termica da parte dell'utente per riscaldamento inferiore a 10 kW (ore più calde della giornata) e quindi in linea con quelle che sono le potenzialità di S2. Sarebbe necessario l'intervento di S1 nel caso di una contemporanea richiesta di riscaldamento e ACS. Nel caso dei test della sessione B2 si avrà una temperatura di ingresso al primario pari a circa 73 °C con conseguente soddisfacimento delle richieste dell'utente essendo la richiesta di picco pari a circa 25 kW.

Si è deciso pertanto di sostituire lo scambiatore S1 con uno scambiatore di dimensioni maggiori e adatte alle condizioni di funzionamento richieste. Come descritto nel paragrafo 5.4.1 del Report RdS/PTR2020/144, nella campagna di test del 2020 era stato testato uno scambiatore S3 (modello CB60 30L) sovradimensionato rispetto alle condizioni di design e quindi sostituito. Si è deciso di usare tale scambiatore in sostituzione allo scambiatore S1 CB30 24H, dopo aver eseguito alcune verifiche preliminari. Da alcuni test sperimentali condotti risulta che lo scambiatore S1 (modello CB60 30L) ha una potenzialità massima di circa 20 kW se

operante con una temperatura di ingresso al primario di 60 °C e una portata di 1,8 m³/h al fine di ottenere al secondario 55 °C con una portata di 2 m³/h, come risulta da tabella seguente.

Tabella 3.33. Condizioni di funzionamento scambiatore S1 (modello CB60 30L)

	T _{in} [°C]	T _{out} [°C]	M [m ³ /h]	P [kW]
Primario (lato TLR)	60	50	1,8	21
Secondario (lato utente)	46	55	2	20

Tale scambiatore risulterebbe quindi sottodimensionato rispetto alle richieste di picco dell'utente previste per i giorni di test. Si è deciso di condurre una prova preliminare per il giorno 1 di test che rappresenta il giorno più gravoso dal punto di vista delle richieste termiche dell'utente. È emerso che lo scambiatore S1 non riusciva a soddisfare pienamente le richieste dell'utente per circa un'ora durante la giornata, ma senza effetti rilevanti sulla temperatura all'interno dei locali o sulla temperatura dell'ACS, come sarà descritto in relazione alla Figura 3.202 per il giorno 1 nel paragrafo 3.4.3.2. Si è deciso di utilizzare tale scambiatore per l'esecuzione della sessione di test B.

Scambiatore S3

Lo scambiatore S3 modello CB30 18M, pur non rispettando quelle che erano le condizioni di design richieste in fase di offerta, è stato usato durante i test della sessione A, in quanto adatto per tali test e per le potenze previste di produzione da solare. Per i test della sessione B1 è prevista una massima produzione da solare di circa 53 kW con una temperatura nella parte bassa dell'accumulo solare di circa 57 °C. Delle prove preliminari sono state eseguite per verificare il funzionamento di tale scambiatore in condizioni prossime a quelle massime previste per i test della sessione B1. Dalle prove eseguite è emerso che tale scambiatore potrebbe riuscire a scambiare una potenza superiore a 50 kW con una temperatura di ingresso al secondario di 30 °C e di uscita di 60 °C (che sono i livelli di temperatura della rete di TLR considerata), ma necessiterebbe di una temperatura in ingresso al primario di 75 °C con una temperatura di uscita (e quindi ritorno all'accumulo solare) di circa 65 °C, come risulta da tabella seguente.

Tabella 3.34. Condizioni di funzionamento scambiatore S3 (modello CB30 18M)

	T _{in} [°C]	T _{out} [°C]	M [m ³ /h]	P [kW]
Primario (lato solare)	75,1	64,7	4	48,4
Secondario (lato TLR)	30	60	1,37	47,8

Questo significherebbe avere nella parte bassa dell'accumulo solare una temperatura di circa 65 °C anziché 57 °C, come previsto dalle simulazioni. Di conseguenza il campo solare lavorerebbe ad una temperatura di ingresso più alta (dipende dalla temperatura nell'accumulo) con prestazioni peggiori. È stato eseguito un test preliminare per il giorno 5 al fine di verificare la possibile variazione di prestazione del campo solare rispetto ai risultati delle simulazioni. È emerso che si avrebbe una diminuzione di circa il 6% di produzione da solare come conseguenza di una temperatura più alta di ritorno al campo solare derivante dall'utilizzo dello scambiatore S3 attuale. Sulla base dei risultati di Tabella 3.34 risulta anche l'inadeguatezza di tale scambiatore per i test della sessione B2 per i quali si suppone di avere una potenza derivante da un sistema di recupero di calore di circa 55 kW ad una temperatura di 73 °C, come sarà descritto nel seguito nel paragrafo 3.4.3.6.

Al tempo stesso il fornitore dello scambiatore S3 modello CB30 18M ha fornito lo scambiatore sostitutivo. Il modello fornito è CB30 34M ed è tale da rispettare le condizioni di design previste. Sulla base di alcune simulazioni richieste al fornitore, tale scambiatore risulterebbe adatto anche per i test della sessione B

riuscendo a scambiare una potenza di 60 kW con una temperatura di ingresso al primario pari a 75 °C e di uscita pari a 57 °C, come risulta da Figura 3.190. Si è deciso quindi di sostituire lo scambiatore S3 per i test della sessione B.

Project ref:	Eurac Nuove valutazioni	
Line ref:	75° C 3 m³	
Modello:	CB30-34M	
Id articolo:	n/a	Pagina: 1(2)
N° di unità:	1	Data: 24/08/2021

		Lato caldo S1 -> S2	Lato freddo S3 -> S4
Process data			
Capacity:	kW	61,2	
Fluido:		Water	Water
Flusso volume:	m³/h	3,00	1,77
Temperatura di entrata:	°C	75,0	30,0
Temperatura di uscita:	°C	56,9	60,0
Total pressure drop calculated (allowed)	kPa	3,4 (30,00)	1,6 (30,00)
Velocity connections:	m/s	1,18	1,20
LMTD:	K	20,4	

Figura 3.190. Estratto specifica tecnica scambiatore CB30-34M

Prove sperimentali condotte hanno confermato il funzionamento dello scambiatore in linea con quanto dichiarato dal fornitore. Inoltre, tali prove hanno permesso di caratterizzare lo scambiatore ed è emerso che variando la temperatura di ingresso al primario tra 67 °C e 74 °C a parità di portata al primario e livelli di temperatura al secondario (ingresso 30 °C, uscita 60 °C), si ha una potenza scambiata tra 33 kW e 57 kW con una temperatura di uscita al primario quasi costante e pari a circa 57 °C, che rappresenta la temperatura di ritorno all'accumulo solare o al sistema di recupero di calore di scarto.

3.4.3.2 Fase 1 - Giorno 1

Il giorno di test 1 è il 05/01 per il quale sono presenti richieste di ACS e riscaldamento da parte dell'utente, rientrando nel periodo di riscaldamento.

In Figura 3.191 viene mostrato, nel grafico inferiore, in nero il comando di avvio della sottostazione per richiesta da parte dell'utente sia per riscaldamento che per ACS, in verde le richieste di caricamento dell'accumulo di ACS e in arancione la disponibilità di energia solare nell'accumulo solare che può essere utilizzata dalla sottostazione. Nel grafico superiore si riporta in magenta la potenza termica fornita dallo scambiatore S1 e in rosso quella fornita dallo scambiatore S2 per soddisfare le richieste termiche. Nel grafico centrale si riporta in viola la potenza termica fornita dallo scambiatore S3 alla rete di teleriscaldamento.

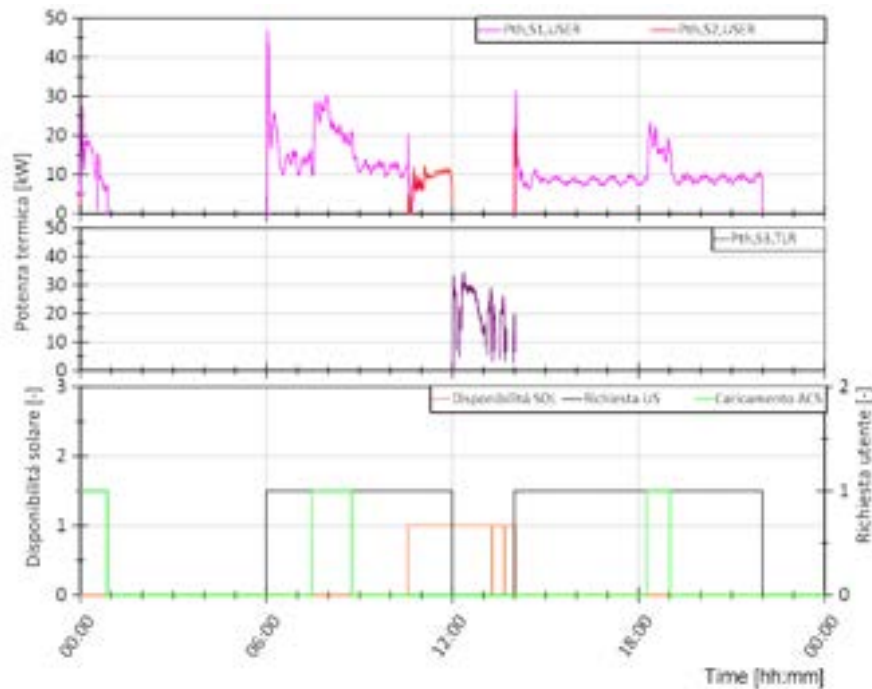


Figura 3.191. Sessione B1, Giorno 1. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità energia solare nell'accumulo (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

Dal confronto tra i tre grafici si può notare che le richieste termiche dell'utente sono principalmente soddisfatte dallo scambiatore S1 e quindi dalla rete di TLR. All'avviamento della sottostazione e quando si hanno richieste di caricamento dell'accumulo di ACS si registrano degli incrementi improvvisi nelle potenze termiche scambiate, per effetto sia di variazione dinamiche di temperature e portata tipiche dell'avviamento, che di un'effettiva maggiore richiesta da parte dell'utente dovuta al caricamento dell'accumulo di ACS. Inoltre la disponibilità di energia solare nell'accumulo solare è in parte contemporanea alla richiesta termica dell'utente: tramite lo scambiatore S2, parte della potenza termica richiesta dall'utente viene fornita dall'impianto solare e ciò avviene tra le 11:30 e le 12:00. La restante disponibilità solare viene immessa nella rete di TLR tramite lo scambiatore S3 che, dopo un funzionamento continuo tra le 12:00 e le 13:00, ha un funzionamento intermittente basato sul livello di temperatura alla quale l'energia solare è inviata alla sottostazione in ingresso a tale scambiatore. Quest'ultimo, infatti, si avvia quando T_6 è maggiore di $64\text{ }^{\circ}\text{C}$ e resta attivo finché tale temperatura è superiore a $62\text{ }^{\circ}\text{C}$. In Figura 3.192 viene riportato un ingrandimento della Figura 3.191 al fine di visualizzare in dettaglio le ore di funzionamento degli scambiatori S2 ed S3, ovvero tra le 09:00 e le 17:00. Lo scambiatore S3 immette energia nella rete di TLR quando questa è disponibile e non si hanno richieste da parte dell'utente, ovvero la le 12:00 e le 14:00 circa. Si verifica un funzionamento contemporaneo di S2 ed S3 solo per qualche minuto intorno alle 14:00.

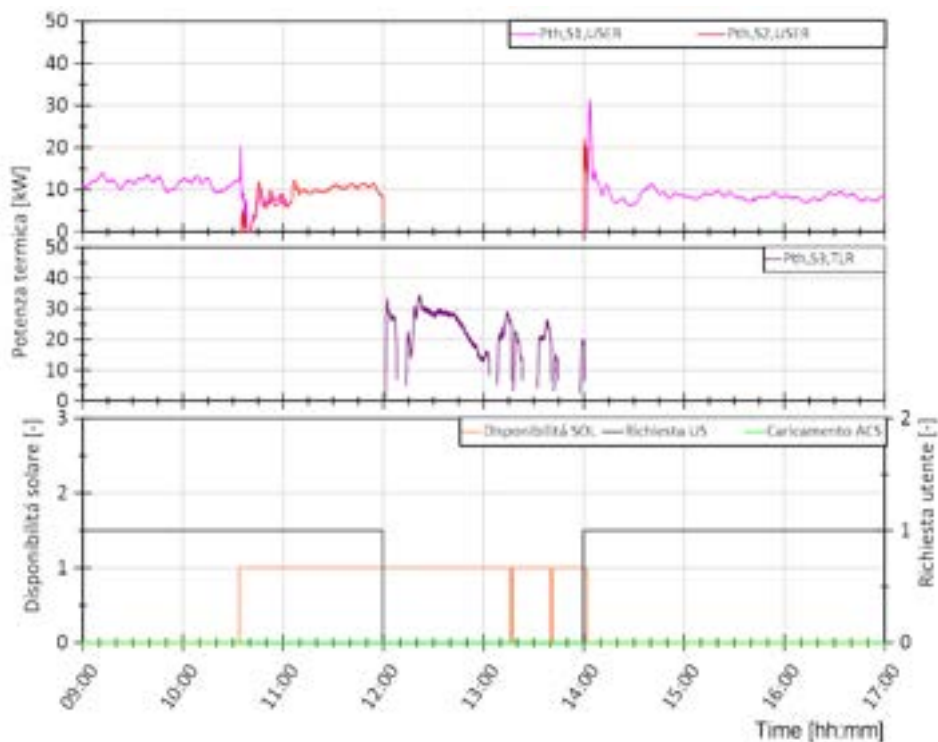


Figura 3.192. Sessione B1, Giorno 1 - Dettaglio. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità energia solare nell'accumulo (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

Confrontando la potenza termica lato utenze (S1+S2) del giorno 1 della sessione A (Figura 3.146) e della sessione B1 (Figura 3.191) si può notare come la richiesta da parte dell'utente nella sessione B1 sia minore come conseguenza del risanamento dell'edificio. Restringendo l'analisi all'accensione pomeridiana (tra le 14:00 e le 22:00) si ha una potenza di circa 16 kW per riscaldamento nel giorno 1 della sessione A e di circa 9 kW per lo stesso giorno della sessione B1. Allo stesso tempo si può notare come durante il giorno 1 della sessione B1 ci sia una maggiore disponibilità di energia solare utilizzabile dalla sottostazione (maggiore potenza per un tempo maggiore) rispetto allo stesso giorno della sessione A.

Si riportano nel seguito gli andamenti delle temperature di ingresso e uscita al primario e al secondario degli scambiatori S1, S2 ed S3 e le portate quando questi sono in funzione (Figura 3.193-Figura 3.195). In particolare per gli scambiatori S2 ed S3 si utilizza una scala temporale basata sui momenti di funzionamento al fine di facilitarne la lettura. I tre grafici riportanti le temperature e le portate nei tre scambiatori mettono in luce alcune caratteristiche relative ai controlli di temperatura e portata sia della test facility che della sottostazione, così come esposto nella descrizione dei test eseguiti nella sessione A.

Nel seguito si riportano alcune considerazioni riguardo il controllo di temperatura da parte della test facility in T1, T5 e T8 e il controllo di temperatura da parte della sottostazione in T4 e T10. Il funzionamento di tali controllo è paragonabile a quanto osservato per i test della sessione A. Si rimanda, quindi, alla descrizione dei giorni di test della sessione A per maggiore dettagli, con particolare riferimento ai giorni 1 e 2. Con riferimento alla Figura 3.196 si può notare come l'andamento del valore misurato T1 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa $\pm 2^\circ\text{C}$ quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento o caricamento dell'accumulo di ACS. Così come descritto nel seguito, tali oscillazioni non compromettono il soddisfacimento delle richieste termiche dell'utente. Con riferimento alla Figura 3.197 si può notare come l'andamento del valore misurato T5 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa $\pm 5^\circ\text{C}$ quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento. Con riferimento alla Figura 3.198, si può notare come l'andamento del valore misurato T8 (curva verde nel grafico superiore) sia in ritardo rispetto all'andamento del valore di riferimento T8nom (curva rossa nel grafico superiore). Questo ritardo è dovuto essenzialmente alla distanza circuitale tra il punto della test facility in cui T8 viene controllata al valore di riferimento e il punto della sottostazione in

cui T8 viene misurata. Di conseguenza si hanno scostamenti assoluti rilevanti rispetto al valore di riferimento in corrispondenza di una brusca variazione del valore di riferimento ma contenuti in ± 1 °C nel funzionamento in condizioni stabili.

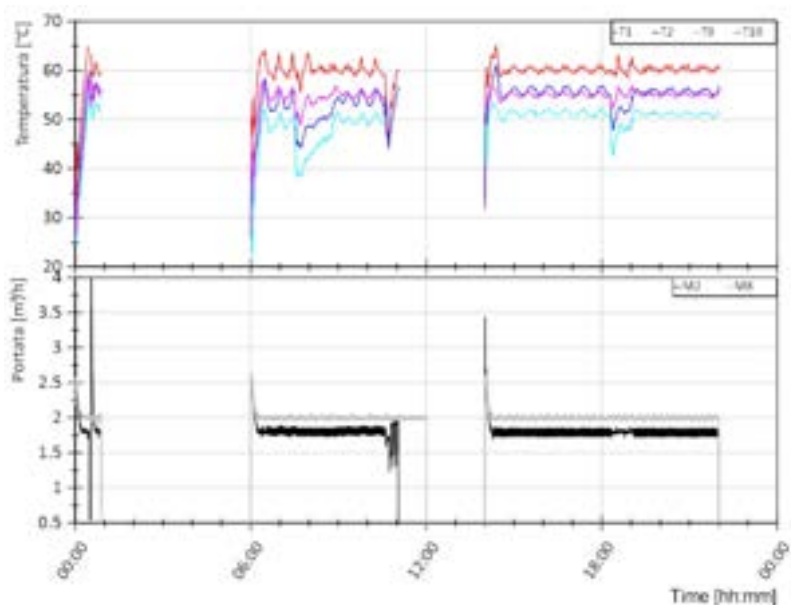


Figura 3.193. Sessione B1, Giorno 1. Andamento delle temperature lato teleriscaldamento (mandata dal teleriscaldamento T1, ritorno al teleriscaldamento T2) e lato utenza (uscita dallo scambiatore S2 T9, mandata all'utenza T10) dello scambiatore S1 (grafico superiore), andamento della portata lato teleriscaldamento (M2) e lato utenza (M8) dello scambiatore S1 (grafico inferiore)

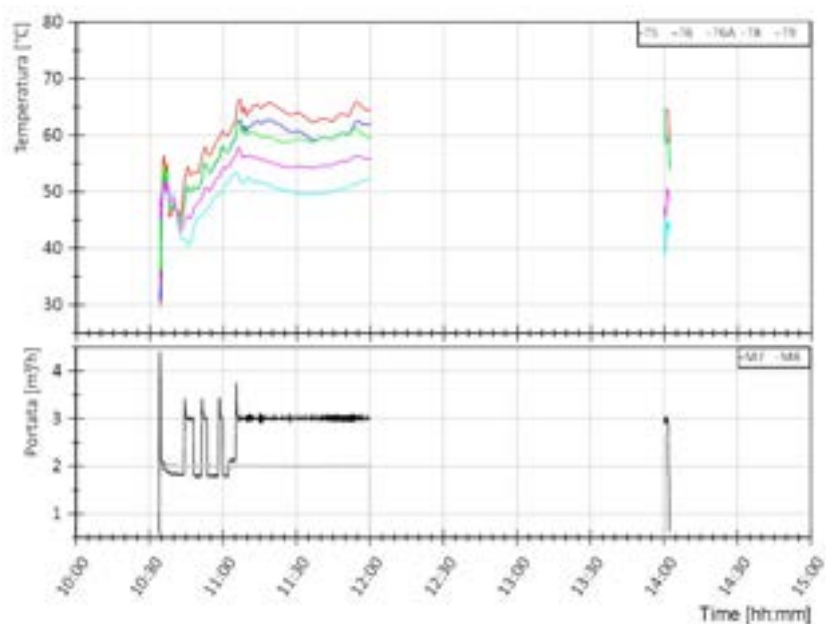


Figura 3.194. Sessione B1, Giorno 1 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (mandata dal sistema di generazione T5, ritorno al sistema di generazione T6 e uscita scambiatore S2 T6A) e lato utenza (ritorno dall'utenza T8, mandata all'utenza T9) dello scambiatore S2 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato utenza (M8) dello scambiatore S2 (grafico inferiore)

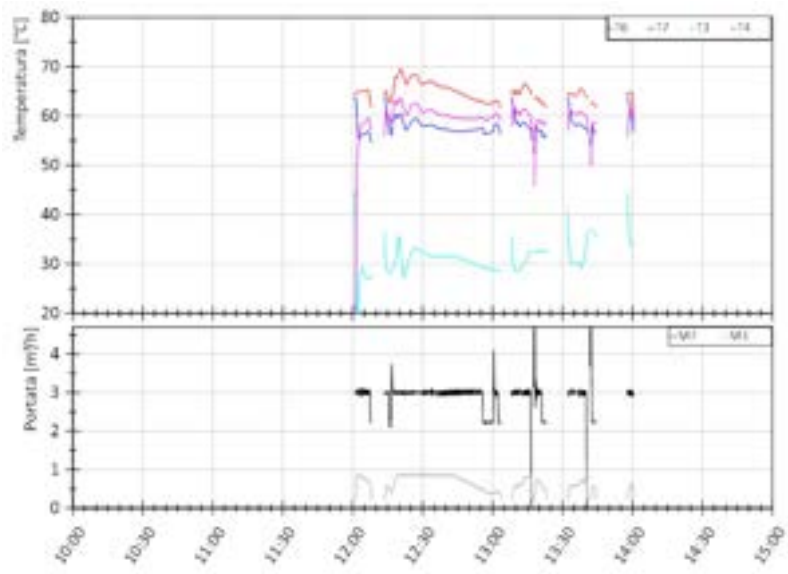


Figura 3.195. Sessione B1, Giorno 1 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (ingresso scambiatore S3 T6 e ritorno al sistema di generazione T7) e lato TLR (ritorno dal TLR T3, mandata al TLR T4) dello scambiatore S3 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato TLR (M3) dello scambiatore S3 (grafico inferiore)

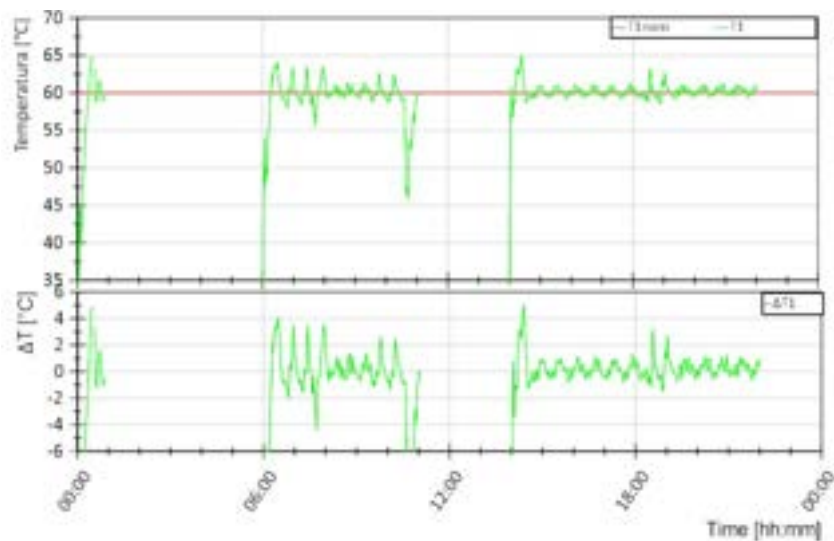


Figura 3.196. Sessione B1, Giorno 1. Andamento della temperatura di mandata dal teleriscaldamento T1 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T1nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

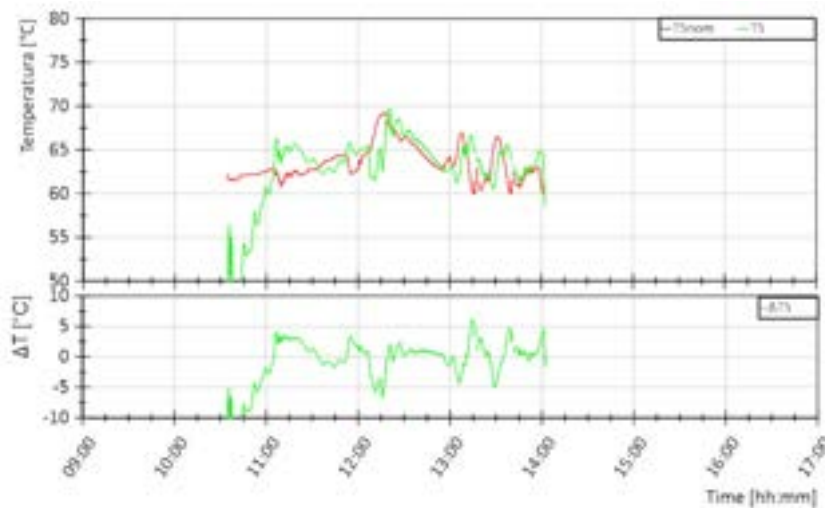


Figura 3.197. Sessione B1, Giorno 1 - Dettaglio. Andamento della temperatura di mandata dal sistema di generazione T5 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T5nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

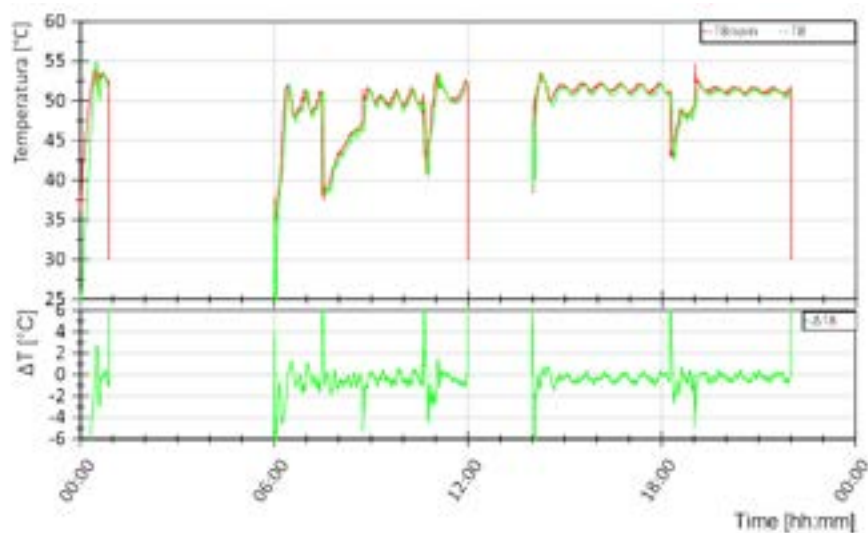


Figura 3.198. Sessione B1, Giorno 1. Andamento della temperatura di ritorno dall'utenza T8 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T8nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

Con riferimento alla Figura 3.199 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T10nom e il valore misurato T10 sia inferiore a $\pm 1^{\circ}\text{C}$ per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T10 da parte della sottostazione, nonostante le oscillazioni registrate in ingresso allo scambiatore S1 ed S2. Si ha una maggiore discrepanza nella condizione di richiesta massima da parte dell'utenza e all'avviamento: in questa condizione si registrano anche degli abbassamenti maggiori di 5°C nella temperatura T1 e quindi gli scambiatori S1 ed S2 operano in condizioni di funzionamento diverse da quelle di progetto non riuscendo a garantire 55°C in uscita, ma comunque riuscendo a soddisfare le richieste termiche dell'utente, come risulta dalla descrizione dei grafici in Figura 3.201 e Figura 3.202 riportati nel seguito.

Con riferimento alla Figura 3.200 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T4nom e il valore misurato T4 sia inferiore a $\pm 2^{\circ}\text{C}$ per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T4 da parte della sottostazione, nonostante le oscillazioni registrate in ingresso allo scambiatore S3. Si ha una maggiore discrepanza all'avviamento e nei momenti in cui la temperatura di ingresso lato generazione (T6) è prossima a 62°C . Il valore di 62°C deriva dalla logica di controllo implementata per regolare l'accensione di S3: al fine di evitare un funzionamento ad alta

intermittenza dello scambiatore a causa delle oscillazioni in T5 e allo stesso tempo massimizzarne l'utilizzo, l'isteresi che ne controlla l'accensione è impostata tra 62 °C e 64 °C.

In Figura 3.201 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio e la temperatura ambiente e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo di ACS (in grigio) nonché la portata di caricamento (in arancione) e di ricircolo (in blu). Si può notare dal grafico superiore come la temperatura all'interno degli appartamenti sia tenuta essenzialmente sopra i 18 °C durante le ore di riscaldamento. Inoltre, dalla Figura 3.202 risulta che la valvola miscelatrice presente nel modello riesce a controllare la temperatura di mandata al riscaldamento secondo curva climatica teorica per la gran parte del tempo, nonostante le oscillazioni che si hanno all'avviamento in T1 e T5. Si verifica solo all'avviamento delle 6:00 e all'avviamento della carica ACS delle 7:30 circa che, per circa 40 minuti complessivi, la sottostazione non riesce a soddisfare la richiesta dell'utente a causa sia di una bassa temperatura T1 che di limiti di potenza dello scambiatore S1, come descritto nel paragrafo 3.4.3.1. Per quanto riguarda l'ACS, si può notare come la temperatura dell'accumulo aumenta ogni qualvolta avviene una carica, fino a raggiungere i 53 °C, e diminuisce per effetto delle perdite termiche o richiesta da parte dell'utente che si verifica in corrispondenza di una portata di ricircolo maggiore di 0,27 m³/h.



Figura 3.199. Sessione B1, Giorno 1. Andamento della temperatura di mandata all'utenza T10 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T10nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

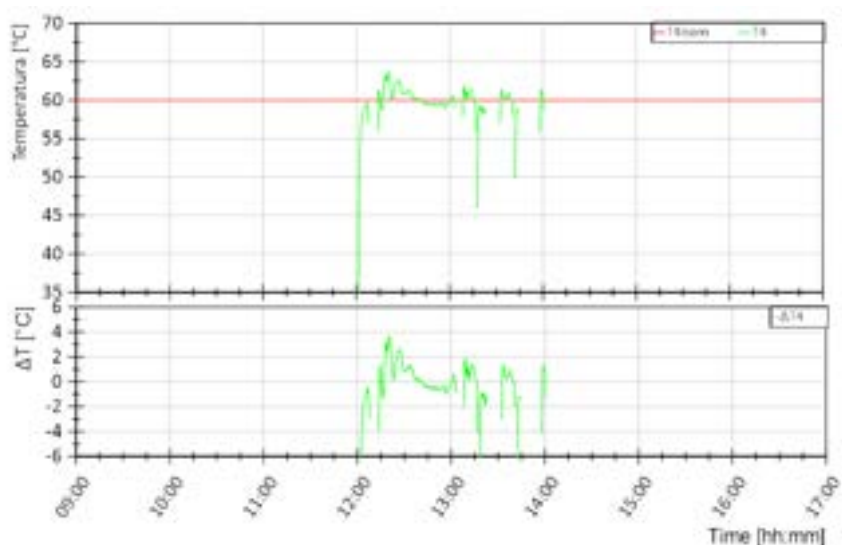


Figura 3.200. Sessione B1, Giorno 1 - Dettaglio. Andamento della temperatura di immissione in rete T4 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T4nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

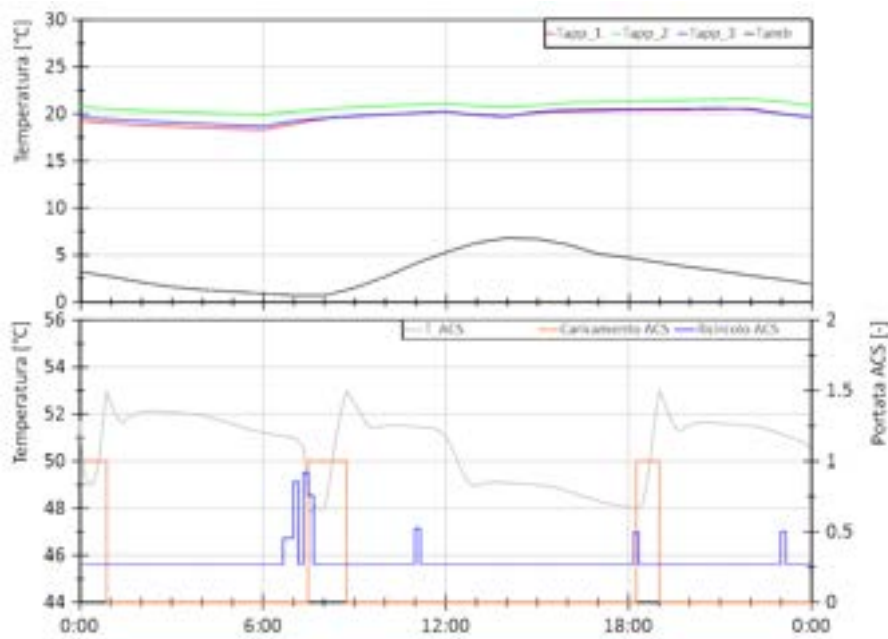


Figura 3.201. Sessione B1, Giorno 1. Andamento della temperatura in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio (curve in blu, verde e rosso del grafico superiore) e temperatura esterna (curva in nero grafico superiore), andamento della temperatura nell'accumulo di ACS e portata di caricamento e ricircolo dell'accumulo di ACS (rispettivamente curva un grigio, in arancione e in blu del grafico inferiore)

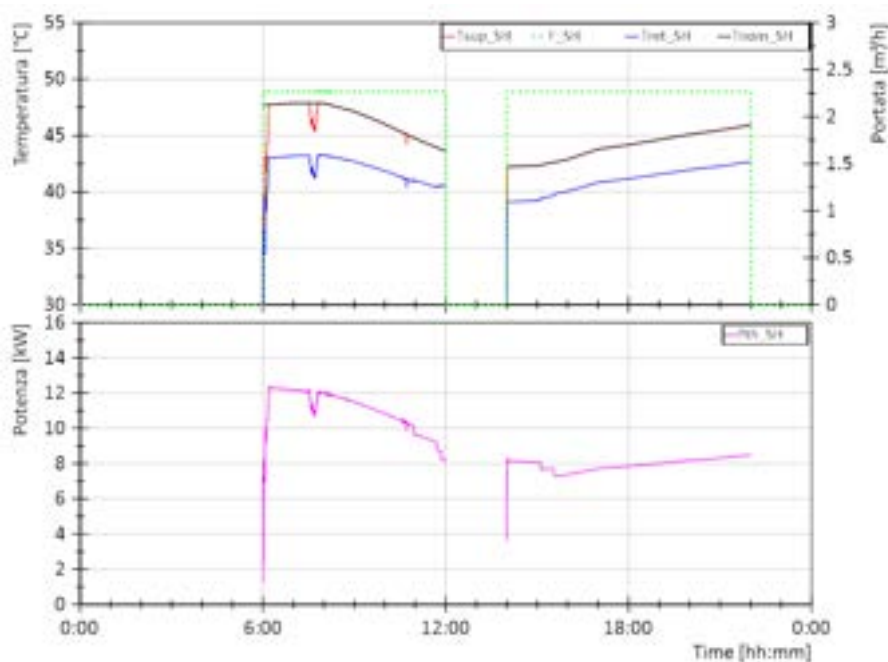


Figura 3.202. Sessione B1, Giorno 1. Andamento della temperatura di mandata e ritorno e portata nel circuito di riscaldamento (curva in rosso, blu e tratteggiata verde nel grafico superiore rispettivamente) e andamento della temperatura di mandata al riscaldamento di riferimento (curva in nero), andamento della potenza termica per riscaldamento (curva in magenta grafico inferiore)

In Figura 3.203 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in ingresso e uscita dal campo solare e la portata circolante e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo solare (in grigio) e

l'intervallo di scarica (in arancione) che indica il periodo in cui l'energia solare viene inviata dall'accumulo alla sottostazione. Dal grafico superiore si evince che in una prima fase di avviamento del campo solare non si ha un caricamento dell'accumulo: la temperatura di uscita dal campo solare è infatti inferiore rispetto alla temperatura nell'accumulo; la carica inizia quando questa temperatura diventa superiore alla temperatura nell'accumulo. Ciò emerge anche dalla Figura 3.204 confrontando la potenza termica prodotta dal campo solare e quella in ingresso all'accumulo solare (rispettivamente in rosso e magenta). Con riferimento alla Figura 3.203, nei momenti in cui si ha la carica dell'accumulo, si assiste ad un aumento della temperatura dello stesso. Tale temperatura può diminuire in corrispondenza di una scarica se la potenza richiesta dalla sottostazione è superiore a quella immessa nell'accumulo in quell'istante o può aumentare in caso contrario. Da ciò si deduce che se non si ha un perfetto bilanciamento tra potenza prodotta e quella utilizzata si va incontro ad un funzionamento intermittente della sottostazione. Nel caso in esame, non appena si avvia la scarica con invio di energia termica alla sottostazione, utilizzata dallo scambiatore S2 (curva in blu nel grafico inferiore), la temperatura nell'accumulo continua ad aumentare. Intorno alle 12 si disattiva S2 e si attiva lo scambiatore S3 con il quale viene immessa nella rete di TLR una potenza maggiore rispetto a quella prodotta dal solare. Ciò determina una scarica dell'accumulo solare e quindi una diminuzione della temperatura dello stesso. Poiché la minima potenza scambiabile da S3, nelle condizioni di temperatura e portate considerate, è di circa 25 kW, nei momenti in cui la potenza prodotta dal solare è inferiore a tale valore si ha inevitabilmente una scarica dell'accumulo fino a 60 °C e quindi una disattivazione degli scambiatori S2 ed S3, finché non vengono raggiunti almeno i 62 °C nell'accumulo.

In Tabella 3.35 si riporta l'energia termica al primario e al secondario dei diversi scambiatori e le relative efficienze per la prova considerata.

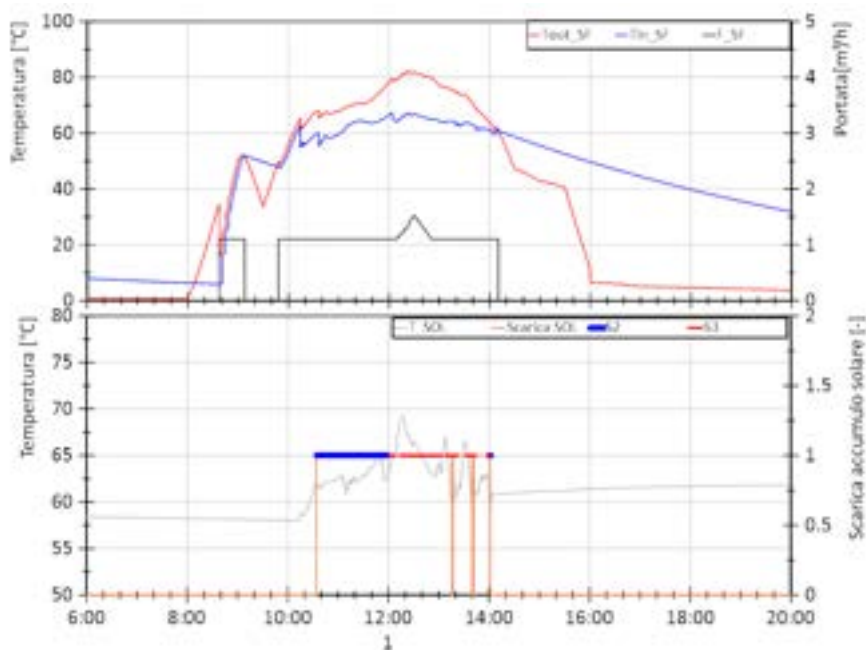


Figura 3.203. Sessione B1, Giorno 1 - Dettaglio. Andamento della temperatura in uscita dal campo solare, in ingresso e la portata (rispettivamente curva in rosso, blu e nero del grafico superiore), andamento della temperatura nell'accumulo solare e intervallo di scarica dell'accumulo solare (rispettivamente curva un grigio e in arancione del grafico inferiore)

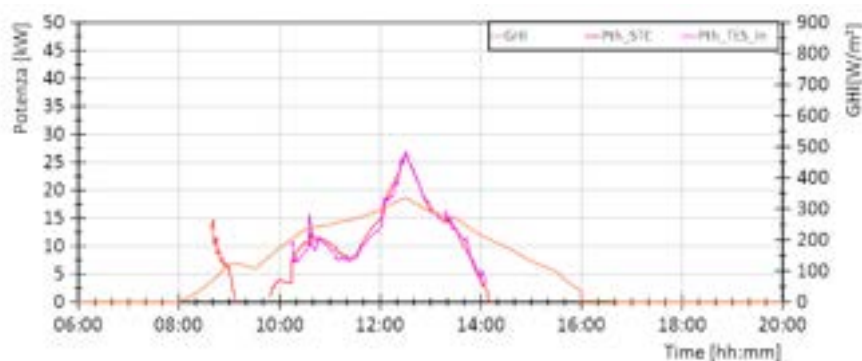


Figura 3.204. Sessione B1, Giorno 1 - Dettaglio. Andamento della radiazione globale sul piano orizzontale (GHI in arancione), della potenza termica prodotta dal campo solare (in rosso) e di quella in ingresso all'accumulo solare (in magenta)

Tabella 3.35. Sessione B1, Giorno 1. Energie termiche al primario (lato teleriscaldamento, TLR, o sistema di generazione, GEN) e al secondario (lato teleriscaldamento, TLR, o utente, US) dei diversi scambiatori della sottostazione e relative efficienze.

Eth,S1,TLR [kWh]	Eth,S1,US [kWh]	η_{s1} [%]	Eth,S2,GEN [kWh]	Eth,S2,US [kWh]	η_{s2} [%]	Eth,S3,GEN [kWh]	Eth,S3,US [kWh]	η_{s3} [%]
170,75	163,70	96%	13,48	12,77	95%	32,76	31,93	97%

3.4.3.3 Fase 1 - Giorno 3

Il giorno di test 3 è il 09/04 per il quale sono presenti richieste di ACS e riscaldamento da parte dell'utente, rientrando nel periodo di riscaldamento.

In Figura 3.205 viene mostrato, nel grafico inferiore, in nero il comando di avvio della sottostazione per richiesta da parte dell'utente sia per riscaldamento che per ACS, in verde le richieste di caricamento dell'accumulo di ACS e in arancione la disponibilità di energia solare nell'accumulo solare che può essere utilizzata dalla sottostazione. Nel grafico superiore si riporta in magenta la potenza termica fornita dallo scambiatore S1 e in rosso quella fornita dallo scambiatore S2 per soddisfare le richieste termiche. Nel grafico centrale si riporta in viola la potenza termica fornita dallo scambiatore S3 alla rete di teleriscaldamento.

Dal confronto tra i tre grafici si può notare che le richieste termiche dell'utente sono principalmente soddisfatte dallo scambiatore S1 e quindi dalla rete di TLR. All'avviamento della sottostazione e quando si hanno richieste di caricamento dell'accumulo di ACS si registrano degli incrementi improvvisi nelle potenze termiche scambiate per effetto sia di variazione dinamiche di temperature e portata tipiche dell'avviamento, che di un'effettiva maggiore richiesta da parte dell'utente dovuta al caricamento dell'accumulo di ACS. Tra le 17:00 e le 22:00 si verifica un funzionamento intermittente dello scambiatore S1 che verrà analizzato nel seguito. La disponibilità di energia solare nell'accumulo solare è in parte contemporanea alla richiesta termica dell'utente: tramite lo scambiatore S2, parte della potenza termica richiesta dall'utente viene fornita dall'impianto solare e ciò avviene tra le 09:00 e le 17:00 circa. Nello stesso intervallo di tempo, la restante disponibilità solare viene immessa nella rete di TLR tramite lo scambiatore S3 per il quale si registra un funzionamento sia intermittente che continuo basato sul livello di temperatura alla quale l'energia solare è inviata alla sottostazione in ingresso a tale scambiatore così come descritto per il giorno 1 della sessione B1. In Figura 3.206 viene riportato un ingrandimento della Figura 3.205 al fine di visualizzare in dettaglio le ore di funzionamento degli scambiatori S2 ed S3, ovvero tra le 08:00 e le 17:00. Lo scambiatore S3 immette energia nella rete di TLR quando questa è disponibile e non si hanno richieste da parte dell'utente, ovvero tra le 12:00 e le 14:00 circa. Si verifica un funzionamento contemporaneo di S2 ed S3 tra le 09:00 e le 12:00 e tra le 14:00 e le 17:00 circa.

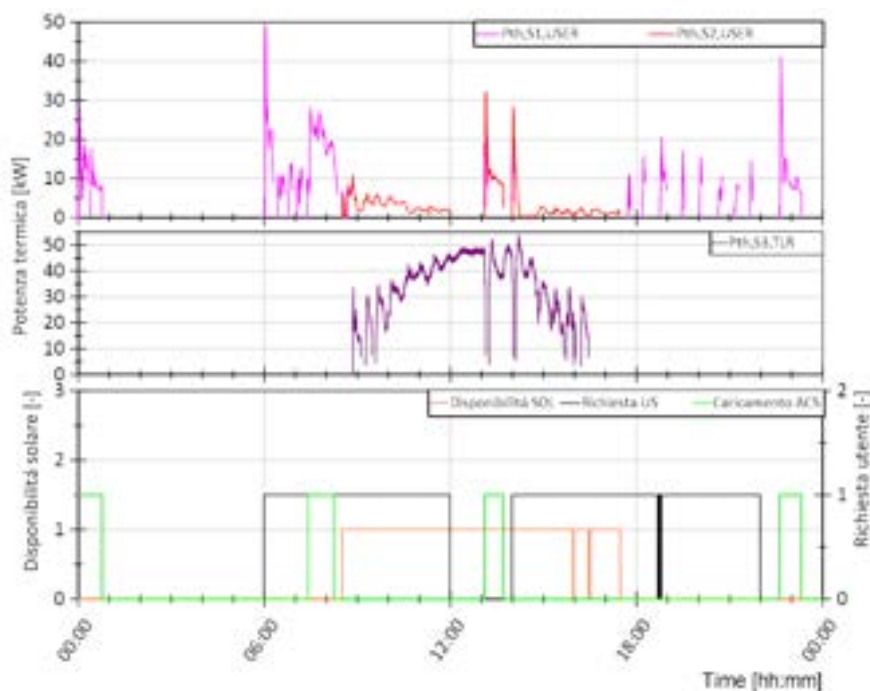


Figura 3.205. Sessione B1, Giorno 3. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità energia solare nell'accumulo (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

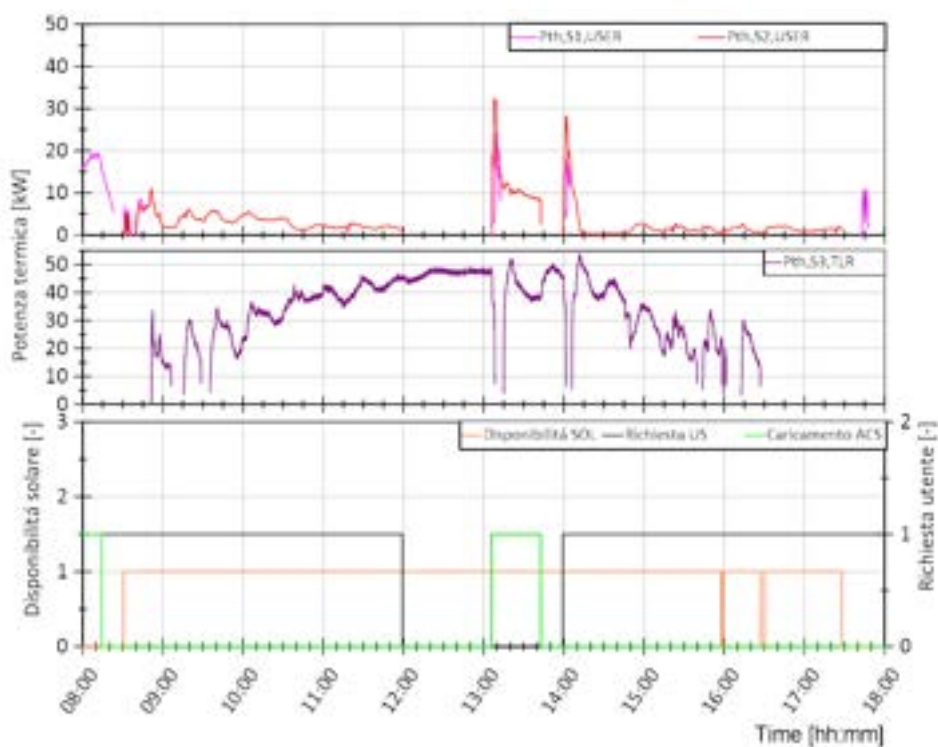


Figura 3.206. Sessione B1, Giorno 3 - Dettaglio. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità energia solare nell'accumulo (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

Così come per il giorno 1, confrontando la potenza termica lato utenze (S1+S2) e quella immessa nella rete di TLR (S3) del giorno 3 della sessione A e della sessione B1, si possono notare sia una minore richiesta da

parte dell'utente che una maggiore disponibilità di energia solare utilizzabile dalla sottostazione nella sessione B1 rispetto allo stesso giorno della sessione A.

Si riportano nel seguito gli andamenti delle temperature di ingresso e uscita al primario e al secondario degli scambiatori S1, S2 ed S3 e le portate quando questi sono in funzione (Figura 3.207-Figura 3.209). In particolare per gli scambiatori S2 ed S3 si utilizza una scala temporale basata sui momenti di funzionamento al fine di facilitarne la lettura. Come accennato tra le 17:00 e le 22:00 si verifica un funzionamento intermittente di S1, così come risulta anche osservare l'andamento di M2 in Figura 3.207. Analogamente a quanto descritto per il giorno 3 della sessione A, l'intermittenza di S1 è dovuta a tre fattori:

- logica di controllo che ne regola l'accensione al fine di evitare sovrapposizioni con S2;
- oscillazioni nel controllo di T1 e quindi T10;
- basse richieste termiche da parte dell'utente per riscaldamento.

Lo scambiatore S1 si attiva quando la temperatura T9 è inferiore a 53 °C e si spegne quando questa temperatura è superiore a 54,5 °C, come si può notare osservando l'andamento di T9 ed M2. Nell'intervallo di tempo considerato le richieste dell'utente sono di circa 1 kW che corrispondono ad una differenza di temperatura lato utente della sottostazione di circa 0,5 °C. Accade quindi che, quando la temperatura T8 è superiore a 54,5°C, sia per effetto delle oscillazioni in T10 (conseguenza delle oscillazioni in T1) che della bassa richiesta da parte dell'utente, S1 si spegne (non si ha circolazione di fluido al primario). In ogni caso, anche se al primario di S1 non circola fluido, si ha comunque circolazione al secondario (M8 è maggiore di zero) e quindi le richieste dell'utente continuano ad essere soddisfatte andando ad utilizzare l'energia accumulata nel fluido stesso.

I tre grafici riportanti le temperature e le portate nei tre scambiatori mettono in luce alcune caratteristiche relative ai controlli di temperatura e portata sia della test facility che della sottostazione, così come esposto nella descrizione dei test eseguiti nella sessione A.

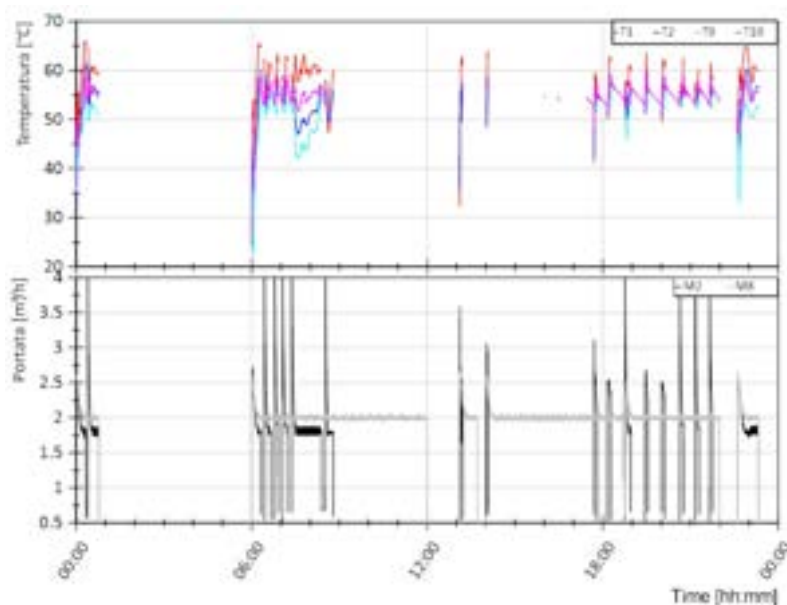


Figura 3.207. Sessione B1, Giorno 3. Andamento delle temperature lato teleriscaldamento (mandata dal teleriscaldamento T1, ritorno al teleriscaldamento T2) e lato utenza (uscita dallo scambiatore S2 T9, mandata all'utenza T10) dello scambiatore S1 (grafico superiore), andamento della portata lato teleriscaldamento (M2) e lato utenza (M8) dello scambiatore S1 (grafico inferiore)

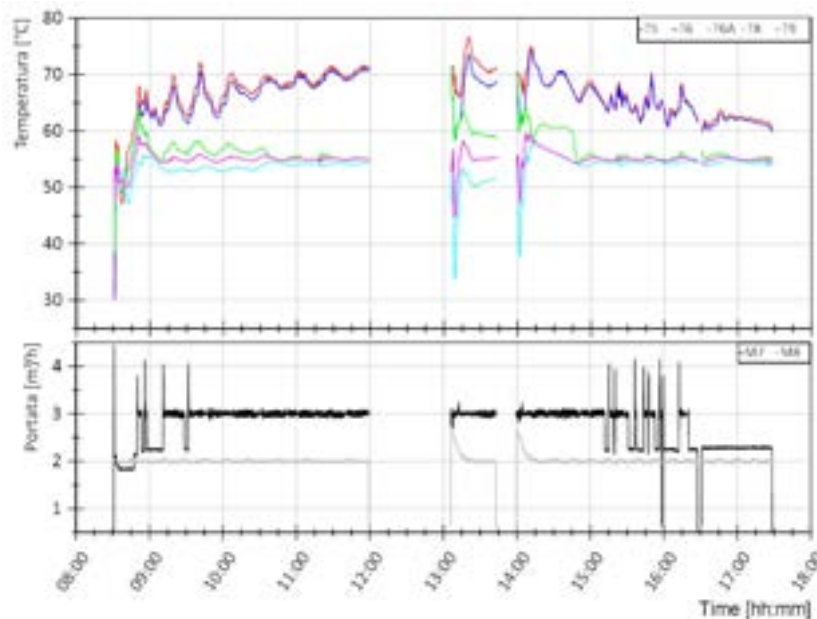


Figura 3.208. Sessione B1, Giorno 3 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (mandata dal sistema di generazione T5, ritorno al sistema di generazione T6 e uscita scambiatore S2 T6A) e lato utenza (ritorno dall'utenza T8, mandata all'utenza T9) dello scambiatore S2 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato utenza (M8) dello scambiatore S2 (grafico inferiore)

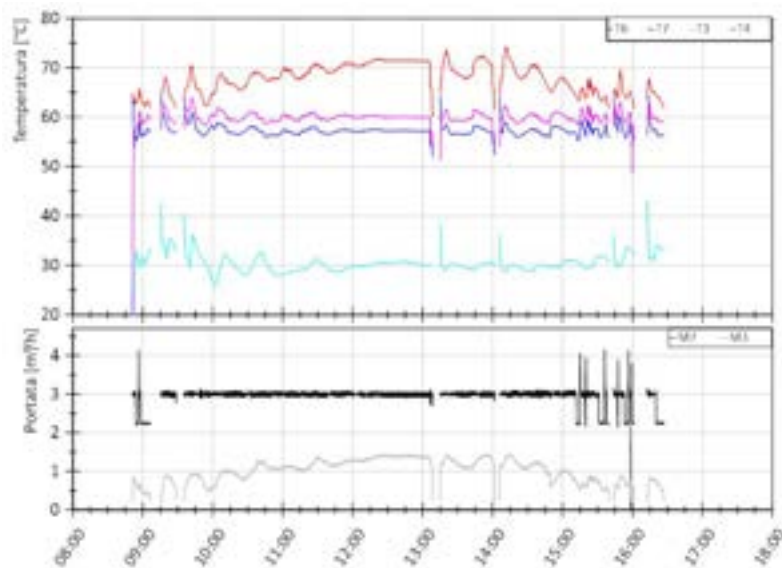


Figura 3.209. Sessione B1, Giorno 3 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (ingresso scambiatore S3 T6 e ritorno al sistema di generazione T7) e lato TLR (ritorno dal TLR T3, mandata al TLR T4) dello scambiatore S3 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato TLR (M3) dello scambiatore S3 (grafico inferiore)

Nel seguito si riportano alcune considerazioni riguardo il controllo di temperatura da parte della test facility in T1, T5 e T8 e il controllo di temperatura da parte della sottostazione in T4 e T10. Il funzionamento di tali controllo è paragonabile a quanto osservato per i test della sessione A. Si rimanda, quindi, alla descrizione dei giorni di test della sessione A per maggiori dettagli, con particolare riferimento al giorno 3.

Con riferimento alla Figura 3.210 si può notare come l'andamento del valore misurato T1 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa $\pm 2^{\circ}\text{C}$ quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento o caricamento dell'accumulo di ACS. Così come descritto nel seguito, tali oscillazioni non compromettono il soddisfacimento delle richieste termiche dell'utente.

Con riferimento alla Figura 3.211 si può notare come l'andamento del valore misurato T5 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa $\pm 5^{\circ}\text{C}$ quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento.

Con riferimento alla Figura 3.212, si può notare come l'andamento del valore misurato T8 (curva verde nel grafico superiore) sia in ritardo rispetto all'andamento del valore di riferimento T8nom (curva rossa nel grafico superiore). Questo ritardo è dovuto essenzialmente alla distanza circuitale tra il punto della test facility in cui T8 viene controllata al valore di riferimento e il punto della sottostazione in cui T8 viene misurata. Di conseguenza si hanno scostamenti assoluti rilevanti rispetto al valore di riferimento in corrispondenza di una brusca variazione del valore di riferimento ma contenuti in $\pm 1^{\circ}\text{C}$ nel funzionamento in condizioni stabili.

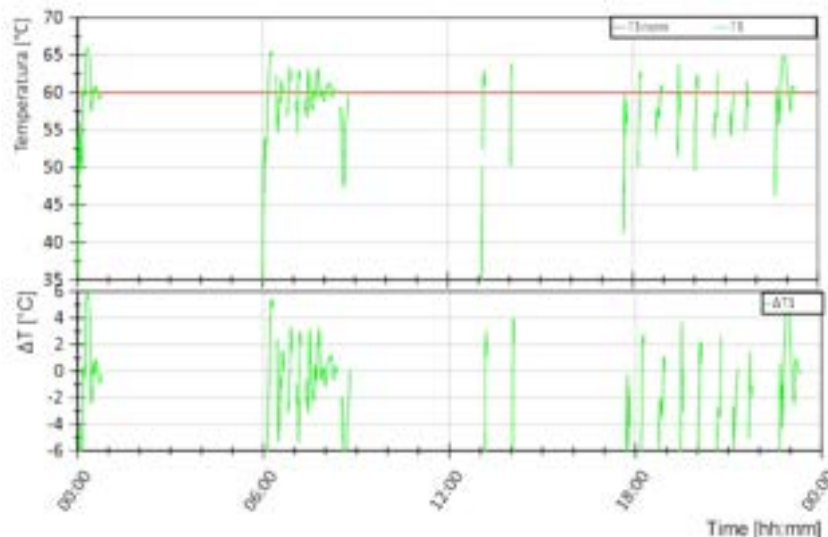


Figura 3.210. Sessione B1, Giorno 3. Andamento della temperatura di mandata dal teleriscaldamento T1 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T1nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

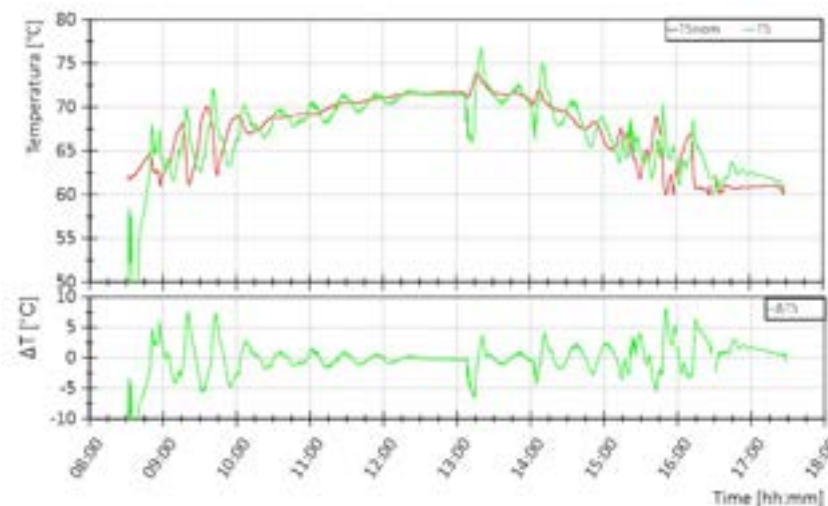


Figura 3.211. Sessione B1, Giorno 3 - Dettaglio. Andamento della temperatura di mandata dal sistema di generazione T5 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T5nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

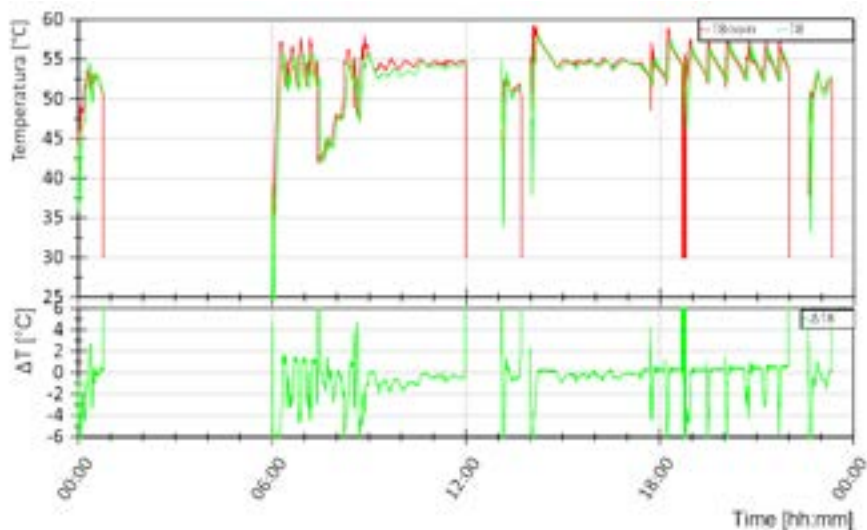


Figura 3.212. Sessione B1, Giorno 3. Andamento della temperatura di ritorno dall'utenza T8 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T8nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

Con riferimento alla Figura 3.213 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T10nom e il valore misurato T10 sia inferiore a $\pm 1^{\circ}\text{C}$ per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T10 da parte della sottostazione, nonostante le oscillazioni registrate in ingresso allo scambiatore S1 ed S2. Si ha una maggiore discrepanza all'avviamento e quando si ha un funzionamento intermittente di S1 per bassa richiesta da parte dell'utente ma comunque si riesce a soddisfare le richieste termiche dell'utente, come risulta da descrizione dei grafici in Figura 3.215 e Figura 3.216 riportati nel seguito.

Con riferimento alla Figura 3.214 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T4nom e il valore misurato T4 sia inferiore a $\pm 2^{\circ}\text{C}$ per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T4 da parte della sottostazione, nonostante le oscillazioni registrate in ingresso allo scambiatore S3. Si ha una maggiore discrepanza all'avviamento e nei momenti in cui la temperatura di ingresso lato generazione (T6) è prossima a 62°C come descritto per i giorni precedenti.

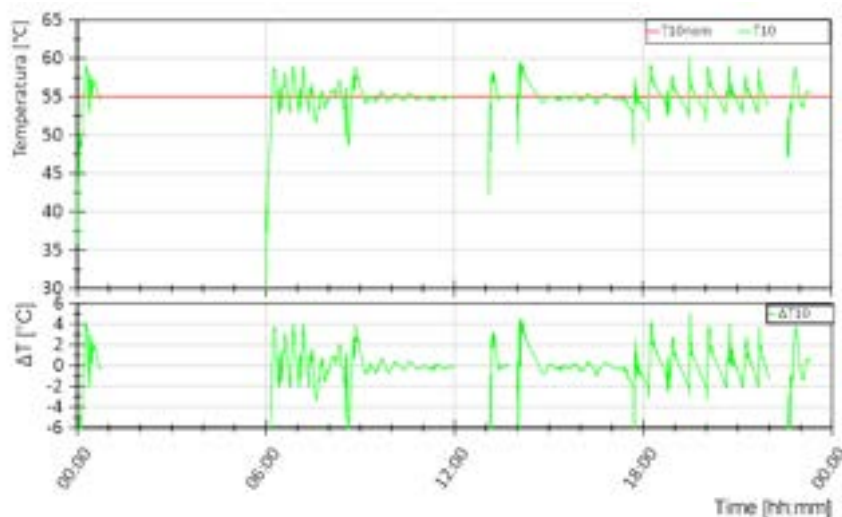


Figura 3.213. Sessione B1, Giorno 3. Andamento della temperatura di mandata all'utenza T10 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T10nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

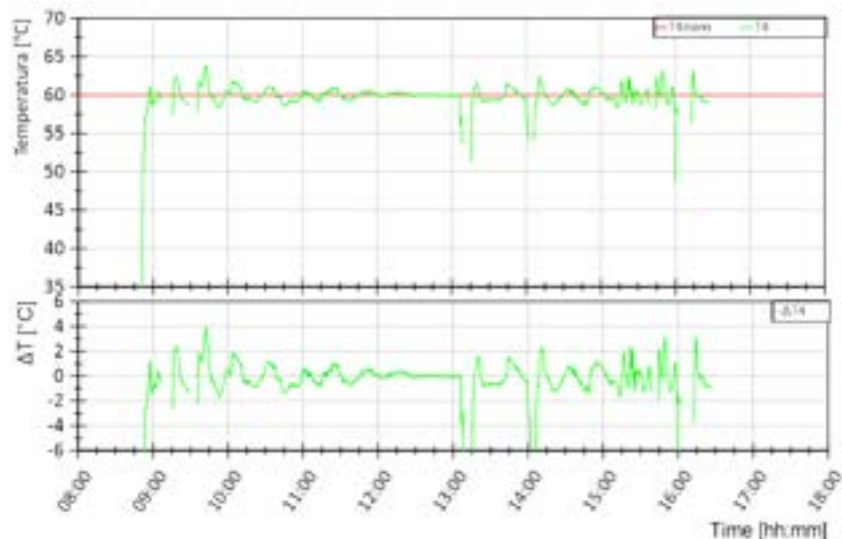


Figura 3.214. Sessione B1, Giorno 3 - Dettaglio. Andamento della temperatura di immissione in rete T4 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T4nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

In Figura 3.215 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio e la temperatura ambiente e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo di ACS (in grigio) nonché la portata di caricamento (in arancione) e di ricircolo (in blu). Si può notare dal grafico superiore come la temperatura all'interno degli appartamenti sia tenuta essenzialmente sopra i 20 °C durante le ore di riscaldamento. Inoltre, dalla Figura 3.216 risulta che la valvola miscelatrice presente nel modello riesce a controllare la temperatura di mandata al riscaldamento secondo curva climatica teorica durante tutto il test. Per quanto riguarda l'ACS, si può notare come la temperatura dell'accumulo aumenta ogni qualvolta avviene una carica, fino a raggiungere i 53 °C, e diminuisce per effetto delle perdite termiche o richiesta da parte dell'utente che si verifica in corrispondenza di una portata di ricircolo maggiore di 0,27 m³/h.

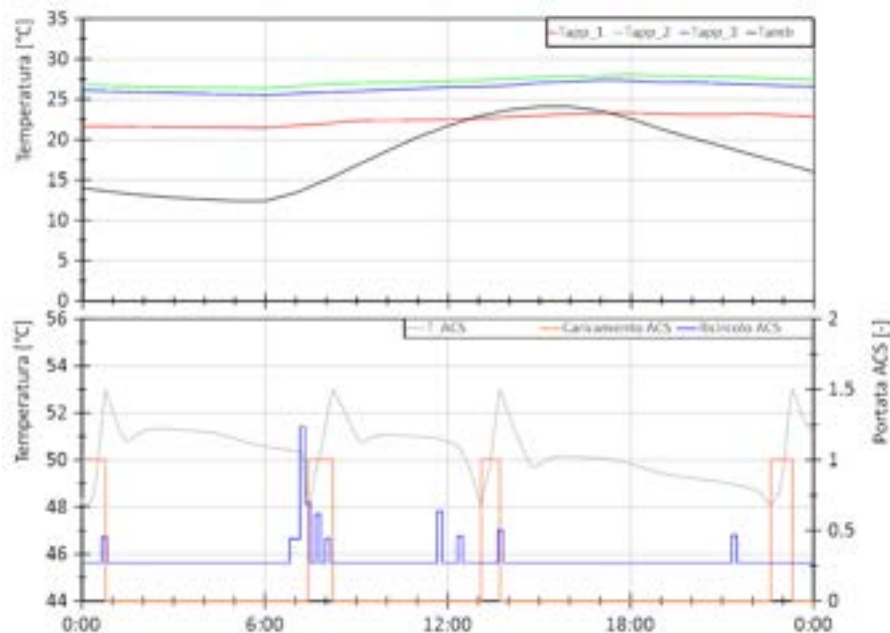


Figura 3.215. Sessione B1, Giorno 3. Andamento della temperatura in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio (curve in blu, verde e rosso del grafico superiore) e temperatura esterna (curva in nero grafico superiore), andamento della temperatura nell'accumulo di ACS e portata di caricamento e ricircolo dell'accumulo di ACS (rispettivamente curva un grigio, in arancione e in blu del grafico inferiore)

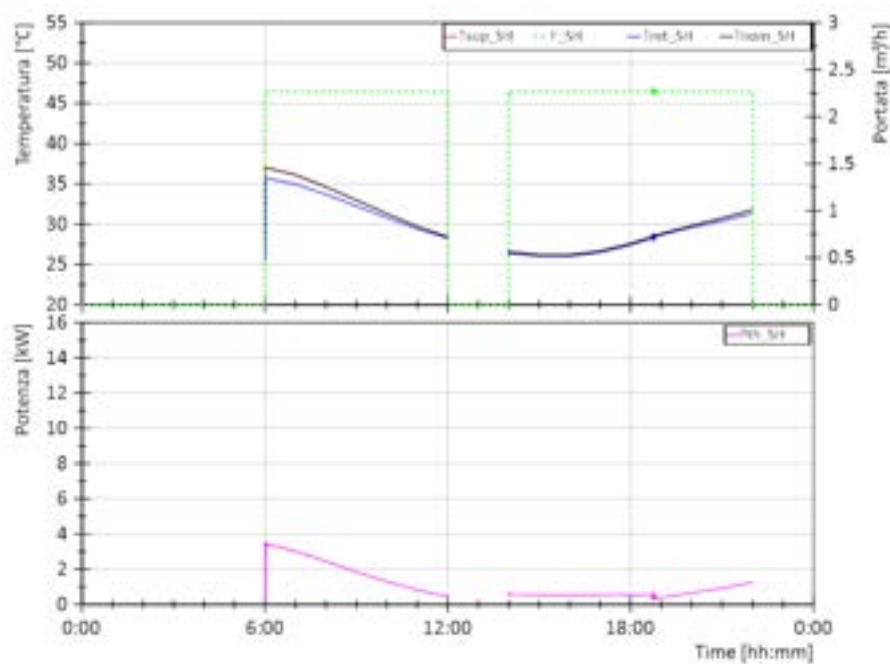


Figura 3.216. Sessione B1, Giorno 3. Andamento della temperatura di mandata e ritorno e portata nel circuito di riscaldamento (curva in rosso, blu e tratteggiata verde nel grafico superiore rispettivamente) e andamento della temperatura di mandata al riscaldamento di riferimento (curva in nero), andamento della potenza termica per riscaldamento (curva in magenta grafico inferiore)

In Figura 3.217 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in ingresso e uscita dal campo solare e la portata circolante e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo solare (in grigio) e l'intervallo di scarica (in arancione) che indica il periodo in cui l'energia solare viene inviata dall'accumulo alla sottostazione. Dal grafico superiore si evince che in una prima fase di avviamento del campo solare non si ha un caricamento dell'accumulo: la temperatura di uscita dal campo solare è infatti inferiore rispetto alla temperatura nell'accumulo. Ciò emerge anche dalla Figura 3.218 confrontando la potenza termica prodotta dal campo solare e quella in ingresso all'accumulo solare (rispettivamente in rosso e magenta). Con riferimento alla Figura 3.217, nei momenti in cui si ha la carica dell'accumulo, si assiste ad un aumento della temperatura dello stesso. Tale temperatura può diminuire in corrispondenza di una scarica se la potenza richiesta dalla sottostazione è superiore a quella immessa nell'accumulo in quell'istante o può aumentare in caso contrario. Da ciò si deduce che se non si ha un perfetto bilanciamento tra potenza prodotta e quella utilizzata si va incontro ad un funzionamento intermittente della sottostazione. Nel caso in esame, si registra un funzionamento continuo di S2 nelle ore di richiesta da parte dell'utente e di contemporanea disponibilità solare e un funzionamento principalmente continuo anche di S3 dato che si ha una produzione solare maggiore di 25 kW per la gran parte del tempo. L'intermittenza di S3 si verifica nella fase di accensione e spegnimento del campo solare a causa del valore minimo di potenza che è in grado di scambiare, come descritto per il giorno 1 della sessione B1.

In Tabella 3.36 si riporta l'energia termica al primario e al secondario dei diversi scambiatori e le relative efficienze per la prova considerata.

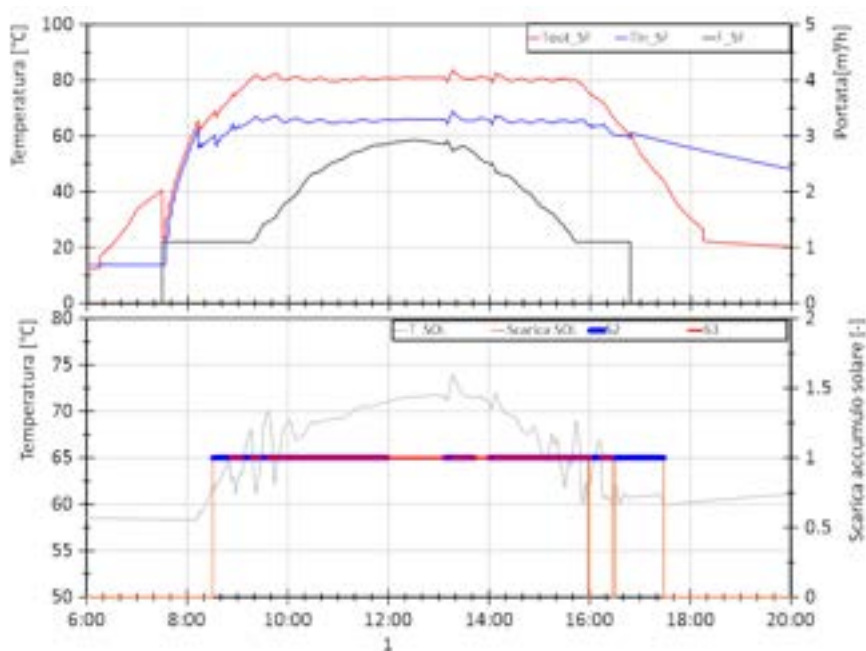


Figura 3.217. Sessione B1, Giorno 3 - Dettaglio. Andamento della temperatura in uscita dal campo solare, in ingresso e la portata (rispettivamente curva in rosso, blu e nero del grafico superiore), andamento della temperatura nell'accumulo solare e intervallo di scarica dell'accumulo solare (rispettivamente curva un grigio e in arancione del grafico inferiore)

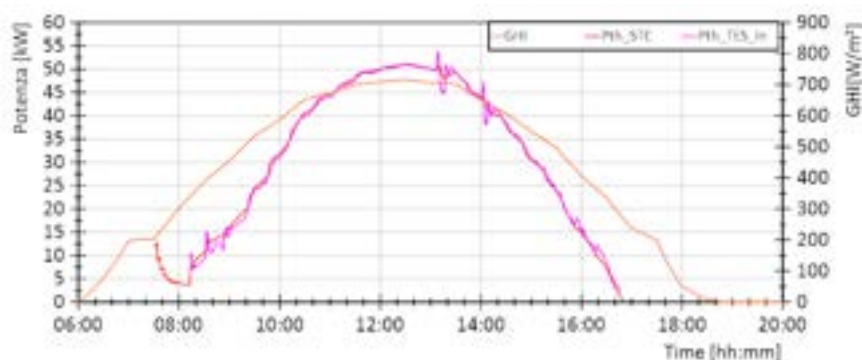


Figura 3.218. Sessione B1, Giorno 3 - Dettaglio. Andamento della radiazione globale sul piano orizzontale (GHI in arancione), della potenza termica prodotta dal campo solare (in rosso) e di quella in ingresso all'accumulo solare (in magenta)

Tabella 3.36. Sessione B1, Giorno 3. Energie termiche al primario (lato teleriscaldamento, TLR, o sistema di generazione, GEN) e al secondario (lato teleriscaldamento, TLR, o utente, US) dei diversi scambiatori della sottostazione e relative efficienze

Eth,S1,TLR [kWh]	Eth,S1,US [kWh]	η_{s1} [%]	Eth,S2,GEN [kWh]	Eth,S2,US [kWh]	η_{s2} [%]	Eth,S3,GEN [kWh]	Eth,S3,US [kWh]	η_{s3} [%]
59,83	55,61	93%	25,71	24,99	97%	249,93	244,46	98%

3.4.3.4 Fase 1 - Giorno 5

Il giorno di test 5 è il 01/08 per il quale sono presenti solo richieste di ACS da parte dell'utente essendo al di fuori del periodo di riscaldamento.

In Figura 3.219 viene mostrato, nel grafico inferiore, in nero il comando di avvio della sottostazione per richiesta da parte dell'utente che coincide con le richieste di caricamento dell'accumulo di ACS e in arancione

la disponibilità di energia solare nell'accumulo solare che può essere utilizzata dalla sottostazione. Nel grafico superiore si riporta in magenta la potenza termica fornita dallo scambiatore S1 e in rosso quella fornita dallo scambiatore S2 per soddisfare le richieste termiche. Nel grafico centrale si riporta in viola la potenza termica fornita dallo scambiatore S3 alla rete di teleriscaldamento.

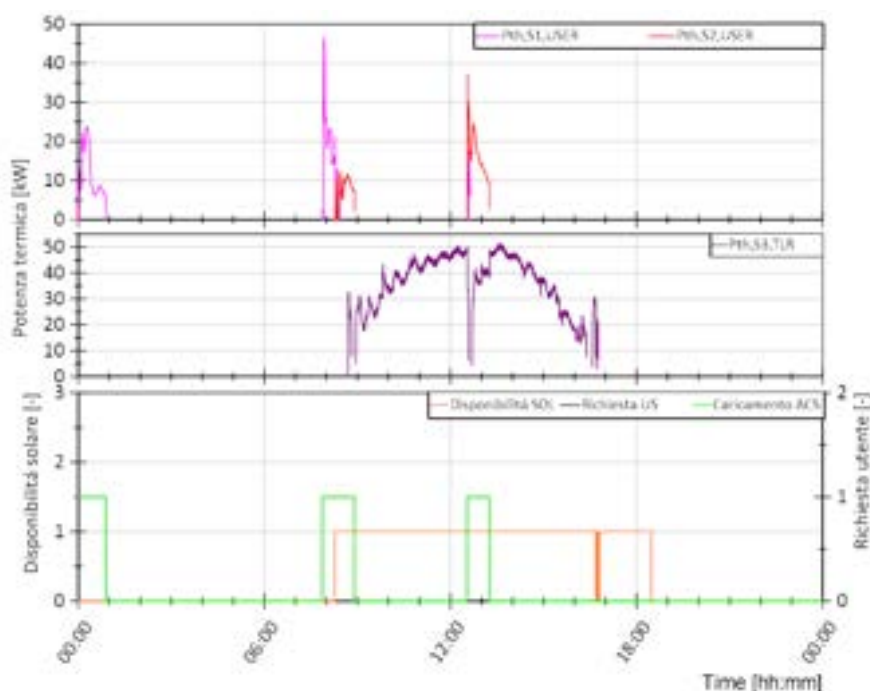


Figura 3.219. Sessione B1, Giorno 5. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità energia solare nell'accumulo (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

Dal confronto tra i tre grafici si può notare che le richieste termiche dell'utente sono soddisfatte sia dallo scambiatore S1 (TLR) che dallo scambiatore S2 (solare), essendoci una contemporaneità di disponibilità solare e richieste per caricamento ACS. La restante disponibilità solare viene immessa nella rete di TLR tramite lo scambiatore S3 che ha un funzionamento principalmente continuo. In Figura 3.220 viene riportato un ingrandimento della Figura 3.219 al fine di visualizzare in dettaglio le ore di funzionamento degli scambiatori S2 e S3. Nell'intervallo di disponibilità di energia solare, ovvero tra le 8 e le 18:30 circa, lo scambiatore S2 funziona tra le 8 e le 9 e tra le 12:30 e le 13:30 circa, mentre lo scambiatore S3 tra le 8:30 e le 17:00 circa. Tra le 17:00 e le 18:30 si ha ancora disponibilità di energia solare, ma ad una temperatura compresa tra 60 °C e 62 °C e quindi non adatta per l'immissione in rete di TLR: continua quindi a circolare nella sottostazione e viene dissipata sotto forma di perdite termiche.

Così come per il giorno 1, confrontando la potenza termica immessa nella rete di TLR (S3) del giorno 5 della sessione A e della sessione B1, si può notare una maggiore disponibilità di energia solare utilizzabile dalla sottostazione nella sessione B1 rispetto allo stesso giorno della sessione A.

Si riportano nel seguito gli andamenti delle temperature di ingresso e uscita al primario e al secondario degli scambiatori S1, S2 e S3 e le portate quando questi sono in funzione (Figura 3.221-Figura 3.223). In particolare per gli scambiatori S2 e S3 si utilizza una scala temporale basata sui momenti di funzionamento al fine di facilitarne la lettura.

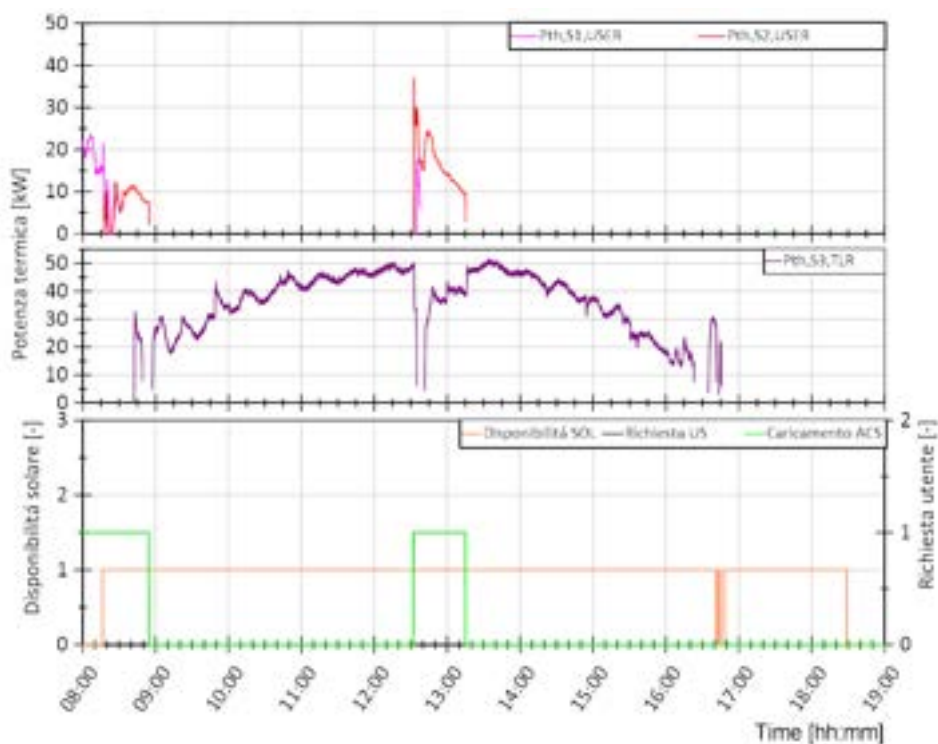


Figura 3.220. Sessione B1, Giorno 5 - Dettaglio. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità energia solare nell'accumulo (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

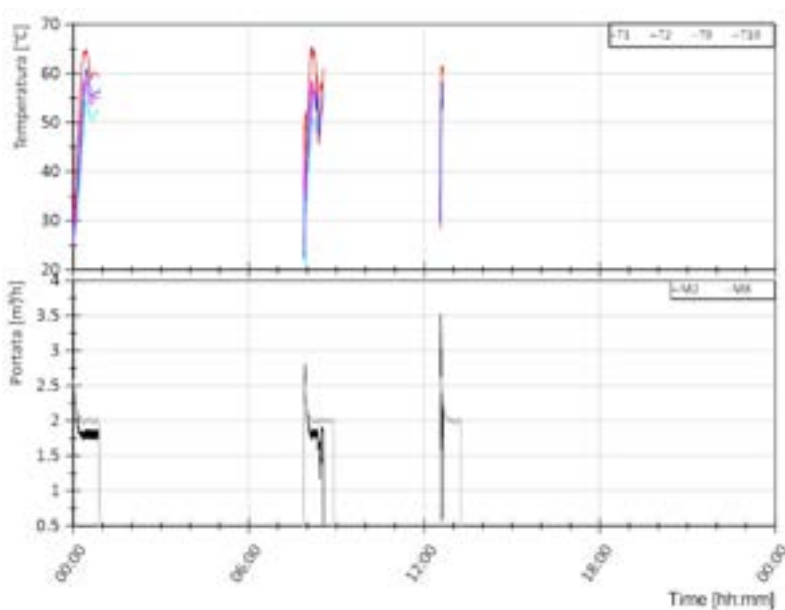


Figura 3.221. Sessione B1, Giorno 5. Andamento delle temperature lato teleriscaldamento (mandata dal teleriscaldamento T1, ritorno al teleriscaldamento T2) e lato utenza (uscita dallo scambiatore S2 T9, mandata all'utenza T10) dello scambiatore S1 (grafico superiore), andamento della portata lato teleriscaldamento (M2) e lato utenza (M8) dello scambiatore S1 (grafico inferiore)

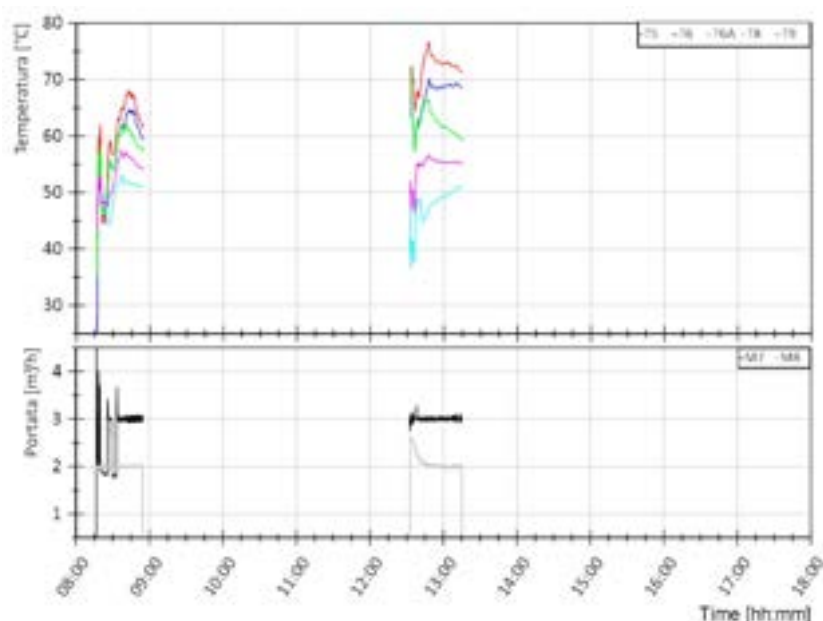


Figura 3.222. Sessione B1, Giorno 5 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (mandata dal sistema di generazione T5, ritorno al sistema di generazione T6 e uscita scambiatore S2 T6A) e lato utenza (ritorno dall'utenza T8, mandata all'utenza T9) dello scambiatore S2 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato utenza (M8) dello scambiatore S2 (grafico inferiore)

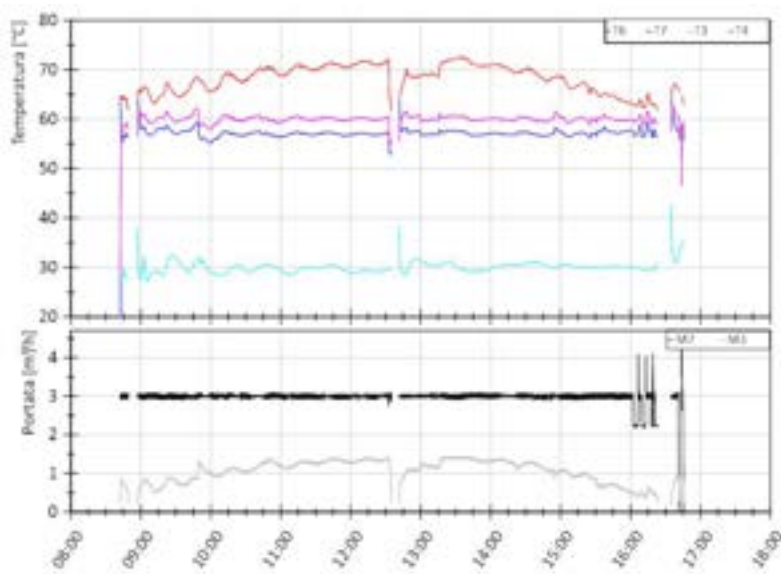


Figura 3.223. Sessione B1, Giorno 5 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (Ingresso scambiatore S3 T6 e ritorno al sistema di generazione T7) e lato TLR (ritorno dal TLR T3, mandata al TLR T4) dello scambiatore S3 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato TLR (M3) dello scambiatore S3 (grafico inferiore)

I tre grafici di cui sopra riportanti le temperature e le portate nei tre scambiatori mettono in luce alcune caratteristiche relative ai controlli di temperatura e portata sia della test facility che della sottostazione, così come esposto nella descrizione dei test eseguiti nella sessione A.

Nel seguito si riportano alcune considerazioni riguardo il controllo di temperatura da parte della test facility in T1, T5 e T8 e il controllo di temperatura da parte della sottostazione in T4 e T10. Il funzionamento di tali controllo è paragonabile a quanto osservato per i test della sessione A. Si rimanda, quindi, alla descrizione dei giorni di test della sessione A per maggiori dettagli, con particolare riferimento al giorno 5.

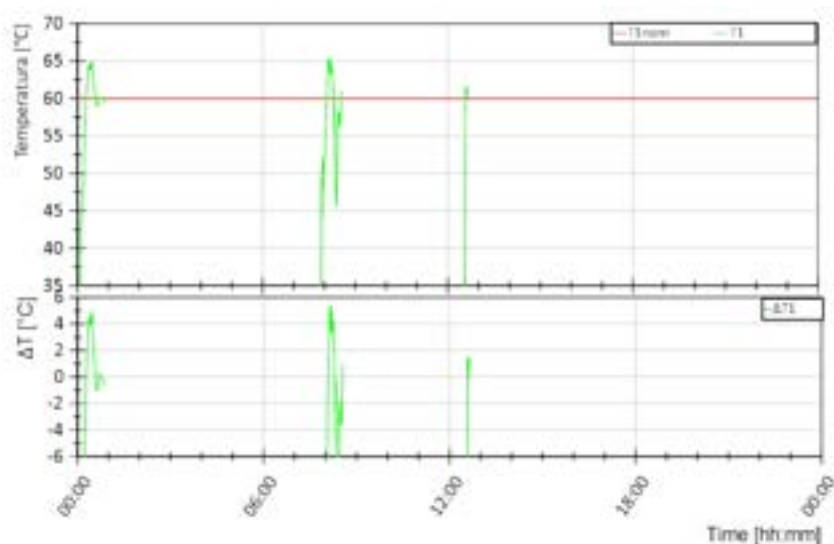


Figura 3.224. Sessione B1, Giorno 5. Andamento della temperatura di mandata dal teleriscaldamento T1 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T1nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

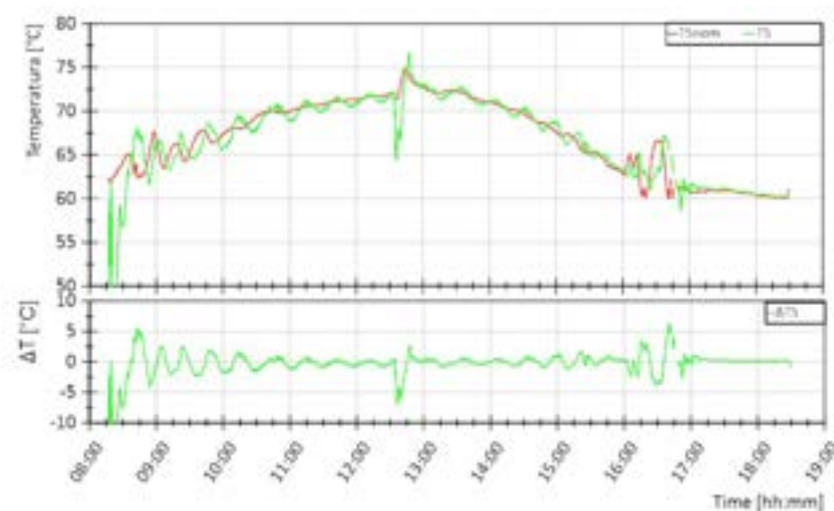


Figura 3.225. Sessione B1, Giorno 5 - Dettaglio. Andamento della temperatura di mandata dal sistema di generazione T5 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T5nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

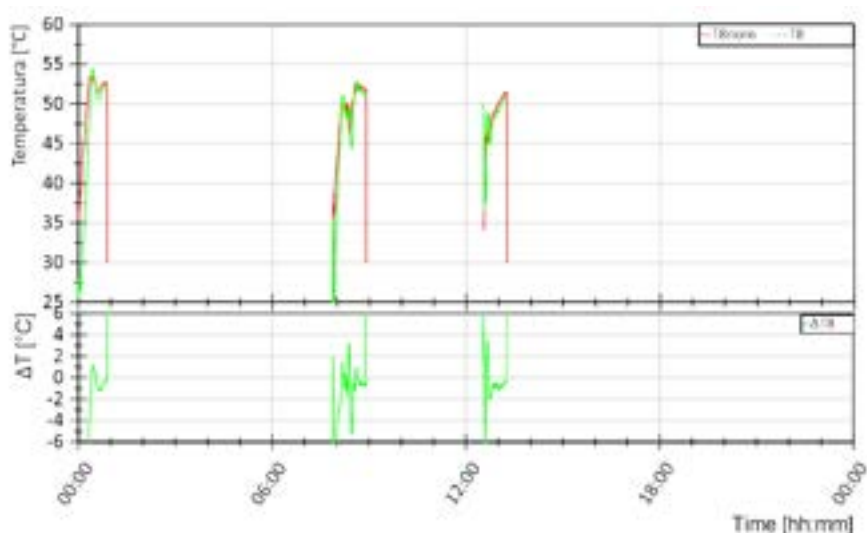


Figura 3.226. Sessione B1, Giorno 5. Andamento della temperatura di ritorno dall'utenza T8 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T8nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore).

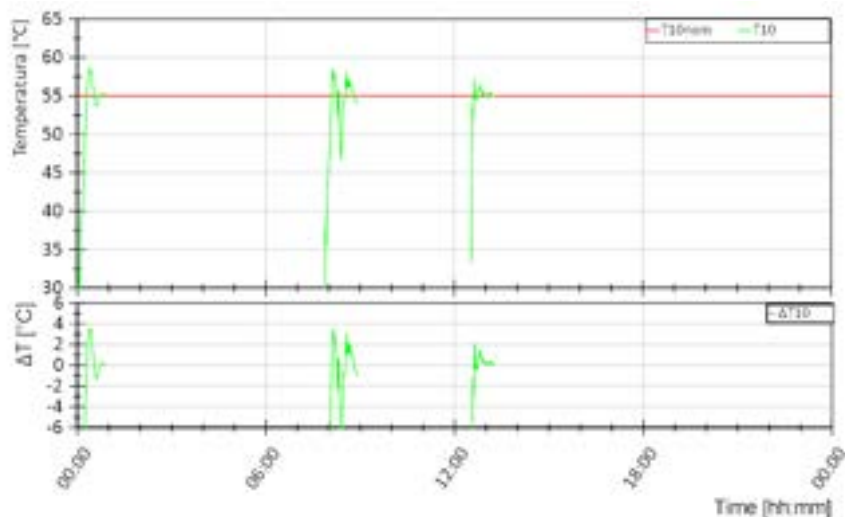


Figura 3.227. Sessione B1, Giorno 5. Andamento della temperatura di mandata all'utenza T10 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T10nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

Con riferimento alla Figura 3.228 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T4nom e il valore misurato T4 sia inferiore a $\pm 2^{\circ}\text{C}$ per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T4 da parte della sottostazione, nonostante le oscillazioni registrate in ingresso allo scambiatore S3. Si ha una maggiore discrepanza all'avviamento e nei momenti in cui la temperatura di ingresso lato generazione (T6) è prossima a 62°C , così come descritto per il giorno 1.

In Figura 3.229 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio e la temperatura ambiente e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo di ACS (in grigio) nonché la portata di caricamento (in arancione) e di ricircolo (in blu). Per quanto riguarda l'ACS, si può notare come la temperatura dell'accumulo aumenta ogni qualvolta avviene una carica fino a raggiungere i 53°C , e diminuisce per effetto delle perdite termiche o richiesta da parte dell'utente che si verifica in corrispondenza di una portata di ricircolo maggiore di $0,27\text{ m}^3/\text{h}$.



Figura 3.228. Sessione B1, Giorno 5 - Dettaglio. Andamento della temperatura di immissione in rete T4 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T4nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

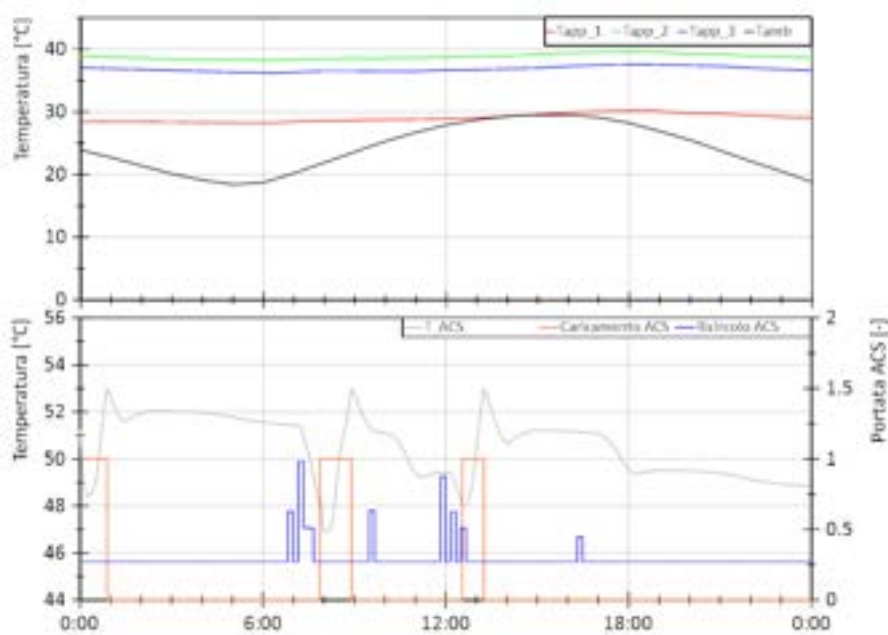


Figura 3.229. Sessione B1, Giorno 5. Andamento della temperatura in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio (curve in blu, verde e rosso del grafico superiore) e temperatura esterna (curva in nero grafico superiore), andamento della temperatura nell'accumulo di ACS e portata di caricamento e ricircolo dell'accumulo di ACS (rispettivamente curva un grigio, in arancione e in blu del grafico inferiore)

In Figura 3.230 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in ingresso e uscita dal campo solare e la portata circolante e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo solare (in grigio) e l'intervallo di scarica (in arancione) che indica il periodo in cui l'energia solare viene inviata dall'accumulo alla sottostazione. Dal grafico superiore si evince che in una prima fase di avviamento del campo solare non si ha un caricamento dell'accumulo: la temperatura di uscita dal campo solare è infatti inferiore rispetto alla temperatura nell'accumulo. Ciò emerge anche dalla Figura 3.231, confrontando la potenza termica prodotta dal campo solare e quella in ingresso all'accumulo solare (rispettivamente in rosso e magenta). Con riferimento alla Figura 3.230, nei momenti in cui si ha la carica dell'accumulo, si assiste ad un aumento della temperatura dello stesso. Tale temperatura può diminuire in corrispondenza di una scarica se la potenza

richiesta dalla sottostazione è superiore a quella immessa nell’accumulo in quell’istante o può aumentare in caso contrario. Da ciò si deduce che se non si ha un perfetto bilanciamento tra potenza prodotta e quella utilizzata si va incontro ad un funzionamento intermittente della sottostazione. Nel caso in esame, si registra un funzionamento prevalentemente continuo di S3 con una immissione in rete di TLR di una potenza inferiore alla produzione solare fino alle 12:00 e superiore dalla 12:00 alle 17:00 circa. In Tabella 3.37 si riporta l’energia termica al primario e al secondario dei diversi scambiatori e le relative efficienze per la prova considerata.

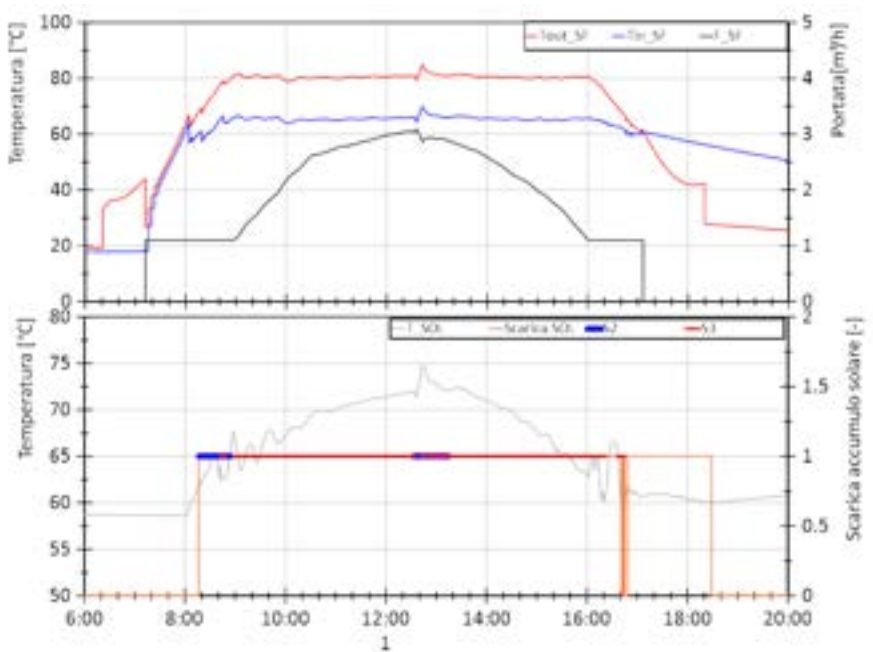


Figura 3.230. Sessione B1, Giorno 5 - Dettaglio. Andamento della temperatura in uscita dal campo solare, in ingresso e la portata (rispettivamente curva in rosso, blu e nero del grafico superiore), andamento della temperatura nell’accumulo solare e intervallo di scarica dell’accumulo solare (rispettivamente curva un grigio e in arancione del grafico inferiore)

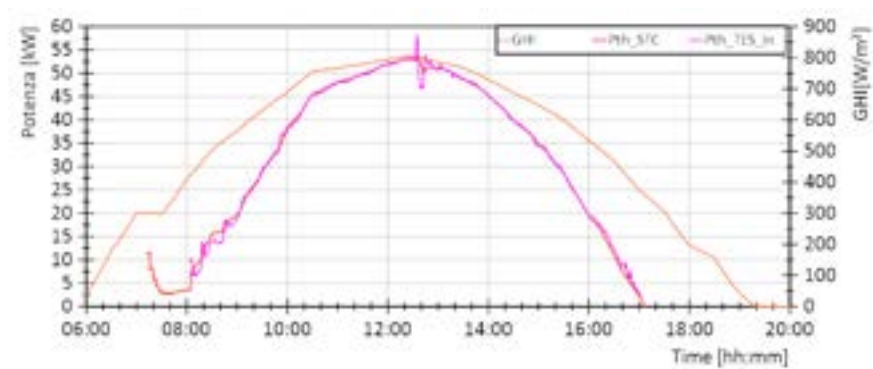


Figura 3.231. Sessione B1, Giorno 5 - Dettaglio. Andamento della radiazione globale sul piano orizzontale (GHI in arancione), della potenza termica prodotta dal campo solare (in rosso) e di quella in ingresso all’accumulo solare (in magenta)

Tabella 3.37. Sessione B1, Giorno 5. Energie termiche al primario (lato teleriscaldamento, TLR, o sistema di generazione, GEN) e al secondario (lato teleriscaldamento, TLR, o utente, US) dei diversi scambiatori della sottostazione e relative efficienze

Eth,S1,TLR [kWh]	Eth,S1,US [kWh]	η_{s1} [%]	Eth,S2,GEN [kWh]	Eth,S2,US [kWh]	η_{s2} [%]	Eth,S3,GEN [kWh]	Eth,S3,US [kWh]	η_{s3} [%]
22,39	20,24	90%	17,21	16,49	96%	286,85	279,29	97%

3.4.3.5 Fase 1 - Prestazioni energetiche ed indicatori per la sessione B1

Si riporta nel seguito un'analisi delle prestazioni energetiche della sottostazione per i 6 giorni di test della sessione B1 al fine di valutare i flussi energetici e la bontà dell'accoppiamento tra i modelli numerici di edificio e campo solare con il laboratorio. In Tabella 3.38 sono riportate l'energia ceduta all'impianto di riscaldamento, l'energia ceduta all'impianto di caricamento dell'accumulo ACS e l'energia ceduta al primario del separatore idraulico per i 6 giorni di test calcolate sulla base degli andamenti delle temperature e portate elaborate dal modello numerico durante i test e per questo indicato con "S" (simulazione). È riportata, inoltre, l'energia ceduta al lato utente dalla sottostazione calcolata sulla base degli andamenti delle temperature e portate elaborate dalla sottostazione durante i test (T8, T10 ed M8) e per questo indicato con "L" (laboratorio) e il fattore di accoppiamento simulazione/laboratorio per i 6 giorni di test già definito in 3.4.2.4. Per una descrizione del collegamento sottostazione/test facility con modello numerico e quindi dettagli sui punti di misura per la valutazione delle energia, si rimanda al paragrafo 5.3.2.

Tabella 3.38. Sessione B1 - Energia ceduta all'impianto di riscaldamento, energia ceduta all'impianto di caricamento dell'accumulo ACS, energia ceduta al primario del separatore idraulico, energia ceduta al lato utente dalla sottostazione e fattore di accoppiamento simulazione/laboratorio per i 6 giorni di test

Giorno di test		1	2	3	4	5	6
Giorno dell'anno		05 Gen	21 Mar	09 Apr	24 Mag	01 Ago	05 Nov
Energia riscaldamento (S)	[kWh]	129,6	64,67	16,41	0	0	66,21
Energia ACS (S)	[kWh]	21,5	28,31	31,54	26,96	20,79	33,39
Energia primario separatore idraulico (S)	[kWh]	155,08	94,64	48,12	27,38	21,05	101,15
Energia lato utente sottostazione (S1+S2) (L)	[kWh]	176,47	115,5	80,6	44,97	36,73	120,39
Fattore accoppiamento S/L	[%]	88%	82%	60%	61%	57%	84%

Come già descritto in 3.4.2.4, in un funzionamento ideale l'energia al primario del separatore idraulico coinciderebbe con l'energia lato utente della sottostazione. Durante i test eseguiti, la temperatura in ingresso alla sottostazione (T8) è controllata dal laboratorio al fine di emulare il valore di temperatura in uscita dal primario del separatore idraulico risultante dalla simulazione. Come emerge dalla descrizione dei diversi giorni di test, non è sempre possibile ottenere una differenza nulla tra variabile di riferimento e variabile controllata. In alcune condizioni di funzionamento si hanno delle discrepanze che si ripercuotono sui bilanci energetici, come si nota dalla valutazione del fattore di accoppiamento in tabella. Rispetto ai test della sessione A, il valore del fattore di accoppiamento è mediamente più basso a causa di minori richieste termiche dell'utente: a parità di differenza tra variabile controllata e riferimento (es. 0,5 °C tra T8 controllata e T8 di riferimento) e a parità di portata, in termini percentuali si ha una differenza maggiore tra potenza al primario del separatore idraulico (simulazione) e quella lato utente della sottostazione (laboratorio) quanto minore sarà la potenza in gioco.

Il valore del fattore di accoppiamento varia tra il 57% e l'88%. Si ha un miglior accoppiamento, e di conseguenza un miglior controllo della T8, nei giorni in cui il funzionamento del sistema è stabile ed è presente una richiesta di riscaldamento e ACS, come accade per il giorno 1, 2 e 6; si ha un accoppiamento peggiore nei giorni in cui si ha un funzionamento meno stabile del sistema, tipico dei giorni con solo richiesta di ACS o con funzionamento intermittente di S1 per bassa richiesta da parte dell'utente. Allo stesso tempo, le giornate con fattore di accoppiamento peggiore (3, 4 e 5) sono caratterizzate da scambi energetici inferiori rispetto alle altre e nella valutazione del fattore di accoppiamento globale avranno un peso minore. Risulta, infatti, un fattore di accoppiamento globale, calcolato sulla base dei valori estrapolati a tutto l'anno, del 79%. Con riferimento allo schema del modello di circuito solare, in Tabella 3.39 sono riportate l'energia totale prodotta dal campo solare, energia da solare in ingresso all'accumulo solare e l'energia da solare in uscita dall'accumulo solare, per i 6 giorni di test della sessione B1. Tali energie sono calcolate sulla base degli andamenti delle temperature e portate elaborate dal modello numerico durante i test e per questo indicato con "S" (simulazione). È riportata, inoltre, l'energia da solare in ingresso alla sottostazione calcolata sulla base degli andamenti delle temperature e portate elaborate dalla sottostazione durante i test (T5, T7 ed M2) e

per questo indicato con “L” (laboratorio) e il fattore di accoppiamento simulazione/laboratorio per i 6 giorni di test già definito in 3.4.2.4.

Tabella 3.39. Sessione B1 - Energia totale prodotta dal campo solare, energia da solare in ingresso all'accumulo solare, energia da solare in uscita dall'accumulo solare, energia da solare in ingresso alla sottostazione e fattore di accoppiamento simulazione/laboratorio per i 6 giorni di test

Giorno di test		1	2	3	4	5	6
Giorno dell'anno		05 Gen	21 Mar	09 Apr	24 Mag	01 Ago	05 Nov
Energia totale prodotta da solare (S)	[kWh]	56,51	96,91	290,43	64,26	319,94	39,04
Energia da solare in ingresso all'accumulo (S)	[kWh]	50,85	91,62	285,9	60,31	316,18	32,89
Energia da solare in uscita dall'accumulo (S)	[kWh]	46,32	87,15	281,45	54,99	313,05	28,07
Energia da solare in ingresso alla sottostazione (L)	[kWh]	50,29	96,03	279,19	55,23	309,06	29,02
Fattore accoppiamento S/L	[%]	92%	91%	101%	100%	101%	97%

Come già descritto in 3.4.2.4 in un funzionamento ideale, l'energia in uscita dall'accumulo solare coinciderebbe con l'energia in ingresso alla sottostazione lato sistema di generazione (5-7). Durante i test eseguiti, la temperatura in uscita dal secondario dell'accumulo solare è controllata dal laboratorio in T5 al fine di emulare il valore di temperatura risultante dalla simulazione. Come emerge dalla descrizione dei diversi giorni di test, non è sempre possibile ottenere una differenza nulla tra variabile di riferimento e variabile controllata. In alcune condizioni di funzionamento si hanno delle discrepanze che non è possibile correggere nemmeno con il controllo in potenza implementato e descritto nel paragrafo 5.3.2. Esse si ripercuotono sui bilanci energetici, come si nota dalla valutazione del fattore di accoppiamento in tabella. Tale valore varia tra il 91% e il 101%. Si ha comunque un miglior accoppiamento nei giorni di maggiore produzione da solare, ovvero il giorno 3 e 5 in cui il funzionamento del sistema è stabile; si ha un accoppiamento peggiore nei giorni in cui si ha un funzionamento meno stabile del sistema, tipico dei giorni con minore produzione da solare. Queste giornate, essendo caratterizzate da scambi energetici inferiori, hanno un peso minore nella valutazione del fattore di accoppiamento globale. Risulta, infatti, un fattore di accoppiamento globale, calcolato sulla base dei valori estrapolati a tutto l'anno, del 99%. Nel seguito verranno analizzati nel dettaglio i flussi energetici del circuito solare.

In Tabella 3.40 sono riportate, per i sei giorni di test le stesse grandezze già definite per i test della sessione A in Tabella 3.29 nel paragrafo 3.4.2.4. In particolare, la frazione di energia prodotta da solare e include i seguenti contributi:

- L'energia necessaria nella fase di preriscaldamento, che si avvia quando il campo solare entra in funzione e termina quando inizia il caricamento dell'accumulo solare. Tale energia sarà tanto maggiore quanto minore è la temperatura ambiente e maggiore è la temperatura iniziale dell'accumulo.
- L'energia di preriscaldamento dell'accumulo solare, necessaria per portare l'accumulo solare dalla sua temperatura iniziale (solitamente 58 °C) a 60 °C, che rappresenta la minima temperatura utile di utilizzo dell'energia solare nell'accumulo da parte della sottostazione.
- Tutte le perdite termiche che ci sono nel circuito tra campo solare e secondario degli scambiatori S2 ed S3 (tra uscita campo solare e ingresso accumulo solare, tra ingresso e uscita accumulo solare, tra uscita accumulo solare e ingresso primario scambiatori S2 ed S3 e tra primario e secondario scambiatori S2 ed S3).
- Parte dell'energia solare presente nell'accumulo ad una temperatura compresa tra 62 °C e 60 °C. Tale energia è ad un livello di temperatura idoneo per l'utilizzo da parte dell'utente e viene quindi fatta circolare nella sottostazione. In alcuni casi o non si ha una contemporanea richiesta termica da parte dell'utente e quindi tale energia viene dispersa, o resta inutilizzata nell'accumulo (a fine giornata la temperatura dell'accumulo è maggiore di 60°C).

Le frazioni di energia in tabella sono anche riportate nelle Figura 3.232 e Figura 3.233, nelle quali è possibile notare rispettivamente in che misura le richieste termiche dell'utente siano soddisfatte dal TLR e da energia prodotta da solare, e in che misura l'energia prodotta da solare sia inviata all'utente, immessa in rete o dispersa.

Tabella 3.40. Sessione B1 - Energia prelevata dalla rete di TLR (primario scambiatore S1), energia prelevata dalla rete di TLR e ceduta all'utente (secondario S1), energia ceduta all'utente prodotta dal campo solare (secondario S2), energia immessa nella rete di TLR e prodotta dal campo solare (secondario S3), frazione di energia all'utente da TLR e da solare, frazione di energia da solare inviata all'utente, immessa in rete di TLR e dispersa per i 6 giorni di test

Giorno di test		1	2	3	4	5	6
Giorno dell'anno		05 Gen	21 Mar	09 Apr	24 Mag	01 Ago	05 Nov
Energia all'utente da TLR-lato TLR (L)	[kWh]	170,75	93,92	59,83	48,1	22,39	119,22
Energia all'utente da TLR-lato US (L)	[kWh]	163,7	88,3	55,61	44,97	20,24	112,4
Energia all'utente da solare (L)	[kWh]	12,77	27,2	24,99	0	16,49	7,99
Energia al TLR da solare (L)	[kWh]	31,93	61,64	244,46	50,04	279,29	17,67
Frazione di energia all'utente da TLR	[%]	92,8%	76,5%	69,0%	100,0%	55,1%	93,4%
Frazione di energia all'utente da solare	[%]	7,2%	23,5%	31,0%	0,0%	44,9%	6,6%
Frazione energia solare inviata all'utente	[%]	22,6%	28,1%	8,6%	0,0%	5,2%	20,5%
Frazione energia solare immessa in rete	[%]	56,5%	63,6%	84,2%	77,9%	87,3%	45,3%
Frazione di energia solare dispersa	[%]	20,9%	8,3%	7,2%	22,1%	7,6%	34,3%

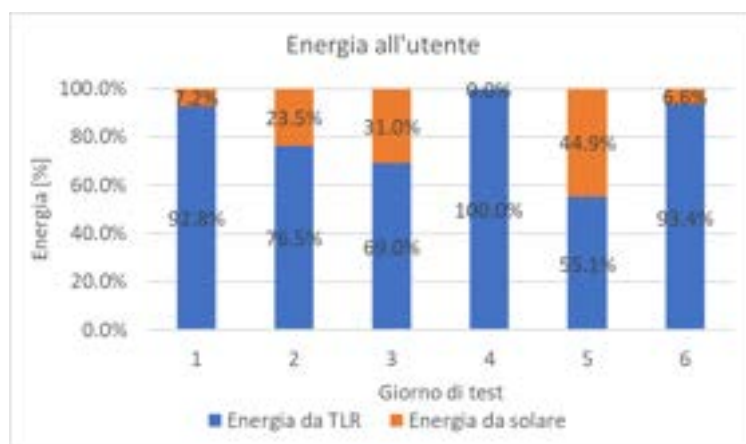


Figura 3.232. Sessione B1 - Percentuale di energia ceduta all'utente proveniente dal TLR (blu) e dal solare (arancione) rispetto all'energia totale ceduta all'utente

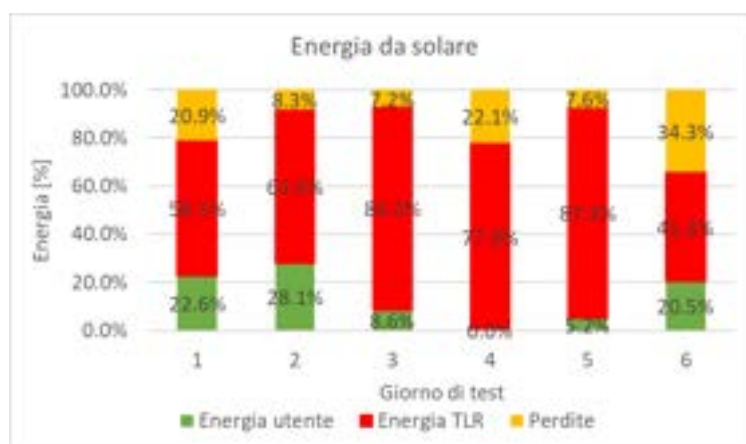


Figura 3.233. Sessione B1 - Percentuale di energia proveniente dal solare inviata all'utente (verde), immessa nella rete di TLR (rosso) e dispersa (giallo) rispetto all'energia totale prodotta dal campo solare

Nel seguito alcune considerazioni con riferimento alla Figura 3.232 e Figura 3.233 e alle tabelle precedenti:

- I giorni 1 e 6 sono giornate tipicamente invernali durante le quali si ha un'elevata richiesta da parte dell'utente per esigenze di riscaldamento e ACS e una bassa radiazione solare. Si verifica, quindi, che la richiesta dell'utente è soddisfatta principalmente dalla rete di TLR, rispettivamente per il 92,8% e 93,4%. In entrambi i giorni si ha una contemporaneità tra disponibilità di energia da solare, richieste da parte dell'utente e immissione nella rete di TLR, come si nota dalle distribuzioni percentuali di energia di Figura 3.233. Da notare che si ha per entrambi i giorni un valore di perdite termiche paragonabili e pari rispettivamente a circa 12 kWh e 13 kWh.
- I giorni 2 e 3 sono giornate primaverili con un buon andamento della radiazione solare e allo stesso tempo richieste termiche per riscaldamento e ACS da parte dell'edificio. In questi giorni si verifica che le richieste termiche dell'utente sono soddisfatte rispettivamente per il 76,5 % e 69% dalla rete di TLR e per il 23,5% e 31% dal solare. In particolare, il giorno 3 presenta una produzione da solare che è circa 3 volte superiore al giorno 2 e di conseguenza anche la frazione di energia solare ceduta all'edificio è superiore. In entrambi i casi parte dell'energia solare è immessa nella rete di TLR e rispettivamente il 63,6 % e 84,2% dell'energia totale prodotta da solare; sia per il giorno 2 che per il giorno 3 si ha anche un funzionamento contemporaneo degli scambiatori S2 ed S3. Da notare che si ha per il giorno 2 l'8,2% di perdite che corrisponde a 8,07 kWh e per il giorno 3 il 7,2% che corrisponde a 20.9 kWh
- I giorni 4 e 5 sono giornate estive per le quali non si hanno richieste di riscaldamento da parte dell'edificio, ma solo di ACS. Per il giorno 4 le richieste termiche dell'utente vengono soddisfatte esclusivamente dal TLR, mentre per il giorno 5 da entrambe le fonti considerate (55,1 % da TLR e 44,9 % da solare). Pur essendoci una produzione solare sufficiente per coprire il carico dell'utente, si ha comunque prelievo dalla rete data la non contemporaneità delle due. In entrambi i casi parte dell'energia solare è immessa nella rete di TLR e rispettivamente il 77,9 % e 87,3% dell'energia totale prodotta da solare. Da notare che si ha per il giorno 4 il 22% di perdite che corrisponde a 14 kWh e per il giorno 5 il 7,6% che corrisponde a 24 kWh.
- Dall'analisi dell'energia solare dispersa emerge che essa è costituita da una quota pressoché fissa e necessaria a portare il sistema nelle condizioni di caricamento dell'accumulo stesso (fase di preriscaldamento del circuito solare). Questa quota ha un valore comparabile per tutti i giorni di test, ovvero circa 5 kWh. A questa si aggiunge una quota variabile dipendente dalle condizioni di funzionamento dell'impianto solare (energia totale prodotta, temperatura ambiente, temperatura iniziale e finale dell'accumulo, contemporaneità tra disponibilità solare e richiesta da parte dell'utente) che tiene in conto del preriscaldamento dell'accumulo solare, dei vari contributi di perdite termiche caratteristici del circuito (perdite termiche dell'accumulo, del circuito tra accumulo e sottostazione e degli scambiatori) e dell'energia dispersa nella sottostazione o residua nell'accumulo per il non utilizzo da parte dell'utente (causate principalmente dalla circolazione di

fluido nella stessa quando vi è disponibilità solare, ma nessuna richiesta dell'utente e/o immissione in rete).

Le energie riportate nella Tabella 3.40, nonché le frazioni di energia riportate nelle Figura 3.232 e Figura 3.233 descritte precedentemente, sono state valutate considerando di utilizzare istantaneamente l'energia solare disponibile per soddisfare le richieste dell'utenza inviando il surplus nella rete di teleriscaldamento. Si può notare che, per alcuni giorni, si ha energia prodotta da solare ed immessa nella rete di teleriscaldamento pur potendo potenzialmente essere utilizzata per soddisfare parzialmente o totalmente le richieste giornaliere dell'utenza. Ciò accade a causa della non contemporaneità tra richiesta dell'utente e produzione da solare. Sulla base dei risultati ottenuti, ulteriori valutazioni sono state fatte in un'ipotesi di scambio sul posto termico giornaliero, così come descritto per i test della sessione A nel paragrafo 3.4.2.4. I risultati sono sintetizzati in Tabella 3.41 e Figura 3.234.

Tabella 3.41. Sessione B1 - Energia prelevata dalla rete di TLR e ceduta all'utente non proveniente da solare (secondario S1), energia ceduta all'utente proveniente da solare in regime di scambio sul posto, energia prodotta da solare immessa nella rete di TLR e non prelevata per soddisfare l'utente (energia residua al TLR da solare), frazione di energia all'utente da TLR e da solare in regime di scambio sul posto per i 6 giorni di test

Giorno di test		1	2	3	4	5	6
Giorno dell'anno		05 Gen	21 Mar	09 Apr	24 Mag	01 Ago	05 Nov
Energia all'utente da TLR (no solare)-lato US	[kWh]	131,77	26,66	0	0	0	94,73
Energia all'utente da solare - scambio sul posto	[kWh]	44,7	88,84	80,6	44,97	36,73	25,66
Energia residua al TLR da solare	[kWh]	0	0	188,85	5,07	259,05	0
Frazione di energia all'utente da TLR (no solare)	[%]	74,7%	23,1%	0,0%	0,0%	0,0%	78,7%
Frazione di energia all'utente da solare-scambio sul posto	[%]	25,3%	76,9%	100,0%	100,0%	100,0%	21,3%

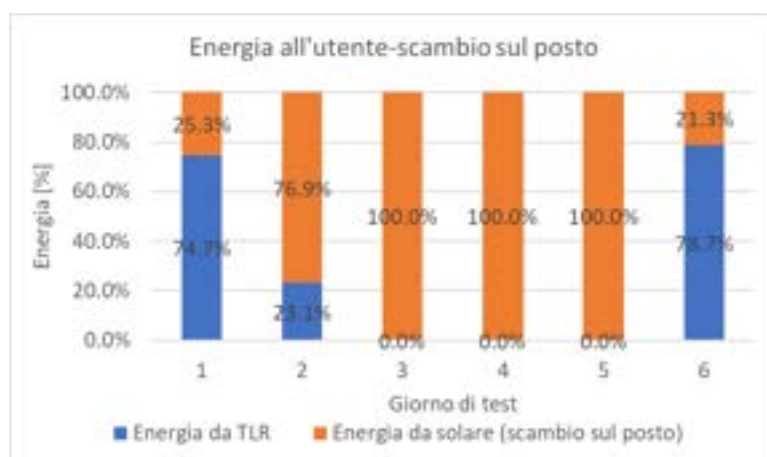


Figura 3.234. Sessione B1 - Percentuale di energia ceduta all'utente proveniente dal TLR (blu) e dal solare (arancione) rispetto all'energia totale ceduta all'utente calcolata in regime di scambio sul posto

Dall'analisi dei dati riportati in Tabella 3.41 e Figura 3.234 e confrontandoli con i dati di Tabella 3.40 e Figura 3.232 si può notare che:

- Per i giorni 1, 2 e 6 si nota un aumento rispettivamente del 18,1%, 53,4% e del 14,7% della frazione di energia all'utente da solare in regime di scambio sul posto rispetto al considerare solo quella istantaneamente autoconsumata. Inoltre, tutta l'energia da solare immessa nella rete di TLR viene prelevata nell'arco della giornata per soddisfare l'utente non si ha, quindi, energia residua al TLR da solare.
- Per i giorni 3, 4 e 5 la frazione di energia all'utente da solare arriva al 100% con un aumento rispettivamente del 69%, 100% e 55,1% rispetto al considerare solo quella istantaneamente

autoconsumata. Inoltre, per questi tre giorni si ha una parte di energia da solare immessa nella rete di TLR che non viene prelevata nell'arco della giornata per soddisfare l'utente pari rispettivamente a 188,9 kWh, 5,1 kWh e 259,1 kWh.

3.4.3.6 Fase 2

Il profilo di generazione termica utilizzato per i 6 giorni di test della fase 2 della sessione B è stato individuato a valle di un confronto con i colleghi ENEA coinvolti nella Linea di Attività riguardante lo sviluppo di strumenti di supporto alle decisioni aziendali per la promozione di pratiche e tecnologie per il recupero di calore a bassa temperatura in ambito industriale (Progetto 1.6 Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali, Linea di Attività 3.19). Sono stati in particolare analizzati i dati forniti ad ENEA dai soggetti obbligati alla realizzazione delle diagnosi energetiche (i.e. grandi aziende e aziende energivore), ai sensi dell'Art. 8 del D.Lgs. 102/2014 e s.m.i., allo scopo di caratterizzare i fabbisogni e gli usi termici dei settori oggetto di studio, inclusi gli interventi di recupero di calore, estrapolando informazioni relative ai più comuni abbinamenti fonte/vettore/pozzo di calore e anche alle tecnologie maggiormente utilizzate per ciascuna tipologia di intervento. Escluso il recupero da impianti di cogenerazione perché non necessariamente riconducibili ad un settore specifico, sono stati valutati i livelli di temperatura a cui il calore risulta disponibile e i relativi processi di generazione. Focalizzando l'attenzione sul settore caseario e sul processo di produzione del latte UHT, ad esempio, le fasi di pastorizzazione e sterilizzazione determinano ben quattro sorgenti di calore, a differenti condizioni di pressione e temperatura, ovvero le condense di vapore, l'acqua calda, il latte pastorizzato e UHT e l'esubero di latte. Si è pertanto ipotizzata la disponibilità di calore di scarto ad una temperatura di 75 °C (es. da raffreddamento del latte dopo il processo di sterilizzazione UHT), recuperabile attraverso uno scambiatore di calore per poter essere inviato alla sottostazione. Il secondario del tale scambiatore di recupero sarebbe idealmente collegato ai terminali 5 e 7 della sottostazione, con riferimento alla Figura 3.2. Considerando le efficienze tipiche di uno scambiatore, si può ragionevolmente ipotizzare di avere una temperatura in uscita dal secondario dello scambiatore di recupero pari a 73 °C. Tale valore coincide con il valore di temperatura in ingresso alla sottostazione in 5 (e quindi in ingresso allo scambiatore S2 o S3). In base a quelle che sono le potenzialità della sottostazione, si ipotizza di avere una potenza recuperabile di 55 kW e disponibile per 7 ore al giorno, ovvero dalle 7:00 alle 14:00. Sulla base delle considerazioni riportate nel paragrafo 3.4.3.1 sulle prestazioni dello scambiatore S3 e considerando una portata nel circuito 5-7 della sottostazione pari a 3 m³/h, si avrebbe una temperatura di uscita dal primario dello scambiatore S3, e quindi in ingresso al secondario dello scambiatore di recupero, pari a circa 57 °C indipendentemente dalla potenza scambiata in S3. In Tabella 3.42 sono sintetizzate le condizioni di funzionamento previste per lo scambiatore di recupero idealmente installato nel caseificio.

Tabella 3.42. Condizioni di funzionamento di design scambiatore di recupero

	T _{in} [°C]	T _{out} [°C]	M [m ³ /h]	P [kW]
Primario scambiatore di recupero (collegamento con processo industriale)	75	59	3	55,83
Secondario scambiatore di recupero (collegamento con sottostazione in 5-7)	57	73	3	55,83

La potenza in ingresso alla sottostazione potrà essere in parte inviata all'utente tramite lo scambiatore S2 (se ci sono richieste), e in parte (o completamente) immessa nella rete di TLR tramite lo scambiatore S3. Si sottolinea infine come le ipotesi fatte sui livelli di temperatura e sui profili orari di disponibilità sono allineate con altri studi presenti in letteratura, dove vengono descritti i processi di lavorazione del latte conferito in azienda, inclusa la pastorizzazione, definita come l'operazione a più alta intensità energetica realizzata attraverso uno scambiatore di calore a piastre che lavora in continuo a 90-95 °C con tecnologia High Temperature/Short Time [11]. In relazione ai tempi di lavorazione, si rileva un consumo piuttosto continuo nel corso dell'anno, per circa 5-8 ore giornaliere a partire dalle 7:00-8:00 [12].

3.4.3.7 Fase 2 - Giorno 1

Il giorno di test 1 è il 05/01 per il quale sono presenti richieste di ACS e riscaldamento da parte dell'utente, rientrando nel periodo di riscaldamento.

In Figura 3.235 viene mostrato, nel grafico inferiore, in nero il comando di avvio della sottostazione per richiesta da parte dell'utente sia per riscaldamento che per ACS, in verde le richieste di caricamento dell'accumulo di ACS e in arancione la disponibilità di calore di scarto (i.e. WH Waste Heat) dal processo considerato che può essere utilizzata dalla sottostazione. Nel grafico superiore si riporta in magenta la potenza termica fornita dallo scambiatore S1 e in rosso quella fornita dallo scambiatore S2 per soddisfare le richieste termiche. Nel grafico centrale si riporta in viola la potenza termica fornita dallo scambiatore S3 alla rete di teleriscaldamento.

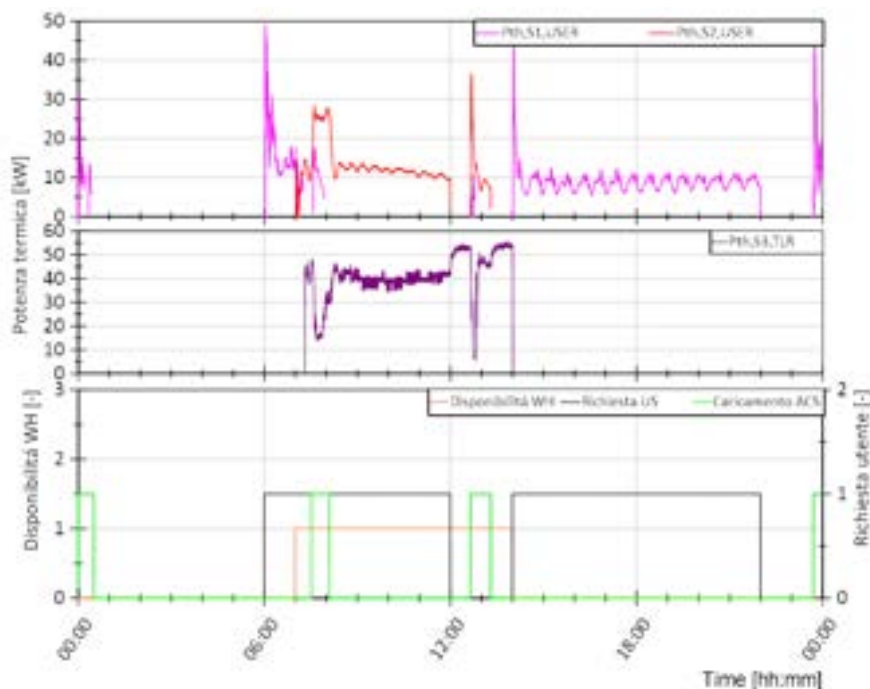


Figura 3.235. Sessione B2, Giorno 1. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità di calore di scarto (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

Dal confronto tra i tre grafici si può notare che le richieste termiche dell'utente sono soddisfatte sia dallo scambiatore S1 (rete di TLR) che dallo scambiatore S2 (calore di scarto). Il profilo di carico utente è analogo a quanto esposto per il giorno 1 della sessione B1. La disponibilità di calore di scarto è in parte contemporanea alla richiesta termica dell'utente: tramite lo scambiatore S2, parte della richiesta termica dell'utente è soddisfatta dal calore di scarto e ciò avviene tra le 07:00 e le 13:30 circa. La restante disponibilità di calore di scarto viene immessa nella rete di TLR tramite lo scambiatore S3 per il quale si registra un funzionamento principalmente continuo. In Figura 3.236 viene riportato un ingrandimento della Figura 3.235 al fine di visualizzare in dettaglio le ore di funzionamento degli scambiatori S2 ed S3. Si verifica un funzionamento contemporaneo di S2 ed S3 per la gran parte del periodo di disponibilità di calore di scarto, con una distribuzione di potenza diversa a seconda delle richieste da parte dell'utente a fronte di una disponibilità di calore di scarto di circa 55 kW: ad una maggiore richiesta da parte dell'utente (S2) corrisponde una minore potenza immessa nella rete di TLR (S3) e viceversa. Si può notare come nei momenti in cui non si ha richiesta da parte dell'utente la potenza immessa in rete di TLR da S3 è di circa 55 kW che corrisponde alla disponibilità di calore di scarto considerata per questi test.

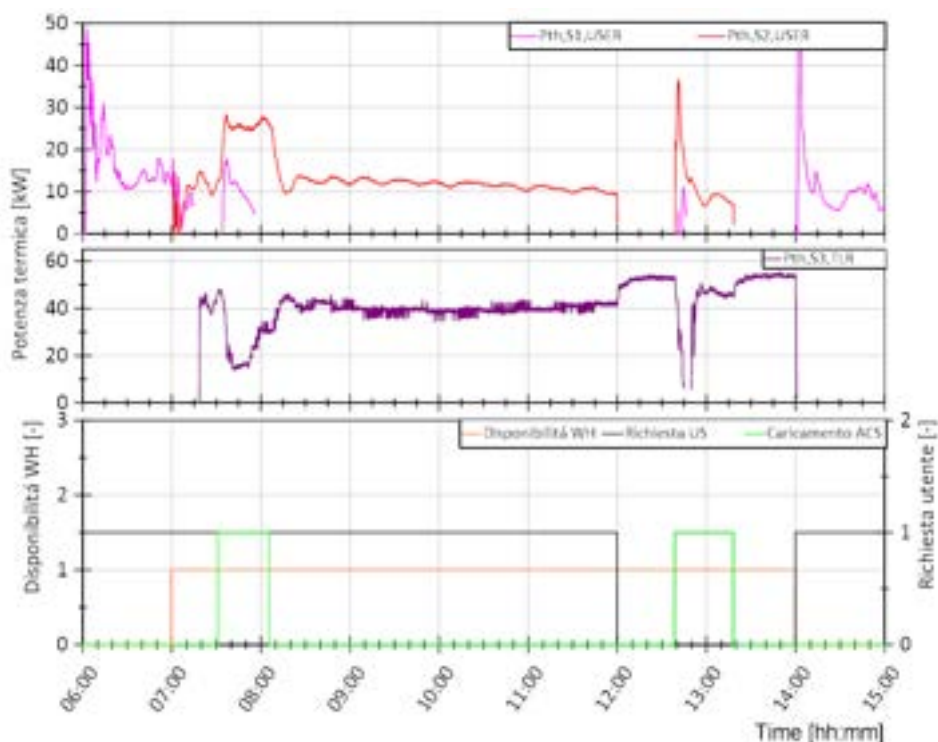


Figura 3.236. Sessione B2, Giorno 1 - Dettaglio. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità di calore di scarto (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

Si riportano nel seguito gli andamenti delle temperature di ingresso e uscita al primario e al secondario degli scambiatori S1, S2 ed S3 e le portate quando questi sono in funzione (Figura 3.237-Figura 3.239). In particolare per gli scambiatori S2 ed S3 si utilizza una scala temporale basata sui momenti di funzionamento al fine di facilitarne la lettura.

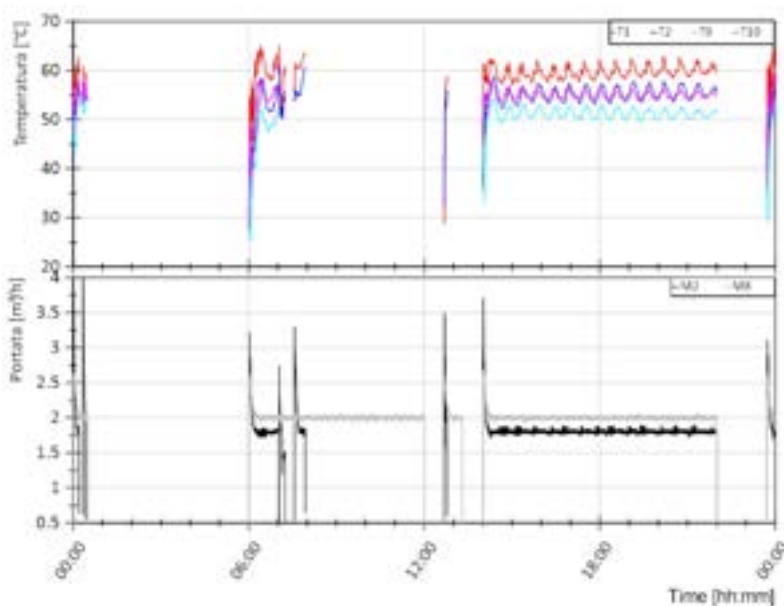


Figura 3.237. Sessione B2, Giorno 1. Andamento delle temperature lato teleriscaldamento (mandata dal teleriscaldamento T1, ritorno al teleriscaldamento T2) e lato utenza (uscita dallo scambiatore S2 T9, mandata all'utenza T10) dello scambiatore S1 (grafico superiore), andamento della portata lato teleriscaldamento (M2) e lato utenza (M8) dello scambiatore S1 (grafico inferiore)

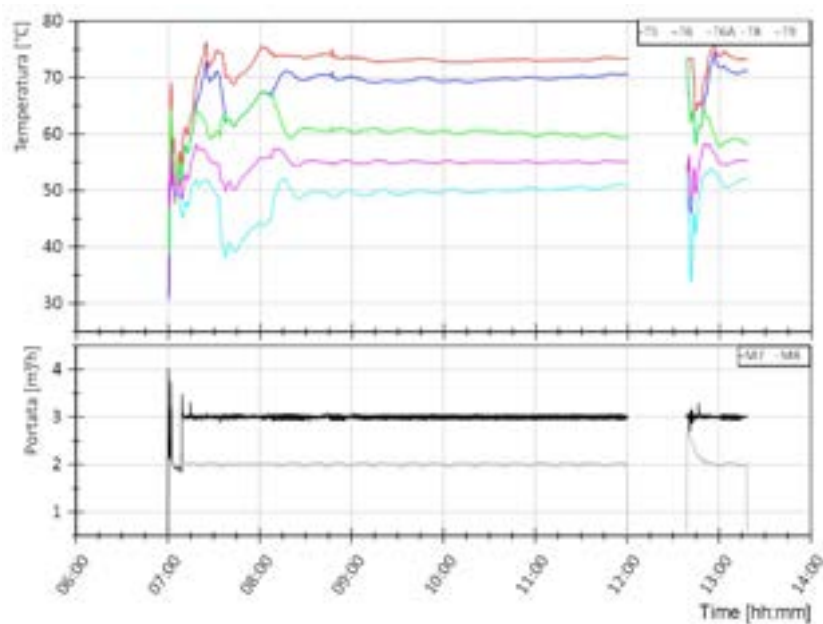


Figura 3.238. Sessione B2, Giorno 1 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (mandata dal sistema di generazione T5, ritorno al sistema di generazione T6 e uscita scambiatore S2 T6A) e lato utenza (ritorno dall'utenza T8, mandata all'utenza T9) dello scambiatore S2 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato utenza (M8) dello scambiatore S2 (grafico inferiore)

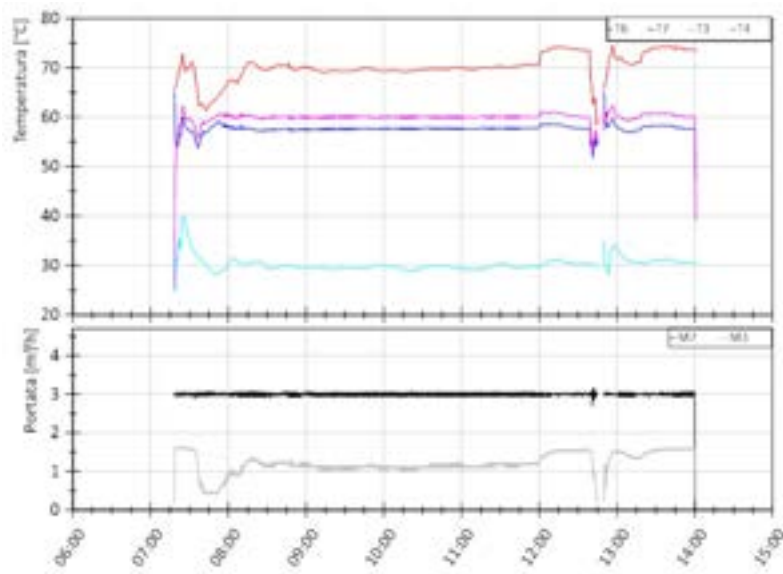


Figura 3.239. Sessione B2, Giorno 1 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (ingresso scambiatore S3 T6 e ritorno al sistema di generazione T7) e lato TLR (ritorno dal TLR T3, mandata al TLR T4) dello scambiatore S3 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato TLR (M3) dello scambiatore S3 (grafico inferiore)

I tre grafici di cui sopra riportanti le temperature e le portate nei tre scambiatori mettono in luce alcune caratteristiche relative ai controlli di temperatura e portata sia della test facility che della sottostazione, così come esposto nella descrizione dei test eseguiti nella sessione A.

Nel seguito si riportano alcune considerazioni riguardo il controllo di temperatura da parte della test facility in T1, T5 e T8 e il controllo di temperatura da parte della sottostazione in T4 e T10. Il funzionamento di tali controllo è paragonabile a quanto osservato per i test della sessione A. Si rimanda, quindi, alla descrizione dei giorni di test della sessione A per maggiore dettagli, con particolare riferimento ai giorni 1 e 2.

Con riferimento alla Figura 3.240 si può notare come l'andamento del valore misurato T1 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa $\pm 2^{\circ}\text{C}$ quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento o caricamento dell'accumulo di ACS. Così come descritto nel seguito, tali oscillazioni non compromettono il soddisfacimento delle richieste termiche dell'utente.

Con riferimento alla Figura 3.241 si può notare come l'andamento del valore misurato T5 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa $\pm 5^{\circ}\text{C}$ quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento. Si registra, comunque, una differenza minore di $\pm 1^{\circ}\text{C}$ rispetto al valore di riferimento di 73°C (valore di temperatura a cui è disponibile il calore di scarto nel processo considerato) per la gran parte del tempo.

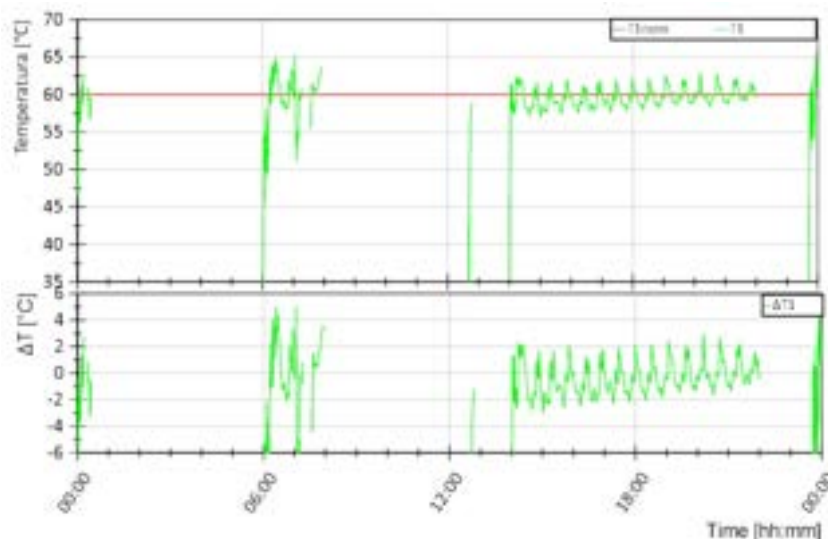


Figura 3.240. Sessione B2, Giornata 1. Andamento della temperatura di mandata dal teleriscaldamento T1 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T1nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

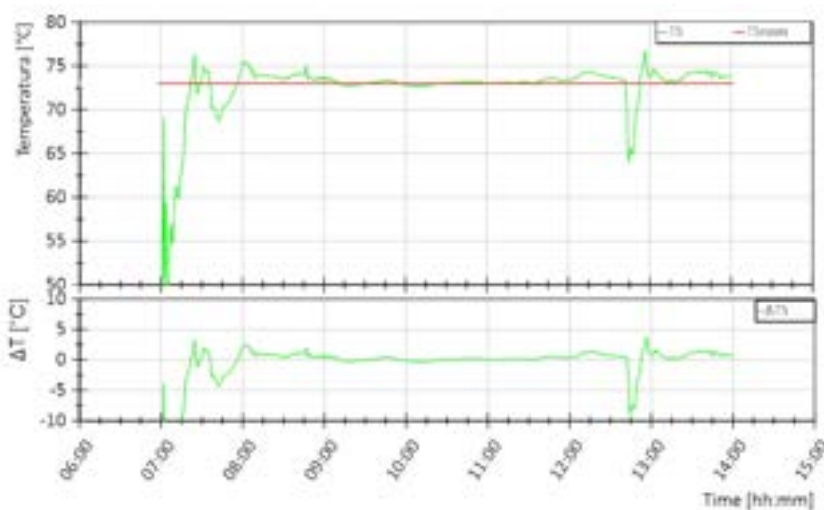


Figura 3.241. Sessione B2, Giornata 1 - Dettaglio. Andamento della temperatura di mandata dal sistema di generazione T5 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T5nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

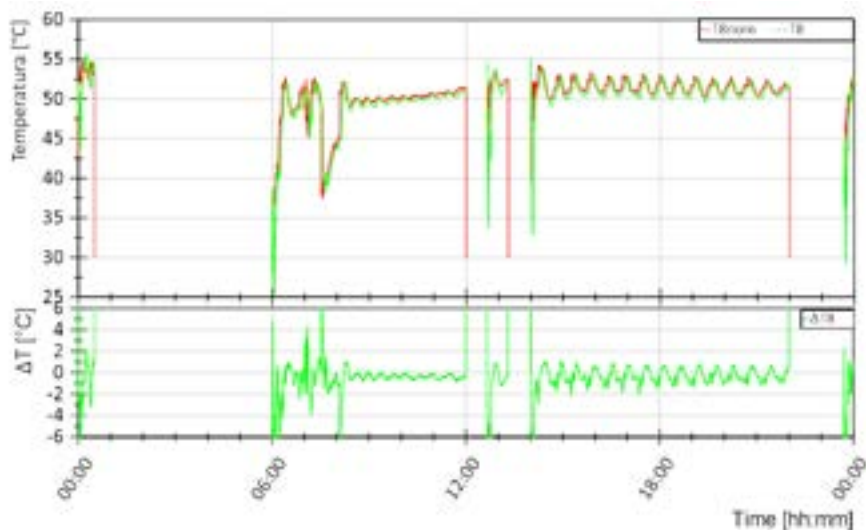


Figura 3.242. Sessione B2, Giorno 1. Andamento della temperatura di ritorno dall'utenza T8 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T8nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore).

Con riferimento alla Figura 3.243 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T10nom e il valore misurato T10 sia inferiore a $\pm 2^{\circ}\text{C}$ per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T10 da parte della sottostazione che deve garantire 55°C all'utente al fine di soddisfarne le richieste termiche.

Con riferimento alla Figura 3.244 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T4nom e il valore misurato T4 sia inferiore a $\pm 1^{\circ}\text{C}$ per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T4 da parte della sottostazione.

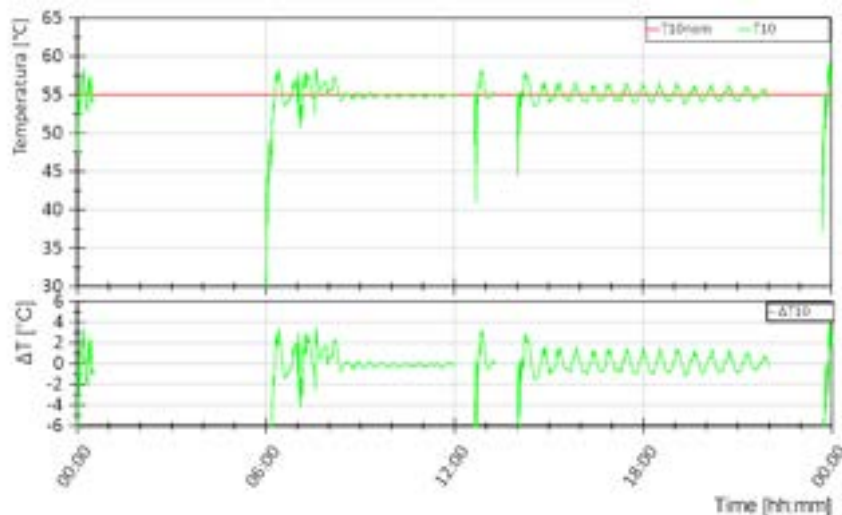


Figura 3.243. Sessione B2, Giorno 1. Andamento della temperatura di mandata all'utenza T10 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T10nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

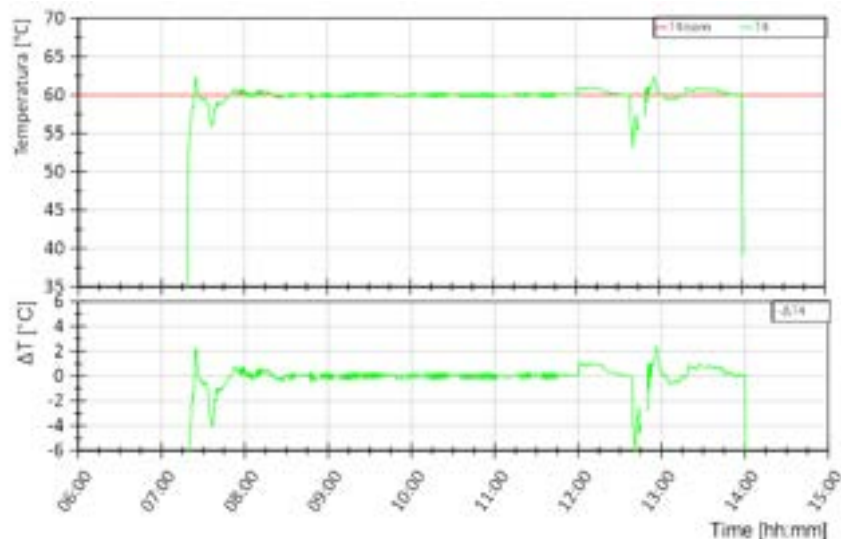


Figura 3.244. Sessione B2, Giorno 1 - Dettaglio. Andamento della temperatura di immissione in rete T4 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T4nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

In Figura 3.245 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio e la temperatura ambiente e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo di ACS (in grigio) nonché la portata di caricamento (in arancione) e di ricircolo (in blu). Si può notare dal grafico superiore come la temperatura all'interno degli appartamenti sia tenuta essenzialmente sopra i 18 °C durante le ore di riscaldamento. Inoltre, dalla Figura 3.246 risulta che la valvola miscelatrice presente nel modello riesce a controllare la temperatura di mandata al riscaldamento secondo curva climatica teorica per la gran parte del tempo, nonostante le oscillazioni che si hanno all'avviamento in T1 e T5. Si verifica solo all'avviamento delle 6:00 che per 15 minuti circa la sottostazione non riesce a soddisfare la richiesta dell'utente a causa sia di una bassa temperatura T1 che di limiti di potenza dello scambiatore S1. Per quanto riguarda l'ACS, si può notare come la temperatura dell'accumulo aumenta ogni qualvolta avviene una carica, fino a raggiungere i 53 °C, e diminuisce per effetto delle perdite termiche o richiesta da parte dell'utente che si verifica in corrispondenza di una portata di ricircolo maggiore di 0,27 m³/h.

In Figura 3.247 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature di mandata e di ritorno del calore di scarto e la relativa portata. Da notare che tali grandezze corrispondono rispettivamente alla temperatura T5 e T7 della sottostazione e alla portata M7. Da queste grandezze è possibile, quindi, ricavare la potenza disponibile da calore di scarto in ingresso alla sottostazione riportata nel grafico inferiore (curva in grigio). Nello stesso grafico viene anche mostrato come si distribuisce nel tempo la disponibilità di calore di scarto tra gli scambiatori S2 ed S3 (curva in blu e rosso rispettivamente). Nel caso in esame, non appena si ha disponibilità di calore di scarto si avvia lo scambiatore S2; lo scambiatore S3 si avvia poco dopo in seguito al raggiungimento della temperatura di riferimento in T5 (73 °C), indice che le dinamicità di avviamento si sono esaurite. La potenza da calore di scarto varia mediamente tra circa 52 kW e 55 kW, raggiungendo anche picchi di 60 kW: questo dipende principalmente dal controllo di temperatura in T5, ovvero la temperatura di mandata del calore di scarto (Tsupp_WH nel grafico). Si può notare come la temperatura di ritorno da calore di scarto (Tret_WH nel grafico) sia per lo più stabile e intorno ai 57 °C, così come anche la portata (F_WH), per tutta la durata del profilo. Ciò che subisce maggiori variazioni è la temperatura T5 che va quindi ad influenzare le prestazioni degli scambiatori S2 ed S3 e quindi la quantità di calore di scarto utilizzata dalla sottostazione.

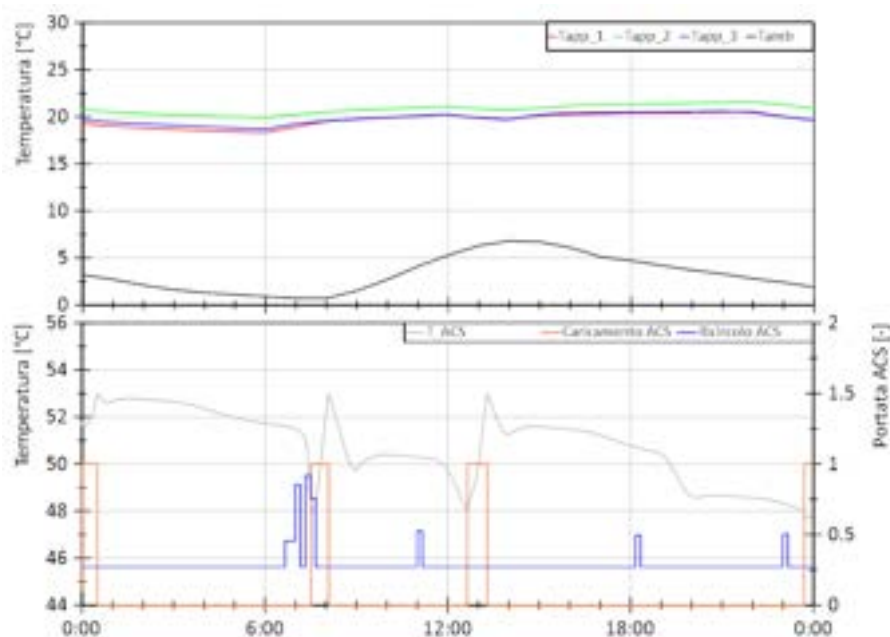


Figura 3.245. Sessione B2, Giorno 1. Andamento della temperatura in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio (curve in blu, verde e rosso del grafico superiore) e temperatura esterna (curva in nero grafico superiore), andamento della temperatura nell'accumulo di ACS e portata di caricamento e ricircolo dell'accumulo di ACS (rispettivamente curva un grigio, in arancione e in blu del grafico inferiore)

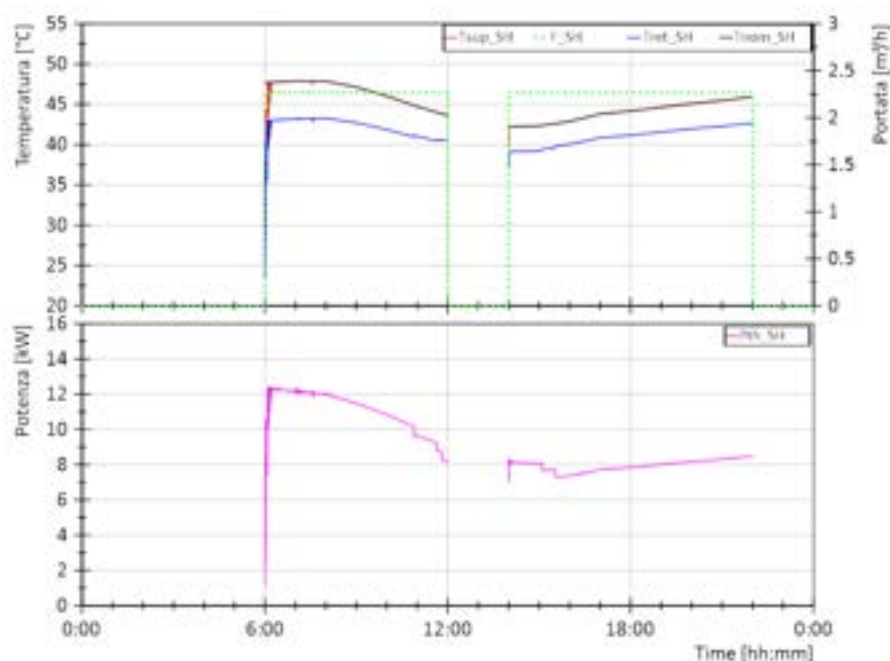


Figura 3.246. Sessione B2, Giorno 1. Andamento della temperatura di mandata e ritorno e portata nel circuito di riscaldamento (curva in rosso, blu e tratteggiata verde nel grafico superiore rispettivamente) e andamento della temperatura di mandata al riscaldamento di riferimento (curva in nero), andamento della potenza termica per riscaldamento (curva in magenta grafico inferiore)

Inoltre, confrontando i grafici di Figura 3.247 e Figura 3.236, è interessante notare come la temperatura di ritorno del calore di scarto (che corrisponde alla temperatura in uscita dallo scambiatore S3), sia sempre intorno ai 57 °C (escludendo le oscillazioni durante gli avviamenti) per diversi valori di potenza termica scambiata in S3, ovvero 20 kW, 40 kW e 55 kW, andando a confermare quanto ottenuto dai test preliminari dello scambiatore S3.

In Tabella 3.43 si riporta l'energia termica al primario e al secondario dei diversi scambiatori e le relative efficienze per la prova considerata

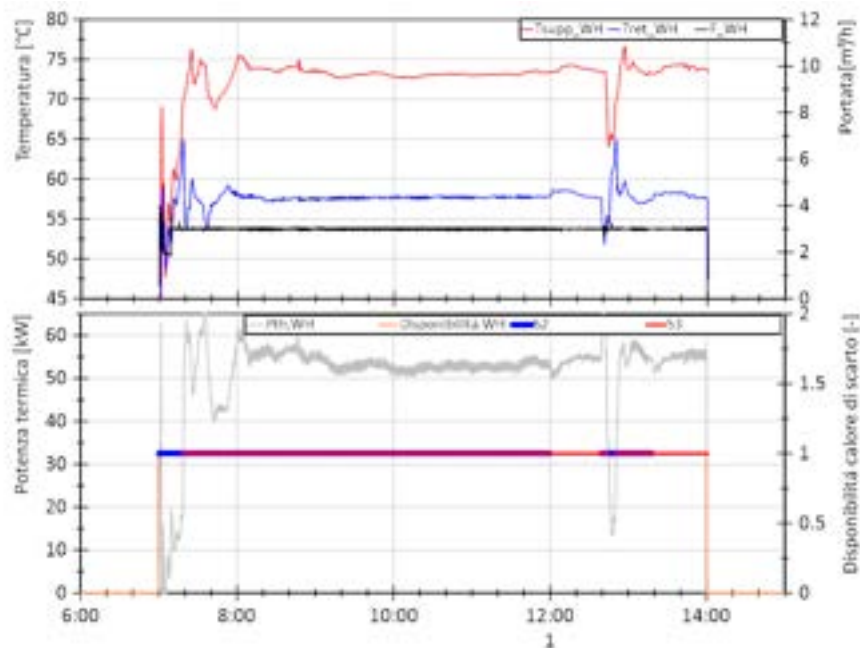


Figura 3.247. Sessione B2, Giorno 1 - Dettaglio. Andamento della temperatura di mandata, ritorno e la portata (rispettivamente curva in rosso, blu e nero del grafico superiore) del calore di scarto, andamento della potenza da calore di scarto in ingresso alla sottostazione e intervallo di disponibilità (curva in arancione) e utilizzo da parte dello scambiatore S2 e S3 (rispettivamente curva in blu e rosso del grafico inferiore)

Tabella 3.43. Sessione B2, Giorno 1. Energie termiche al primario (lato teleriscaldamento, TLR, o sistema di generazione, GEN) e al secondario (lato teleriscaldamento, TLR, o utente, US) dei diversi scambiatori della sottostazione e relative efficienze

Eth,S1,TLR [kWh]	Eth,S1,US [kWh]	η_{S1} [%]	Eth,S2,GEN [kWh]	Eth,S2,US [kWh]	η_{S2} [%]	Eth,S3,GEN [kWh]	Eth,S3,US [kWh]	η_{S3} [%]
106,84	102,26	96%	73,82	73,36	99%	284,29	274,82	97%

3.4.3.8 Fase 2 - Giorno 3

Il giorno di test 3 è il 09/04 per il quale sono presenti richieste di ACS e riscaldamento da parte dell'utente, rientrando nel periodo di riscaldamento.

In Figura 3.248 viene mostrato, nel grafico inferiore, in nero il comando di avvio della sottostazione per richiesta da parte dell'utente sia per riscaldamento che per ACS, in verde le richieste di caricamento dell'accumulo di ACS e in arancione la disponibilità di calore di scarto dal processo considerato che può essere utilizzata dalla sottostazione. Nel grafico superiore si riporta in magenta la potenza termica fornita dallo scambiatore S1 e in rosso quella fornita dallo scambiatore S2 per soddisfare le richieste termiche. Nel grafico centrale si riporta in viola la potenza termica fornita dallo scambiatore S3 alla rete di teleriscaldamento.

Dal confronto tra i tre grafici si può notare che le richieste termiche dell'utente sono soddisfatte sia dallo scambiatore S1 (rete di TLR) che dallo scambiatore S2 (calore di scarto). Il profilo di carico utente è analogo a quanto esposto per il giorno 3 della sessione B1. La disponibilità di calore di scarto è in parte contemporanea alla richiesta termica dell'utente: tramite lo scambiatore S2, parte della richiesta termica dell'utente è soddisfatta dal calore di scarto e ciò avviene tra le 07:00 e le 14:00 circa. La restante disponibilità di calore di scarto viene immessa nella rete di TLR tramite lo scambiatore S3 per il quale si registra un

funzionamento principalmente continuo. In Figura 3.249 viene riportato un ingrandimento della Figura 3.248 al fine di visualizzare in dettaglio le ore di funzionamento degli scambiatori S2 ed S3. Si verifica un funzionamento contemporaneo di S2 ed S3 per la gran parte del periodo di disponibilità di calore di scarto, con una distribuzione di potenza diversa a seconda delle richieste da parte dell'utente, a fronte di una disponibilità di calore di scarto di circa 55 kW: ad una maggiore richiesta da parte dell'utente (S2) corrisponde una minore potenza immessa nella rete di TLR (S3) e viceversa. Si può notare come nei momenti in cui non si ha richiesta da parte dell'utente la potenza immessa in rete di TLR da S3 è di circa 55 kW che corrisponde alla disponibilità di calore di scarto considerata per questi test.

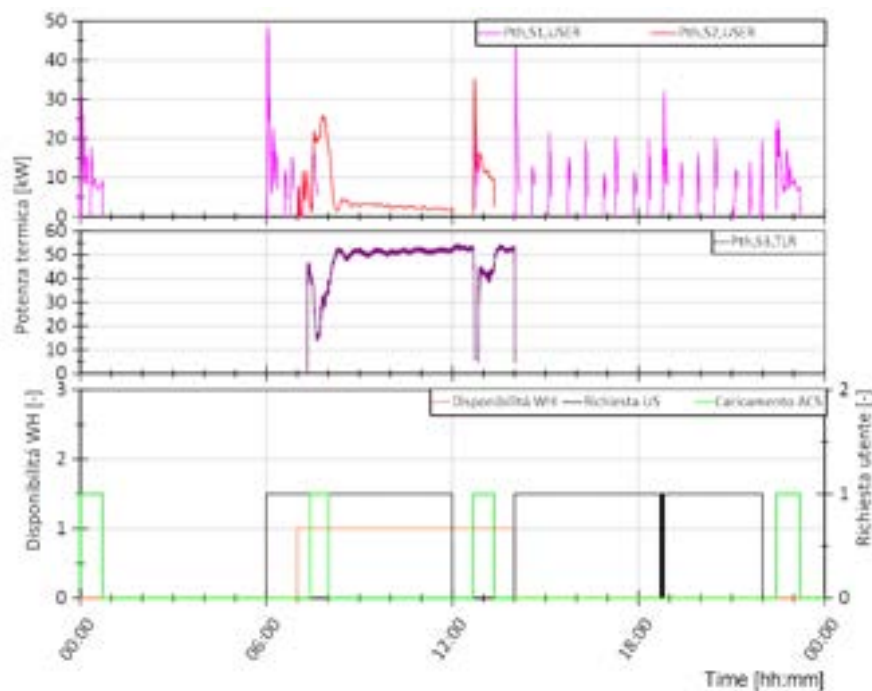


Figura 3.248. Sessione B2, Giorno 3. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità di calore di scarto (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

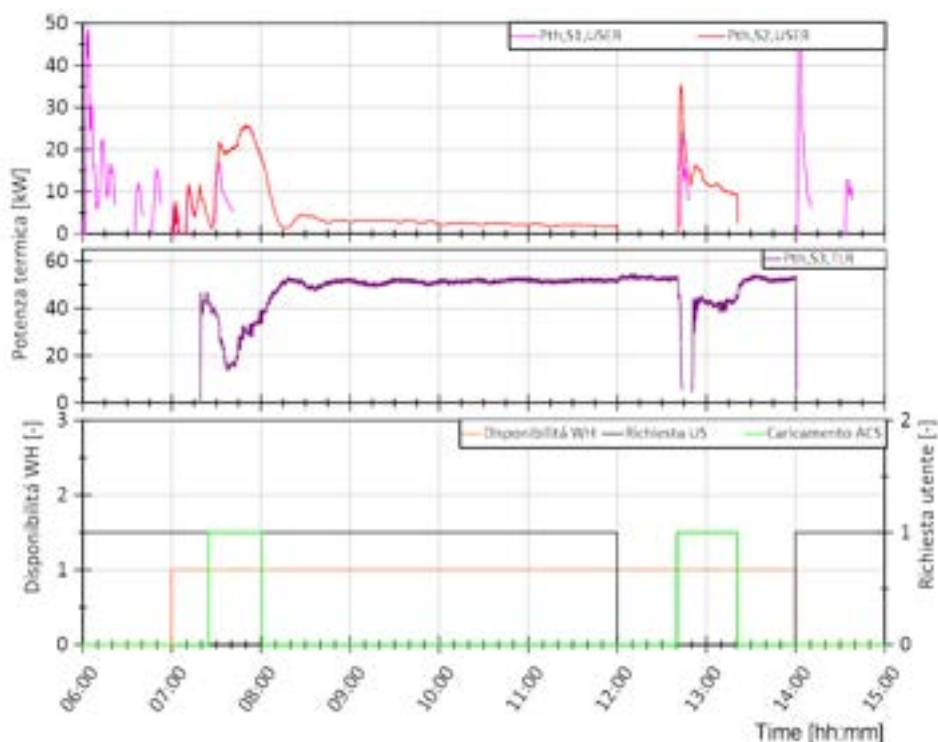


Figura 3.249. Sessione B2, Giorno 3 - Dettaglio. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità di calore di scarto (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

Si riportano nel seguito gli andamenti delle temperature di ingresso e uscita al primario e al secondario degli scambiatori S1, S2 ed S3 e le portate quando questi sono in funzione (Figura 3.250-Figura 3.252). In particolare per gli scambiatori S2 ed S3 si utilizza una scala temporale basata sui momenti di funzionamento al fine di facilitarne la lettura.

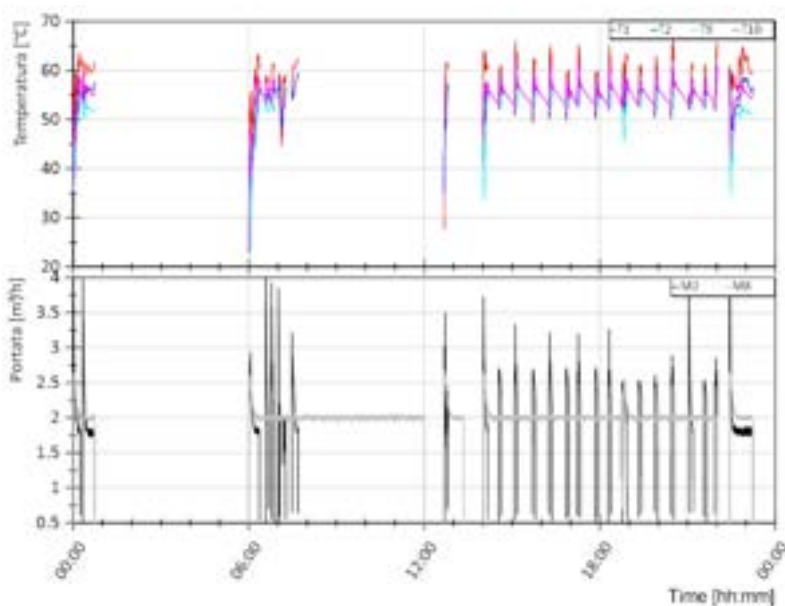


Figura 3.250. Sessione B2, Giorno 3. Andamento delle temperature lato teleriscaldamento (mandata dal teleriscaldamento T1, ritorno al teleriscaldamento T2) e lato utenza (uscita dallo scambiatore S2 T9, mandata all'utenza T10) dello scambiatore S1 (grafico superiore), andamento della portata lato teleriscaldamento (M2) e lato utenza (M8) dello scambiatore S1 (grafico inferiore)

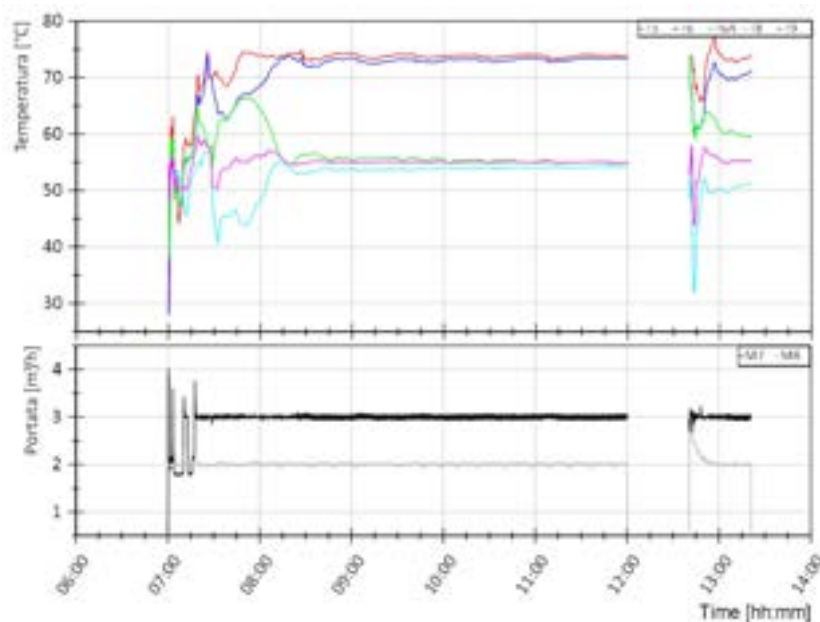


Figura 3.251. Sessione B2, Giorno 3 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (mandata dal sistema di generazione T5, ritorno al sistema di generazione T6 e uscita scambiatore S2 T6A) e lato utenza (ritorno dall'utenza T8, mandata all'utenza T9) dello scambiatore S2 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato utenza (M8) dello scambiatore S2 (grafico inferiore)

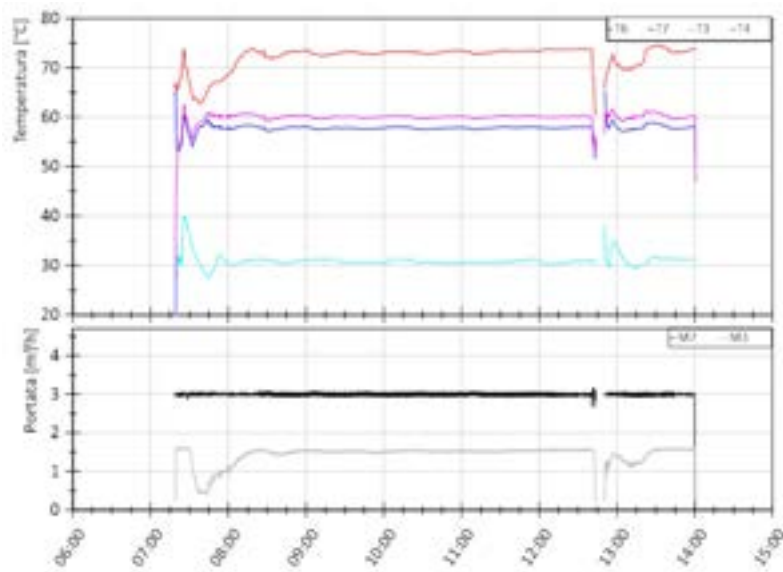


Figura 3.252. Sessione B2, Giorno 3 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (Ingresso scambiatore S3 T6 e ritorno al sistema di generazione T7) e lato TLR (ritorno dal TLR T3, mandata al TLR T4) dello scambiatore S3 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato TLR (M3) dello scambiatore S3 (grafico inferiore)

I tre grafici di cui sopra riportanti le temperature e le portate nei tre scambiatori mettono in luce alcune caratteristiche relative ai controlli di temperatura e portata sia della test facility che della sottostazione, così come esposto nella descrizione dei test eseguiti nella sessione A.

Nel seguito si riportano alcune considerazioni riguardo il controllo di temperatura da parte della test facility in T1, T5 e T8 e il controllo di temperatura da parte della sottostazione in T4 e T10. Il funzionamento di tali controllo è paragonabile a quanto osservato per i test della sessione A. Si rimanda, quindi, alla descrizione dei giorni di test della sessione A per maggiori dettagli, con particolare riferimento ai giorni 1 e 2.

Con riferimento alla Figura 3.253 si può notare come l'andamento del valore misurato T1 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa $\pm 2^\circ\text{C}$ quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento o caricamento dell'accumulo di ACS. Inoltre, si registra un funzionamento principalmente intermittente di S1 per le stesse motivazioni esposte nella descrizione dei giorni 3 della sessione B1: tale intermittenza è strettamente legata alle oscillazioni che si hanno anche nelle temperature T1 e T10 (illustrata nella Figura 3.256). Così come descritto nel seguito, tali oscillazioni non compromettono il soddisfacimento delle richieste termiche dell'utente.

Con riferimento alla Figura 3.254 si può notare come l'andamento del valore misurato T5 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa $\pm 5^\circ\text{C}$ quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento. Si registra, comunque, una differenza minore di $\pm 1^\circ\text{C}$ rispetto al valore di riferimento di 73°C (valore di temperatura a cui è disponibile il calore di scarto nel processo considerato) per la gran parte del tempo.

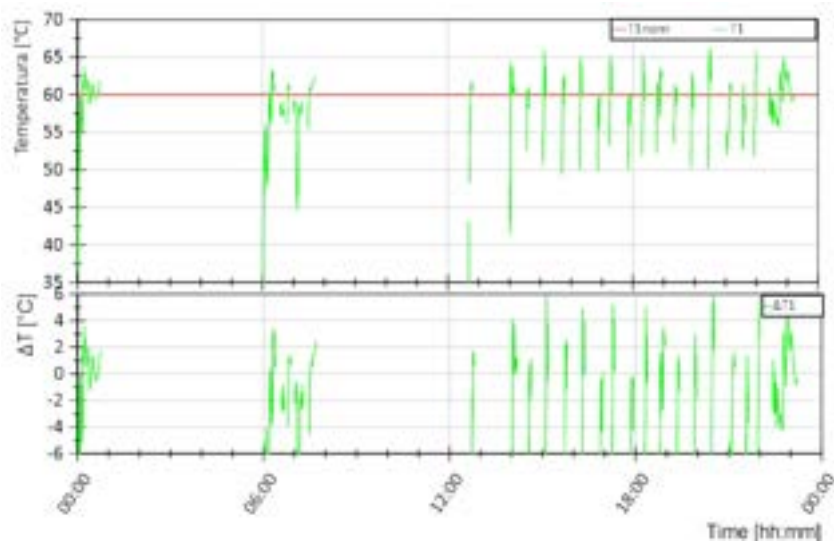


Figura 3.253. Sessione B2, Giorno 3. Andamento della temperatura di mandata dal teleriscaldamento T1 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T1nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

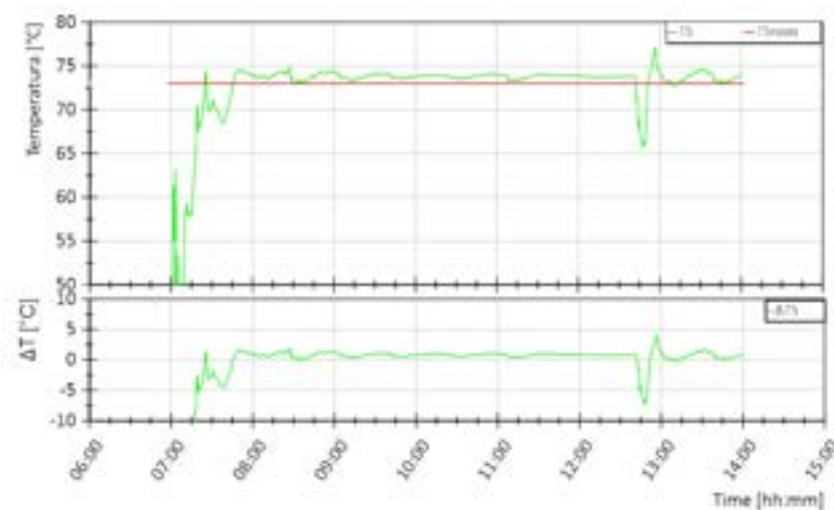


Figura 3.254. Sessione B2, Giorno 3 - Dettaglio. Andamento della temperatura di mandata dal sistema di generazione T5 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T5nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

Con riferimento alla Figura 3.256 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T10nom e il valore misurato T10 sia inferiore a ± 2 °C per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T10 da parte della sottostazione che deve garantire 55 °C all'utente al fine di soddisfarne le richieste termiche.

Con riferimento alla Figura 3.257 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T4nom e il valore misurato T4 sia inferiore a ± 1 °C per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T4 da parte della sottostazione.

In Figura 3.258 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio e la temperatura ambiente e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo di ACS (in grigio) nonché la portata di caricamento (in arancione) e di ricircolo (in blu). Si può notare dal grafico superiore come la temperatura all'interno degli appartamenti sia tenuta essenzialmente sopra i 20 °C durante le ore di riscaldamento. Inoltre, dalla Figura 3.259 risulta che la valvola miscelatrice presente nel modello riesce a controllare la temperatura di mandata al riscaldamento secondo curva climatica teorica, nonostante le oscillazioni che si hanno all'avviamento in T1 e T5 e al funzionamento intermittente di S1. Per quanto riguarda l'ACS, si può notare come la temperatura dell'accumulo aumenta ogni qualvolta avviene una carica, fino a raggiungere i 53 °C, e diminuisce per effetto delle perdite termiche o richiesta da parte dell'utente che si verifica in corrispondenza di una portata di ricircolo maggiore di 0,27 m³/h.

In Figura 3.260 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature di mandata e di ritorno del calore di scarto e la relativa portata. Da notare che tali grandezze corrispondono rispettivamente alla temperatura T5 e T7 della sottostazione e alla portata M7. Da queste grandezze è possibile, quindi, ricavare la potenza disponibile da calore di scarto in ingresso alla sottostazione riportata nel grafico inferiore (curva in grigio). Nello stesso grafico viene anche mostrato come si distribuisce nel tempo la disponibilità di calore di scarto tra gli scambiatori S2 ed S3 (curva in blu e rosso rispettivamente). Nel caso in esame, non appena si ha disponibilità di calore di scarto si avvia lo scambiatore S2. Lo scambiatore S3 si avvia poco dopo in seguito al raggiungimento della temperatura di riferimento in T5 (73 °C), indice che le dinamicità di avviamento si sono esaurite. La potenza da calore di scarto varia mediamente tra circa 52 kW e 55 kW, raggiungendo anche picchi di 60 kW. Gli andamenti delle temperature sono simili a quanto descritto per il giorno 1 sessione B2 al quale si rimanda per ulteriori dettagli.

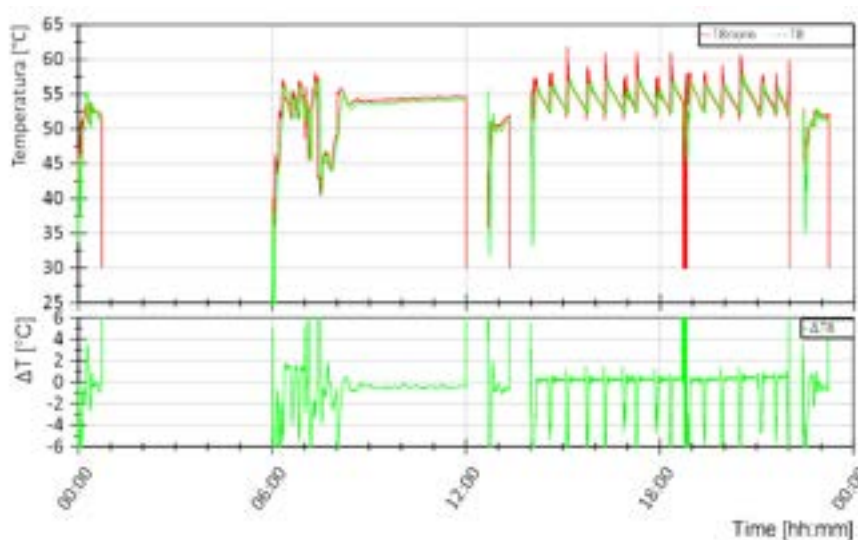


Figura 3.255. Sessione B2, Giorno 3. Andamento della temperatura di ritorno dall'utenza T8 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T8nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

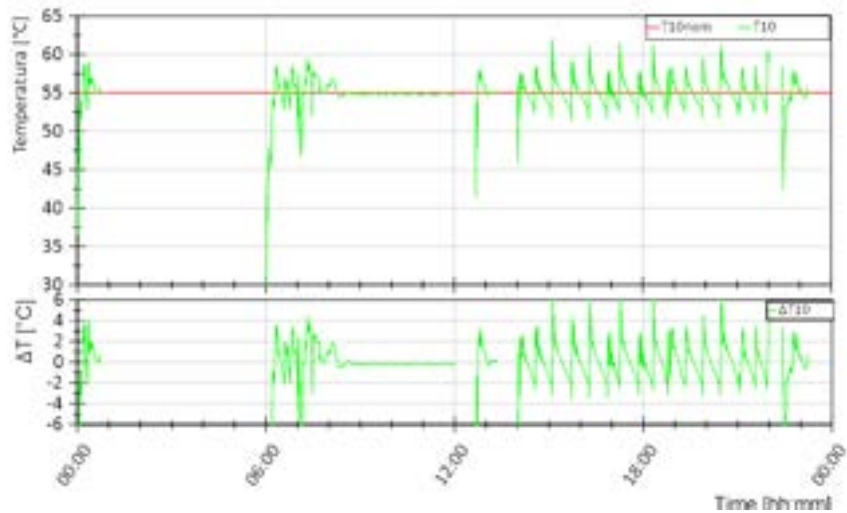


Figura 3.256. Sessione B2, Giorno 3. Andamento della temperatura di mandata all'utenza T10 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T10nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

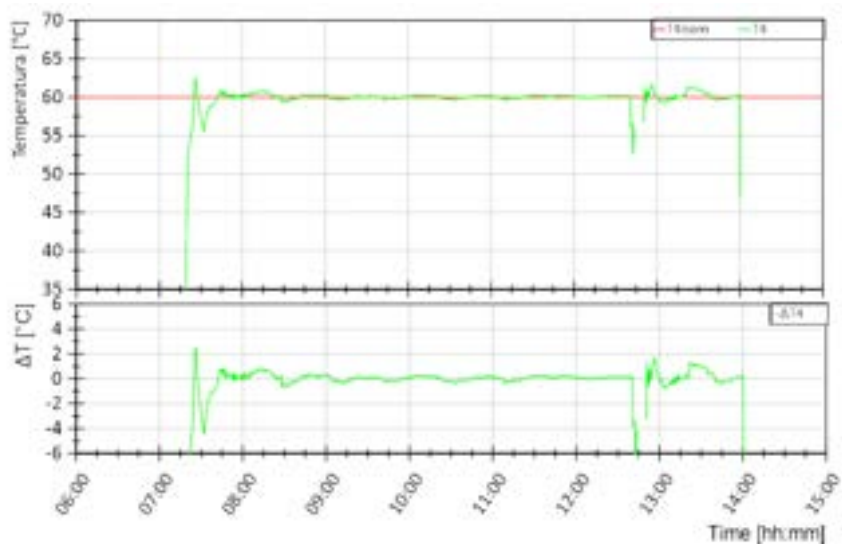


Figura 3.257. Sessione B2, Giorno 3 - Dettaglio. Andamento della temperatura di immissione in rete T4 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T4nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

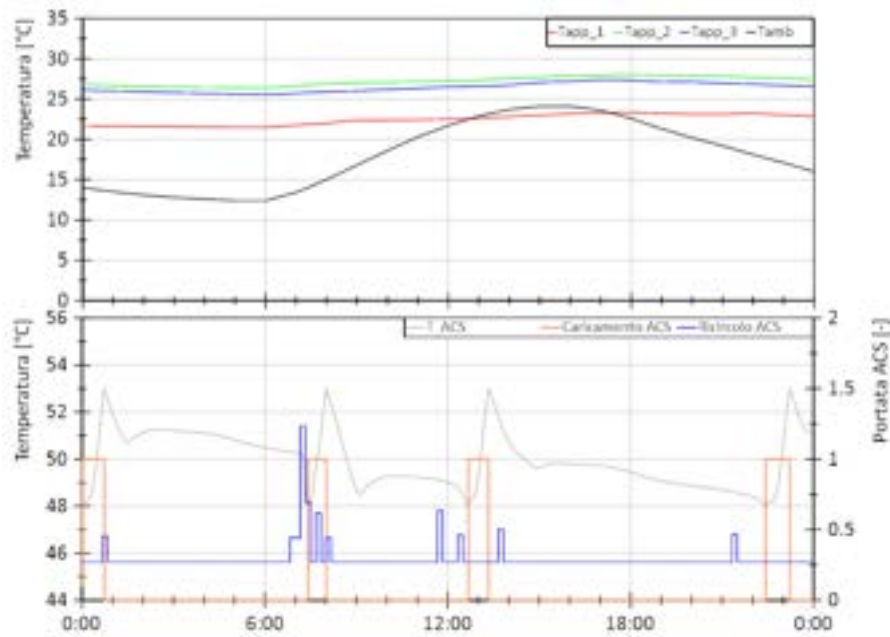


Figura 3.258. Sessione B2, Giorno 3. Andamento della temperatura in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio (curve in blu, verde e rosso del grafico superiore) e temperatura esterna (curva in nero grafico superiore), andamento della temperatura nell'accumulo di ACS e portata di caricamento e ricircolo dell'accumulo di ACS (rispettivamente curva un grigio, in arancione e in blu del grafico inferiore)

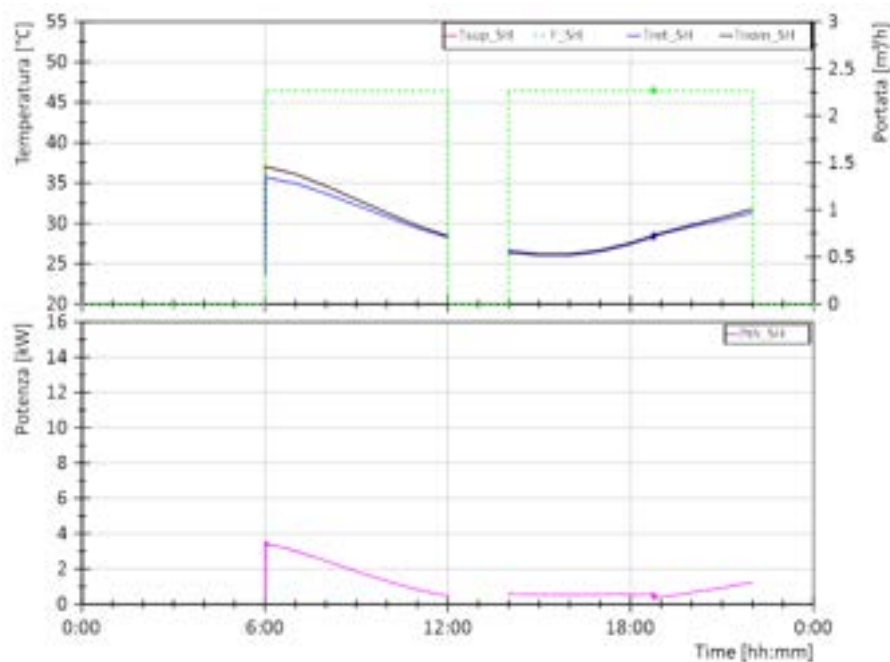


Figura 3.259. Sessione B2, Giorno 3. Andamento della temperatura di mandata e ritorno e portata nel circuito di riscaldamento (curva in rosso, blu e tratteggiata verde nel grafico superiore rispettivamente) e andamento della temperatura di mandata al riscaldamento di riferimento (curva in nero), andamento della potenza termica per riscaldamento (curva in magenta grafico inferiore)

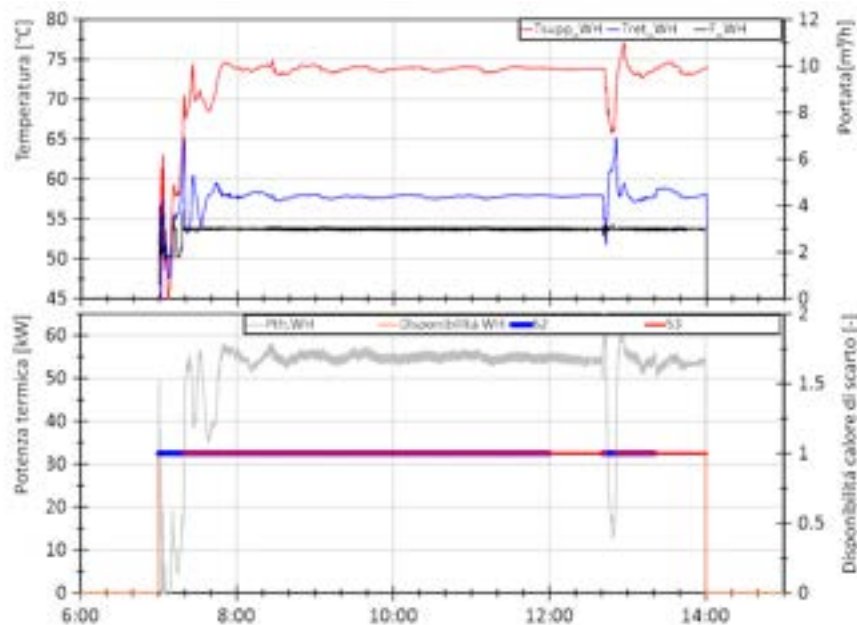


Figura 3.260. Sessione B2, Giornata 3 - Dettaglio. Andamento della temperatura di mandata, ritorno e la portata (rispettivamente curva in rosso, blu e nero del grafico superiore) del calore di scarto, andamento della potenza da calore di scarto in ingresso alla sottostazione e intervallo di disponibilità (curva in arancione) e utilizzo da parte dello scambiatore S2 e S3 (rispettivamente curva in blu e rosso del grafico inferiore)

In Tabella 3.44 si riporta l'energia termica al primario e al secondario dei diversi scambiatori e le relative efficienze per la prova considerata.

Tabella 3.44. Sessione B2, Giornata 3. Energie termiche al primario (lato teleriscaldamento, TLR, o sistema di generazione, GEN) e al secondario (lato teleriscaldamento, TLR, o utente, US) dei diversi scambiatori della sottostazione e relative efficienze

Eth,S1,TLR [kWh]	Eth,S1,US [kWh]	η_{S1} [%]	Eth,S2,GEN [kWh]	Eth,S2,US [kWh]	η_{S2} [%]	Eth,S3,GEN [kWh]	Eth,S3,US [kWh]	η_{S3} [%]
48,07	44,06	92%	34,69	34,06	98%	323,83	316,88	98%

3.4.3.9 Fase 2 - Giornata 5

Il giorno di test 5 è il 01/08 per il quale sono presenti solo richieste di ACS da parte dell'utente essendo al di fuori del periodo di riscaldamento.

In Figura 3.261 viene mostrato, nel grafico inferiore, in nero il comando di avvio della sottostazione per richiesta da parte dell'utente sia per riscaldamento che per ACS, in verde le richieste di caricamento dell'accumulo di ACS e in arancione la disponibilità di calore di scarto dal processo considerato che può essere utilizzata dalla sottostazione. Nel grafico superiore si riporta in magenta la potenza termica fornita dallo scambiatore S1 e in rosso quella fornita dallo scambiatore S2 per soddisfare le richieste termiche. Nel grafico centrale si riporta in viola la potenza termica fornita dallo scambiatore S3 alla rete di teleriscaldamento. Dal confronto tra i tre grafici si può notare che le richieste termiche dell'utente sono soddisfatte sia dallo scambiatore S1 (rete di TLR) che dallo scambiatore S2 (calore di scarto). Il profilo di carico utente è analogo a quanto esposto per il giorno 5 della sessione B1. In Figura 3.262 viene riportato un ingrandimento della Figura 3.261 al fine di visualizzare in dettaglio le ore di funzionamento degli scambiatori S2 ed S3. Si verifica un funzionamento contemporaneo di S2 ed S3 per due cariche dell'accumulo ACS, ovvero tra le 8:30 e le 9:00 e tra le 12:30 e le 13:00 circa. Si può notare come nei momenti in cui non si ha richiesta da parte dell'utente la potenza immessa in rete di TLR da S3 è di circa 55 kW che corrisponde alla disponibilità di calore di scarto considerata per questi test.

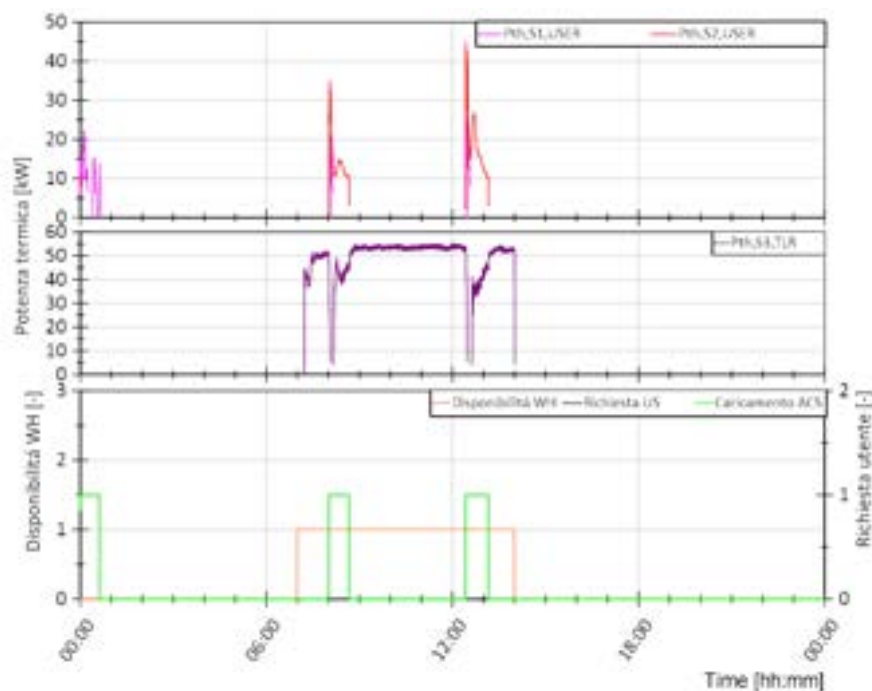


Figura 3.261. Sessione B2, Giorno 5. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità di calore di scarto (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

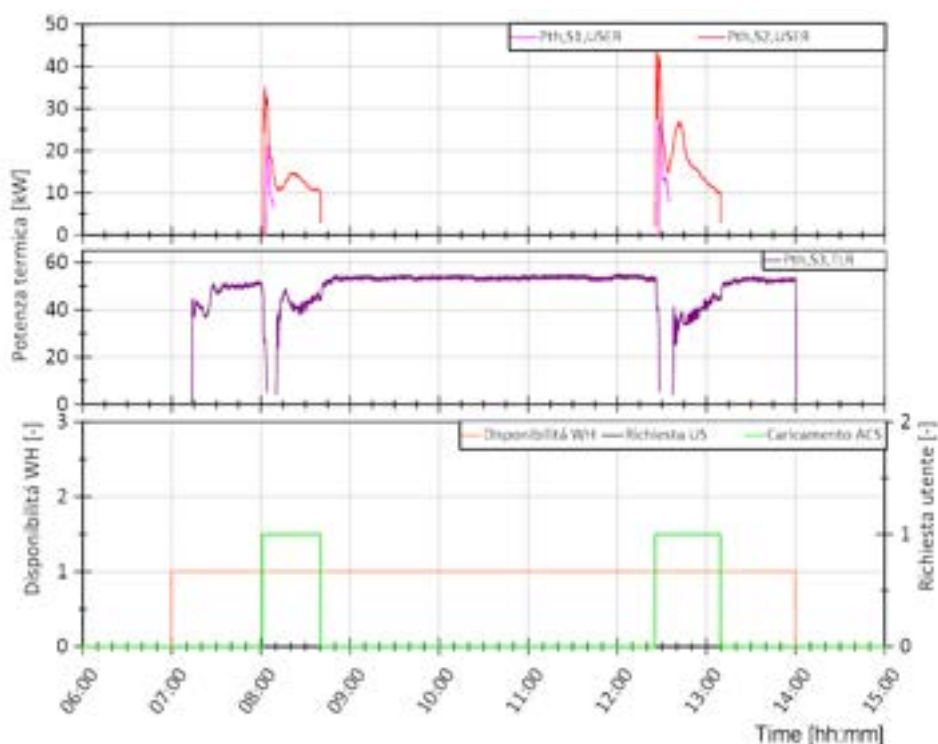


Figura 3.262. Sessione B2, Giorno 5 - Dettaglio. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità di calore di scarto (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

Si riportano nel seguito gli andamenti delle temperature di ingresso e uscita al primario e al secondario degli scambiatori S1, S2 ed S3 e le portate quando questi sono in funzione (Figura 3.263-Figura 3.265). In particolare per gli scambiatori S2 ed S3 si utilizza una scala temporale basata sui momenti di funzionamento al fine di facilitarne la lettura.

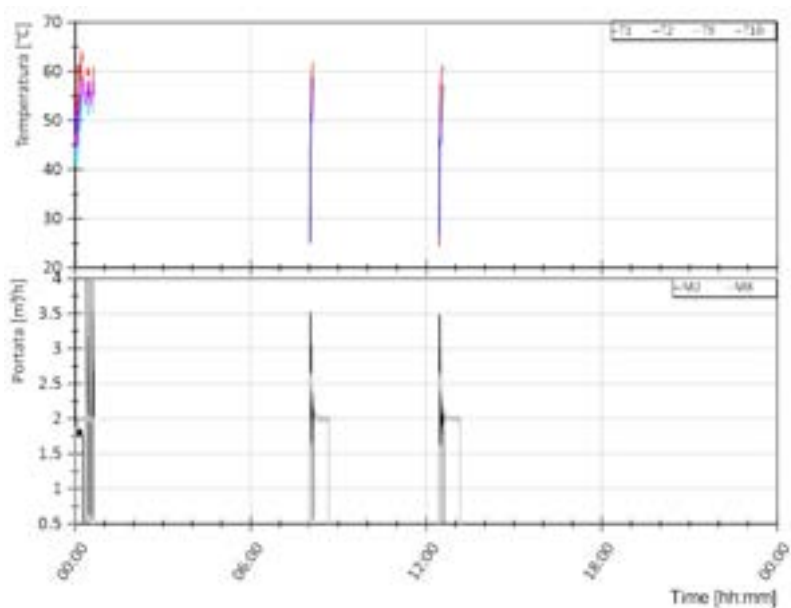


Figura 3.263. Sessione B2, Giorno 5. Andamento delle temperature lato teleriscaldamento (mandata dal teleriscaldamento T1, ritorno al teleriscaldamento T2) e lato utenza (uscita dallo scambiatore S2 T9, mandata all'utenza T10) dello scambiatore S1 (grafico superiore), andamento della portata lato teleriscaldamento (M2) e lato utenza (M8) dello scambiatore S1 (grafico inferiore)

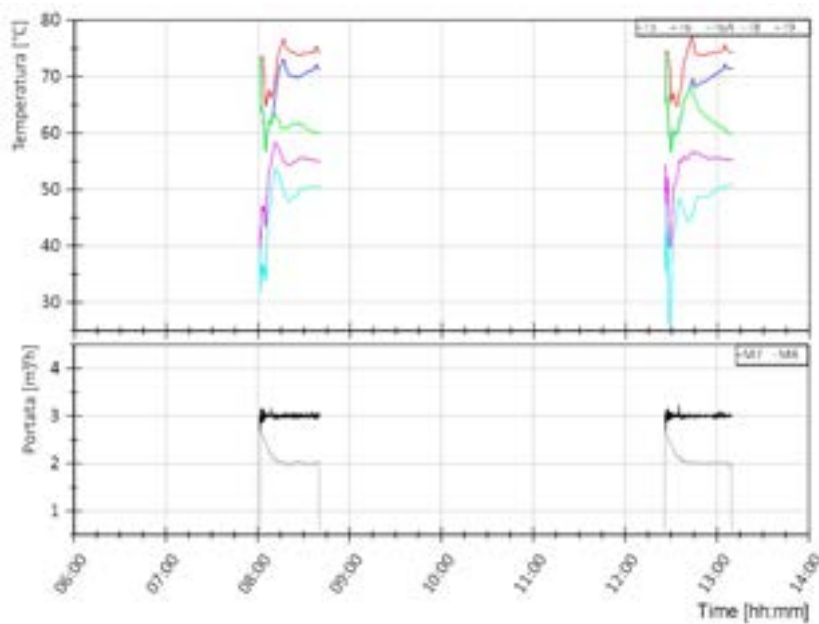


Figura 3.264. Sessione B2, Giorno 5 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (mandata dal sistema di generazione T5, ritorno al sistema di generazione T6 e uscita scambiatore S2 T6A) e lato utenza (ritorno dall'utenza T8, mandata all'utenza T9) dello scambiatore S2 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato utenza (M8) dello scambiatore S2 (grafico inferiore)

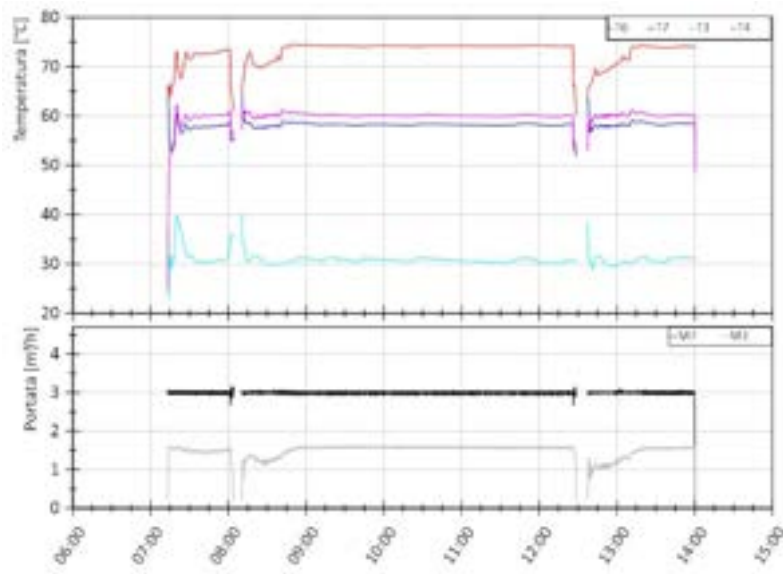


Figura 3.265. Sessione B2, Giorno 5 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (Ingresso scambiatore S3 T6 e ritorno al sistema di generazione T7) e lato TLR (ritorno dal TLR T3, mandata al TLR T4) dello scambiatore S3 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato TLR (M3) dello scambiatore S3 (grafico inferiore)

I tre grafici di cui sopra riportanti le temperature e le portate nei tre scambiatori mettono in luce alcune caratteristiche relative ai controlli di temperatura e portata sia della test facility che della sottostazione, così come esposto nella descrizione dei test eseguiti nella sessione A.

Nel seguito si riportano alcune considerazioni riguardo il controllo di temperatura da parte della test facility in T1, T5 e T8 e il controllo di temperatura da parte della sottostazione in T4 e T10. Il funzionamento di tali controllo è paragonabile a quanto osservato per i test della sessione A. Si rimanda, quindi, alla descrizione dei giorni di test della sessione A per maggiore dettagli.

Con riferimento alla Figura 3.267 si può notare come l'andamento del valore misurato T5 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa ± 5 °C quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento. Si registra, comunque, una differenza minore di ± 2 °C rispetto al valore di riferimento di 73 °C (valore di temperatura a cui è disponibile il calore di scarto nel processo considerato) per la gran parte del tempo.

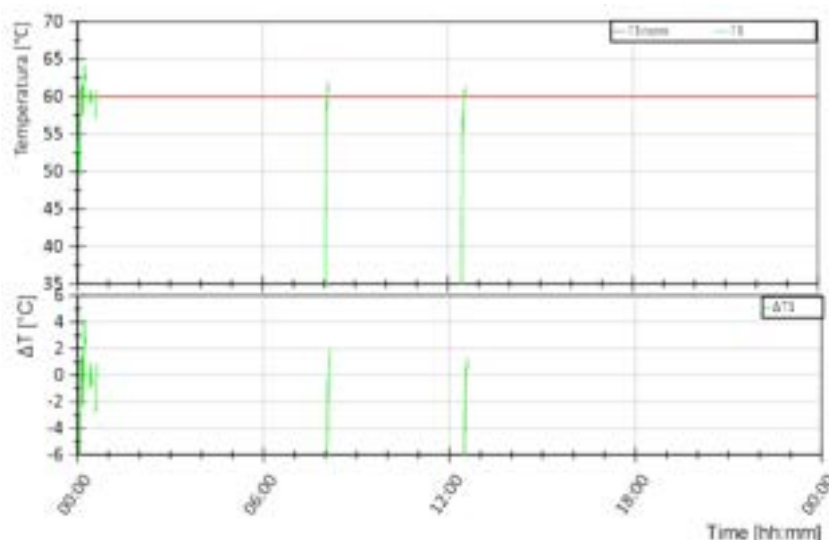


Figura 3.266. Sessione B2, Giorno 5. Andamento della temperatura di mandata dal teleriscaldamento T1 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T1nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

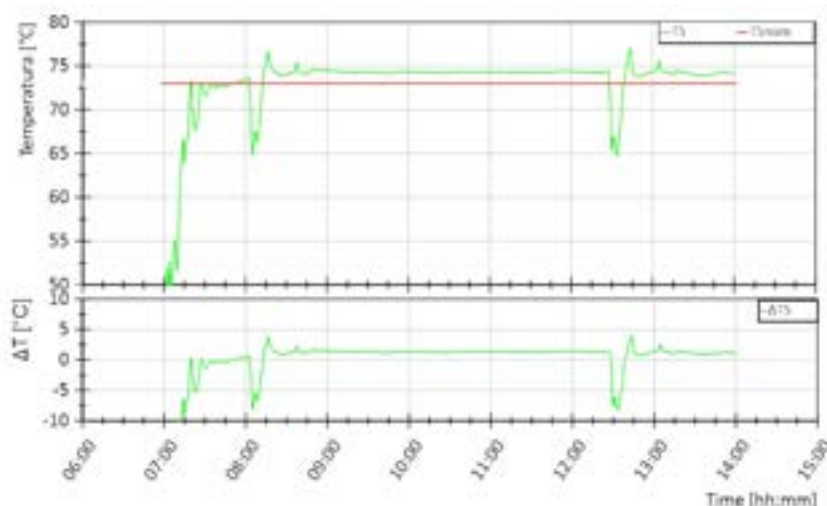


Figura 3.267. Sessione B2, Giorno 5 - Dettaglio. Andamento della temperatura di mandata dal sistema di generazione T5 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T5nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

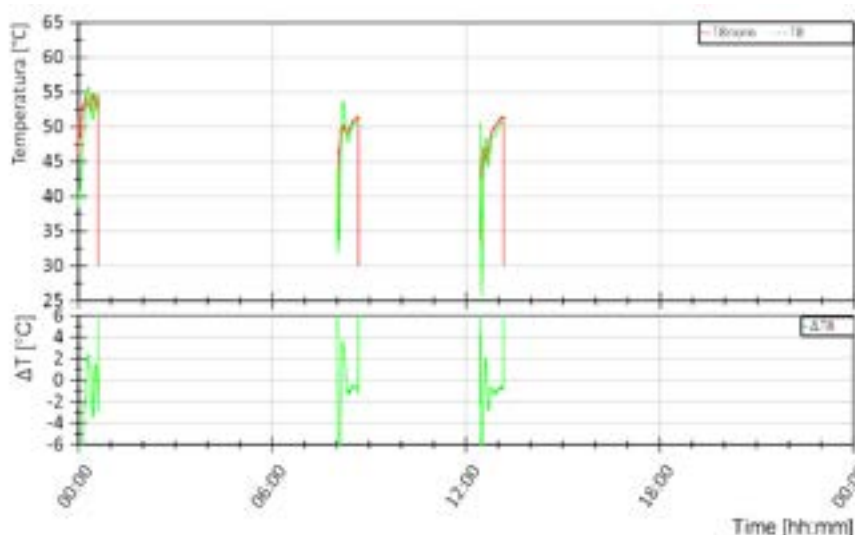


Figura 3.268. Sessione B2, Giorno 5. Andamento della temperatura di ritorno dall'utenza T8 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T8nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

Con riferimento alla Figura 3.269 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T10nom e il valore misurato T10 sia inferiore a ± 2 °C per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T10 da parte della sottostazione che deve garantire 55 °C all'utente al fine di soddisfarne le richieste termiche.

Con riferimento alla Figura 3.270 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T4nom e il valore misurato T4 sia inferiore a ± 1 °C per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T4 da parte della sottostazione.

In Figura 3.271 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio e la temperatura ambiente e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo di ACS (in grigio) nonché la portata di caricamento (in arancione) e di ricircolo (in blu). Per quanto riguarda l'ACS, si può notare come la temperatura dell'accumulo aumenta ogni qualvolta avviene una carica, fino a raggiungere i 53 °C, e diminuisce per effetto delle perdite termiche o richiesta da parte dell'utente che si verifica in corrispondenza di una portata di ricircolo maggiore di 0,27 m³/h.

In Figura 3.272 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature di mandata e di ritorno del calore di scarto e la relativa portata. Da notare che tali grandezze corrispondono rispettivamente alla

temperatura T5 e T7 della sottostazione e alla portata M7. Da queste grandezze è possibile, quindi, ricavare la potenza disponibile da calore di scarto in ingresso alla sottostazione riportata nel grafico inferiore (curva in grigio). Nello stesso grafico viene anche mostrato come si distribuisce nel tempo la disponibilità di calore di scarto tra gli scambiatori S2 ed S3 (curva in blu e rosso rispettivamente). Nel caso in esame, non appena si ha disponibilità di calore di scarto si avvia lo scambiatore S2. Lo scambiatore S3 si avvia poco dopo in seguito al raggiungimento della temperatura di riferimento in T5 (73 °C), indice che le dinamicità di avviamento si sono esaurite. La potenza da calore di scarto varia mediamente tra circa 52 kW e 55 kW, raggiungendo anche picchi di 60 kW. Gli andamenti delle temperature sono simili a quanto descritto per il giorno 1 sessione B2 al quale si rimanda per ulteriori dettagli.

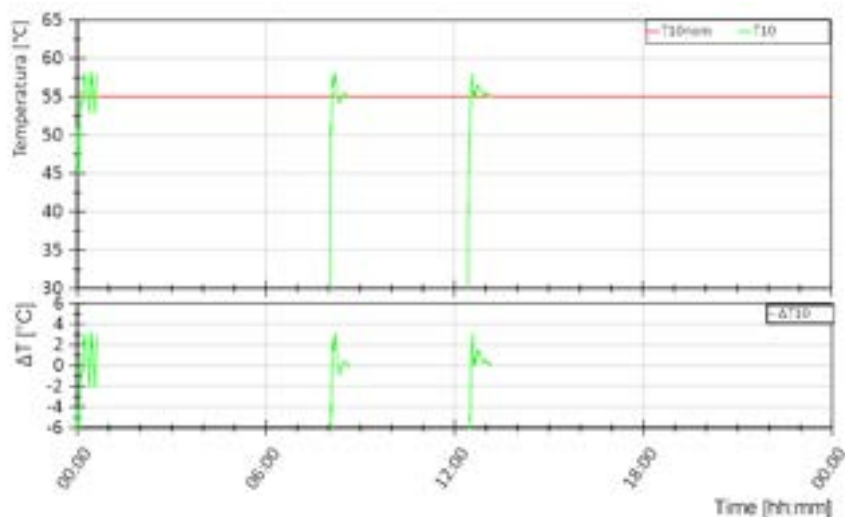


Figura 3.269. Sessione B2, Giorno 5. Andamento della temperatura di mandata all'utenza T10 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T10nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

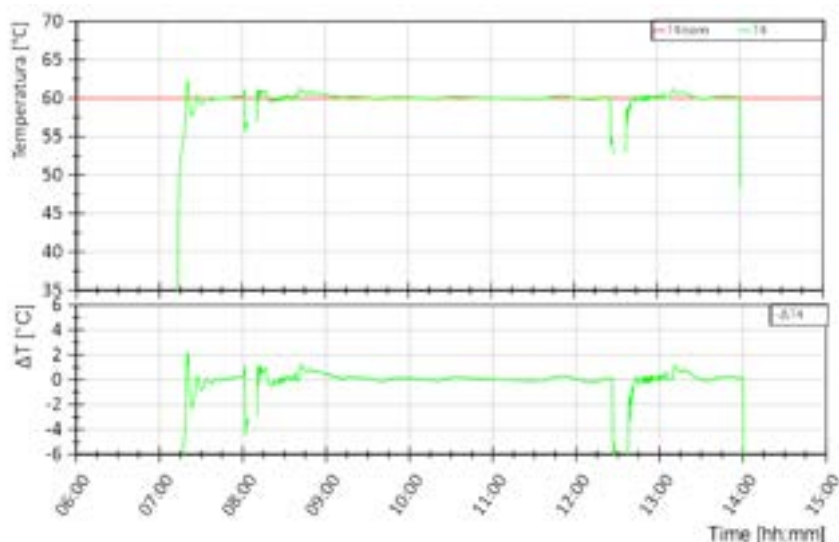


Figura 3.270. Sessione B2, Giorno 5 - Dettaglio. Andamento della temperatura di immissione in rete T4 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T4nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

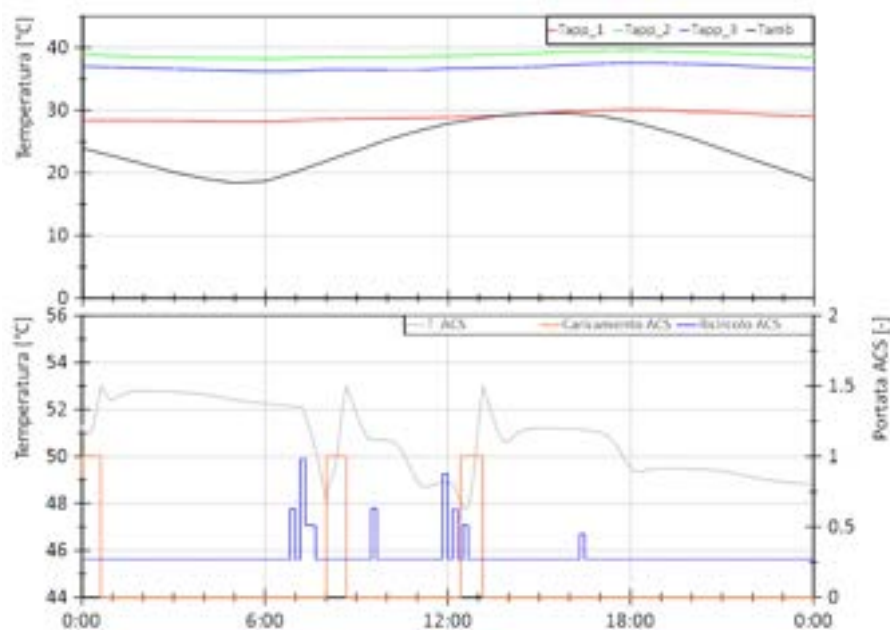


Figura 3.271. Sessione B2, Giornata 5. Andamento della temperatura in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio (curve in blu, verde e rosso del grafico superiore) e temperatura esterna (curva in nero grafico superiore), andamento della temperatura nell'accumulo di ACS e portata di caricamento e ricircolo dell'accumulo di ACS (rispettivamente curva un grigio, in arancione e in blu del grafico inferiore)

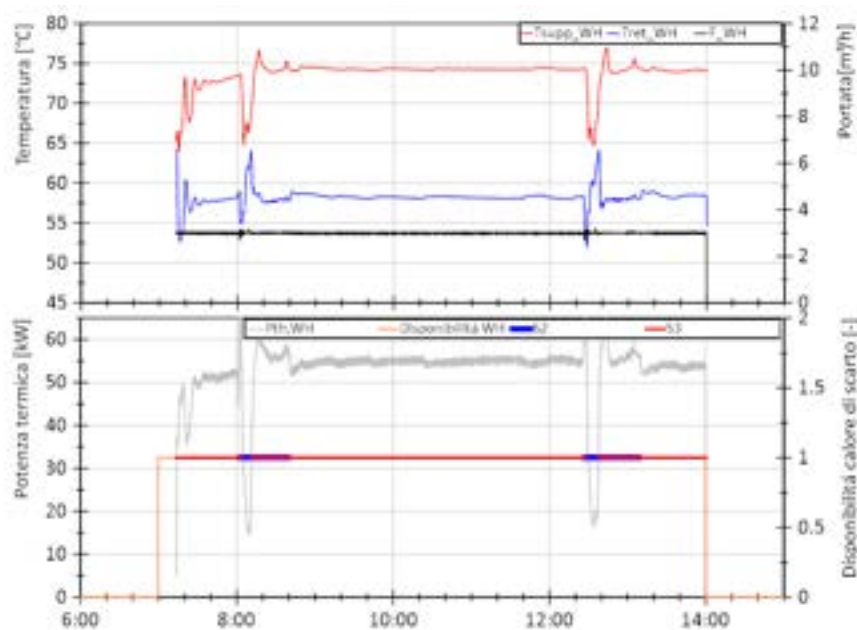


Figura 3.272. Sessione B2, Giornata 5 - Dettaglio. Andamento della temperatura di mandata, ritorno e la portata (rispettivamente curva in rosso, blu e nero del grafico superiore) del calore di scarto, andamento della potenza da calore di scarto in ingresso alla sottostazione e intervallo di disponibilità (curva in arancione) e utilizzo da parte dello scambiatore S2 e S3 (rispettivamente curva in blu e rosso del grafico inferiore)

In Tabella 3.45 si riporta l'energia termica al primario e al secondario dei diversi scambiatori e le relative efficienze per la prova considerata.

Tabella 3.45. Sessione B2, Giorno 5. Energie termiche al primario (lato teleriscaldamento, TLR, o sistema di generazione, GEN) e al secondario (lato teleriscaldamento, TLR, o utente, US) dei diversi scambiatori della sottostazione e relative efficienze.

Eth,S1,TLR [kWh]	Eth,S1,US [kWh]	η_{S1} [%]	Eth,S2,GEN [kWh]	Eth,S2,US [kWh]	η_{S2} [%]	Eth,S3,GEN [kWh]	Eth,S3,US [kWh]	η_{S3} [%]
7,86	6,38	81%	22,94	22,89	100%	334,36	327,61	98%

3.4.3.10 Fase 2 - Prestazioni energetiche ed indicatori per la sessione B2

Si riporta nel seguito un'analisi delle prestazioni energetiche della sottostazione per i 6 giorni di test della sessione B2 al fine di valutare principalmente i flussi energetici. Per quanto riguarda la bontà dell'accoppiamento tra il modello numerico di edificio con il laboratorio valgono le stesse considerazioni espresse per i test della sessione B1 riportate in 3.4.3.5 avendo utilizzato le stesse tipologie di controllo e lo stesso edificio. In Tabella 3.46 sono riportate l'energia ceduta all'impianto di riscaldamento, l'energia ceduta all'impianto di caricamento dell'accumulo ACS e l'energia ceduta al primario del separatore idraulico per i 6 giorni di test, calcolate sulla base degli andamenti delle temperature e portate elaborate dal modello numerico durante i test e per questo indicato con "S" (simulazione). È riportata, inoltre, l'energia ceduta al lato utente dalla sottostazione calcolata sulla base degli andamenti delle temperature e portate elaborate dalla sottostazione durante i test (T8, T10 ed M8) e per questo indicato con "L" (laboratorio) e il fattore di accoppiamento simulazione/laboratorio per i 6 giorni di test già definito in 3.4.2.4. Per una descrizione del collegamento sottostazione/test facility con modello numerico e quindi dettagli sui punti di misura per la valutazione delle energie, si rimanda al capitolo 5.3.2.

Tabella 3.46. Sessione B2 - Energia ceduta all'impianto di riscaldamento, energia ceduta all'impianto di caricamento dell'accumulo ACS, energia ceduta al primario del separatore idraulico, energia ceduta al lato utente dalla sottostazione e fattore di accoppiamento simulazione/laboratorio per i 6 giorni di test

Giorno di test		1	2	3	4	5	6
Giorno dell'anno		05 Gen	21 Mar	09 Apr	24 Mag	01 Ago	05 Nov
Energia riscaldamento (S)	[kWh]	129,91	64,66	16,41	0	0	66,2
Energia ACS (S)	[kWh]	20,55	28,15	31,35	27,16	20,08	33,45
Energia primario separatore idraulico (S)	[kWh]	154,5	94,48	47,93	27,53	21,03	101,2
Energia lato utente sottostazione (S1+S2) (L)	[kWh]	175,62	115,69	78,12	37,85	29,27	120,45
Fattore accoppiamento S/L	[%]	88%	82%	61%	73%	72%	84%

In Tabella 3.47 sono riportate, per i sei giorni di test le stesse grandezze già definite per i test della sessione A in Tabella 3.29 nel paragrafo 3.4.2.4 considerando, in questo caso, come fonte per il sistema di generazione non il solare termico, ma il calore di scarto da processo industriale.

Tabella 3.47. Sessione B2 - Energia da calore di scarto in ingresso alla sottostazione, energia prelevata dalla rete di TLR (primario scambiatore S1), energia prelevata dalla rete di TLR e ceduta all'utente (secondario S1), energia ceduta all'utente da calore di scarto (secondario S2), energia immessa nella rete di TLR da calore di scarto (secondario S3), frazione di energia all'utente da TLR e da calore di scarto, frazione di energia da calore di scarto inviata all'utente, immessa in rete di TLR e dispersa per i 6 giorni di test

Giorno di test		1	2	3	4	5	6
Giorno dell'anno		05 Gen	21 Mar	09 Apr	24 Mag	01 Ago	05 Nov
Energia da calore di scarto (L)	[kWh]	359,7	354,09	360,31	360,54	360,89	363,81
Energia all'utente da TLR-lato TLR (L)	[kWh]	106,84	69,43	48,07	30,03	7,86	89,1

Energia all'utente da TLR-lato US (L)	[kWh]	102,26	64,6	44,06	27,3	6,38	84,12
Energia all'utente da calore di scarto (L)	[kWh]	73,36	51,09	34,06	10,55	22,89	36,33
Energia al TLR da calore di scarto (L)	[kWh]	274,82	290,58	316,88	336,7	327,61	317,13
Frazione di energia all'utente da TLR	[%]	58,2%	55,8%	56,4%	72,1%	21,8%	69,8%
Frazione di energia all'utente da calore di scarto	[%]	41,8%	44,2%	43,6%	27,9%	78,2%	30,2%
Frazione energia da calore di scarto inviata all'utente	[%]	20,4%	14,4%	9,5%	2,9%	6,3%	10,0%
Frazione energia da calore di scarto immessa in rete	[%]	76,4%	82,1%	87,9%	93,4%	90,8%	87,2%
Frazione di energia da calore di scarto in perdite	[%]	3,2%	3,5%	2,6%	3,7%	2,9%	2,8%

Le frazioni di energia in tabella sono anche riportate nelle Figura 3.273 e Figura 3.274, nelle quali è possibile notare, rispettivamente, in che misura le richieste termiche dell'utente siano soddisfatte dal TLR e da energia proveniente da calore di scarto, e in che misura l'energia proveniente da calore di scarto sia inviata all'utente, immessa in rete o dispersa.

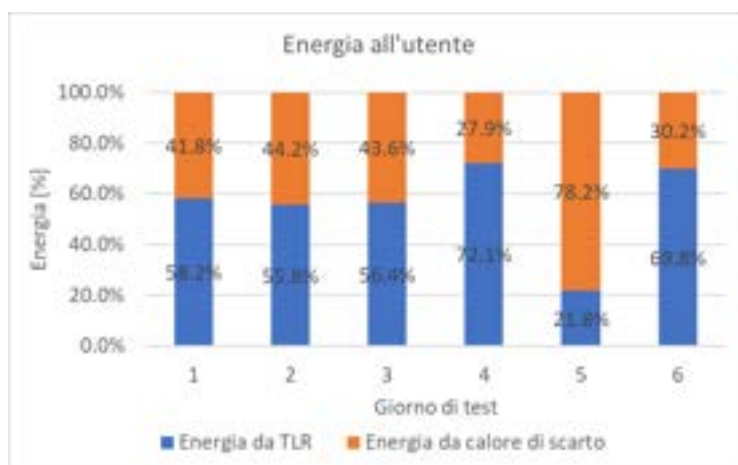


Figura 3.273. Sessione B2 - Percentuale di energia ceduta all'utente proveniente dal TLR (blu) e da calore di scarto (arancione) rispetto all'energia totale ceduta all'utente

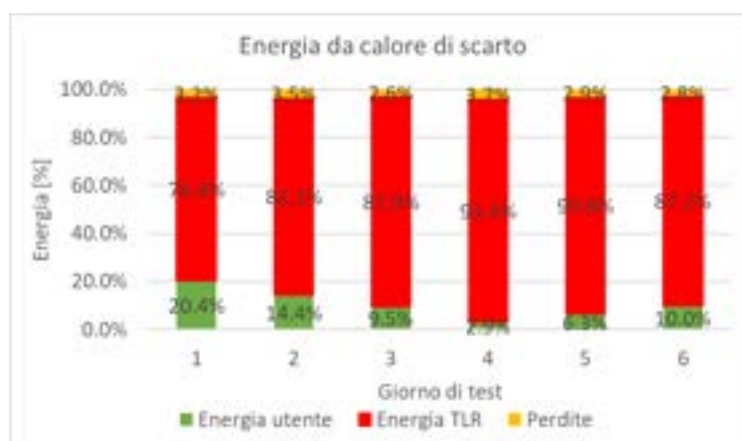


Figura 3.274. Sessione B2 - Percentuale di energia proveniente da calore di scarto inviata all'utente (verde), immessa nella rete di TLR (rosso) e dispersa (giallo) rispetto all'energia totale prodotta da calore di scarto

Nel seguito alcune considerazioni con riferimento alla Figura 3.273 e Figura 3.274 e alle tabelle precedenti:

- L'energia da calore di scarto è comparabile per i 6 giorni di test dato che è stato considerato lo stesso profilo di disponibilità (circa 55 kW per 7 ore al giorno).
- I giorni 1, 2, 3 e 6 sono giornate del periodo invernale per le quali si ha una richiesta termica da parte dell'utente per esigenze di riscaldamento e ACS a parità di energia termica da calore di scarto disponibile. Si verifica che la richiesta dell'utente è soddisfatta tra il 55,8% e il 69,8 % dalla rete di TLR e tra il 30,2% e 44,2 % da energia proveniente da calore di scarto. Allo stesso tempo, tra il 76,4% e l'87,9 % dell'energia da calore di scarto viene immesso nella rete di TLR. Le perdite termiche sono comprese tra il 2,8% e il 3,5 % e sono dovute principalmente alle perdite termiche nel circuito della sottostazione e alle efficienze degli scambiatori S2 ed S3.
- I giorni 4 e 5 sono giornate estive per le quali non si hanno richieste di riscaldamento da parte dell'edificio, ma solo di ACS. In questo caso le richieste termiche dell'utente vengono soddisfatte per il 72,1% e 21,8 % dal TLR e per il 27,9% e il 78,2% da energia proveniente da calore di scarto. Pur essendoci una disponibilità di energia proveniente da calore di scarto sufficiente per coprire il carico dell'utente, si ha comunque prelievo dalla rete data la non contemporaneità delle due. Si hanno, infatti, delle cariche dell'accumulo di ACS al di fuori dell'orario di disponibilità di calore di scarto che è tra le 7:00 e le 14:00. Allo stesso tempo, tra il 90,8 % e il 93,4 % dell'energia da calore di scarto viene immesso nella rete di TLR. Le perdite termiche sono comprese tra il 2,9 % e il 3,7 % e sono dovute principalmente alle perdite termiche nel circuito della sottostazione e alle efficienze degli scambiatori S2 ed S3.

Le energie riportate nella Tabella 3.47, nonché le frazioni di energia riportate nelle Figura 3.273 e Figura 3.274 descritte precedentemente, sono state valutate considerando di utilizzare istantaneamente l'energia da calore di scarto disponibile per soddisfare le richieste dell'utenza inviando il surplus nella rete di teleriscaldamento. Si può notare che per tutti i giorni di test si ha energia proveniente da calore di scarto immessa nella rete di teleriscaldamento pur potendo potenzialmente essere utilizzata per soddisfare totalmente le richieste giornaliere dell'utenza. Ciò accade a causa della non contemporaneità tra richiesta dell'utente e disponibilità di calore di scarto. Sulla base dei risultati ottenuti, ulteriori valutazioni sono state fatte in un'ipotesi di scambio sul posto termico giornaliero, così come descritto per i test della sessione A nel paragrafo 3.4.2.4. I risultati sono sintetizzati in Tabella 3.48 e Figura 3.275.

Tabella 3.48. Sessione B2 - Energia prelevata dalla rete di TLR e ceduta all'utente non proveniente da calore di scarto (secondario S1), energia ceduta all'utente proveniente da calore di scarto in regime di scambio sul posto, energia proveniente da calore di scarto immessa nella rete di TLR e non prelevata per soddisfare l'utente (energia residua al TLR da calore di scarto), frazione di energia all'utente da TLR e da calore di scarto in regime di scambio sul posto per i 6 giorni di test.

Giorno di test		1	2	3	4	5	6
Giorno dell'anno		05 Gen	21 Mar	09 Apr	24 Mag	01 Ago	05 Nov
Energia all'utente da TLR (no calore di scarto)-lato US	[kWh]	0	0	0	0	0	0
Energia all'utente da calore di scarto -scambio sul posto	[kWh]	175,62	115,69	78,12	37,85	29,27	120,45
Energia residua al TLR da calore di scarto	[kWh]	172,56	225,98	272,82	309,4	321,23	233,01
Frazione di energia all'utente da TLR (no calore di scarto)	[%]	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Frazione di energia all'utente da calore di scarto-scambio sul posto	[%]	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

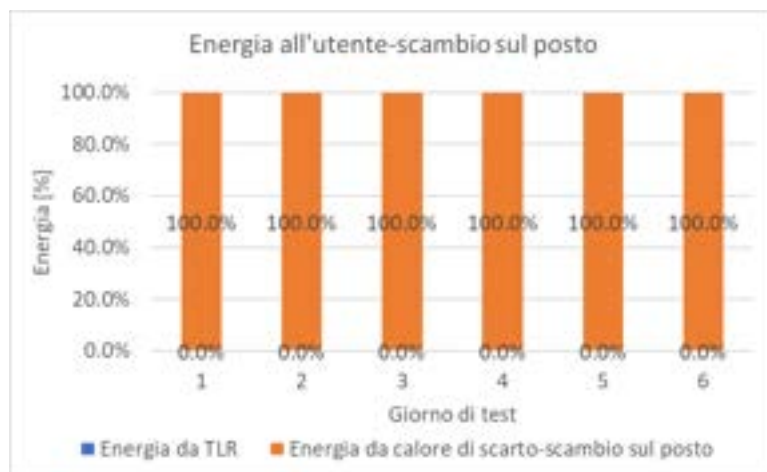


Figura 3.275. Sessione B2 - Percentuale di energia ceduta all'utente proveniente dal TLR (blu) e dal calore di scarto (arancione) rispetto all'energia totale ceduta all'utente calcolata in regime di scambio sul posto

Dall'analisi dei dati riportati in Tabella 3.48 e Figura 3.275 e confrontandoli con i dati di Tabella 3.47 e Figura 3.273 si può notare che per tutti i giorni di test la frazione di energia all'utente da calore di scarto arriva al 100%, con un aumento compreso tra il 21,8 % e 72,1 % rispetto al considerare solo quella istantaneamente autoconsumata. Inoltre, si ha sempre una parte di energia da calore di scarto immessa nella rete di TLR che non viene prelevata nell'arco della giornata per soddisfare l'utente.

3.4.4 Estrapolazione annuale

I dati relativi ai flussi energetici nella sottostazione riportati nei paragrafi 3.4.2.4, 3.4.3.5, 3.4.3.10 sono relativi esclusivamente ai 6 giorni di test per ogni sessione di test effettuata, ovvero sessione A, B1 e B2. Al fine di ottenere valori relativi all'intero anno, in base alla metodologia utilizzata per individuare i 6 giorni di test, è necessario moltiplicare i valori di energia giornalieri per il numero di giorni del raggruppamento relativo e sommare i valori ottenuti. In Tabella 3.49 sono riportati, per ogni sessione di test, l'energia ceduta all'impianto di riscaldamento, l'energia ceduta all'impianto di caricamento dell'accumulo ACS, l'energia ceduta al lato utente dalla sottostazione, l'energia prelevata dalla rete di TLR e ceduta all'utente (secondario S1), l'energia totale prodotta dal sistema di generazione, l'energia ceduta all'utente prodotta dal sistema di generazione (secondario S2), l'energia immessa nella rete di TLR e prodotta dal sistema di generazione (secondario S3), la frazione di energia all'utente da TLR e da sistema di generazione, la frazione di energia da sistema di generazione inviata all'utente, immessa in rete di TLR e dispersa calcolate per l'intero anno sulla base dell'estrapolazione dei dati per i 6 giorni di test. Da notare che per i test della sessione A e B1 il sistema di generazione considerato è il campo solare, mentre per i test della sessione B2 è recupero di calore di scarto da un processo industriale.

Sulla base dei dati riportati in tabella emerge che:

- L'energia per riscaldamento della sessione B1 è paragonabile a quella della sessione B2 in quanto è stato utilizzato lo stesso modello di edificio per le due sessioni di test. Si nota, invece, una differenza tra l'energia per riscaldamento della sessione A e B (B1 e B2): l'energia della sessione B è circa il 43% di quella della sessione A per effetto del risanamento dell'edificio; l'energia per ACS è paragonabile nelle tre sessioni di test in quanto non sono state apportate modifiche al modello di edificio per quanto riguarda il circuito ACS.
- L'energia prodotta dal campo solare nella sessione B1 è circa il 150% di quella della sessione A. Pur avendo lo stesso campo solare (tipologia di collettori e dimensione) è diversa la gestione dell'accumulo solare: nel test della sessione A esso è gestito ad una temperatura superiore ad 80 °C, mentre nella sessione B1 ad una temperatura superiore a 60 °C e comunque inferiore a quella della sessione A. Di conseguenza si ha una temperatura di ritorno al campo solare inferiore nella sessione B1 e conseguente aumento delle prestazioni dello stesso.

- La sottostazione permette di coprire il 92% e l'86% del carico termico dell'edificio con energia proveniente dal TLR e il restante 8% e 14% con energia proveniente da campo solare, rispettivamente considerando i test della sessione A e B1. L'incremento percentuale della frazione di energia all'utente da solare è dovuto, da un lato ad una minore richiesta da parte dell'utente in seguito al risanamento dell'edificio e, dall'altro, ad una maggiore produzione di energia da solare. Nel caso dei test della sessione B2 si ha una maggiore frazione di energia da sistema di generazione (calore di scarto) che va a soddisfare le richieste dell'utente, ovvero il 41,5%. Ciò è dovuto principalmente alla contemporaneità tra richiesta dell'utente e disponibilità di calore di scarto che si ha tra le 7:00 e le 12:00 dei giorni invernali (1, 2, 3 e 6).
- La sottostazione permette di trasferire il 13% e il 9,6% dell'energia annuale prodotta da solare all'utente, il 68% e 79,5% viene immesso nella rete di TLR mentre il 19% e l'11% è disperso sotto forma di perdite termiche in vari punti del circuito, rispettivamente considerando i test della sessione A e B1. Si nota, quindi, un aumento della frazione di energia solare immessa nella rete di TLR nei test della sessione B1 per effetto di una maggiore produzione da solare, una minore richiesta da parte dell'utente e minori perdite rispetto alla sessione A. La diminuzione delle perdite è dovuta principalmente ad una minore temperatura di gestione dell'accumulo solare che da un lato porta ad una diminuzione dell'energia richiesta nella fase di preriscaldamento del campo solare e dall'altro ad una diminuzione delle perdite termiche nel circuito tra campo solare e accumulo (simulato) e tra accumulo e secondario scambiatori S2 ed S3 (laboratorio).

Tabella 3.49. Energia ceduta all'impianto di riscaldamento, energia ceduta all'impianto di caricamento dell'accumulo ACS, energia ceduta al lato utente dalla sottostazione, energia prelevata dalla rete di TLR e ceduta all'utente (secondario S1), energia totale prodotta dal sistema di generazione, energia ceduta all'utente prodotta dal sistema di generazione (secondario S2), energia immessa nella rete di TLR e prodotta dal sistema di generazione (secondario S3), frazione di energia all'utente da TLR e da sistema di generazione, frazione di energia da sistema di generazione inviata all'utente, immessa in rete di TLR e dispersa per l'intero anno

Sessione		A	B1	B2
Energia per riscaldamento (S)	[kWh]	40.718	17.687	17.712
Energia per ACS (S)	[kWh]	9.569	9.537	9.406
Energia lato utente sottostazione (S1+S2) (L)	[kWh]	55.753	35.278	34.072
Energia all'utente da TLR-lato utente S1 (L)	[kWh]	51.242	30.265	19.947
Energia totale prodotta da sistema di generazione(S)	[kWh]	34.911	52.422	131.442
Energia all'utente da sistema di generazione-lato utente S2 (L)	[kWh]	4.511	5.013	14.125
Energia al TLR da sistema di generazione (L)	[kWh]	23.814	41.668	113.201
Frazione di energia all'utente da TLR	[%]	91,9%	85,8%	58,5%
Frazione di energia all'utente da sistema di generazione	[%]	8,1%	14,2%	41,5%
Frazione energia da sistema di generazione inviata all'utente	[%]	12,9%	9,6%	10,7%
Frazione energia da sistema di generazione immessa in rete	[%]	68,2%	79,5%	86,1%
Frazione di energia da sistema di generazione in perdite	[%]	18,9%	11,0%	3,1%

Le energie riportate nella Tabella 3.49 sono state valutate considerando di utilizzare istantaneamente l'energia da sistema di generazione disponibile per soddisfare le richieste dell'utenza inviando il surplus nella rete di teleriscaldamento. Si può notare che, per tutte le sessioni di test, si ha energia proveniente da sistema di generazione immessa nella rete di teleriscaldamento pur potendo potenzialmente essere utilizzata per soddisfare totalmente o parzialmente le richieste dell'utenza. Ciò accade a causa della non contemporaneità tra richiesta dell'utente e disponibilità di energia dal sistema di generazione considerato. Sulla base di ciò, nei paragrafi 3.4.2.4, 3.4.3.5 e 3.4.3.10 ulteriori valutazioni sono state fatte in un'ipotesi di scambio sul posto termico giornaliero e i risultati ottenuti sono stati estrapolati all'intero anno e sintetizzati in Tabella 3.50.

Tabella 3.50. Energia ceduta al lato utente dalla sottostazione, energia prelevata dalla rete di TLR e ceduta all'utente non proveniente da sistema di generazione (secondario S1), energia ceduta all'utente proveniente da sistema di generazione in regime di scambio sul posto (autoconsumata+prelievo surplus da TLR), energia proveniente da sistema di generazione immessa nella rete di TLR e non prelevata per soddisfare l'utente (energia residua al TLR da sistema di generazione), frazione di energia all'utente da TLR e da sistema di generazione in regime di scambio sul posto giornaliero per l'intero anno

Sessione		A	B1	B2
Energia lato utente sottostazione (S1+S2)	[kWh]	55.753	35.278	34.072
Energia all'utente da TLR-lato utente	[kWh]	42.230	16.983	0
Energia all'utente da sistema di generazione -scambio sul posto	[kWh]	13.522	18.295	34.072
Energia residua al TLR da sistema di generazione	[kWh]	14.802	28.385	93.254
Frazione di energia all'utente da TLR	[%]	76%	48%	0%
Frazione di energia all'utente da sistema di generazione-scambio sul posto	[%]	24%	52%	100%

Dall'analisi dei dati riportati in Tabella 3.50 e confrontandoli con i dati di Tabella 3.49 si può notare che:

- Per la sessione A e B1 si ha un aumento rispettivamente del 15,9 % e 37,8% della frazione di energia all'utente da solare in regime di scambio sul posto giornaliero rispetto al considerare solo quella istantaneamente autoconsumata, arrivando rispettivamente al 24% e 52%. Inoltre, si ha una parte di energia da sistema di generazione che viene immessa nella rete di TLR e non prelevata per soddisfare l'utente per una quantità rispettivamente pari a 14.802 kWh e 28.385 kWh. Sarebbe, quindi, potenzialmente possibile aumentare ulteriormente la frazione di energia all'utente da sistema di generazione, considerando il regime di scambio sul posto su un intervallo di tempo più ampio (mensile o annuale anziché giornaliero).
- Per la sessione B2 la frazione di energia all'utente da calore di scarto arriva al 100% con un aumento del 58,5 % rispetto al considerare solo quella istantaneamente autoconsumata. Rispetto alla sessione A e B1, in questo caso l'energia prodotta dal sistema di generazione è pressoché costante per i 6 giorni di test, non essendo dipendente dalla disponibilità della fonte solare, ed è giornalmente sempre maggiore della richiesta da parte dell'utente. Risulta che una parte di energia prodotta dal sistema di generazione è immessa nella rete di TLR per una quantità pari a 93.254 kWh annuali.

3.4.5 Considerazioni sui risultati della seconda campagna di prove sperimentali

La sottostazione è stata testata in condizione quasi reali, considerandola collegata ad un'utenza condominiale, ad un sistema di generazione locale e alla rete di teleriscaldamento. Sia i carichi che la generazione sono stati emulati grazie a modelli in TRNSYS descritti; questi sono stati utilizzati per testare la sottostazione tramite la tecnica del hardware in-the-loop.

Tutte le sessioni di test hanno evidenziato un corretto funzionamento delle logiche di controllo implementate anche in condizioni di funzionamento realistiche, confermando quanto già ottenuto nella prima campagna di prove (Report RdS/PTR2020/144). In particolare, la sottostazione è riuscita a soddisfare l'utenza andando a fornire, quando richiesto, energia ad una temperatura di 70 °C per i test della sessione A e 55 °C per i test della sessione B, e garantendo le condizioni di comfort all'interno dei locali del modello di edificio considerato. Il passaggio dai test della sessione A a quelli della sessione B ha evidenziato la variazione dei carichi termici all'utente per effetto del risanamento, la variazione delle prestazioni del campo solare e alcune criticità in merito al dimensionamento degli scambiatori. L'energia annuale fornita dalla sottostazione all'utente nella sessione B è circa il 43% di quella della sessione A, mentre l'energia prodotta dal campo solare nella sessione B1 è circa il 150% di quella della sessione A, come conseguenza di una diversa gestione dell'accumulo solare. La criticità principale ha riguardato lo scambiatore S1, dimensionato per fornire all'utente circa 60 kW a 60 °C se connesso con una rete di TLR operante a 80 °C e quindi risultato non adatto per fornire all'utente 25 kW (potenza di picco prevista dell'edificio risanato per i giorni di test) a 55 °C se connesso con una rete di TLR operante a 60 °C. Per l'esecuzione delle prove della sessione B è stato necessario sostituire lo scambiatore S1 con uno di dimensioni maggiori al fine di poter soddisfare l'utenza risanata. Similmente è stata necessaria la sostituzione dello scambiatore S3 con uno di dimensioni maggiori al fine di potersi correttamente

interfacciare con la rete di TLR e scambiare le potenze previste nei test delle fasi B1 e B2 (maggiori rispetto a quelle della sessione A). Ne deriva che la progettazione della sottostazione è strettamente dipendente dalle condizioni di funzionamento della rete di TLR, dai carichi termici previsti e dalle potenzialità del sistema di generazione considerato. Ipotizzando di avere una sottostazione installata presso un'utente e operante nelle stesse condizioni della sessione A, in vista di un possibile risanamento dell'edificio e/o della rete di TLR o anche di una variazione nel sistema di generazione sarebbe necessario verificare il corretto dimensionamento degli scambiatori e, se necessario, sostituirli.

Dalle prove condotte è emerso che nei momenti di contemporaneità di disponibilità solare/calore di scarto e richieste da parte dell'utente, la sottostazione riesce a coprire il carico termico principalmente con lo scambiatore S2. In particolare, la frazione di energia all'utente da sistema di generazione locale risulta essere l'8,1%, il 14,2 % e il 41,5% su base annuale, rispettivamente per la configurazione della sessione A, B1 e B2. Da notare che, durante i test della sessione A, si è supposto un utilizzo dell'energia solare da parte della sottostazione solo quando questa è disponibile ad una temperatura superiore a 80 °C, pur potendo potenzialmente essere utile per l'utente da una temperatura di circa 60 °C che rappresenta la temperatura minima di ritorno dall'utenza (T8) in condizioni di funzionamento stazionarie del sistema: la frazione di energia solare per la sessione A potrebbe essere maggiore del 8,2%, ma sarebbe necessaria una verifica sperimentale per una stima corretta. In tutte le configurazioni testate si ha sovrapproduzione di energia solare/calore di scarto, che viene immessa in rete. Risulta, infatti, che la frazione di energia da sistema di generazione locale immessa in rete è pari al 68,2%, 79,5% e 86,1% rispettivamente per la configurazione della sessione A, B1 e B2. Ne risulta che, al fine di aumentare la percentuale di energia solare/calore di scarto utilizzata per coprire il carico, si dovrebbe agire sul dimensionamento e la gestione dell'accumulo solare più che sulla capacità installata. In alternativa, si potrebbe gestire in maniera differente l'interfacciamento con la rete di TLR considerando un regime di scambio sul posto termico, usando quindi la rete come sistema di accumulo dell'energia termica prodotta e non direttamente auto-consumata. Entrambe le possibilità necessiterebbero di una revisione e ottimizzazione dell'impianto: da un lato sarebbe necessario un corretto dimensionamento degli accumuli basato sia sulle potenzialità dei sistemi di generazione che sulle richieste dell'utente, rispettando quelli che sono i possibili limiti di ingombro all'interno di un condominio; dall'altro è importante tenere in considerazione le possibili limitazioni imposte dal gestore della rete di TLR per quando riguarda l'immissione in rete.

La gestione dei sei giorni di test in un regime di scambio sul posto giornaliero è stata ulteriormente investigata ed è stata valutata anche un'extrapolazione annuale dei risultati ottenuti. È emerso che per la sessione A e B1 si ha un aumento rispettivamente del 15,9 % e 37,8% della frazione di energia all'utente da solare in regime di scambio sul posto giornaliero rispetto al considerare solo quella istantaneamente auto-consumata, arrivando rispettivamente al 24% e 52% di frazione solare a copertura dei fabbisogni termici del condominio. Per i test della sessione B2 la frazione di energia all'utente da calore di scarto arriva al 100% con un aumento del 58,5 % rispetto al considerare solo quella auto-consumata.

I risultati ottenuti, insieme ad ulteriori campagne di simulazioni numeriche e prove sperimentali, potrebbero dimostrarsi utili per definire futuri scenari tecnico-economici di integrazione di sottostazioni bidirezionali in contesti urbani diversi e in relazione a reti di teleriscaldamento più o meno estese e ramificate, condotte a livelli di temperatura diversi e prevedendo strategie per l'estensione della quota di auto-consumo.

4 Conclusioni

Al fine di raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione al 2050, il quadro normativo europeo (Direttiva UE 2018/2001) e nazionale evidenzia l'importanza del ruolo delle reti di teleriscaldamento.

In questo contesto, la simulazione numerica del funzionamento delle reti di teleriscaldamento costituisce uno strumento di fondamentale importanza, poiché consente con costi ridotti di studiare molteplici soluzioni di efficientamento energetico. Inoltre, le simulazioni numeriche consentono di misurare ogni variabile di interesse in ogni punto del dominio di calcolo. Per queste ragioni, la presente attività di ricerca perfeziona ed integra i modelli numerici sviluppati nelle attività descritte nel Report RdS/PTR2020/144 riguardo alla rete di teleriscaldamento del Campus Universitario di Parma (ramo Nuova Sud). In particolare, si è ritenuto opportuno analizzare i seguenti aspetti:

- efficienza degli scambiatori di calore collocati presso le sottostazioni di scambio termico alle utenze;
- potenza delle pompe idrauliche a servizio dei circuiti secondari presso le utenze;
- effetti dell'abbassamento della temperatura di esercizio della rete di teleriscaldamento a valle della *deep renovation* delle utenze;
- effetti della riqualificazione di tutte le utenze della rete ed effetti della *deep renovation* sul comfort termico e sui consumi energetici della centrale termica;
- effetti della riqualificazione energetica della centrale termica.

Per quanto riguarda la modellazione degli scambiatori di calore, i risultati ottenuti sull'intera rete di teleriscaldamento hanno mostrato che la variazione di efficienza di scambio termico ha un effetto trascurabile dal punto di vista del *comfort* termico delle utenze. È stato quindi deciso di proseguire la campagna di simulazioni numeriche utilizzando il modello di scambiatore di calore ad efficienza costante.

Per quanto riguarda le pompe di circolazione a servizio dei circuiti secondari, sono state effettuate una serie di simulazioni numeriche al fine di ottimizzare le loro potenze ed evitare, quindi, sovradimensionamenti o sottodimensionamenti delle stesse. Queste analisi sono state condotte considerando le temperature nominali di mandata e ritorno della rete di teleriscaldamento pari a 80°C/55°C.

In seguito, lo studio è proseguito simulando il comportamento termo-idraulico della rete di teleriscaldamento quando le temperature nominali di esercizio della rete vengono abbassate a 55°C/30°C. I risultati ottenuti per questo scenario mostrano che le condizioni di *comfort* termico non sono soddisfacenti per diverse utenze della rete. È stato quindi deciso di analizzare il funzionamento della rete nello scenario in cui tutte le utenze hanno subito un intervento di *deep renovation*. In questo caso, il *comfort* termico raggiunge livelli soddisfacenti per tutte le utenze considerate. L'analisi condotta mostra quindi come sia possibile abbassare la temperatura di esercizio di una rete di teleriscaldamento quando che il distretto urbano che essa serve subisce un intervento di riqualificazione energetica, a parità di condizioni di *comfort*. È inoltre importante sottolineare che lo scenario con gli edifici riqualificati e la rete di teleriscaldamento funzionante in regime di bassa temperatura (55°C/30°C) comporta un'energia primaria in ingresso alla centrale ridotta a circa il 60% rispetto a quella richiesta dallo scenario con gli edifici non riqualificati e la rete operante ad alta temperatura (80°C/55°C).

Una volta analizzati gli effetti della riqualificazione energetica degli edifici, l'attività di ricerca è proseguita analizzando gli effetti della riqualificazione energetica della centrale termica. In questo caso, è stato ipotizzato l'inserimento di una pompa di calore, demandando al gruppo caldaie il ruolo di portare la temperatura di mandata ai livelli desiderati solo quando la pompa di calore non è sufficiente. Inoltre, la pompa di calore è alimentata solo quando è disponibile potenza fotovoltaica. Questa è stata inserita nel modello sviluppando dei componenti *ad-hoc*. I risultati ottenuti mostrano che è stato possibile ottenere una riduzione del 22,5% dei consumi energetici in termini di tep, grazie all'introduzione dei pannelli fotovoltaici in abbinamento alla pompa di calore. È atteso che tale risultato possa migliorare prevedendo l'impiego di accumuli elettrici dedicati alla produzione fotovoltaica.

In riferimento al TLR attivo è stato creato un modello numerico dinamico di una sottostazione, comprensivo dei relativi sistemi di controllo, a partire da uno scambiatore ad efficienza variabile basato sul metodo Thermal Resistance Scaling. Il modello è stato validato mediante un confronto sistematico con i risultati sperimentali disponibili. I risultati ottenuti in termini di potenze scambiate, temperature e portate dei vari circuiti della sottostazione sono risultati essere in linea con i dati sperimentali. Il modello sviluppato è quindi in grado di rispondere come atteso alle variazioni dinamiche sia di richiesta che di produzione di energia termica e può essere utilizzato per effettuare studi di integrazione di utenti attivi (*prosumer*) nelle reti di teleriscaldamento.

Per quanto riguarda l'attività sperimentale sul prototipo di sottostazione attiva, la campagna di test sperimentali è stata suddivisa in due sessioni:

- sessione A: il TLR è stato considerato operante in condizioni convenzionali, con temperatura di mandata pari a 80 °C e temperatura di ritorno pari a 50 °C; è stato utilizzato un modello numerico di edificio compatibile con la potenza termica nominale della sottostazione bidirezionale, ovvero 60 kW; è stato utilizzato un modello numerico per generare il profilo dinamico della potenza termica generata da un impianto a pannelli solari termici piani; tale impianto è dotato di un accumulo termico gestito per accumulare acqua calda a temperature superiori a 80°C;
- sessione B: il TLR è stato considerato operante in condizioni di bassa temperatura, con temperatura di mandata pari a 60 °C e temperatura di ritorno pari a 30 °C; il modello numerico di edificio considera le stesse caratteristiche geometriche, lo stesso sistema di distribuzione del calore e uno stato di involucro edilizio risanato;

A sua volta, la sessione B è stata suddivisa in due fasi, B1 e B2:

- per i test della fase B1 è stato utilizzato lo stesso modello numerico della sessione A per l'impianto a pannelli solari, ma con una gestione dell'accumulo finalizzata a produrre acqua a temperature maggiori di 60 °C;
- per i test della fase B2 è stato considerato un sistema di recupero di calore di scarto da un caseificio, con una potenza recuperabile costante e pari a 55 kW per 7 ore al giorno.

Per ogni sessione di test sono stati testati i sei giorni non consecutivi che meglio rappresentano la variabilità di condizioni climatiche dell'intero anno con riferimento ad un anno climatico medio per il comune di Castenaso, comune della città metropolitana di Bologna. A partire dai risultati per i giorni rappresentativi sono stati estrapolati i risultati energetici per tutto l'anno di riferimento. In particolare, è stato osservato che:

- l'energia per il riscaldamento della sessione B1 è paragonabile a quella della sessione B2 in quanto è stato utilizzato lo stesso modello di edificio per le due sessioni di test;
- l'energia della sessione B è circa il 43% di quella della sessione A per effetto del risanamento dell'edificio; l'energia per ACS è paragonabile nelle tre sessioni di test in quanto non sono state apportate modifiche al modello di edificio per quanto riguarda il circuito ACS;
- l'energia prodotta dal campo solare nella sessione B1 è circa il 150% di quella della sessione A; questo è dovuto alla diversa gestione dell'accumulo solare: nel test della sessione A esso è gestito ad una temperatura superiore ad 80 °C, mentre nella sessione B1 ad una temperatura superiore a 60 °C e comunque inferiore a quella della sessione A; questo comporta una temperatura di ritorno al campo solare inferiore nella sessione B1 e conseguente aumento delle prestazioni dello stesso;
- considerando i test della sessione A e B1 la sottostazione bidirezionale permette di coprire rispettivamente il 92% e l'86% del carico termico dell'edificio con energia proveniente dal TLR e rispettivamente il restante 8% e 14% con energia proveniente da campo solare;
- nel caso dei test della sessione B2 la sottostazione bidirezionale permette di coprire il 41,5% del carico termico dell'edificio; questo è dovuto principalmente alla contemporaneità tra richiesta dell'utente e disponibilità di calore di scarto;
- la sottostazione permette di trasferire il 13% e il 9,6% dell'energia annuale prodotta da solare all'utente, il 68% e 79,5% viene immesso nella rete di TLR mentre il 19% e l'11% è disperso sotto forma di perdite, rispettivamente considerando i test della sessione A e B1; si osserva dunque un aumento della frazione di energia solare immessa nella rete di TLR nei test della sessione B1 per effetto di una maggiore produzione da solare, una minore richiesta da parte dell'utente e minori perdite rispetto alla sessione A.

È importante osservare che i flussi energetici sono stati valutati considerando di utilizzare istantaneamente l'energia da sistema di generazione disponibile per soddisfare le richieste dell'utenza inviando il surplus nella rete di teleriscaldamento. Si può notare che, per tutte le sessioni di test, si ha energia proveniente da sistema di generazione immessa nella rete di teleriscaldamento pur potendo potenzialmente essere utilizzata per soddisfare totalmente o parzialmente le richieste dell'utenza. Ciò accade a causa della non contemporaneità tra richiesta dell'utente e disponibilità di energia dal sistema di generazione considerato. Al fine di aumentare la percentuale di energia solare/calore di scarto utilizzata per coprire il carico, è stata fatta l'ipotesi di applicare un sistema di scambio sul posto termico giornaliero e i risultati ottenuti sono stati estrapolati all'intero anno. Da un'analisi comparativa emerge che:

- per la sessione A e B1 si ha un aumento rispettivamente del 15,9 % e 37,8% della frazione di energia all'utente da solare in regime di scambio sul posto giornaliero rispetto; inoltre, si ha una parte di energia da sistema di generazione che viene immessa nella rete di TLR e non prelevata per soddisfare l'utente per una quantità rispettivamente pari a 14.802 kWh e 28.385 kWh; sarebbe, quindi, potenzialmente possibile aumentare ulteriormente la frazione di energia all'utente da sistema di generazione, considerando il regime di scambio sul posto su un intervallo di tempo più ampio (mensile o annuale anziché giornaliero);
- per la sessione B2 la frazione di energia all'utente da calore di scarto arriva al 100% con un aumento del 58,5 % rispetto al considerare solo quella istantaneamente autoconsumata; inoltre risulta che una parte di energia prodotta dal sistema di generazione è immessa nella rete di TLR per una quantità pari a 93.254 kWh annuali.

In conclusione, è possibile affermare che tutte le sessioni di test hanno evidenziato un corretto funzionamento delle logiche di controllo implementate anche in condizioni di funzionamento realistiche. In particolare, la sottostazione, una volta equipaggiata con scambiatori di calore opportunamente dimensionati, è stata in grado di soddisfare l'utenza andando a fornire, quando richiesto, energia ad una temperatura di 70 °C per i test della sessione A e 55 °C per i test della sessione B, e garantendo le condizioni di *comfort* all'interno dei locali del modello di edificio considerato.

5 Appendice

5.1 Dati climatici

5.1.1 Condizioni dell'aria esterna

Le condizioni meteo utilizzate per la simulazione sono quelle medie della cittadina di Castenaso, comune compreso nell'area metropolitana di Bologna. Oltre a temperatura dell'aria esterna nel file meteo sono presenti una serie di informazioni aggiuntive (irraggiamento, umidità relativa ecc.) per permettere una simulazione il più possibile aderente ad un caso reale. Il file usato è il file ottenuto dal database di Meteonorm [6] e il time step è pari a un'ora.

5.1.2 Temperatura del vano non riscaldato posto sotto il primo piano abitato

Il tipo di edificio considerato (casa multifamiliare piccola) generalmente non presenta appartamenti direttamente a contatto con il terreno, ma piuttosto con zone non riscaldate (ad esempio garage o cantine). Per tale motivo, per simulare nel modo più corretto le dispersioni termiche del primo piano abitato si impone come condizione al contorno nel modello la temperatura dei locali non riscaldati presenti al di sotto degli appartamenti considerati. Tale temperatura viene calcolata, con timestep mensile, in base alle indicazioni contenute nella norma UNI EN ISO 13370 [11]. La Figura 5.1 riporta i valori mensili ottenuti (compresi tra 15°C e 23°C) e utilizzati nelle simulazioni.

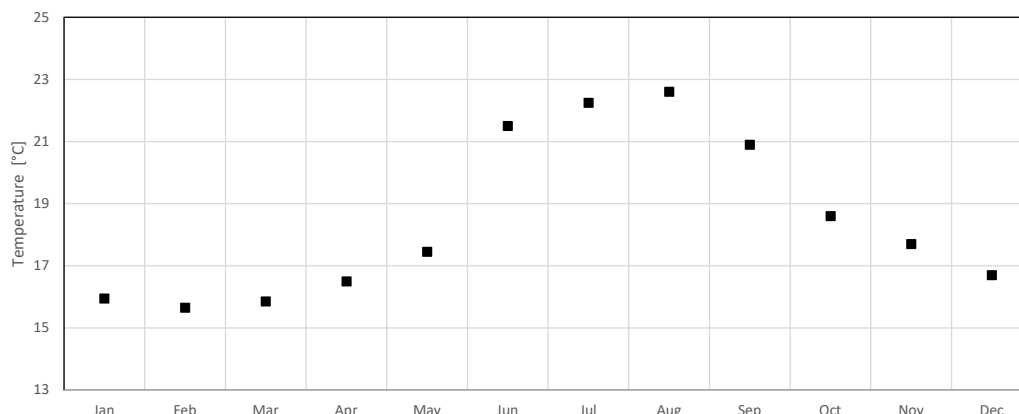


Figura 5.1. Temperatura media mensile dei locali non riscaldati posti sotto il primo piano abitato

5.1.3 Curva climatica

Le impostazioni relative alla curva climatica considerata nella sessione di test A prevedono una temperatura di mandata minima ai radiatori pari a 40 °C in corrispondenza di una temperatura dell'aria esterna pari a 20 °C e una temperatura di mandata massima pari a 70 °C in corrispondenza di una temperatura dell'aria esterna pari a -7 °C (temperatura dell'aria ambiente minima durante l'anno considerato nella località presa in esame). Per quanto riguarda invece la sessione di test B, le migliori performance dal punto di vista termico dell'involucro consentono di soddisfare la domanda di riscaldamento dell'edificio, a parità di terminali di emissione, con temperature di mandata più basse. In particolare, la temperatura di mandata minima ai radiatori viene ridotta a 30 °C in corrispondenza di una temperatura dell'aria esterna pari a 20 °C, mentre la temperatura di mandata massima viene ridotta a 55 °C in corrispondenza di una temperatura dell'aria esterna pari a -7 °C. In entrambi i casi, i valori estremi vengono interpolati con un'interpolazione lineare. La Tabella 5.1 riassume le caratteristiche della curva climatica utilizzata nella sessione di test A e nella sessione di test B (per quest'ultima i valori sono riportati tra parentesi).

Tabella 5.1. Parametri relativi alla curva climatica impostata

T ARIA ESTERNA [°C]	T MANDATA CALDAIA [°C] SESSIONE A	T MANDATA CALDAIA [°C] SESSIONE B
20	40	30
-7	70	55

5.2 Radiatore e collettore solare scelti per le simulazioni

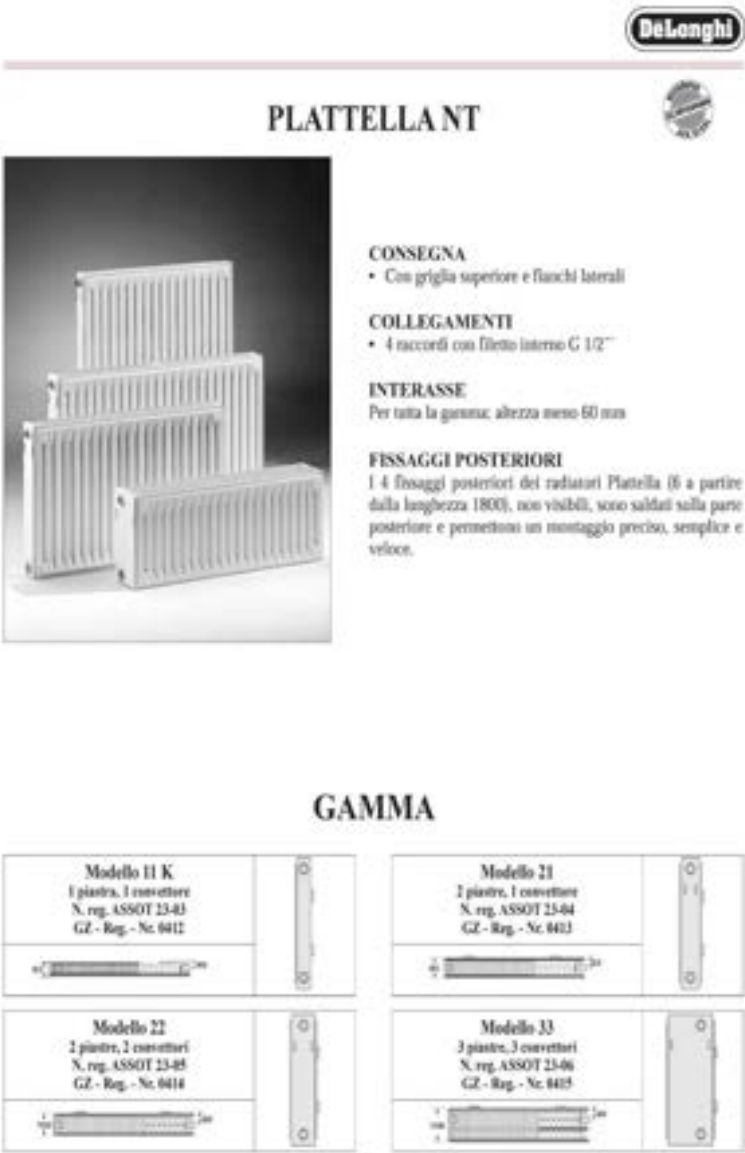


Figura 5.2. Tipo di radiatore considerato

Datenblatt ökoTech GS

Kollektor-Typ	Industrie																			
	1,6x3	1,2x4	1,2x6	1,2x8	1,2x7	6,3	8,8	16,6	12,8	14,7	7,2	9,6	12,8	14,3	16,7	36,5				
Konstruktionshöhe	13					13					13					13				
Breite	120,8					205					233					302				
Länge	310	411	513	615	717	310	411	513	615	717	310	411	513	615	717	310				
Bruttofläche	3,7	5,0	6,2	7,4	8,8	8,8	10,5	12,8	14,7	7,2	9,6	12,8	14,3	16,7	9,3	12,4				
Aperturfläche	3,3	4,4	5,5	6,6	7,7	5,7	7,7	9,8	11,8	13,5	6,8	8,8	11,0	13,2	15,4	17,3				
Wärmeübergangskoeffizient	1	2,0	3,5	4,3	5,2	6,0	4,4	5,9	7,3	8,8	10,3	5,0	6,7	8,4	10,0	11,2				
Kollektor-Typ	Resi																			
	1,6x3	1,2x4	1,2x6	1,2x8	1,2x7	6,3	8,8	16,6	12,8	14,7	7,2	9,6	12,8	14,3	16,7	36,5				
Konstruktionshöhe	13					13					13					13				
Breite	120,8					205					233					302				
Länge	310	411	513	615	717	310	411	513	615	717	310	411	513	615	717	310				
Bruttofläche	3,7	5,0	6,2	7,4	8,8	8,8	10,5	12,8	14,7	7,2	9,6	12,8	14,3	16,7	9,3	12,4				
Aperturfläche	3,3	4,4	5,5	6,6	7,7	5,7	7,7	9,8	11,8	13,5	6,8	8,8	11,0	13,2	15,4	17,3				
Wärmeübergangskoeffizient	1	2,0	3,5	4,3	5,2	6,0	4,4	5,9	7,3	8,8	10,3	5,0	6,7	8,4	10,0	11,2				
Durchflussmenge	min. 10 l/min - max. 80 l/min																			
Wärmeträger-Medium	Wasser Propylenglykol Gemisch, (bei Frostschutz-Ansatz je nach Anteil Frosttemperatur ablesen)																			
Belastbarkeit	maximal zulässiger Druck im Kollektor: 8 bar (auf Befehl auch Ausführung für max. 11 bar erhältlich)																			
Korrosionsklasse *)	10 + 0,7%																			
Wärmeübergangskoeffizient *)	$\alpha_l = 3,879 \text{ W/m}^2\text{K}$; $\alpha_g = 0,016$ (bei $s = 3,0 \text{ m/s}$)																			
Belastungstemperatur *)	175,7 °C - bei 1800h Einstrahlung, 30°C Umgebungstemperatur																			
Absorber	Sunselect® - gepulverte Absorber mit selektiver Beschichtung Absorber: ± 10% / 2%, Selektiv: ± 1%																			
Dämmung	Dämmstärke: 70 mm																			
Abdeckung	extrudiertes Solarstahlschutzglas 4mm (Lichtdurchlässigkeit > 90%)																			
Dichtungsmittel	Aluminiumprofile mit EPDM-Dichtungen																			
Material	Holzrahmen								Alu-Holzrahmen											
Gewicht	ca. 28 kg / m²																			
Belastung	auf Dachflächen befestigt								auf Dach / Aufklebung											
Anschluss	22 / 28 mm Kupferrohre																			
Verbindungsart	verschraubt mit hochtemperaturfesten Sandgrenz-Solar-Werkstoff (bis 200°C) oder solarergänzende Verschraubungen - Halbfeder ist nicht erlaubt																			
max. Wärmeleitung	3 mm in Absorberbleche Die Trennung ist so auszuführen, dass kein Dämmstoff der Absorber gedämmen wird.																			
Feuchtheitschutz	Holzrahmen vor Regen zu schützen, Öko-Tech®-Einbauelemente schützen								vollständig geschützt											
Montage	Bei der Montage sind die entsprechenden bzw. gesetzlich vorgeschriebenen Sicherheitsvorkehrungen für Montage und Fixierung zu treffen. Montage und Verputzarbeiten sind von befugten Personen nach den technischen Regeln der Berufsgenossen durchzuführen. Mindestabstand zum Dach: 20 cm. Weitere Hinweise siehe ökoTech Montageanleitung.																			

*) Prüfverfahren: EN 12007 1.3-1.7 bzw. EN 12007 1.3-1.7 (nach DIN EN 12007, 1.3-1.7) und EN 12007 1.3-1.7 (nach DIN EN 12007, 1.3-1.7) und EN 12007 1.3-1.7 (nach DIN EN 12007, 1.3-1.7)

Österreichisches Forschungsinstitut für Photovoltaik und Photovoltaik Research GmbH, 2006

Stand: 12/2016, Hersteller: August Schmalzer GmbH, 12016



Revizor: 14/02/2017

Technische Änderungen und Druckfehler vorbehalten

solarkollektoren.at

Figura 5.3. Scheda tecnica del collettore solare termico considerato (ökoTech GS)



Figura 5.4. Certificato di test del collettore solare termico considerato

5.3 Impianto di laboratorio

5.3.1 Connessione laboratorio con sottostazione

Nel seguito è riportata una descrizione del collegamento della sottostazione con la test facility e del modello numerico con la test facility e sottostazione e alcune osservazioni necessarie per una chiara interpretazione dei risultati delle prove effettuate.

Uno schema di collegamento della sottostazione con la test facility è mostrato in Figura 5.5, in cui sono visibili i 3 scambiatori di calore. Nelle prove della sessione A è richiesto di fornire alla sottostazione energia termica ad 80 °C al primario dello scambiatore S1 (controllando T1) e ad una temperatura maggiore di 80 °C al primario degli scambiatori S2/S3 (controllando T5). Il controllo di queste temperature è affidato alla test facility. Il sensore di temperatura T1 della sottostazione è in serie al sensore W.PS1:TM01 della test facility, mentre il sensore T5 della sottostazione è in serie al sensore W.HE:TM02 della test facility. L'energia termica da fornire al primario degli scambiatori è prodotta nella test facility utilizzando una caldaia con potenza nominale di 75 kW. Poiché il fluido termovettore usato nella caldaia è olio diatermico, viene utilizzato uno scambiatore olio-acqua per trasferire l'energia termica alla parte del circuito in cui è utilizzata acqua e quindi alla sottostazione. Come si può notare dallo schema, W.PS1:TM01 (e quindi T1) è in serie a W.HE:TM02 ed è controllato ad 80 °C tramite una valvola: è possibile, quindi, controllare W.PS1:TM01 ad un valore inferiore a W.HE:TM02, ma non superiore. Ne consegue che, in questa configurazione impiantistica, essendo 80 °C il valore di temperatura alla quale bisogna fornire energia da TLR alla sottostazione, esso rappresenta anche il valore minimo di temperatura alla quale è possibile fornire energia alla sottostazione proveniente

dall'accumulo solare. Al fine di avere $T_5 > 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, viene controllata la temperatura W.HE:TM01 (in uscita dallo scambiatore olio-acqua) con un controllo PID il cui attuatore è la pompa lato olio dello scambiatore stesso, ovvero O.TPS:VP01. Tale temperatura viene controllata ad un valore massimo di $92\text{ }^{\circ}\text{C}$, per questioni di sicurezza. Questa temperatura viene abbassata al valore di set point risultante dalla simulazione corrispondente alla temperatura di uscita dall'accumulo solare (in W.HE:TM02) con un controllo PID il cui attuatore è la valvola a 3 vie W.HE:MV01. Tale temperatura è in serie a W.PS2:TM01 e quindi a T_5 .

Per quanto riguarda S_1 , al fine di avere $T_1 = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, viene controllata la temperatura W.PS1:TM01 con un controllo PID il cui attuatore è la valvola a 3 vie W.PS1:MV01: il fluido caldo ad una temperatura maggiore di $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ viene prelevato dal ramo proveniente dallo scambiatore olio-acqua della test facility e controllato alla temperatura desiderata. Si può notare che nella configurazione descritta ci sono diversi PID che lavorano in serie. L'interazione di tali PID causa delle oscillazioni nei valori di temperatura da controllare e fornire alla sottostazione (T_1 e T_5), come si può osservare nei grafici riportati per le singole prove. Inoltre, anche le portate M_2 ed M_5 nei due circuiti considerati possono, in alcuni casi, essere influenzate dalla configurazione circuitale considerata. Può accadere che durante il funzionamento del circuito S_2/S_3 , principalmente dello scambiatore S_2 , si attivi anche lo scambiatore S_1 : questo crea degli sbilanciamenti nelle portate M_2 ed M_3 che possono indurre delle oscillazioni e/o picchi principalmente nella fase iniziale, come si può osservare nei grafici riportati per le singole prove. L'interazione tra gli scambiatori considerati crea anche dei picchi e/o cadute di temperatura in T_1 e T_5 . Questi squilibri si risolvono in breve tempo grazie ai controlli implementati sulla sottostazione.

5.3.2 Connessione laboratorio e sottostazione con modello numerico

In Figura 5.6 si riporta uno schema semplificato di collegamento della sottostazione e quindi della test facility con il modello numerico di edificio e di circuito solare. In particolare sono evidenziati in blu gli input al modello numerico e in arancione gli output dal modello.

Il collegamento della sottostazione/test facility con il modello numerico di edificio avviene al primario del separatore idraulico (modello) che è collegato al lato utente della sottostazione (secondario scambiatori S_1 e S_2). Si ha il seguente scambio di informazioni tra modello e sottostazione/test facility:

- Il modello numerico ha come input la temperatura T_{10} in uscita dalla sottostazione e la portata M_8 circolante al lato utente della sottostazione.
- Il modello numerico ha come output la temperatura in uscita al primario del separatore idraulico, indicata con A.TRN:TM01. Con riferimento alla Figura 5.5, tale variabile viene controllata dalla test facility in W.BT:TM04 (in serie a T_8) tramite la valvola W.BT:MV02.
- La circolazione di fluido al lato utente della sottostazione è possibile grazie alla pompa W.P2:MV01 della test facility (rif. Figura 5.5) che viene avviata sulla base di un segnale proveniente dal modello: quando si ha una richiesta di riscaldamento o caricamento accumulo di ACS, il modello numerico invia un segnale per l'accensione della sottostazione e quindi della pompa.

La valutazione dell'energia termica ceduta dal laboratorio/sottostazione all'edificio per riscaldamento è fatta considerando i sensori di temperatura T_8 , T_{10} e il sensore di portata M_8 . La valutazione dell'energia termica in ingresso all'edificio emulato è fatta considerando i sensori di temperatura T_{10} , A.TRN:TM01 (output emulazione) e il sensore di portata M_8 . Tali energie dovrebbero essere coincidenti nel caso in cui T_8 sia pari a A.TRN:TM01. È presente una differenza massima del 9% (maggiore l'energia ceduta dal laboratorio) nelle giornate con riscaldamento attivo e una differenza maggiore (fino al 20%) nelle giornate con sola richiesta di caricamento ACS. La differenza è dovuta principalmente ai limiti tecnici del controllo di temperatura sopra menzionato. Infatti, dall'accensione del riscaldamento sono necessari circa 10 minuti per avere un controllo ottimale della temperatura a causa delle normali variazioni della temperatura di mandata; ciò causa questa differenza tra le energie che in termini percentuali sarà maggiore quanto minore sono le ore di accensione. Il collegamento della sottostazione/test facility con il modello numerico di circuito solare avviene al secondario dell'accumulo solare (modello) che è collegato al lato generazione della sottostazione (connessioni 5-7, primario degli scambiatori S_2 ed S_3). Si ha il seguente scambio di informazioni tra modello e sottostazione/test facility:

- Il modello numerico ha come input la temperatura T_7 in uscita dalla sottostazione e un valore di portata indicato con $M7_modello$, calcolato come indicato nel seguito.

- Il modello numerico ha come output la temperatura in uscita al secondario dell'accumulo solare, indicata con A.TRN:TM02. Con riferimento alla Figura 5.5, tale variabile viene controllata dalla test facility in W.HE:TM02 (in serie a T5) tramite la valvola W.HE:MV01.
- La circolazione di fluido al lato utente della sottostazione è possibile grazie alla pompa W.HE:VP01 della test facility che viene avviata sulla base di un segnale proveniente dal modello: quando si ha disponibilità di energia solare nell'accumulo, sulla base delle logiche di controllo implementate, il modello numerico invia un segnale per l'accensione della pompa suddetta. Da notare che tale pompa è attiva anche quando si ha prelievo dalla rete di TLR e quindi è attivo lo scambiatore S1.

La valutazione dell'energia termica in ingresso alla sottostazione e proveniente dall'accumulo solare è fatta considerando i sensori di temperatura T5, T7e il sensore di portata M7. La valutazione dell'energia termica in uscita dall'accumulo solare emulato dovrebbe essere fatta considerando i sensori di temperatura T7, A.TRN:TM02 (output emulazione) e il sensore di portata M7. Tali energie dovrebbero essere coincidenti nel caso in cui T5 sia pari a A.TRN:TM02. Nei primi test effettuati si è notata una differenza dell'ordine del 40 % (maggiore l'energia in uscita dall'accumulo solare emulato rispetto a quella in ingresso alla sottostazione) dovuta principalmente alla difficoltà del controllo di temperatura di garantire l'uguaglianza delle due temperature in un tempo limitato. Si è deciso quindi di modificare la modalità di interazione tra laboratorio e modello, implementando un controllo in potenza ed evitare quindi di "distruggere" energia solare presente nell'accumulo solare. Al fine di eguagliare ad ogni istante la potenza ceduta dall'accumulo solare emulato e quella in ingresso al lato generazione della sottostazione e mantenere come temperature quelle realmente presenti nel laboratorio e nel modello, viene inviato al modello una portata fittizia (in luogo di quella reale M7) calcolata come segue:

$$M7_{modello} = M7 * \frac{T5 - T7}{A.TRN:TM02 - T7} \quad (5.1)$$

Con questo nuovo accorgimento, la differenza tra l'energia termica in uscita dall'accumulo solare emulato rispetto a quella in ingresso alla sottostazione raggiunge un valore massimo del 6% (maggiore l'energia in uscita dall'accumulo solare emulato).

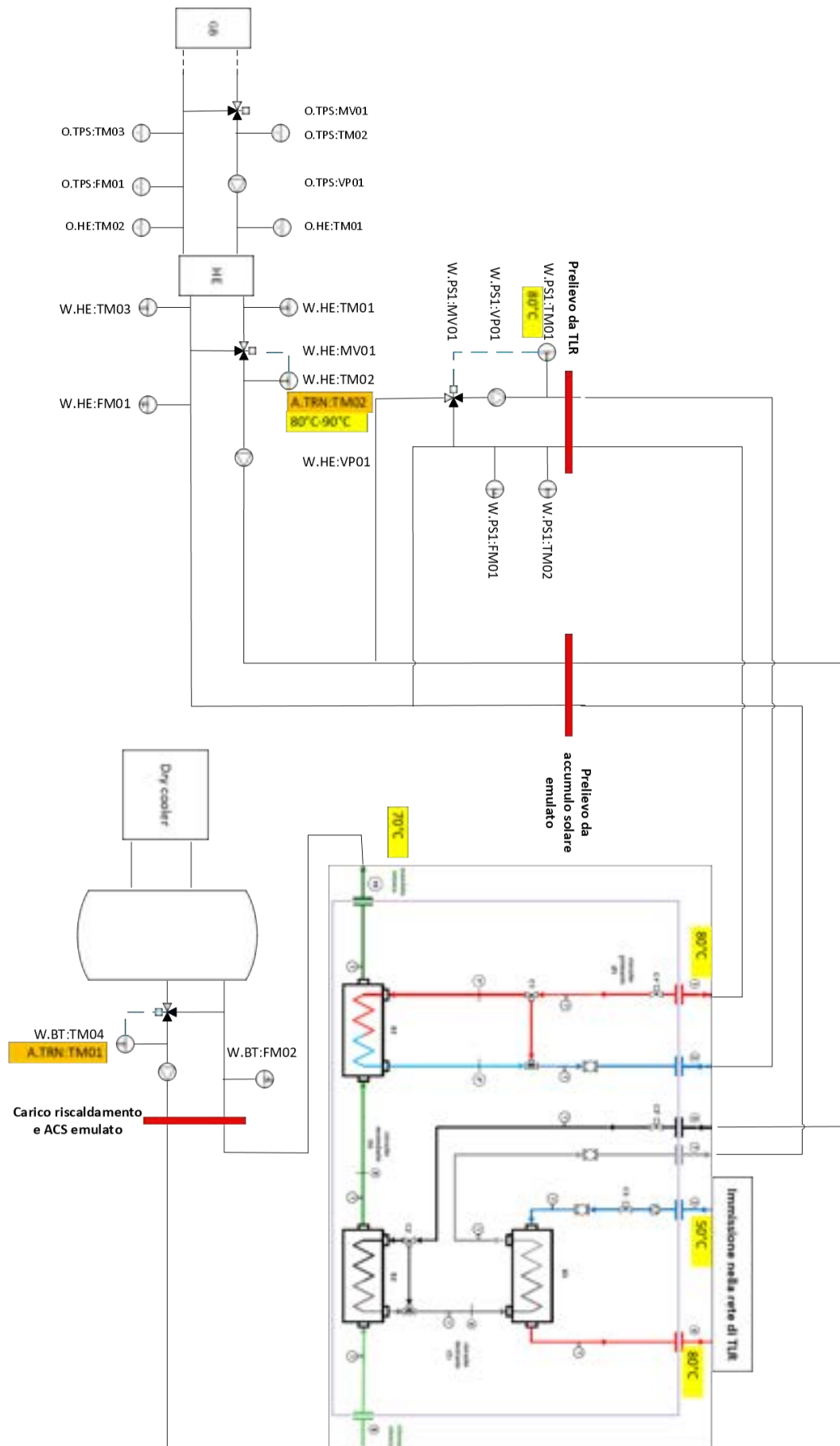


Figura 5.5. Schema di collegamento della sottostazione al laboratorio Energy Exchange di EURAC

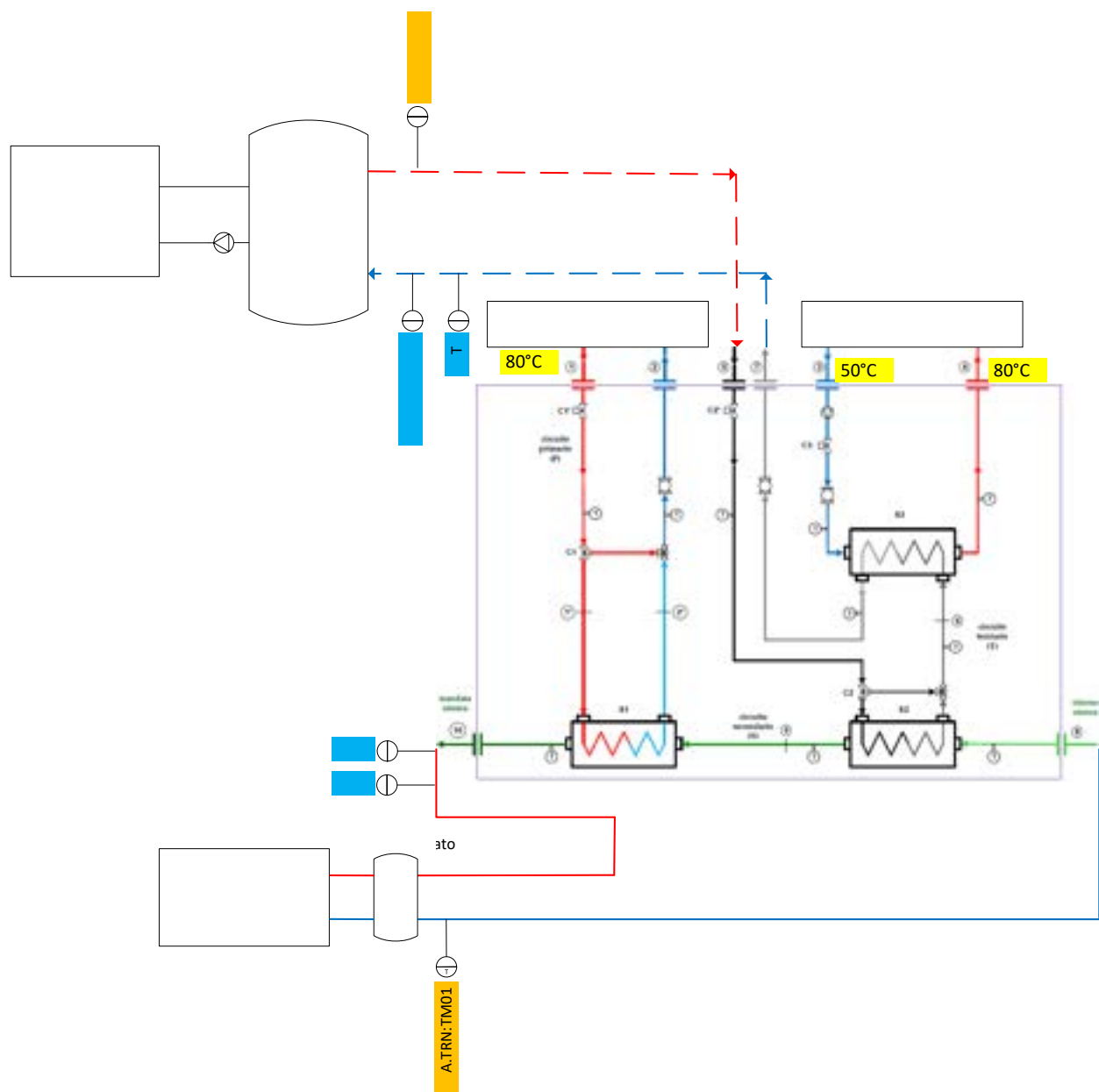


Figura 5.6. Schema connessione modello numerico con la sottostazione

5.4 Ulteriori risultati della seconda campagna di prove sperimentali

5.4.1 Sessione A - Giorno 2

Il giorno di test 2 è il 21/03 per il quale sono presenti richieste di ACS e riscaldamento da parte dell'utente rientrando nel periodo di riscaldamento.

In Figura 5.7 viene mostrato, nel grafico inferiore, in nero il comando di avvio della sottostazione per richiesta da parte dell'utente sia per riscaldamento che per ACS, in verde le richieste di caricamento dell'accumulo di ACS e in arancione la disponibilità di energia solare nell'accumulo solare che può essere utilizzata dalla sottostazione. Nel grafico superiore si riporta in magenta la potenza termica fornita dallo scambiatore S1 e in rosso quella fornita dallo scambiatore S2 per soddisfare le richieste termiche. Nel grafico centrale si riporta in viola la potenza termica fornita dallo scambiatore S3 alla rete di teleriscaldamento.

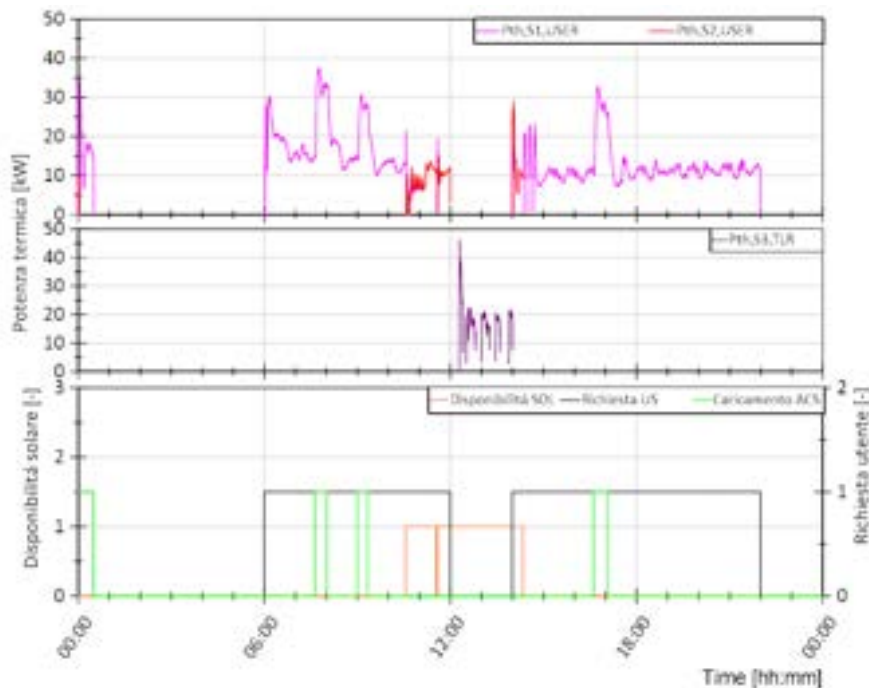


Figura 5.7. Sessione A, Giorno 2. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità energia solare nell'accumulo (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

Dal confronto tra i tre grafici si può notare che le richieste termiche dell'utente sono principalmente soddisfatte dallo scambiatore S1 e quindi dalla rete di TLR. All'avviamento della sottostazione e quando si hanno richieste di caricamento dell'accumulo di ACS si registrano degli incrementi improvvisi nelle potenze termiche scambiate per effetto sia di variazione dinamiche di temperature e portata tipiche dell'avviamento, che di un'effettiva maggiore richiesta da parte dell'utente dovuta al caricamento dell'accumulo di ACS. Inoltre, la disponibilità di energia solare nell'accumulo solare è in parte contemporanea alla richiesta termica dell'utente: tramite lo scambiatore S2, parte della potenza termica richiesta dall'utente viene fornita dall'impianto solare. La restante disponibilità solare viene immessa nella rete di TLR tramite lo scambiatore S3 che ha un funzionamento intermittente basato sul livello di temperatura alla quale l'energia solare è inviata alla sottostazione in ingresso a tale scambiatore, ovvero si avvia quando T_6 è maggiore di 84°C e resta attivo finché tale temperatura è superiore a 82°C . In Figura 5.8 viene riportato un ingrandimento della Figura 5.7 al fine di visualizzare in dettaglio le ore di funzionamento degli scambiatori S2 ed S3, ovvero tra le 10:00 e le 15:00. Si nota che durante i primi 40 minuti di accensione dello scambiatore S2 (10:30-11:10 circa) si ha un funzionamento in contemporanea allo scambiatore S1 con potenze comparabili. Successivamente funziona solo lo scambiatore S2 per circa 30 minuti. Nell'ultima accensione delle 14:00 per circa 10 minuti lo scambiatore S1 funziona insieme allo scambiatore S2 e successivamente per altri 10 minuti funziona solo S2.

per poi spegnersi per esaurimenti di disponibilità solare. Lo scambiatore S3 immette energia nella rete di TLR quando questa è disponibile e non si hanno richieste da parte dell'utente, ovvero la le 12:00 e le 14:00. Non si verifica, quindi, un funzionamento contemporaneo di S2 ed S3.

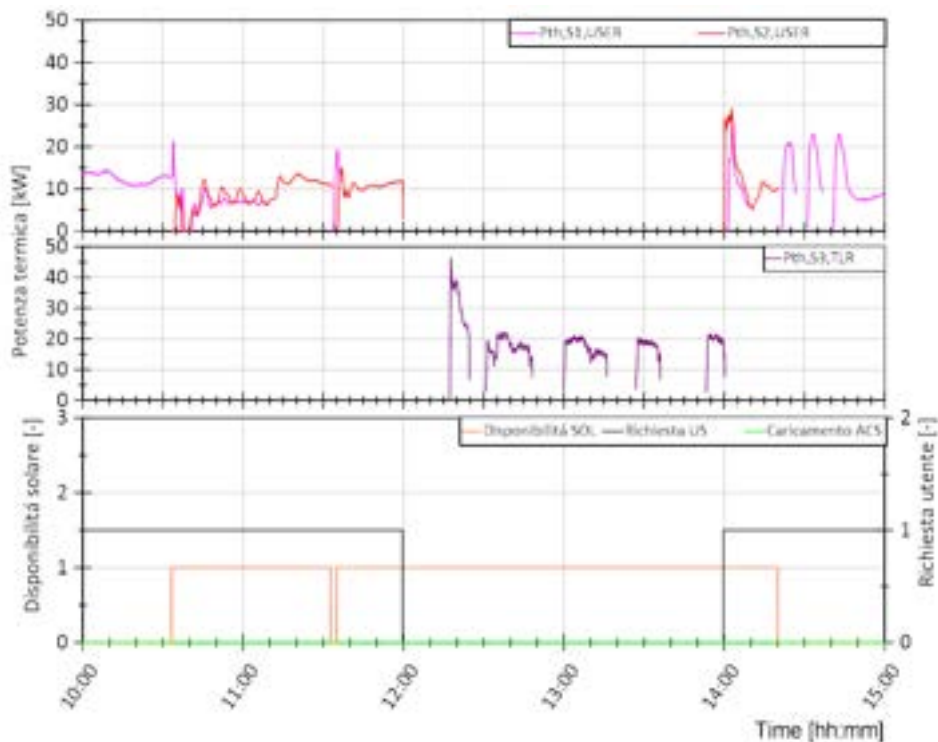


Figura 5.8. Sessione A, Giorno 2 - Dettaglio. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità energia solare nell'accumulo (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

Si riportano nel seguito gli andamenti delle temperature di ingresso e uscita al primario e al secondario degli scambiatori S1, S2 ed S3 e le portate quando questi sono in funzione (Figura 5.9-Figura 5.11). In particolare per gli scambiatori S2 ed S3 si utilizza una scala temporale basata sui momenti di funzionamento al fine di facilitarne la lettura. I grafici mettono in luce alcune caratteristiche relative ai controlli di temperatura e portata sia della test facility che della sottostazione, così come esposto per il giorno 1. Nel seguito si riportano alcune considerazioni riguardo il controllo di temperatura da parte della test facility in T1, T5 e T8 e il controllo di temperatura da parte della sottostazione in T4 e T10.

Con riferimento alla Figura 5.12 si può notare come l'andamento del valore misurato T1 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa ± 2 °C quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento o caricamento dell'accumulo di ACS. Le prime sono dovute al controllo di temperatura della test facility a monte del punto di collegamento 1-2 con la sottostazione, così come descritto nel capitolo 5.3.1; le seconde sono dovute a improvvise variazioni di richieste termiche da parte dell'utente che richiedono tra i 15 e i 30 minuti di tempo per essere controllate da parte della test facility. Così come descritto nel seguito, tali oscillazioni non compromettono il soddisfacimento delle richieste termiche dell'utente.

Con riferimento alla Figura 5.13 si può notare come l'andamento del valore misurato T5 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa ± 5 °C quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento. Le prime sono dovute al controllo di temperatura della test facility a monte del punto di collegamento 5-7 con la sottostazione, così come descritto nel capitolo 5.3.1 e sono accentuate dalla distanza circuitale che tra il punto in cui tale temperatura viene controllata e il punto in cui T5 è posizionato; le seconde sono dovute prevalentemente alle perdite termiche che si hanno nel circuito di collegamento tra sottostazione e test facility e richiedono tra i 15 e i 45 minuti di tempo per essere controllate da parte della test facility.

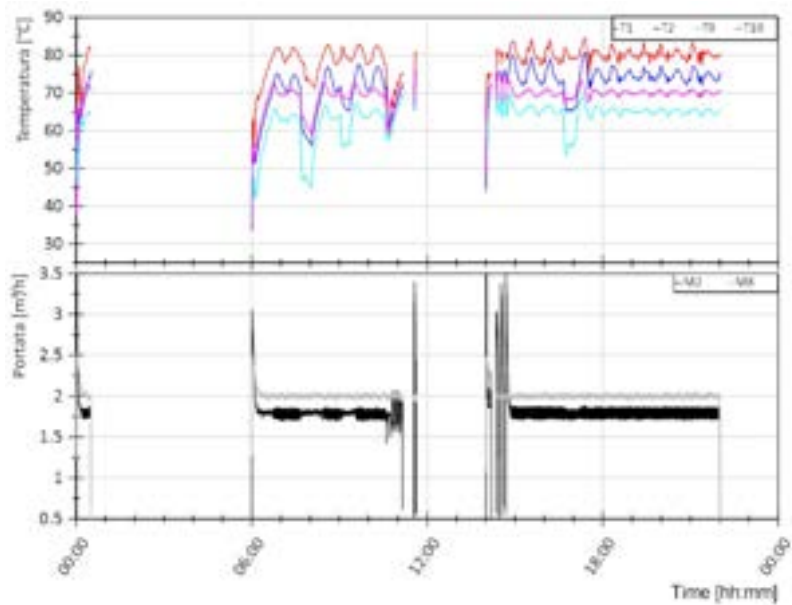


Figura 5.9. Sessione A, Giorno 2. Andamento delle temperature lato teleriscaldamento (mandata dal teleriscaldamento T1, ritorno al teleriscaldamento T2) e lato utenza (uscita dallo scambiatore S2 T9, mandata all'utenza T10) dello scambiatore S1 (grafico superiore), andamento della portata lato teleriscaldamento (M2) e lato utenza (M8) dello scambiatore S1 (grafico inferiore)

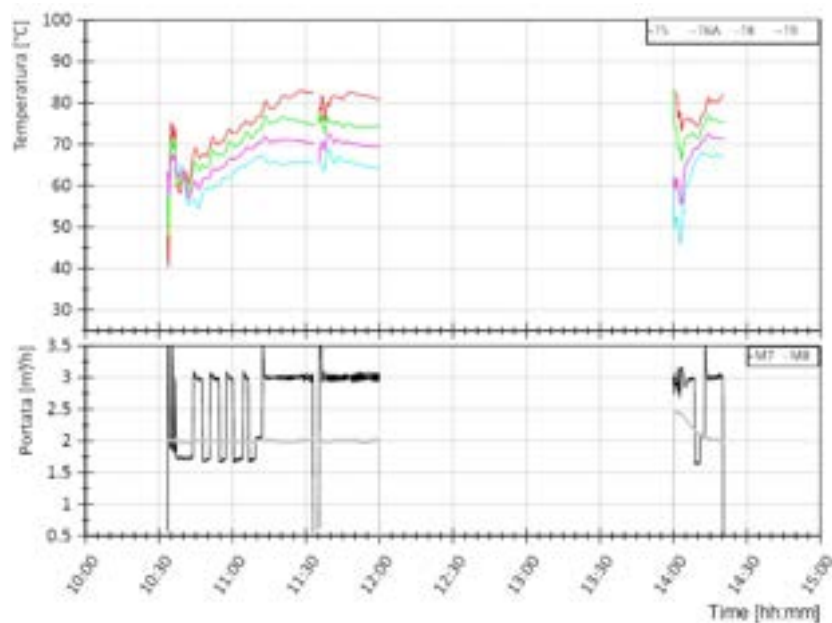


Figura 5.10. Sessione A, Giorno 2 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (mandata dal sistema di generazione T5, ritorno al sistema di generazione T6 e uscita scambiatore S2 T6A) e lato utenza (ritorno dall'utenza T8, mandata all'utenza T9) dello scambiatore S2 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato utenza (M8) dello scambiatore S2 (grafico inferiore)

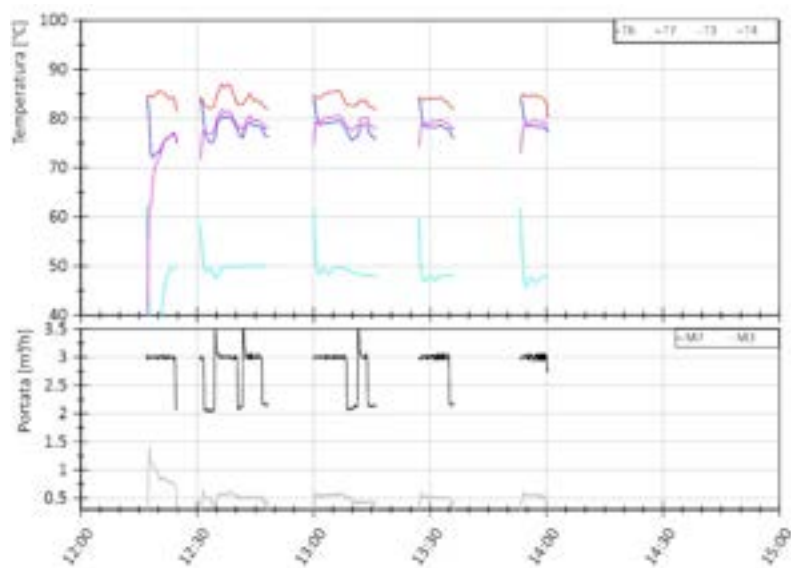


Figura 5.11. Sessione A, Giorno 2. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (Ingresso scambiatore S3 T6 e ritorno al sistema di generazione T7) e lato TLR (ritorno dal TLR T3, mandata al TLR T4) dello scambiatore S3 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato TLR (M3) dello scambiatore S3 (grafico inferiore)

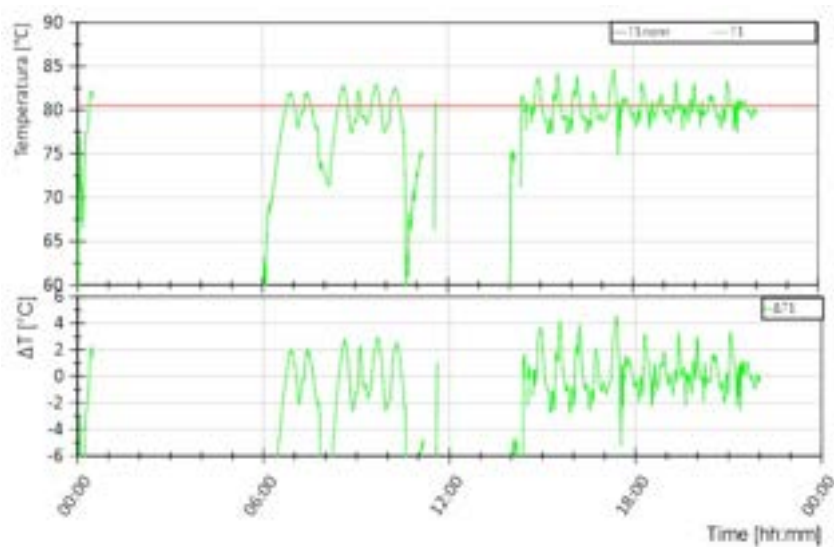


Figura 5.12. Sessione A, Giorno 2. Andamento della temperatura di mandata dal teleriscaldamento T1 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T1nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)



Figura 5.13. Sessione A, Giorno 2 - Dettaglio. Andamento della temperatura di mandata dal sistema di generazione T5 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T5nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

Con riferimento alla Figura 5.14, si può notare come l'andamento del valore misurato T8 (curva verde nel grafico superiore) sia in ritardo rispetto all'andamento del valore di riferimento T8nom (curva rossa nel grafico superiore). Questo ritardo è dovuto essenzialmente alla distanza circuitale tra il punto della test facility in cui T8 viene controllata al valore di riferimento e il punto della sottostazione in cui T8 viene misurata. Di conseguenza si hanno scostamenti assoluti rilevanti rispetto al valore di riferimento in corrispondenza di una brusca variazione del valore di riferimento ma contenuti in $\pm 1^\circ\text{C}$ nel funzionamento in condizioni stabili. Con riferimento alla Figura 5.15 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T10nom e il valore misurato T10 sia inferiore a $\pm 1^\circ\text{C}$ per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T10 da parte della sottostazione, nonostante le oscillazioni registrate in ingresso allo scambiatore S1 ed S2. Si ha una maggiore discrepanza nella condizione di richiesta massima da parte dell'utenza e all'avviamento: in questa condizione si registrano anche degli abbassamenti maggiori di 5°C nella temperatura T1 e quindi gli scambiatori S1 ed S2 operano in condizioni di funzionamento diverse da quelle di progetto non riuscendo a garantire 70°C in uscita ma comunque riuscendo a soddisfare le richieste termiche dell'utente, come risulta da descrizione dei grafici in Figura 5.17 e Figura 5.18 riportati nel seguito.

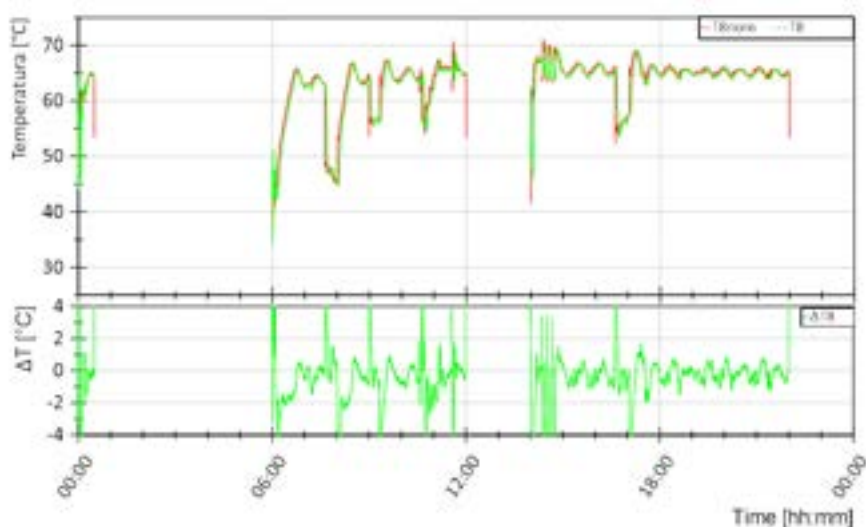


Figura 5.14. Sessione A, Giorno 2. Andamento della temperatura di ritorno dall'utenza T8 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T8nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

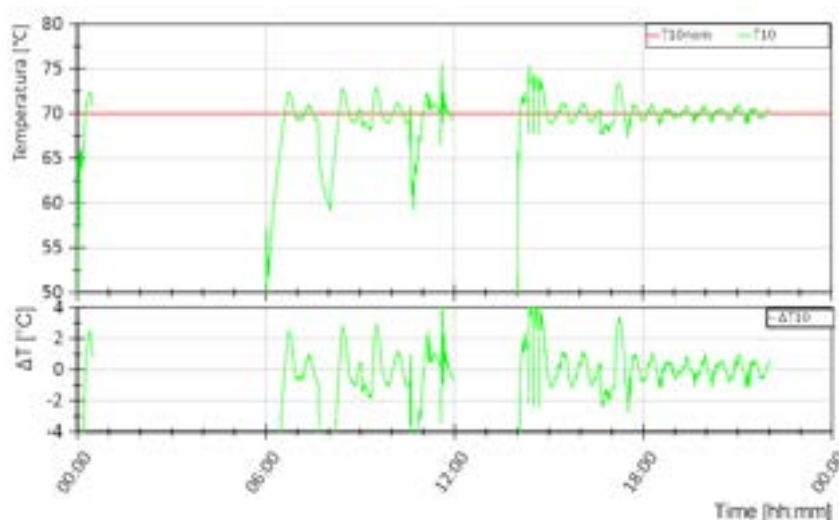


Figura 5.15. Sessione A, Giorno 2. Andamento della temperatura di mandata all'utenza T10 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T10nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

Con riferimento alla Figura 5.16 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento $T4_{nom}$ e il valore misurato $T4$ sia inferiore a ± 2 °C per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della $T4$ da parte della sottostazione, nonostante le oscillazioni registrate in ingresso allo scambiatore S3. Si ha una maggiore discrepanza all'avviamento e nei momenti in cui la temperatura di ingresso lato generazione ($T6$) è prossima ad 82 °C, così come descritto per il giorno 1.

In Figura 5.17 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio e la temperatura ambiente e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo di ACS (in grigio) nonché la portata di caricamento (in arancione) e di ricircolo (in blu). Si può notare dal grafico superiore come la temperatura all'interno degli appartamenti sia tenuta essenzialmente sopra i 20 °C durante le ore di riscaldamento. Inoltre, dalla Figura 5.18 risulta che la valvola miscelatrice presente nel modello riesce a controllare la temperatura di mandata al riscaldamento secondo curva climatica teorica, nonostante le oscillazioni che si hanno all'avviamento in T1 e T5. Tali oscillazioni non compromettono il soddisfacimento delle richieste dell'utente. Per quanto riguarda l'ACS, si può notare come la temperatura dell'accumulo aumenta ogni qualvolta avviene una carica fino a raggiungere i 60 °C, e diminuisce per effetto delle perdite termiche o richiesta da parte dell'utente che si verifica in corrispondenza di una portata di ricircolo maggiore di 0,27 m³/h.

In Figura 5.19 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in ingresso e uscita dal campo solare e la portata circolante e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo solare (in grigio) e l'intervallo di scarica (in arancione) che indica il periodo in cui l'energia solare viene inviata dall'accumulo alla sottostazione. Dal grafico superiore si evince che in una prima fase di avviamento del campo solare non si ha un caricamento dell'accumulo: la temperatura di uscita dal campo solare è infatti inferiore rispetto alla temperatura nell'accumulo; la carica inizia quando questa temperatura diventa superiore alla temperatura nell'accumulo. Ciò emerge anche dalla Figura 5.20 confrontando la potenza termica prodotta dal campo solare e quella in ingresso all'accumulo solare (rispettivamente in rosso e magenta). Con riferimento alla Figura 5.19, nei momenti in cui si ha la carica dell'accumulo, si assiste ad un aumento della temperatura dello stesso. Tale temperatura può diminuire in corrispondenza di una scarica se la potenza richiesta dalla sottostazione è superiore a quella immessa nell'accumulo in quell'istante o può aumentare in caso contrario. Nel caso in esame, non appena si avvia la scarica con invio di energia termica alla sottostazione, utilizzata dallo scambiatore S2 (curva in blu nel grafico inferiore) ed S3 (curva in rosso nel grafico inferiore), la temperatura nell'accumulo diminuisce.

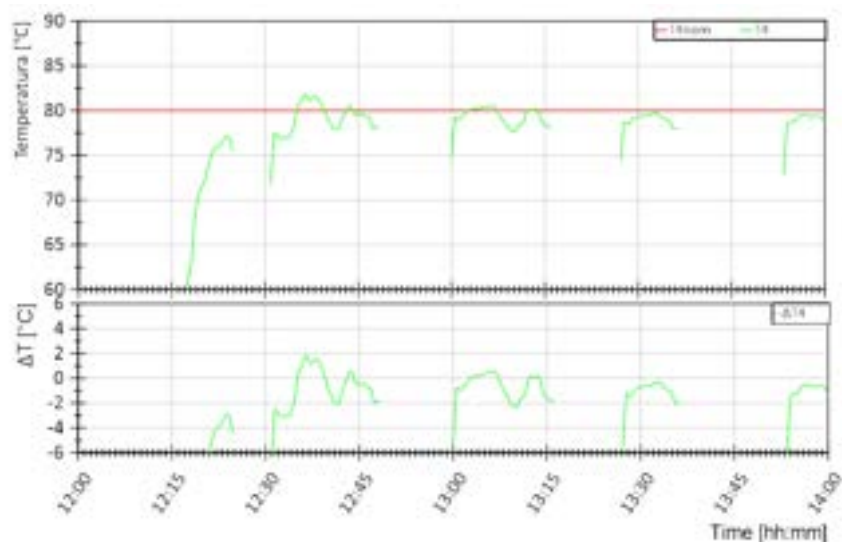


Figura 5.16. Sessione A, Giorno 2 - Dettaglio. Andamento della temperatura di immissione in rete T4 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T4nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

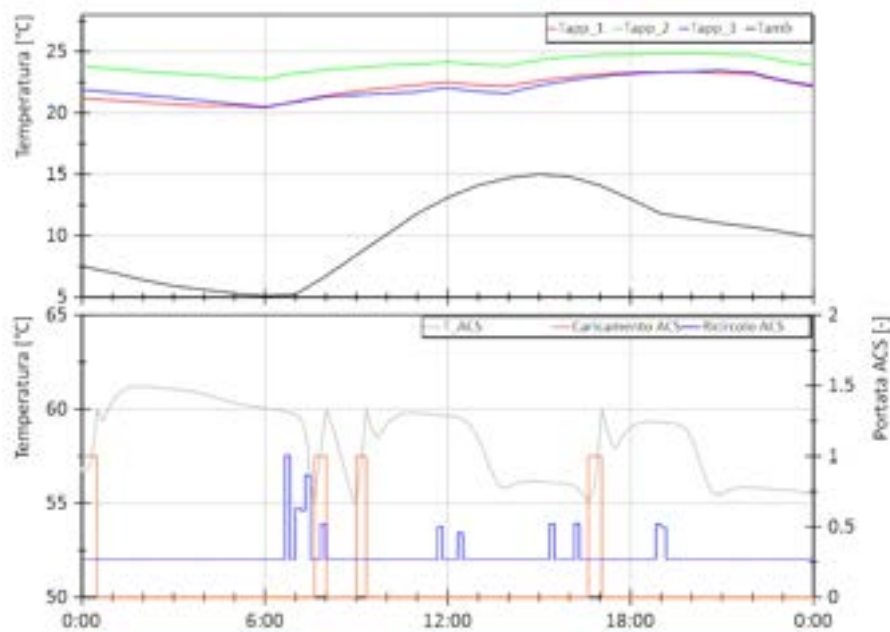


Figura 5.17. Sessione A, Giorno 2. Andamento della temperatura in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio (curve in blu, verde e rosso del grafico superiore) e temperatura esterna (curva in nero grafico superiore), andamento della temperatura nell'accumulo di ACS e portata di caricamento e ricircolo dell'accumulo di ACS (rispettivamente curva un grigio, in arancione e in blu del grafico inferiore)

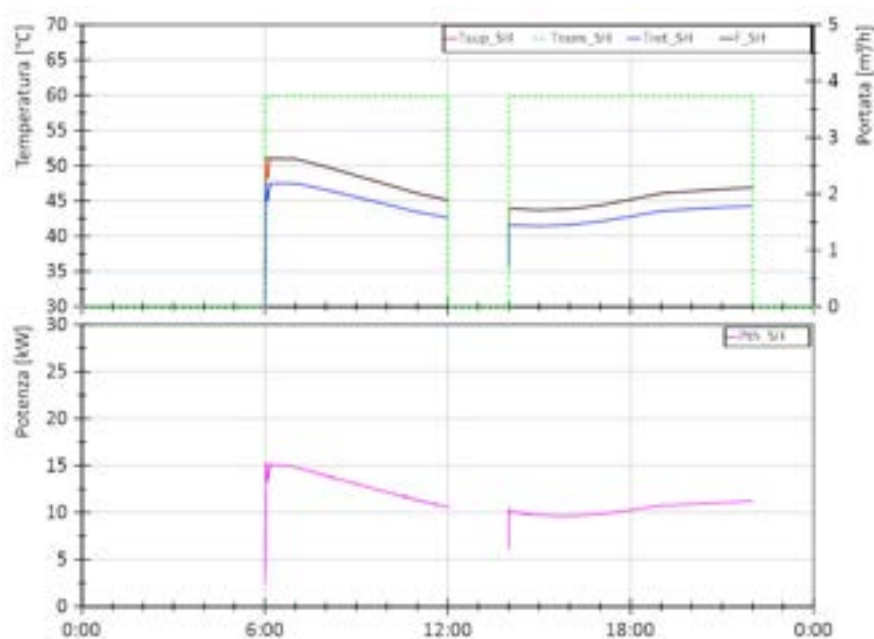


Figura 5.18. Sessione A, Giorno 2. Andamento della temperatura di mandata e ritorno e portata nel circuito di riscaldamento (curva in rosso, blu e tratteggiata verde nel grafico superiore rispettivamente) e andamento della temperatura di mandata al riscaldamento di riferimento (curva in nero), andamento della potenza termica per riscaldamento (curva in magenta grafico inferiore)

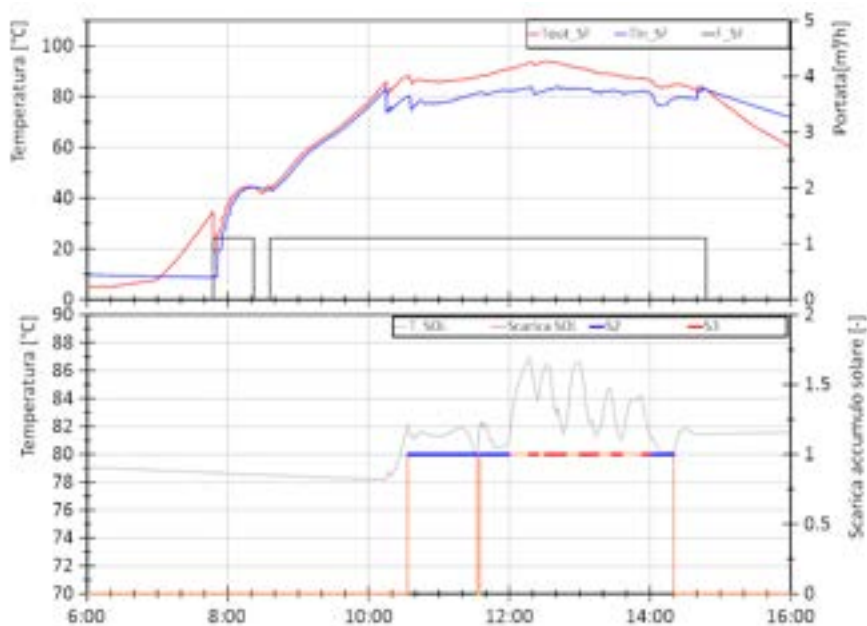


Figura 5.19. Sessione A, Giorno 2. Andamento della temperatura in uscita dal campo solare, in ingresso e la portata (rispettivamente curva in rosso, blu e nero del grafico superiore), andamento della temperatura nell'accumulo solare e intervallo di scarica dell'accumulo solare (rispettivamente curva un grigio e in arancione del grafico inferiore)

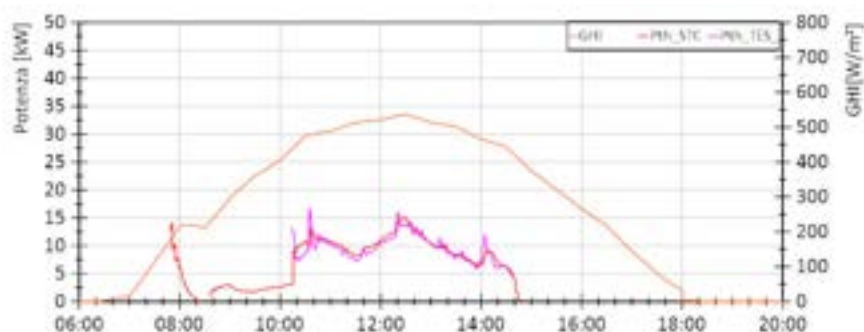


Figura 5.20. Sessione A, Giorno 2 - Dettaglio. Andamento della radiazione globale sul piano orizzontale (GHI in arancione), della potenza termica prodotta dal campo solare (in rosso) e di quella in ingresso all'accumulo solare (in magenta)

In Tabella 5.2 si riporta l'energia termica al primario e al secondario dei diversi scambiatori e le relative efficienze per la prova considerata.

Tabella 5.2. Sessione A, Giorno 2. Energie termiche al primario (lato teleriscaldamento, TLR, o sistema di generazione, GEN) e al secondario (lato teleriscaldamento, TLR, o utente, US) dei diversi scambiatori della sottostazione e relative efficienze

Eth,S1,TLR [kWh]	Eth,S1,US [kWh]	η_{S1} [%]	Eth,S2,GEN [kWh]	Eth,S2,US [kWh]	η_{S2} [%]	Eth,S3,GEN [kWh]	Eth,S3,US [kWh]	η_{S3} [%]
191,55	185,95	97%	17,6	16,93	96%	18,4	18,26	99%

5.4.2 Sessione A - Giorno 4

Il giorno di test 4 è il 24/05 per il quale sono presenti solo richieste di ACS da parte dell'utente essendo al di fuori del periodo di riscaldamento.

In Figura 5.21 viene mostrato in nero il comando di avvio della sottostazione per richiesta da parte dell'utente che coincide con le richieste di caricamento dell'accumulo di ACS e in arancione la disponibilità di energia solare nell'accumulo solare che può essere utilizzata dalla sottostazione. Nel grafico superiore si riporta in magenta la potenza termica fornita dallo scambiatore S1 e in rosso quella fornita dallo scambiatore S2 per soddisfare le richieste termiche. Nel grafico centrale si riporta in viola la potenza termica fornita dallo scambiatore S3 alla rete di teleriscaldamento.

Dal confronto tra i tre grafici si può notare che le richieste termiche dell'utente sono principalmente soddisfatte dallo scambiatore S1 e quindi dalla rete di TLR. Inoltre, la disponibilità di energia solare nell'accumulo solare è solo parzialmente contemporanea alla richiesta termica dell'utente: tramite lo scambiatore S2, parte della potenza termica richiesta dall'utente viene fornita dall'impianto solare. La restante disponibilità solare viene immessa nella rete di TLR tramite lo scambiatore S3 che ha un funzionamento intermittente basato sul livello di temperatura alla quale l'energia solare è inviata alla sottostazione in ingresso a tale scambiatore, ovvero si avvia quando T6 è maggiore di 84 °C e resta attivo finché tale temperatura è superiore a 82 °C. In Figura 5.22 viene riportato un ingrandimento della Figura 5.21 al fine di visualizzare in dettaglio le ore di funzionamento degli scambiatori S2 ed S3, ovvero tra le 15:00 e le 19:00. Si nota che durante i primi 40 minuti di accensione dello scambiatore S2 si ha un funzionamento in contemporanea allo scambiatore S1 con potenze comparabili. Successivamente funziona solo lo scambiatore S1 per terminare la carica dell'accumulo ACS poiché è terminata la disponibilità di energia solare nell'accumulo ad una temperatura superiore ad 80 °C. Lo scambiatore S3 immette energia nella rete di TLR quando questa è disponibile e non si hanno richieste da parte dell'utente, ovvero la le 15:00 e le 16:00. Non si verifica, quindi, un funzionamento contemporaneo di S2 ed S3.

Si riportano nel seguito gli andamenti delle temperature di ingresso e uscita al primario e al secondario degli scambiatori S1, S2 ed S3 e le portate quando questi sono in funzione (Figura 5.23-Figura 5.25). In particolare

per gli scambiatori S2 ed S3 si utilizza una scala temporale basata sui momenti di funzionamento al fine di facilitarne la lettura.

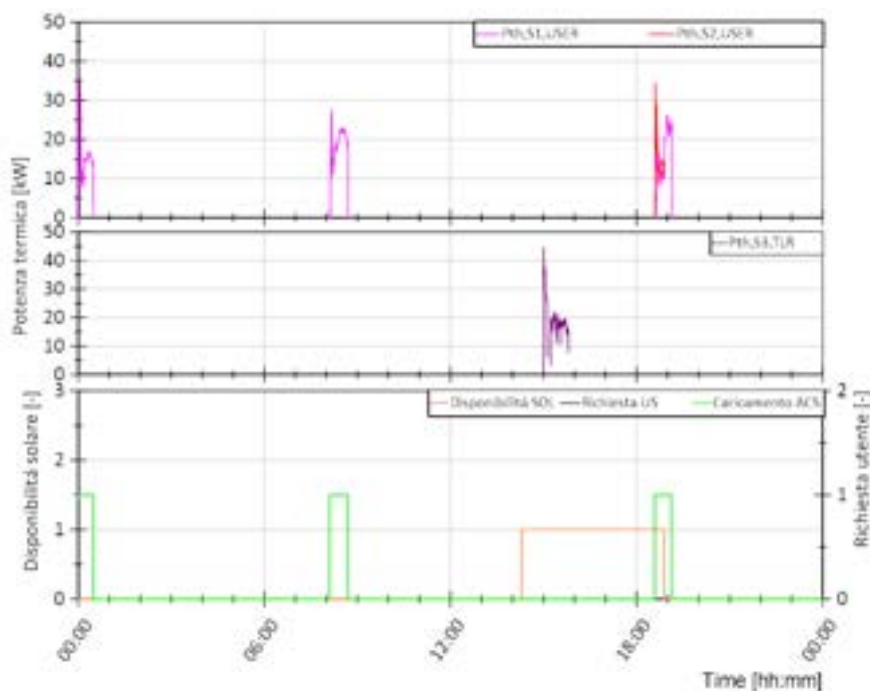


Figura 5.21. Sessione A, Giorno 4. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità energia solare nell'accumulo (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

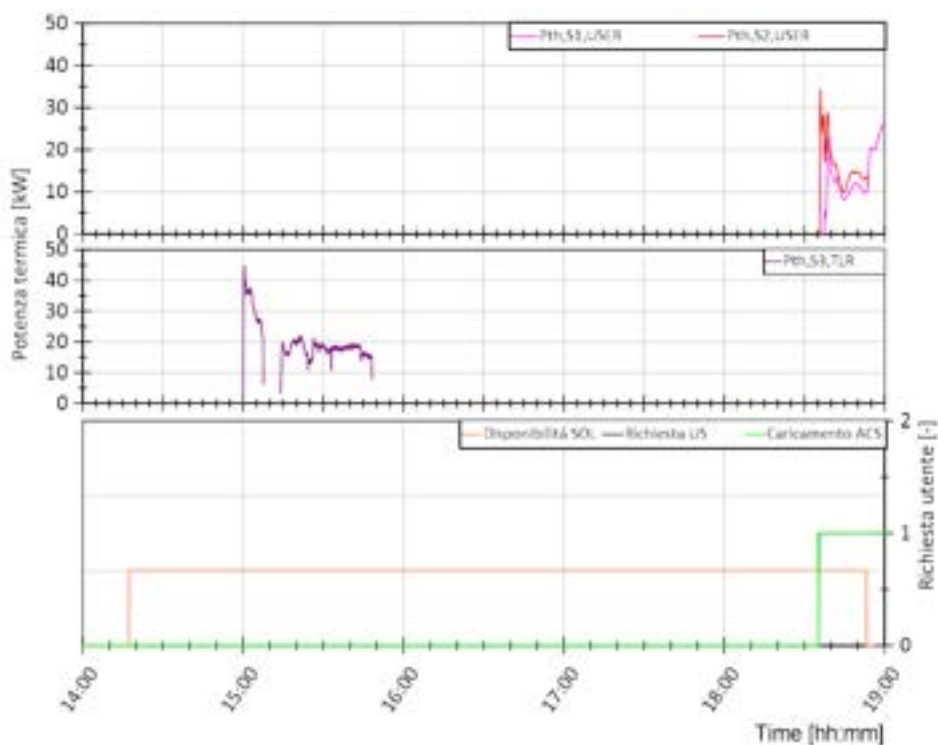


Figura 5.22. Sessione A, Giorno 4 - Dettaglio. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità energia solare nell'accumulo (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

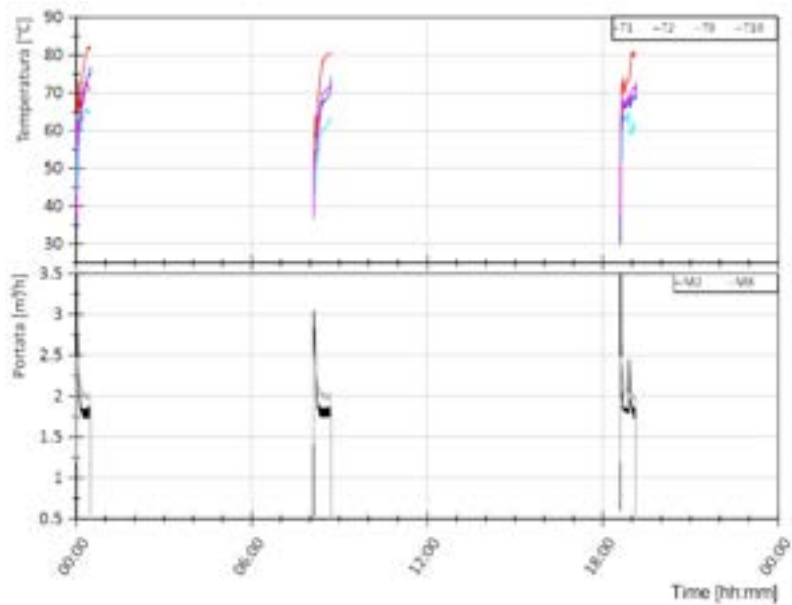


Figura 5.23. Sessione A, Giorno 4. Andamento delle temperature lato teleriscaldamento (mandata dal teleriscaldamento T1, ritorno al teleriscaldamento T2) e lato utenza (uscita dallo scambiatore S2 T9, mandata all'utenza T10) dello scambiatore S1 (grafico superiore), andamento della portata lato teleriscaldamento (M2) e lato utenza (M8) dello scambiatore S1 (grafico inferiore)

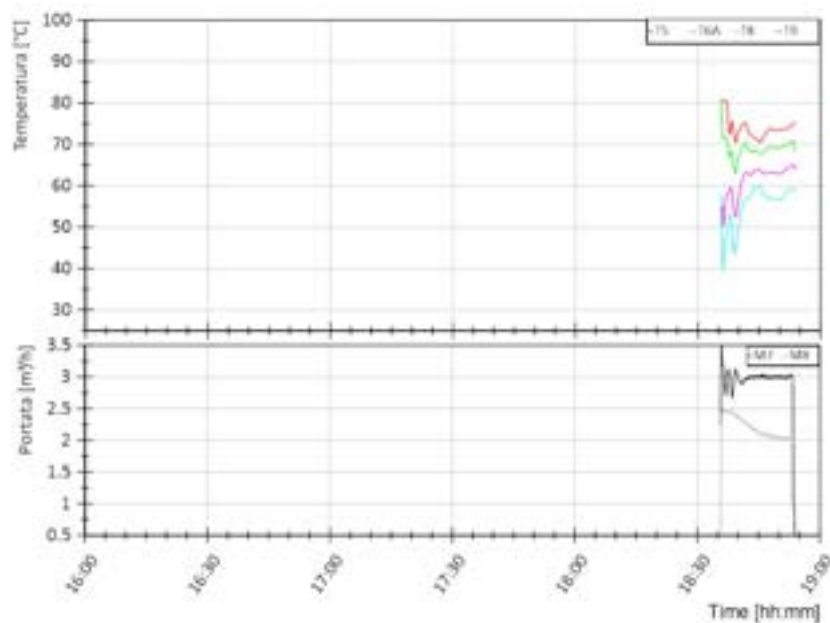


Figura 5.24. Sessione A, Giorno 4 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (mandata dal sistema di generazione T5, ritorno al sistema di generazione T6 e uscita scambiatore S2 T6A) e lato utenza (ritorno dall'utenza T8, mandata all'utenza T9) dello scambiatore S2 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato utenza (M8) dello scambiatore S2 (grafico inferiore)

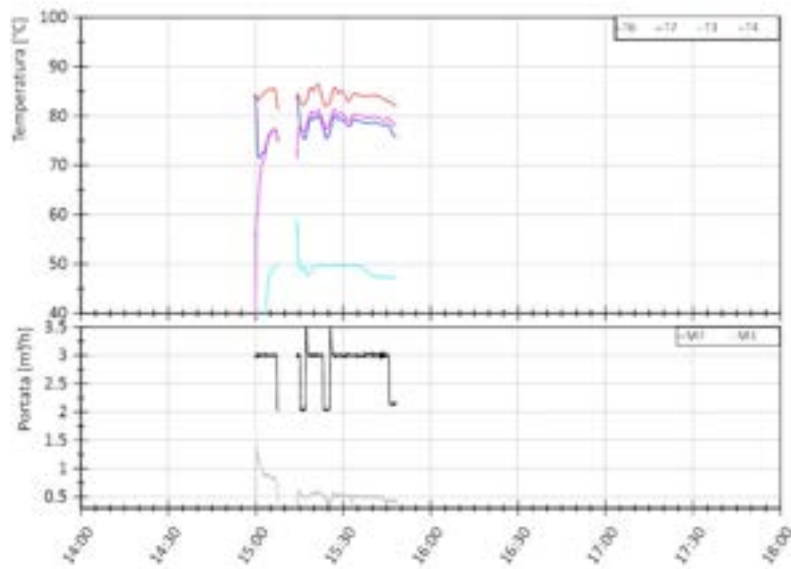


Figura 5.25. Sessione A, Giorno 4 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (Ingresso scambiatore S3 T6 e ritorno al sistema di generazione T7) e lato TLR (ritorno dal TLR T3, mandata al TLR T4) dello scambiatore S3 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato TLR (M3) dello scambiatore S3 (grafico inferiore)

Nel seguito si riportano alcune considerazioni riguardo il controllo di temperatura da parte della test facility in T1, T5 e T8 e il controllo di temperatura da parte della sottostazione in T4 e T10.

Con riferimento alla Figura 5.26 si può notare come l'andamento del valore misurato T1 (curva verde nel grafico superiore) sia caratteristico dell'avviamento dell'impianto (come descritto per i giorni precedenti) e non si stabilizza a causa della breve durata di una carica dell'accumulo di ACS (circa 30 minuti). Pur non riuscendo a controllare la temperatura T1 ad 80 °C al valore nominale durante la carica, si riescono comunque a soddisfare le richieste dell'utente.

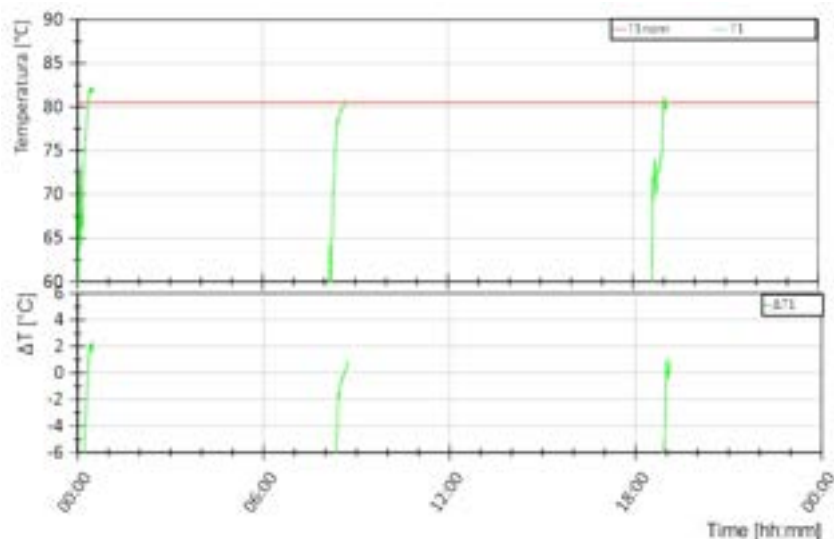


Figura 5.26. Sessione A, Giorno 4. Andamento della temperatura di mandata dal teleriscaldamento T1 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T1nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

Con riferimento alla Figura 5.27 si può notare come l'andamento del valore misurato T5 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa ± 5 °C quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento. Le prime sono dovute al controllo di temperatura della test

facility a monte del punto di collegamento 5-7 con la sottostazione, così come descritto nel capitolo 5.3.1 e sono accentuate dalla distanza circuitale che tra il punto in cui tale temperatura viene controllata e il punto in cui T5 è posizionato; le seconde sono dovute prevalentemente alle perdite termiche che si hanno nel circuito di collegamento tra sottostazione e test facility e richiedono tra i 15 e i 45 minuti di tempo per essere controllate da parte della test facility.

Con riferimento alla Figura 5.28, si può notare come l'andamento del valore misurato T8 (curva verde nel grafico superiore) sia in ritardo rispetto all'andamento del valore di riferimento T8nom (curva rossa nel grafico superiore). Questo ritardo è dovuto essenzialmente alla distanza circuitale tra il punto della test facility in cui T8 viene controllata al valore di riferimento e il punto della sottostazione in cui T8 viene misurata. Di conseguenza si hanno scostamenti assoluti rilevanti rispetto al valore di riferimento in corrispondenza di una brusca variazione del valore di riferimento ma contenuti in $\pm 1^\circ\text{C}$ nel funzionamento in condizioni stabili.

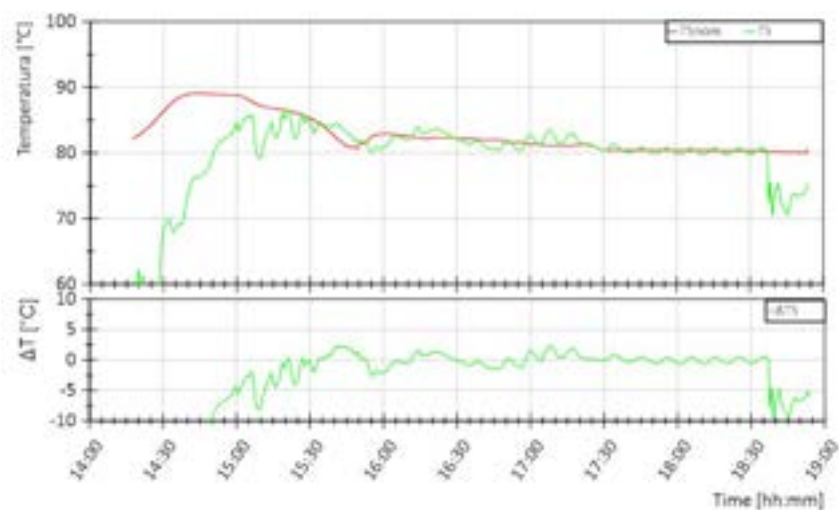


Figura 5.27. Sessione A, Giorno 4 - Dettaglio. Andamento della temperatura di mandata dal sistema di generazione T5 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T5nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

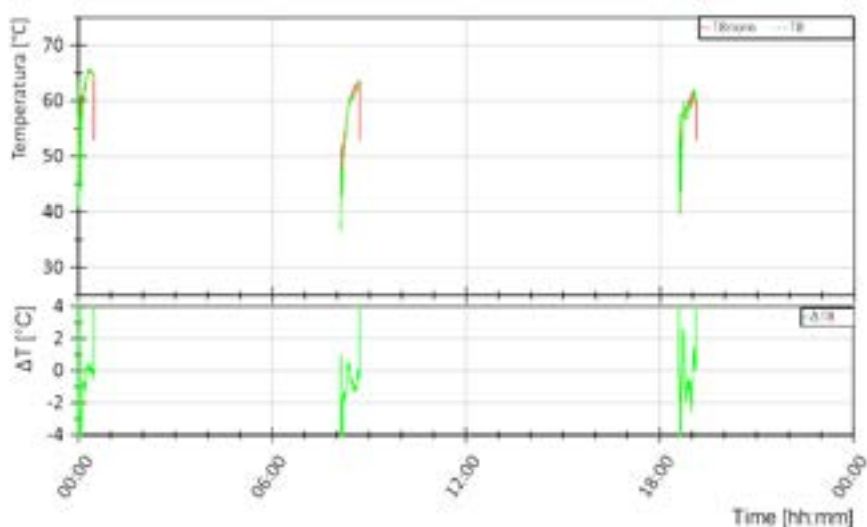


Figura 5.28. Sessione A, Giorno 4. Andamento della temperatura di ritorno dall'utenza T8 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T8nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

Con riferimento alla Figura 5.29 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T10nom e il valore misurato T10 sia caratteristica dell'avviamento dell'impianto e non si riesce a raggiungere un funzionamento a regime per la breve durata della carica dell'accumulo di ACS. Si riesce comunque a soddisfare le richieste termiche dell'utente andando a caricare l'accumulo di ACS, come risulta da descrizione dei grafici in Figura 5.31 riportati nel seguito.

Con riferimento alla Figura 5.30 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T4nom e il valore misurato T4 sia inferiore a ± 2 °C per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T4 da parte della sottostazione, nonostante le oscillazioni registrate in ingresso allo scambiatore S3. Si ha una maggiore discrepanza all'avviamento e nei momenti in cui la temperatura di ingresso lato generazione (T6) è prossima ad 82 °C, così come descritto per il giorno 1.

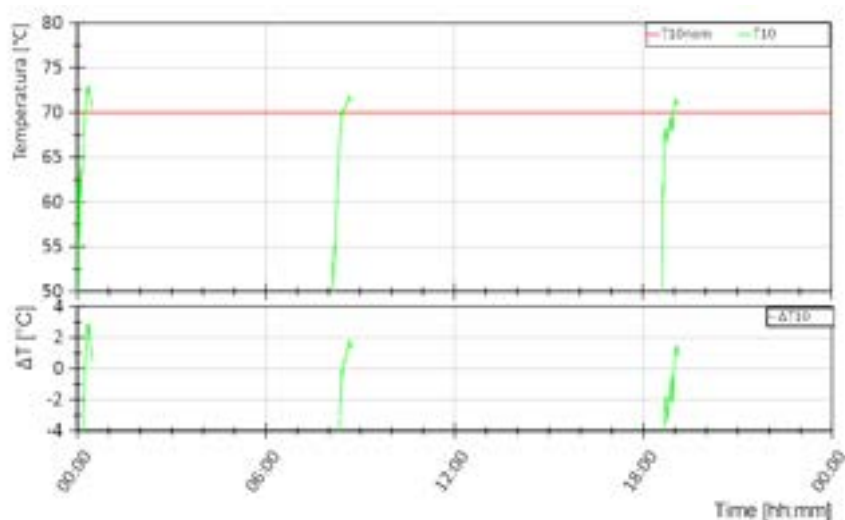


Figura 5.29. Sessione A, Giorno 4. Andamento della temperatura di mandata all'utenza T10 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T10nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

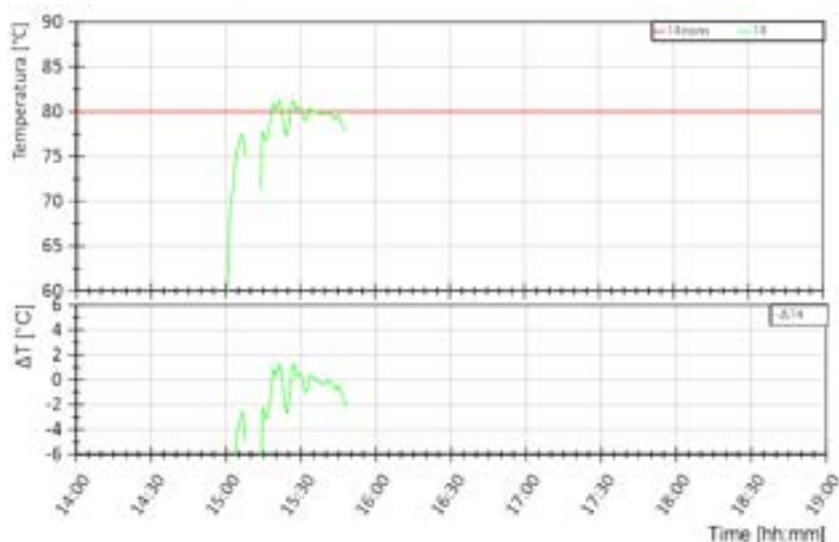


Figura 5.30. Sessione A, Giorno 4 - Dettaglio. Andamento della temperatura di immissione in rete T4 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T4nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

In Figura 5.31 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio e la temperatura ambiente e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo di ACS (in grigio) nonché la portata di caricamento (in arancione) e di ricircolo (in blu). Per quanto riguarda l'ACS, si può notare come la temperatura dell'accumulo aumenta ogni qualvolta avviene una carica fino a raggiungere i 60 °C, e

diminuisce per effetto delle perdite termiche o richiesta da parte dell'utente che si verifica in corrispondenza di una portata di ricircolo maggiore di $0,27 \text{ m}^3/\text{h}$. Inoltre, la temperatura nell'accumulo non scende mai sotto i 55°C , pur non riuscendo a garantire un controllo ottimale della temperatura T10 a 70°C a causa delle dinamiche di avviamento della test facility e/o variazioni importanti di richieste termiche.

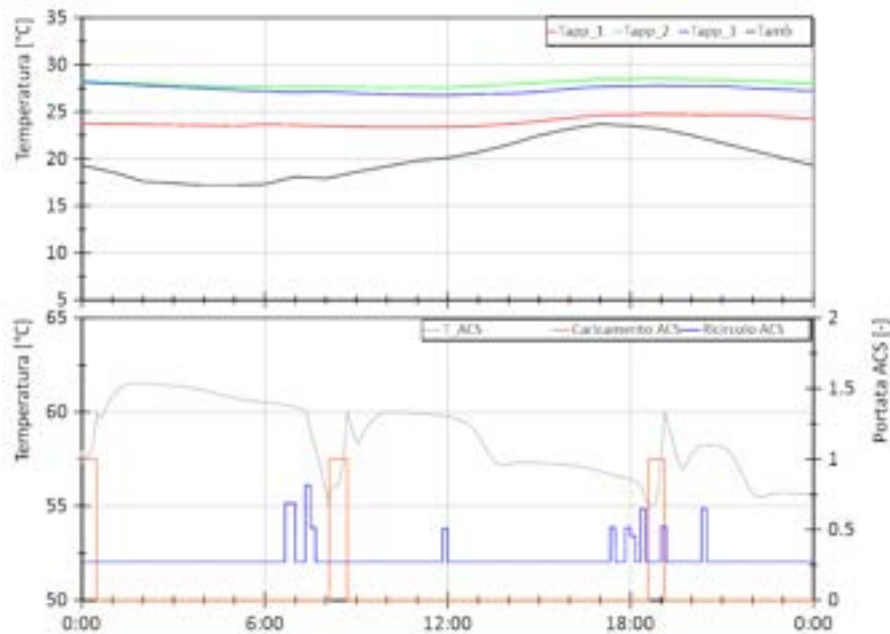


Figura 5.31. Sessione A, Giorno 4. Andamento della temperatura in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio (curve in blu, verde e rosso del grafico superiore) e temperatura esterna (curva in nero grafico superiore), andamento della temperatura nell'accumulo di ACS e portata di caricamento e ricircolo dell'accumulo di ACS (rispettivamente curva in grigio, in arancione e in blu del grafico inferiore)

In Figura 5.32 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in ingresso e uscita dal campo solare e la portata circolante e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo solare (in grigio) e l'intervallo di scarica (in arancione) che indica il periodo in cui l'energia solare viene inviata dalla sottostazione. Dal grafico superiore si evince che in una prima fase di avviamento del campo solare non si ha un caricamento dell'accumulo: la temperatura di uscita dal campo solare è infatti inferiore rispetto alla temperatura nell'accumulo; la carica inizia quando questa temperatura diventa superiore alla temperatura nell'accumulo. Ciò emerge anche dalla Figura 5.33 confrontando la potenza termica prodotta dal campo solare e quella in ingresso all'accumulo solare (rispettivamente in rosso e magenta). Con riferimento alla Figura 5.32, nei momenti in cui si ha la carica dell'accumulo, si assiste ad un aumento della temperatura dello stesso. Tale temperatura può diminuire in corrispondenza di una scarica se la potenza richiesta dalla sottostazione è superiore a quella immessa nell'accumulo in quell'istante o può aumentare in caso contrario. Nel caso in esame, non appena si avvia la scarica con invio di energia termica alla sottostazione, utilizzata dallo scambiatore S2 (curva in blu nel grafico inferiore) ed S3 (curva in rosso nel grafico inferiore), la temperatura nell'accumulo diminuisce. Si nota, inoltre, che tra le 15:50 e le 18:20 circa l'accumulo si scarica pur non essendoci un utilizzo diretto da parte di S2 ed S3: questo accade per effetto delle perdite termiche che si hanno nel circuito S2-S3 della sottostazione lato generazione. In questo periodo di tempo, infatti, l'acqua continua a circolare nella sottostazione ma non è ad una temperatura adatta per essere inviata in rete né vi è richiesta di ACS da parte dell'utente.

In

Tabella 5.3 si riporta l'energia termica al primario e al secondario dei diversi scambiatori e le relative efficienze per la prova considerata. Osservando le efficienze riportate in

Tabella 5.3 si può notare che η_{S2} supera il 100%. Questo evento è imputabile all'incertezza di misura che per le grandezze in gioco è almeno del 4 %.

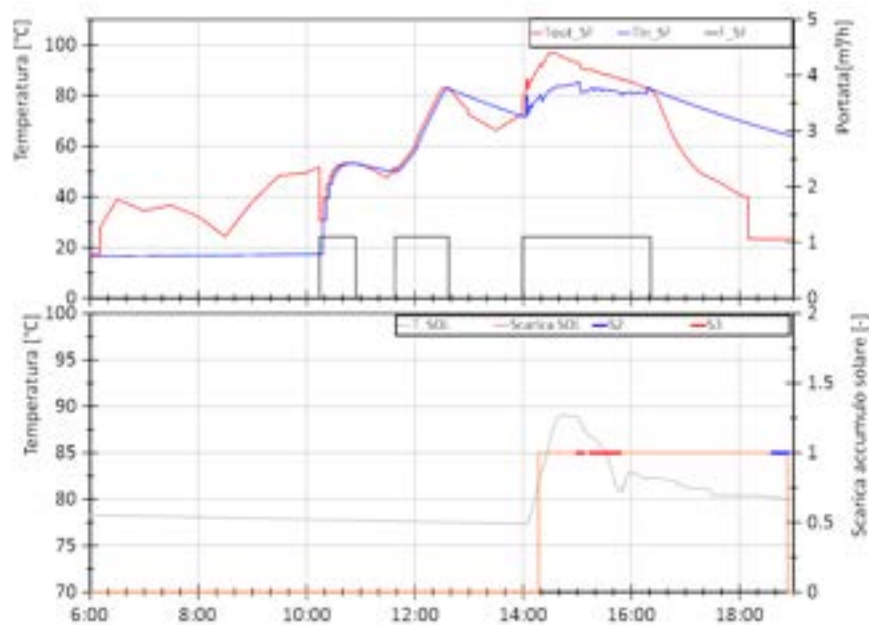


Figura 5.32. Sessione A, Giorno 4 - Dettaglio. Andamento della temperatura in uscita dal campo solare, in ingresso e la portata (rispettivamente curva in rosso, blu e nero del grafico superiore), andamento della temperatura nell’accumulo solare e intervallo di scarica dell’accumulo solare (rispettivamente curva un grigio e in arancione del grafico inferiore)

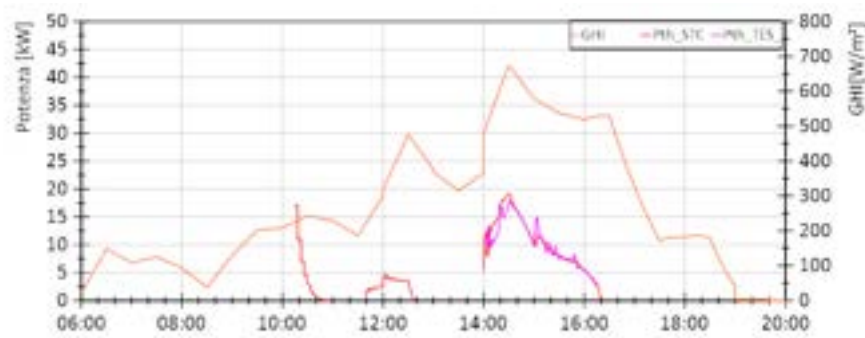


Figura 5.33. Sessione A, Giorno 4 - Dettaglio. Andamento della radiazione globale sul piano orizzontale (GHI in arancione), della potenza termica prodotta dal campo solare (in rosso) e di quella in ingresso all’accumulo solare (in magenta)

Tabella 5.3. Sessione A, Giorno 4. Energie termiche al primario (lato teleriscaldamento, TLR, o sistema di generazione, GEN) e al secondario (lato teleriscaldamento, TLR, o utente, US) dei diversi scambiatori della sottostazione e relative efficienze

Eth,S1,TLR [kWh]	Eth,S1,US [kWh]	η_{S1} [%]	Eth,S2,GEN [kWh]	Eth,S2,US [kWh]	η_{S2} [%]	Eth,S3,GEN [kWh]	Eth,S3,US [kWh]	η_{S3} [%]
27,45	25,11	91%	4,78	4,82	101%	14,19	13,91	98%

5.4.3 Sessione A - Giorno 6

Il giorno di test 6 è il 05/11 per il quale sono presenti richieste di ACS e riscaldamento da parte dell’utente rientrando nel periodo di riscaldamento.
 In Figura 5.34 viene mostrato, nel grafico inferiore, in nero il comando di avvio della sottostazione per richiesta da parte dell’utente sia per riscaldamento che per ACS, in verde le richieste di caricamento dell’accumulo di ACS e in arancione la disponibilità di energia solare nell’accumulo solare che può essere

utilizzata dalla sottostazione. Nel grafico superiore si riporta in magenta la potenza termica fornita dallo scambiatore S1 e in rosso quella fornita dallo scambiatore S2 per soddisfare le richieste termiche. Nel grafico centrale si riporta in viola la potenza termica fornita dallo scambiatore S3 alla rete di teleriscaldamento che in questo caso è nulla.

Dal confronto tra tre grafici si può notare che le richieste termiche dell'utente sono principalmente soddisfatte dallo scambiatore S1 e quindi dalla rete di TLR. All'avviamento della sottostazione e quando si hanno richieste di caricamento dell'accumulo di ACS si registrano degli incrementi improvvisi nelle potenze termiche scambiate per effetto sia di variazione dinamiche di temperature e portata tipiche dell'avviamento, che di un'effettiva maggiore richiesta da parte dell'utente dovuta al caricamento dell'accumulo di ACS. Inoltre, la disponibilità di energia solare nell'accumulo solare è contemporanea alla richiesta termica dell'utente: tramite lo scambiatore S2, parte della potenza termica richiesta dall'utente viene fornita dall'impianto solare. In particolare, in Figura 5.35 viene riportato un ingrandimento della Figura 5.34 al fine di visualizzare in dettaglio le ore di funzionamento dello scambiatore S2, ovvero tra le 14:00 e le 16:00. Si nota che durante i primi 45 minuti circa di accensione dello scambiatore S2 si ha un funzionamento in contemporanea allo scambiatore S1 con potenze comparabili. Successivamente e per 30 minuti circa lo scambiatore S1 è spento e il solo scambiatore S2 soddisfa l'utenza, fino ad esaurimento di disponibilità di energia solare.

Si riportano nel seguito gli andamenti delle temperature di ingresso e uscita al primario e al secondario dello scambiatore S1 ed S2 e le portate quando questi sono in funzione (Figura 5.36-Figura 5.38). In particolare per lo scambiatore S2 si utilizza una scala temporale basata sui momenti di funzionamento al fine di facilitarne la lettura.

Nel seguito si riportano alcune considerazioni riguardo il controllo di temperatura da parte della test facility in T1, T5 e T8 e il controllo di temperatura da parte della sottostazione in T10.

Con riferimento alla Figura 5.38 si può notare come l'andamento del valore misurato T1 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa ± 2 °C quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento o caricamento dell'accumulo di ACS. Le prime sono dovute al controllo di temperatura della test facility a monte del punto di collegamento 1-2 con la sottostazione, così come descritto nel paragrafo 5.3.1; le seconde sono dovute a improvvise variazioni di richieste termiche da parte dell'utente che richiedono tra i 15 e i 30 minuti di tempo per essere controllate da parte della test facility. Così come descritto nel seguito, tali oscillazioni non compromettono il soddisfacimento delle richieste termiche dell'utente.

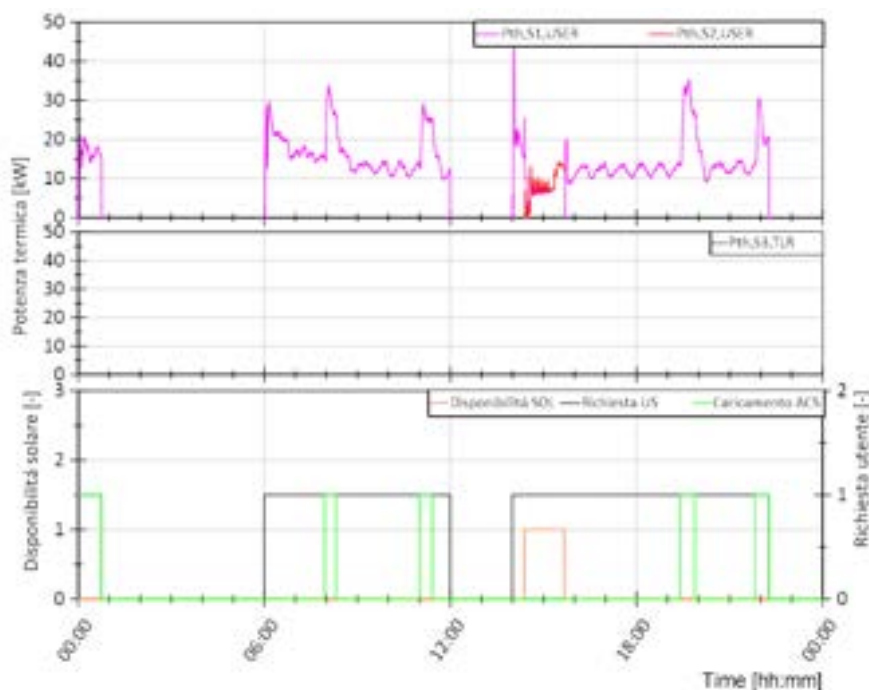


Figura 5.34. Sessione A, Giorno 6. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore e segnale di disponibilità energia solare nell'accumulo (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

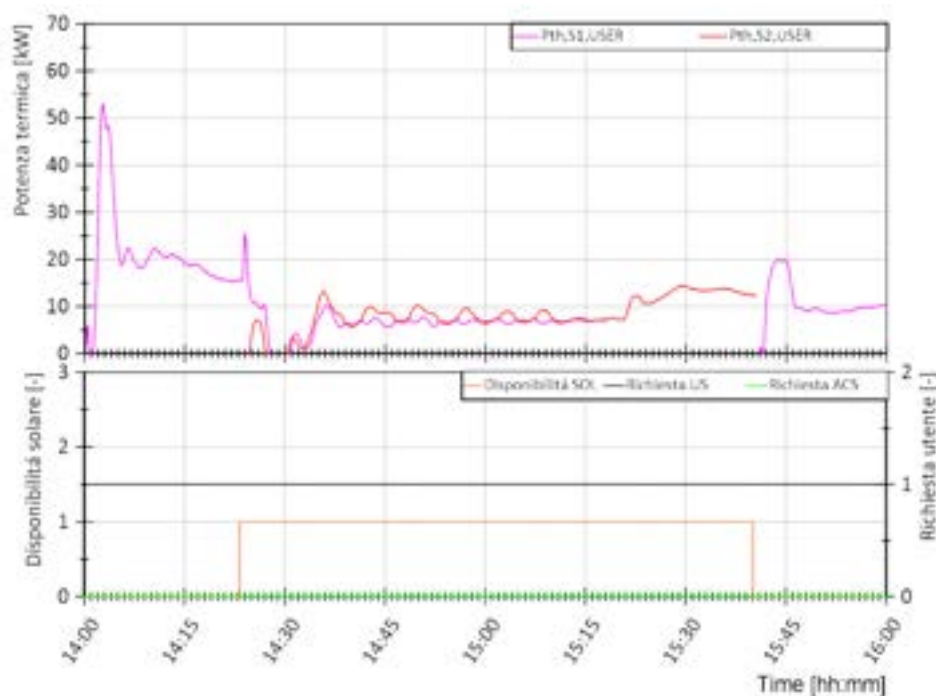


Figura 5.35. Sessione A, Giorno 6 - Dettaglio. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore e segnale di disponibilità energia solare nell'accumulo (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

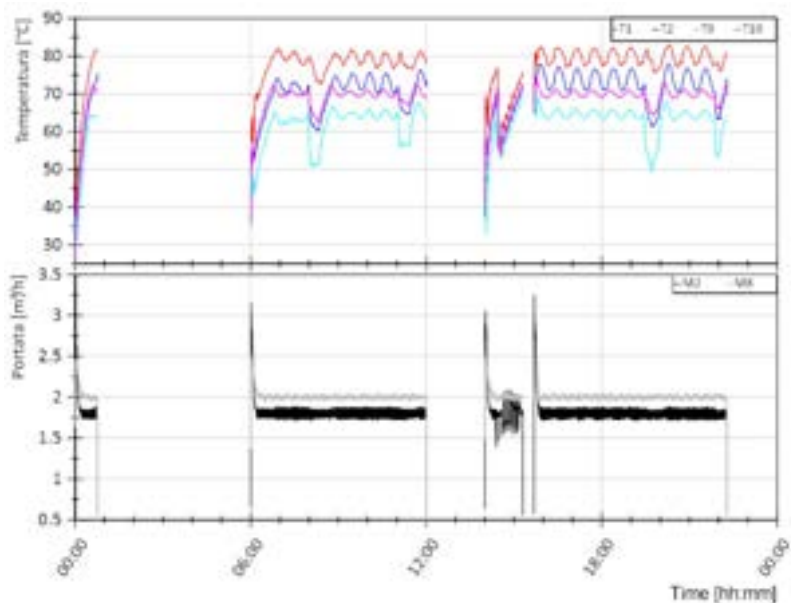


Figura 5.36. Giorno 6. Andamento delle temperature lato teleriscaldamento (mandata dal teleriscaldamento T1, ritorno al teleriscaldamento T2) e lato utenza (uscita dallo scambiatore S2 T9, mandata all'utenza T10) dello scambiatore S1 (grafico superiore), andamento della portata lato teleriscaldamento (M2) e lato utenza (M8) dello scambiatore S1 (grafico inferiore)

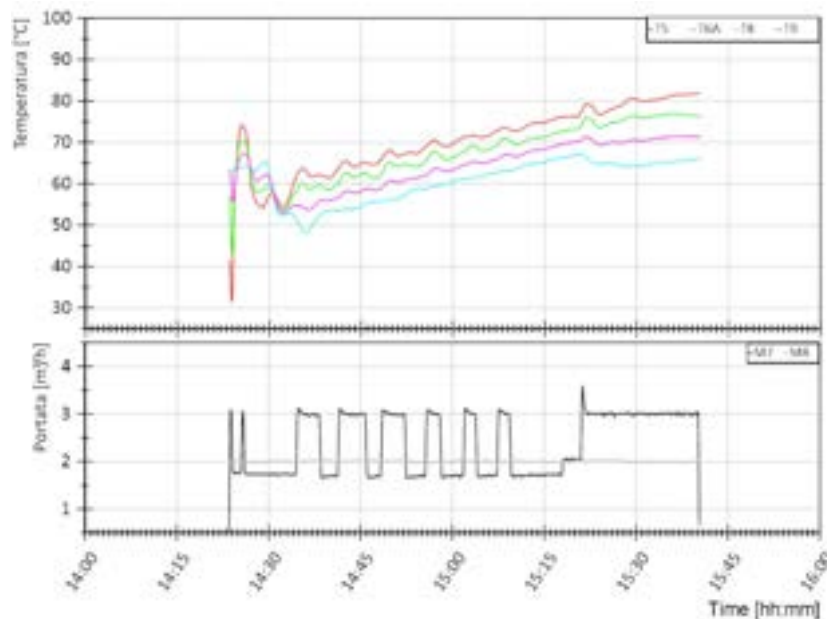


Figura 5.37. Sessione A, Giorno 6 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (mandata dal sistema di generazione T5, ritorno al sistema di generazione T6 e uscita scambiatore S2 T6A) e lato utenza (ritorno dall'utenza T8, mandata all'utenza T9) dello scambiatore S2 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato utenza (M8) dello scambiatore S2 (grafico inferiore)

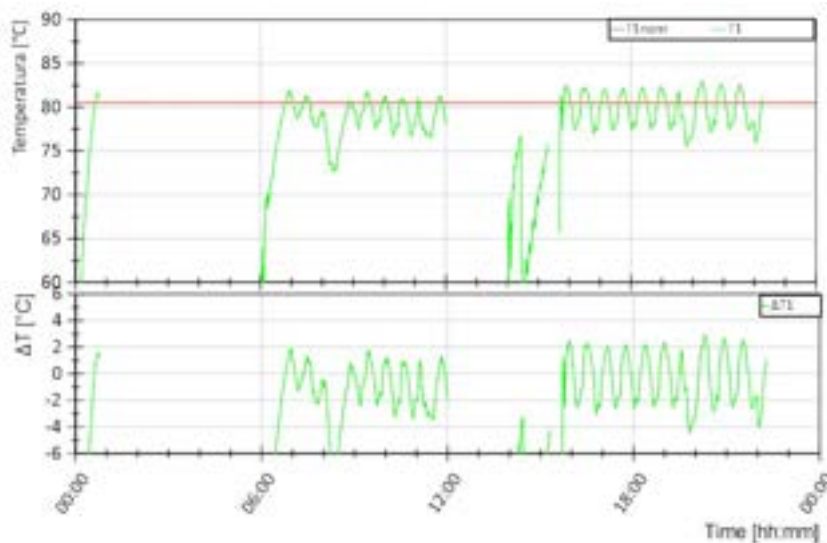


Figura 5.38. Sessione A, Giorno 6. Andamento della temperatura di mandata dal teleriscaldamento T1 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T1nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

Con riferimento alla Figura 5.39 si può notare come l'andamento del valore misurato T5 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa ± 5 °C quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento. Le prime sono dovute al controllo di temperatura della test facility a monte del punto di collegamento 5-7 con la sottostazione, così come descritto nel capitolo 5.3.1 e sono accentuate dalla distanza circuitale che tra il punto in cui tale temperatura viene controllata e il punto in cui T5 è posizionato; le seconde sono dovute prevalentemente alle perdite termiche che si hanno nel circuito di collegamento tra sottostazione e test facility e richiedono tra i 15 e i 45 minuti di tempo per essere controllate da parte della test facility.

Con riferimento alla Figura 5.40, si può notare come l'andamento del valore misurato T8 (curva verde nel grafico superiore) sia in ritardo rispetto all'andamento del valore di riferimento T8nom (curva rossa nel grafico superiore). Questo ritardo è dovuto essenzialmente alla distanza circuitale tra il punto della test facility in cui T8 viene controllata al valore di riferimento e il punto della sottostazione in cui T8 viene misurata. Di conseguenza si hanno scostamenti assoluti rilevanti rispetto al valore di riferimento in corrispondenza di una brusca variazione del valore di riferimento ma contenuti in $\pm 1^\circ\text{C}$ nel funzionamento in condizioni stabili.

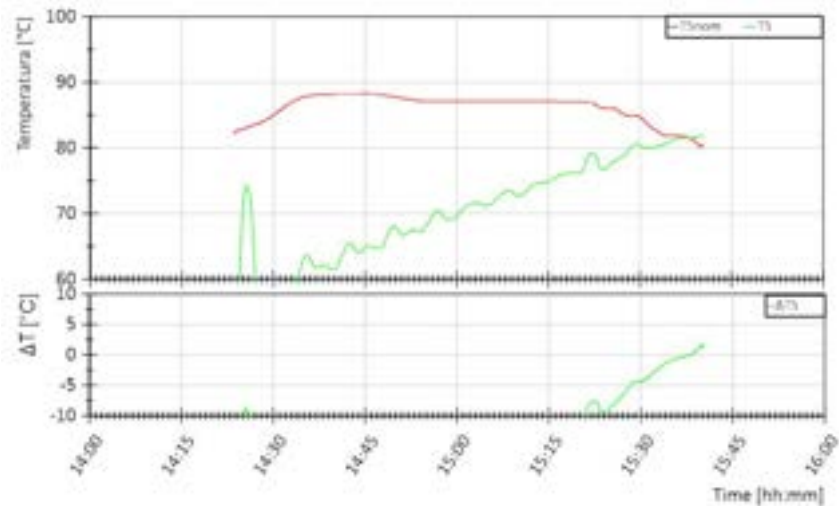


Figura 5.39. Sessione A, Giorno 6 - Dettaglio. Andamento della temperatura di mandata dal sistema di generazione T5 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T5nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

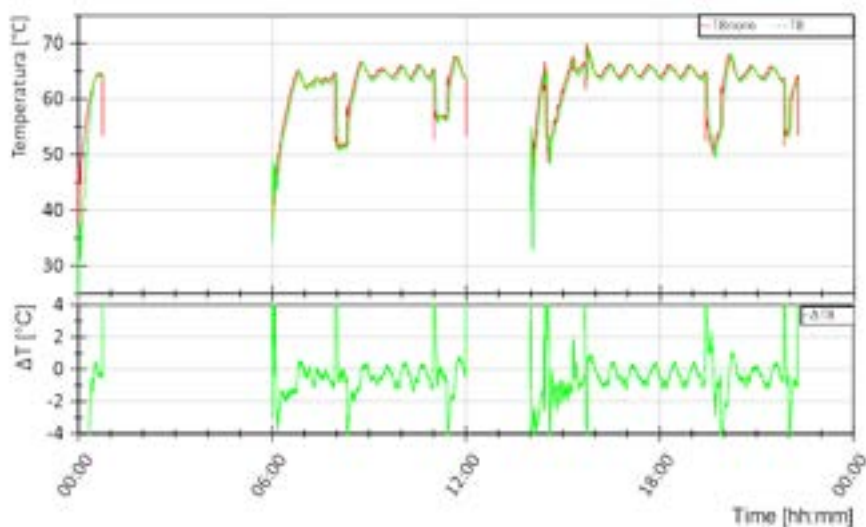


Figura 5.40. Sessione A, Giorno 6. Andamento della temperatura di ritorno dall'utenza T8 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T8nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

Con riferimento alla Figura 5.41 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T10nom e il valore misurato T10 sia inferiore a $\pm 1^\circ\text{C}$ per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T10 da parte della sottostazione, nonostante le oscillazioni registrate in ingresso allo scambiatore S1. Si ha una maggiore discrepanza nella condizione di richiesta massima da parte dell'utenza e all'avviamento: in questa condizione si registrano anche degli abbassamenti maggiori di 5°C nella temperatura T1 e quindi gli scambiatori S1 ed S2 operano in condizioni di funzionamento diverse da quelle di progetto non riuscendo a garantire 70°C in uscita ma comunque riuscendo a soddisfare le richieste termiche dell'utente, come risulta da descrizione dei grafici in Figura 5.42 e Figura 5.43 riportati nel seguito.

In Figura 5.42 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio e la temperatura ambiente e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo di ACS (in grigio) nonché la portata di caricamento (in arancione) e di ricircolo (in blu). Si può notare dal grafico superiore come la temperatura all'interno degli appartamenti sia tenuta essenzialmente sopra i 20 °C durante le ore di riscaldamento. Inoltre, dalla Figura 5.43 risulta che la valvola miscelatrice presente nel modello riesce a controllare la temperatura di mandata al riscaldamento secondo curva climatica teorica, nonostante le oscillazioni che si hanno all'avviamento in T1 e T5. Tali oscillazioni non compromettono il soddisfacimento delle richieste dell'utente. Per quanto riguarda l'ACS, si può notare come la temperatura dell'accumulo aumenta ogni qualvolta avviene una carica fino a raggiungere i 60 °C, e diminuisce per effetto delle perdite termiche o richiesta da parte dell'utente che si verifica in corrispondenza di una portata di ricircolo maggiore di 0,27 m³/h.

In Figura 5.44 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in ingresso e uscita dal campo solare e la portata circolante e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo solare (in grigio) e l'intervallo di scarica (in arancione) che indica il periodo in cui l'energia solare viene inviata dall'accumulo alla sottostazione. Dal grafico superiore si evince che in una prima fase di avviamento del campo solare non si ha un caricamento dell'accumulo: la temperatura di uscita dal campo solare è infatti inferiore rispetto alla temperatura nell'accumulo; la carica inizia quando questa temperatura diventa superiore alla temperatura nell'accumulo. Ciò emerge anche dalla Figura 5.45 confrontando la potenza termica prodotta dal campo solare e quella in ingresso all'accumulo solare (rispettivamente in rosso e magenta). Con riferimento alla Figura 5.44, nei momenti in cui si ha la carica dell'accumulo, si assiste ad un aumento della temperatura dello stesso. Tale temperatura può diminuire in corrispondenza di una scarica se la potenza richiesta dalla sottostazione è superiore a quella immessa nell'accumulo in quell'istante o può aumentare in caso contrario. Nel caso in esame, non appena si avvia la scarica con invio di energia termica alla sottostazione, utilizzata dallo scambiatore S2 (curva in blu nel grafico inferiore), la temperatura nell'accumulo diminuisce.

In Tabella 5.4 si riporta l'energia termica al primario e al secondario dei diversi scambiatori e le relative efficienze per la prova considerata.

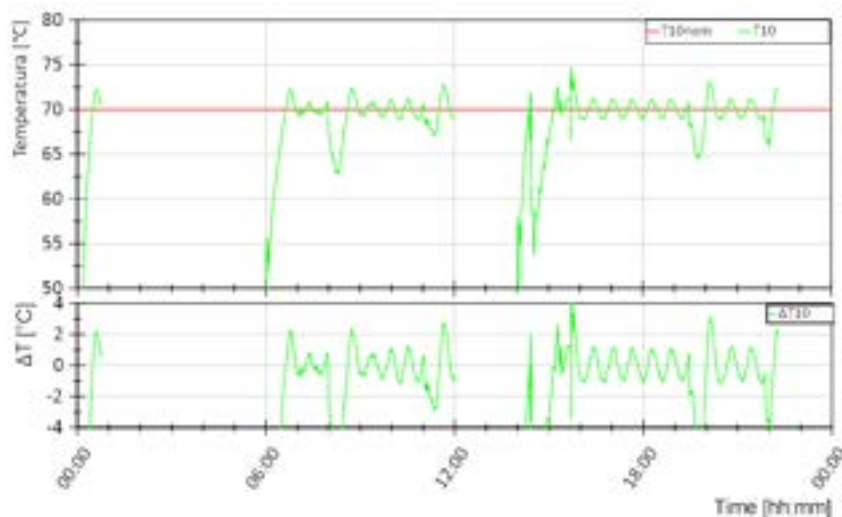


Figura 5.41. Sessione A, Giorno 6. Andamento della temperatura di mandata all'utenza T10 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T10nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

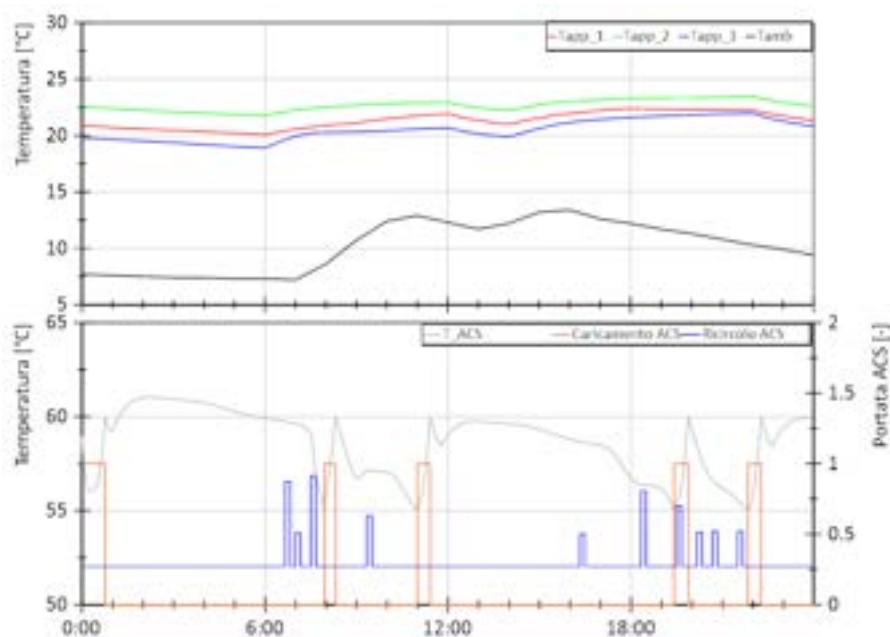


Figura 5.42. Sessione A, Giorno 6. Andamento della temperatura in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio (curve in blu, verde e rosso del grafico superiore) e temperatura esterna (curva in nero grafico superiore), andamento della temperatura nell'accumulo di ACS e portata di caricamento e ricircolo dell'accumulo di ACS (rispettivamente curva un grigio, in arancione e in blu del grafico inferiore)

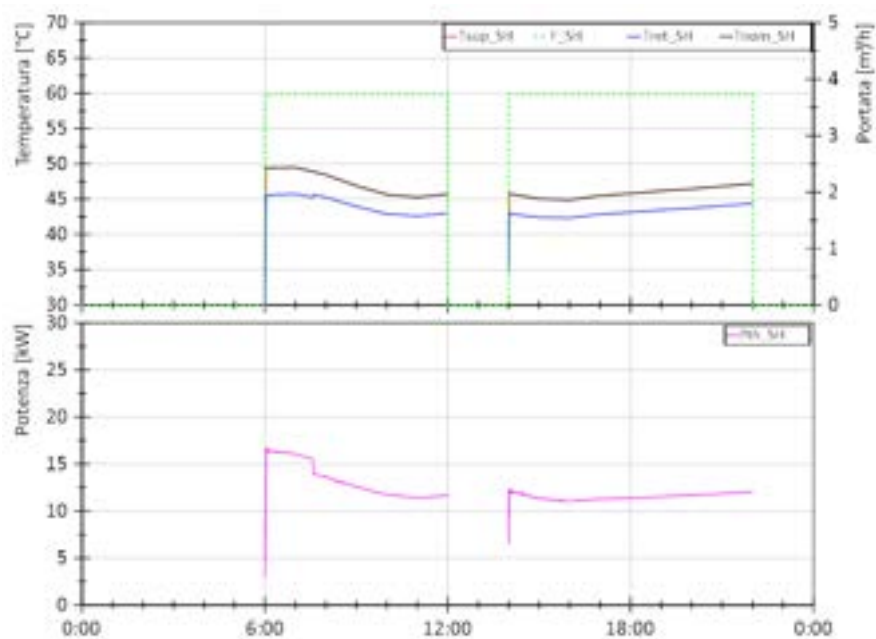


Figura 5.43. Sessione A, Giorno 6. Andamento della temperatura di mandata e ritorno e portata nel circuito di riscaldamento (curva in rosso, blu e tratteggiata verde nel grafico superiore rispettivamente) e andamento della temperatura di mandata al riscaldamento di riferimento (curva in nero), andamento della potenza termica per riscaldamento (curva in magenta grafico inferiore)

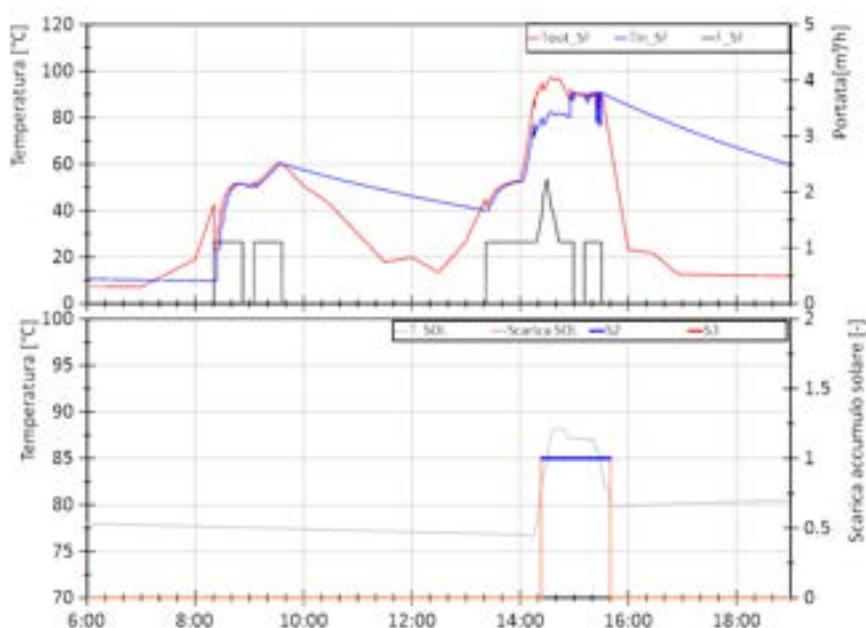


Figura 5.44. Sessione A, Giorno 6 - Dettaglio. Andamento della temperatura in uscita dal campo solare, in ingresso e la portata (rispettivamente curva in rosso, blu e nero del grafico superiore), andamento della temperatura nell'accumulo solare e intervallo di scarica dell'accumulo solare (rispettivamente curva un grigio e in arancione del grafico inferiore)

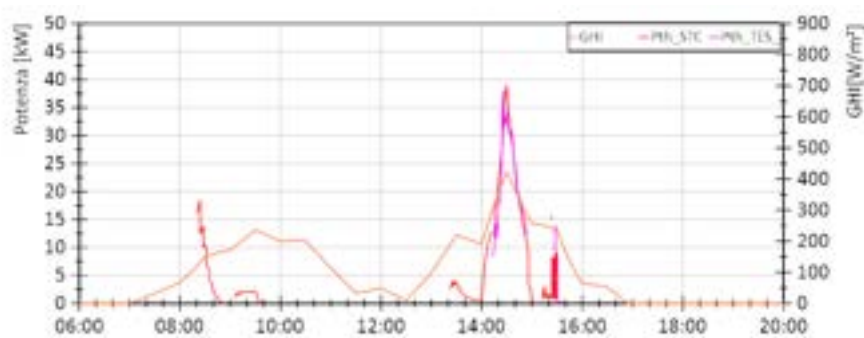


Figura 5.45. Sessione A, Giorno 6 - Dettaglio. Andamento della radiazione globale sul piano orizzontale (GHI in arancione), della potenza termica prodotta dal campo solare (in rosso) e di quella in ingresso all'accumulo solare (in magenta)

Tabella 5.4. Sessione A, Giorno 6. Energie termiche al primario (lato teleriscaldamento, TLR, o sistema di generazione, GEN) e al secondario (lato teleriscaldamento, TLR, o utente, US) dei diversi scambiatori della sottostazione e relative efficienze

Eth,S1,TLR [kWh]	Eth,S1,US [kWh]	η_{s1} [%]	Eth,S2,GEN [kWh]	Eth,S2,US [kWh]	η_{s2} [%]
225,09	219,09	97%	10,66	10,16	95%

5.4.4 Sessione B1 - Giorno 2

Il giorno di test 2 è il 21/03 per il quale sono presenti richieste di ACS e riscaldamento da parte dell'utente, rientrando nel periodo di riscaldamento.

In Figura 5.46 viene mostrato, nel grafico inferiore, in nero il comando di avvio della sottostazione per richiesta da parte dell'utente sia per riscaldamento che per ACS, in verde le richieste di caricamento dell'accumulo di ACS e in arancione la disponibilità di energia solare nell'accumulo solare che può essere utilizzata dalla sottostazione. Nel grafico superiore si riporta in magenta la potenza termica fornita dallo

scambiatore S1 e in rosso quella fornita dallo scambiatore S2 per soddisfare le richieste termiche. Nel grafico centrale si riporta in viola la potenza termica fornita dallo scambiatore S3 alla rete di teleriscaldamento. Dal confronto tra i tre grafici si può notare che le richieste termiche dell'utente sono principalmente soddisfatte dallo scambiatore S1 e quindi dalla rete di TLR. All'avviamento della sottostazione e quando si hanno richieste di caricamento dell'accumulo di ACS si registrano degli incrementi improvvisi nelle potenze termiche scambiate per effetto sia di variazione dinamiche di temperature e portata tipiche dell'avviamento, che di un'effettiva maggiore richiesta da parte dell'utente dovuta al caricamento dell'accumulo di ACS. Inoltre, la disponibilità di energia solare nell'accumulo solare è in parte contemporanea alla richiesta termica dell'utente: tramite lo scambiatore S2, parte della potenza termica richiesta dall'utente viene fornita dall'impianto solare e ciò avviene tra le 10:00 e le 16:00. Nello stesso intervallo di tempo, la restante disponibilità solare viene immessa nella rete di TLR tramite lo scambiatore S3 per il quale si registra un funzionamento intermittente basato sul livello di temperatura alla quale l'energia solare è inviata alla sottostazione in ingresso a tale scambiatore così come descritto per il giorno 1 della sessione B1. In Figura 5.47 viene riportato un ingrandimento della Figura 5.46 al fine di visualizzare in dettaglio le ore di funzionamento degli scambiatori S2 ed S3, ovvero tra le 09:00 e le 17:00. Lo scambiatore S3 immette energia nella rete di TLR quando questa è disponibile e non si hanno richieste da parte dell'utente, ovvero la le 12:00 e le 14:00 circa. Si verifica un funzionamento contemporaneo di S2 ed S3 tra le 10:00 e le 12:00 e tra le 14:00 e le 16:00 circa.

Così come per il giorno 1, confrontando la potenza termica lato utenze (S1+S2) e quella immessa nella rete di TLR (S3) del giorno 2 della sessione A e della sessione B1, si possono notare sia una minore richiesta da parte dell'utente che una maggiore disponibilità di energia solare utilizzabile dalla sottostazione nella sessione B1 rispetto allo stesso giorno della sessione A.

Si riportano nel seguito gli andamenti delle temperature di ingresso e uscita al primario e al secondario degli scambiatori S1, S2 ed S3 e le portate quando questi sono in funzione (Figura 5.48-Figura 5.50). In particolare per gli scambiatori S2 ed S3 si utilizza una scala temporale basata sui momenti di funzionamento al fine di facilitarne la lettura.

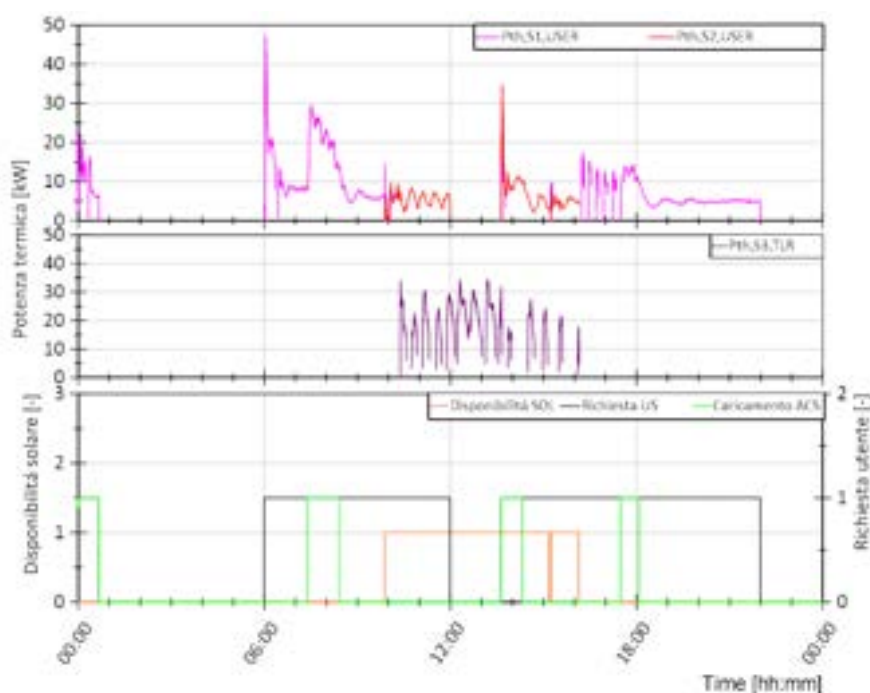


Figura 5.46. Sessione B1, Giorno 2. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità energia solare nell'accumulo (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

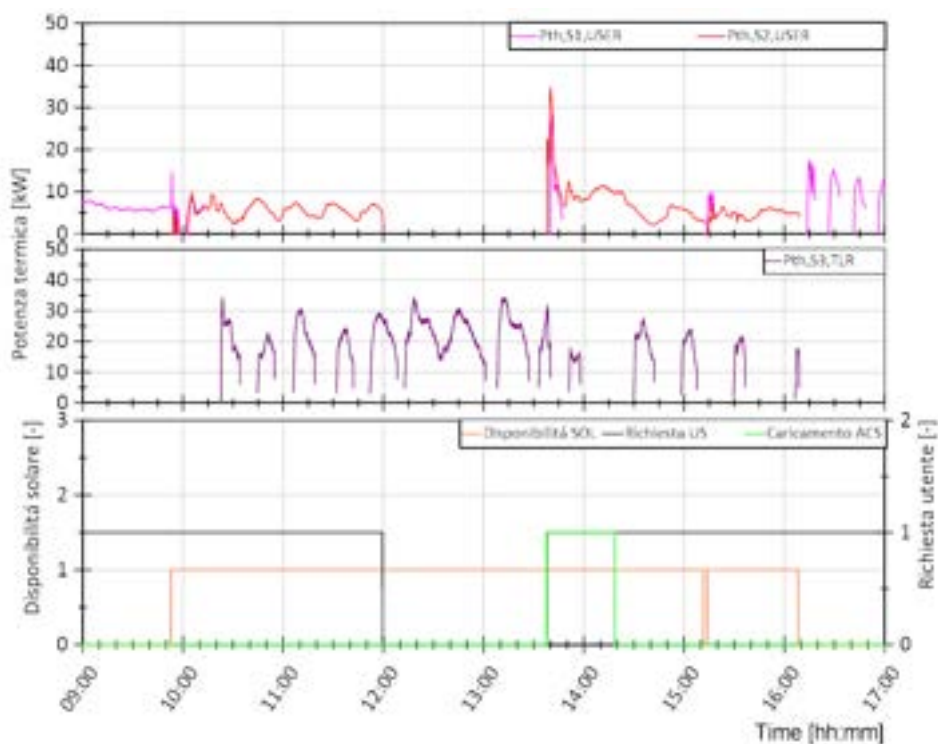


Figura 5.47. Sessione B1, Giorno 2 - Dettaglio. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità energia solare nell'accumulo (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

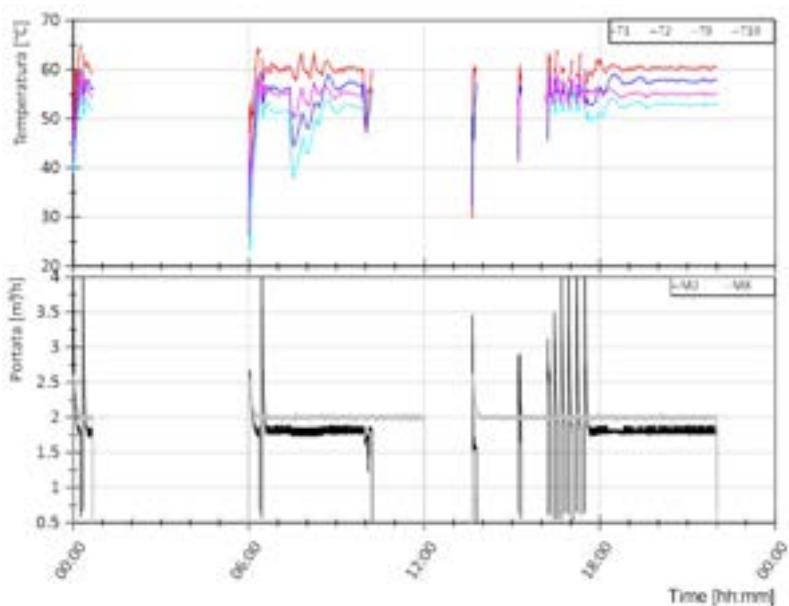


Figura 5.48. Sessione B1, Giorno 2. Andamento delle temperature lato teleriscaldamento (mandata dal teleriscaldamento T1, ritorno al teleriscaldamento T2) e lato utenza (uscita dallo scambiatore S2 T9, mandata all'utenza T10) dello scambiatore S1 (grafico superiore), andamento della portata lato teleriscaldamento (M2) e lato utenza (M8) dello scambiatore S1 (grafico inferiore)

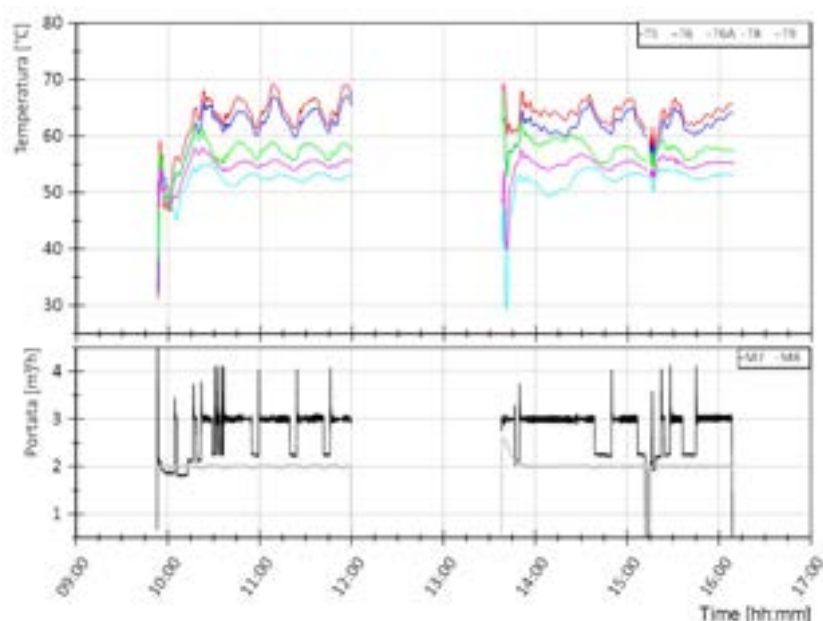


Figura 5.49. Sessione B1, Giorno 1 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (mandata dal sistema di generazione T5, ritorno al sistema di generazione T6 e uscita scambiatore S2 T6A) e lato utenza (ritorno dall'utenza T8, mandata all'utenza T9) dello scambiatore S2 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato utenza (M8) dello scambiatore S2 (grafico inferiore)

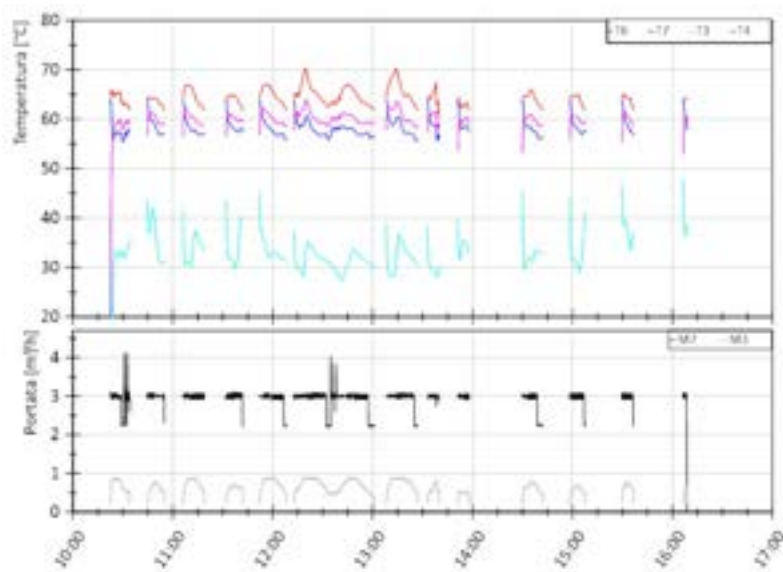


Figura 5.50. Sessione B1, Giorno 2 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (ingresso scambiatore S3 T6 e ritorno al sistema di generazione T7) e lato TLR (ritorno dal TLR T3, mandata al TLR T4) dello scambiatore S3 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato TLR (M3) dello scambiatore S3 (grafico inferiore)

I tre grafici di cui sopra riportanti le temperature e le portate nei tre scambiatori mettono in luce alcune caratteristiche relative ai controlli di temperatura e portata sia della test facility che della sottostazione, così come esposto nella descrizione dei test eseguiti nella sessione A.

Nel seguito si riportano alcune considerazioni riguardo il controllo di temperatura da parte della test facility in T1, T5 e T8 e il controllo di temperatura da parte della sottostazione in T4 e T10. Il funzionamento di tali controllo è paragonabile a quanto osservato per i test della sessione A. Si rimanda, quindi, alla descrizione dei giorni di test della sessione A per maggiori dettagli, con particolare riferimento ai giorni 1 e 2.

Con riferimento alla Figura 5.51 si può notare come l'andamento del valore misurato T1 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa $\pm 2^\circ\text{C}$ quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento o caricamento dell'accumulo di ACS. Così come descritto nel seguito, tali oscillazioni non compromettono il soddisfacimento delle richieste termiche dell'utente.

Con riferimento alla Figura 5.52 si può notare come l'andamento del valore misurato T5 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa $\pm 5^\circ\text{C}$ quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento.

Con riferimento alla Figura 5.53 si può notare come l'andamento del valore misurato T8 (curva verde nel grafico superiore) sia in ritardo rispetto all'andamento del valore di riferimento T8nom (curva rossa nel grafico superiore). Questo ritardo è dovuto essenzialmente alla distanza circuitale tra il punto della test facility in cui T8 viene controllata al valore di riferimento e il punto della sottostazione in cui T8 viene misurata. Di conseguenza si hanno scostamenti assoluti rilevanti rispetto al valore di riferimento in corrispondenza di una brusca variazione del valore di riferimento ma contenuti in $\pm 1^\circ\text{C}$ nel funzionamento in condizioni stabili.

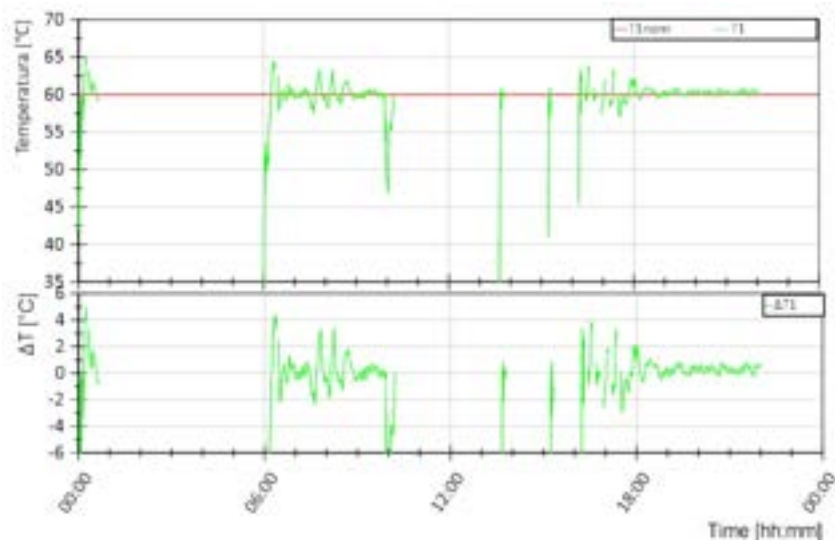


Figura 5.51. Sessione B1, Giorno 2. Andamento della temperatura di mandata dal teleriscaldamento T1 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T1nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

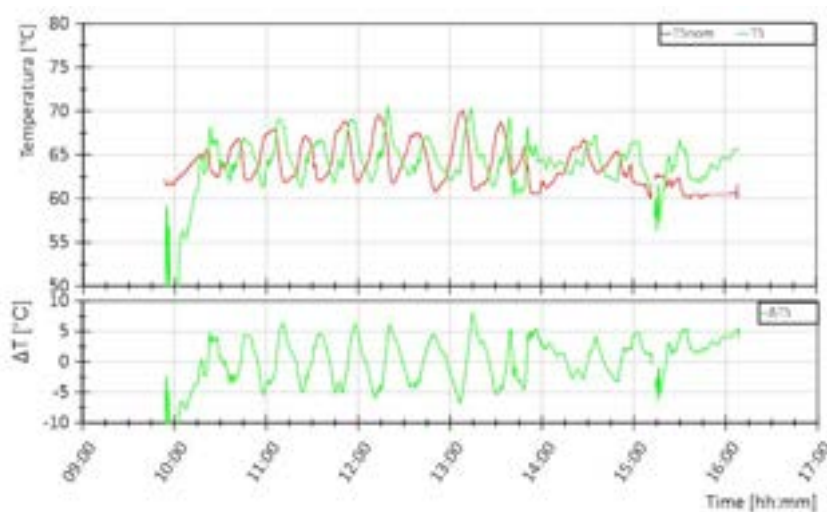


Figura 5.52. Sessione B1, Giorno 2 - Dettaglio. Andamento della temperatura di mandata dal sistema di generazione T5 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T5nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)



Figura 5.53. Sessione B1, Giorno 2. Andamento della temperatura di ritorno dall'utenza T8 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T8nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

Con riferimento alla Figura 5.54 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T10nom e il valore misurato T10 sia inferiore a ± 1 °C per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T10 da parte della sottostazione, nonostante le oscillazioni registrate in ingresso allo scambiatore S1 ed S2. Si ha una maggiore discrepanza nella condizione di richiesta massima da parte dell'utenza e all'avviamento: in questa condizione si registrano anche degli abbassamenti maggiori di 5 °C nella temperatura T1 e quindi gli scambiatori S1 ed S2 operano in condizioni di funzionamento diverse da quelle di progetto non riuscendo a garantire 55 °C in uscita ma comunque riuscendo a soddisfare le richieste termiche dell'utente, come risulta da descrizione dei grafici in Figura 5.56 e Figura 5.57 riportati nel seguito.

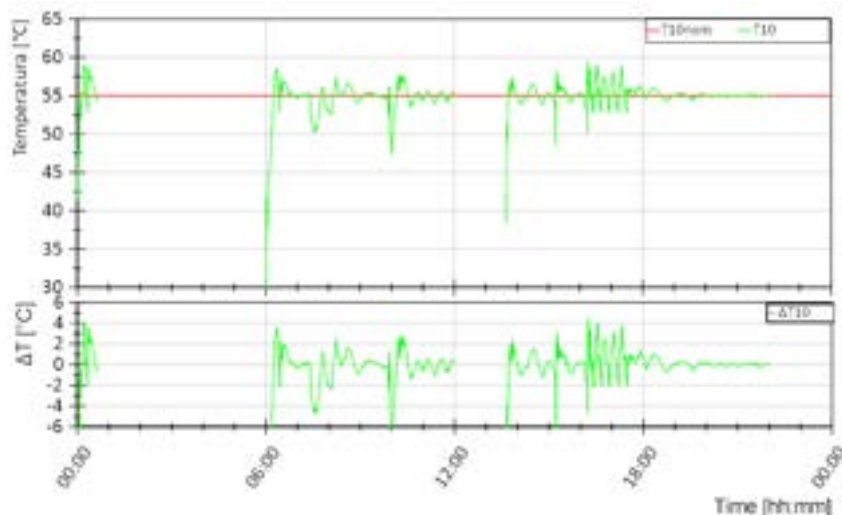


Figura 5.54. Sessione B1, Giorno 2. Andamento della temperatura di mandata all'utenza T10 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T10nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

Con riferimento alla Figura 5.55 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T4nom e il valore misurato T4 sia inferiore a ± 2 °C per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T4 da parte della sottostazione, nonostante le oscillazioni registrate in ingresso allo scambiatore S3. Si ha una maggiore discrepanza all'avviamento e nei momenti in cui la temperatura di ingresso lato generazione (T6) è prossima a 62 °C. Il valore di 62 °C deriva dalla logica di

controllo implementata per regolare l'accensione di S3: al fine di evitare un funzionamento ad alta intermittenza dello scambiatore a causa delle oscillazioni in T5 e allo stesso tempo massimizzarne l'utilizzo, l'isteresi che ne controlla l'accensione è impostata tra 62 °C e 64 °C.

In Figura 5.56 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio e la temperatura ambiente e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo di ACS (in grigio) nonché la portata di caricamento (in arancione) e di ricircolo (in blu). Si può notare dal grafico superiore come la temperatura all'interno degli appartamenti sia tenuta essenzialmente sopra i 20 °C durante le ore di riscaldamento. Inoltre, dalla Figura 5.57 risulta che la valvola miscelatrice presente nel modello riesce a controllare la temperatura di mandata al riscaldamento secondo curva climatica teorica durante tutto il test, eccetto che per qualche minuto all'avviamento. Per quanto riguarda l'ACS, si può notare come la temperatura dell'accumulo aumenta ogni qualvolta avviene una carica, fino a raggiungere i 53 °C, e diminuisce per effetto delle perdite termiche o richiesta da parte dell'utente che si verifica in corrispondenza di una portata di ricircolo maggiore di 0,27 m³/h.

In Figura 5.58 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in ingresso e uscita dal campo solare e la portata circolante e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo solare (in grigio) e l'intervallo di scarica (in arancione) che indica il periodo in cui l'energia solare viene inviata dall'accumulo alla sottostazione. Dal grafico superiore si evince che in una prima fase di avviamento del campo solare non si ha un caricamento dell'accumulo: la temperatura di uscita dal campo solare è infatti inferiore rispetto alla temperatura nell'accumulo; la carica inizia quando questa temperatura diventa superiore alla temperatura nell'accumulo. Ciò emerge anche dalla Figura 5.59 confrontando la potenza termica prodotta dal campo solare e quella in ingresso all'accumulo solare (rispettivamente in rosso e magenta). Con riferimento alla Figura 5.58, nei momenti in cui si ha la carica dell'accumulo, si assiste ad un aumento della temperatura dello stesso. Tale temperatura può diminuire in corrispondenza di una scarica se la potenza richiesta dalla sottostazione è superiore a quella immessa nell'accumulo in quell'istante o può aumentare in caso contrario. Da ciò si deduce che se non si ha un perfetto bilanciamento tra potenza prodotta e quella utilizzata si va incontro ad un funzionamento intermittente della sottostazione. Nel caso in esame, si registra un funzionamento continuo di S2 nelle ore di richiesta da parte dell'utente e di contemporanea disponibilità solare, ma un funzionamento intermittente di S3 a causa del valore minimo di potenza che è in grado di scambiare, come descritto per il giorno 1 della sessione B1.

In Tabella 5.5 si riporta l'energia termica al primario e al secondario dei diversi scambiatori e le relative efficienze per la prova considerata.

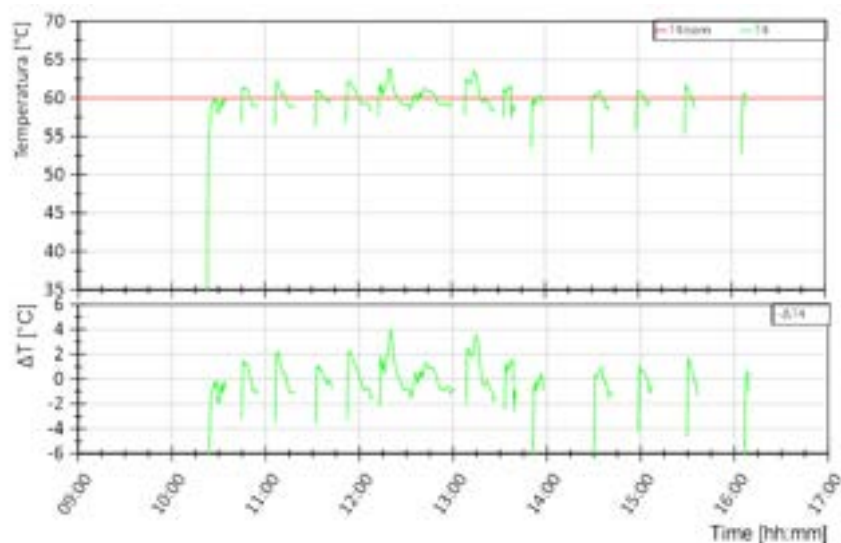


Figura 5.55. Sessione B1, Giorno 2 - Dettaglio. Andamento della temperatura di immissione in rete T4 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T4nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

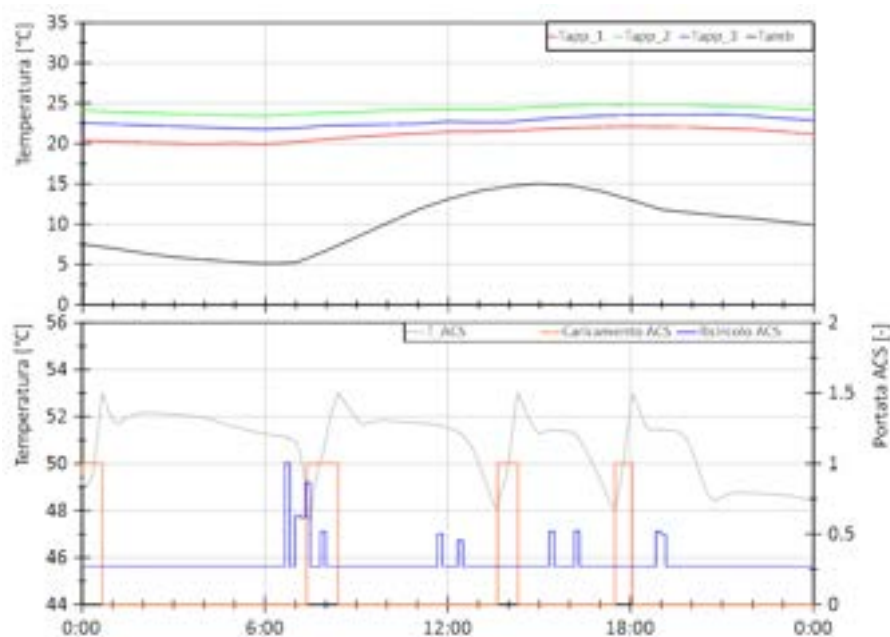


Figura 5.56. Sessione B1, Giorno 2. Andamento della temperatura in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio (curve in blu, verde e rosso del grafico superiore) e temperatura esterna (curva in nero grafico superiore), andamento della temperatura nell'accumulo di ACS e portata di caricamento e ricircolo dell'accumulo di ACS (rispettivamente curva un grigio, in arancione e in blu del grafico inferiore)

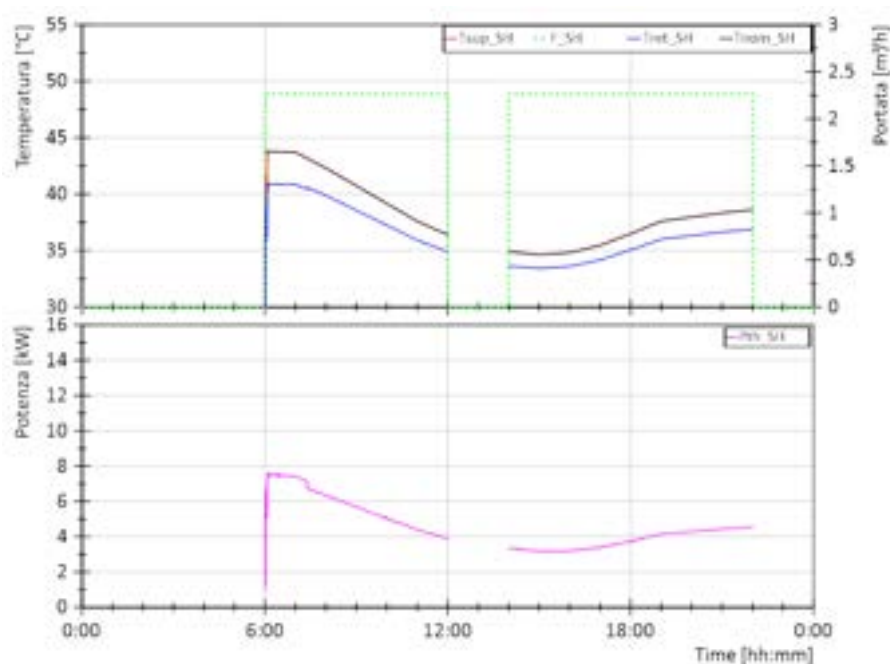


Figura 5.57. Sessione B1, Giorno 2. Andamento della temperatura di mandata e ritorno e portata nel circuito di riscaldamento (curva in rosso, blu e tratteggiata verde nel grafico superiore rispettivamente) e andamento della temperatura di mandata al riscaldamento di riferimento (curva in nero), andamento della potenza termica per riscaldamento (curva in magenta grafico inferiore).

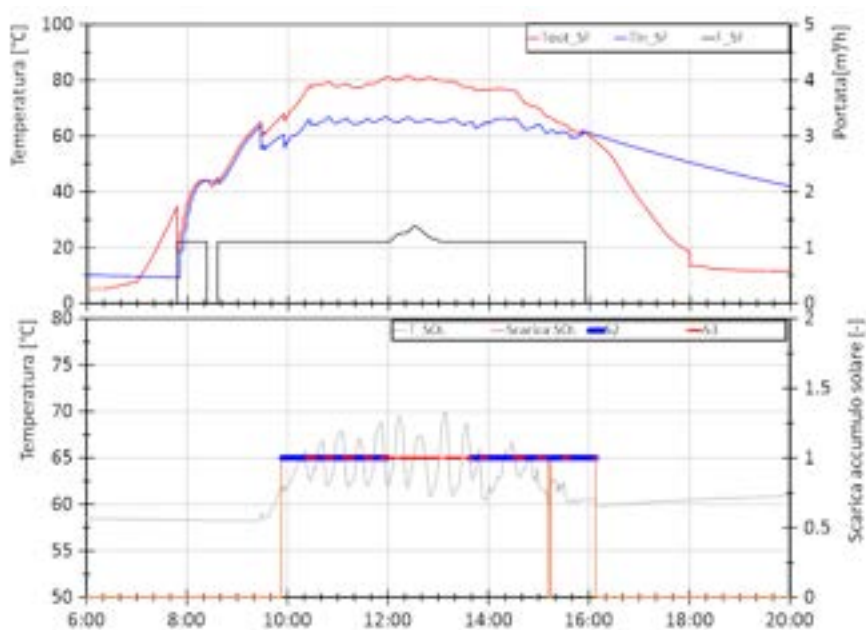


Figura 5.58. Sessione B1, Giorno 2 - Dettaglio. Andamento della temperatura in uscita dal campo solare, in ingresso e la portata (rispettivamente curva in rosso, blu e nero del grafico superiore), andamento della temperatura nell'accumulo solare e intervallo di scarica dell'accumulo solare (rispettivamente curva un grigio e in arancione del grafico inferiore)

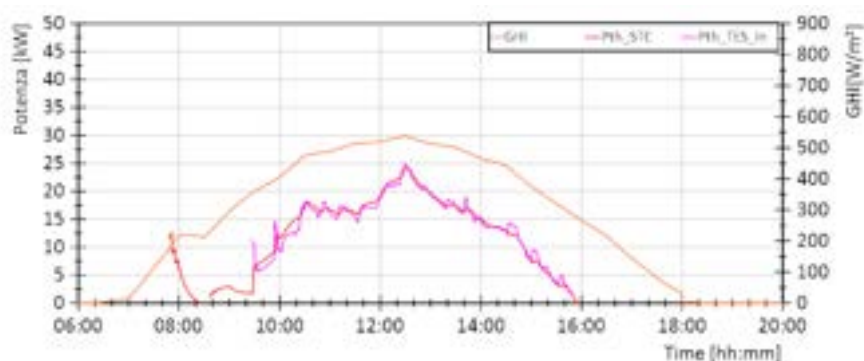


Figura 5.59. Sessione B1, Giorno 2 - Dettaglio. Andamento della radiazione globale sul piano orizzontale (GHI in arancione), della potenza termica prodotta dal campo solare (in rosso) e di quella in ingresso all'accumulo solare (in magenta)

Tabella 5.5. Sessione B1, Giorno 2. Energie termiche al primario (lato teleriscaldamento, TLR, o sistema di generazione, GEN) e al secondario (lato teleriscaldamento, TLR, o utente, US) dei diversi scambiatori della sottostazione e relative efficienze

Eth,S1,TLR [kWh]	Eth,S1,US [kWh]	η_{S1} [%]	Eth,S2,GEN [kWh]	Eth,S2,US [kWh]	η_{S2} [%]	Eth,S3,GEN [kWh]	Eth,S3,US [kWh]	η_{S3} [%]
93,92	88,30	94%	28,73	27,20	95%	61,80	61,64	100%

5.4.5 Sessione B1 - Giorno 4

Il giorno di test 4 è il 24/05 per il quale sono presenti solo richieste di ACS da parte dell'utente essendo al di fuori del periodo di riscaldamento.

In Figura 5.60 viene mostrato, nel grafico inferiore, in nero il comando di avvio della sottostazione per richiesta da parte dell'utente che coincide con le richieste di caricamento dell'accumulo di ACS e in arancione la disponibilità di energia solare nell'accumulo solare che può essere utilizzata dalla sottostazione. Nel grafico superiore si riporta in magenta la potenza termica fornita dallo scambiatore S1 e in rosso quella fornita dallo

scambiatore S2 per soddisfare le richieste termiche. Nel grafico centrale si riporta in viola la potenza termica fornita dallo scambiatore S3 alla rete di teleriscaldamento.

Dal confronto tra i tre grafici si può notare che le richieste termiche dell'utente sono soddisfatte dallo scambiatore S1 e quindi dalla rete di TLR in quanto non si ha contemporaneità di disponibilità solare e richieste per caricamento ACS. La disponibilità solare viene immessa nella rete di TLR tramite lo scambiatore S3 che ha un funzionamento in parte intermittente e in parte continuo, per le stesse motivazioni illustrate nella descrizione del giorno 1 e 2. In Figura 5.61 viene riportato un ingrandimento della Figura 5.60 al fine di visualizzare in dettaglio le ore di funzionamento dello scambiatore S3. Lo scambiatore S3 immette energia nella rete di TLR quando questa è disponibile e non si hanno richieste da parte dell'utente, ovvero la le 12:30 e le 16:30 circa. Non si verifica, quindi, un funzionamento contemporaneo di S2 ed S3.

Così come per il giorno 1, confrontando la potenza termica immessa nella rete di TLR (S3) del giorno 4 della sessione A e della sessione B1, si può notare una maggiore disponibilità di energia solare utilizzabile dalla sottostazione nella sessione B1 rispetto allo stesso giorno della sessione A.

Si riportano nel seguito gli andamenti delle temperature di ingresso e uscita al primario e al secondario degli scambiatori S1 ed S3 e le portate quando questi sono in funzione (Figura 5.62-Figura 5.63). In particolare per lo scambiatore S3 si utilizza una scala temporale basata sui momenti di funzionamento al fine di facilitarne la lettura. I grafici mettono in luce alcune caratteristiche relative ai controlli di temperatura e portata sia della test facility che della sottostazione, così come esposto nella descrizione dei test eseguiti nella sessione A.

Nel seguito si riportano alcune informazioni riguardo il controllo di temperatura da parte della test facility in T1, T5 e T8 e il controllo di temperatura da parte della sottostazione in T4 e T10 (Figura 5.64-Figura 5.68). Il funzionamento di tali controllo è paragonabile a quanto osservato per i test della sessione A. Si rimanda, quindi, alla descrizione dei giorni di test della sessione A per maggiore dettagli, con particolare riferimento al giorno 4.

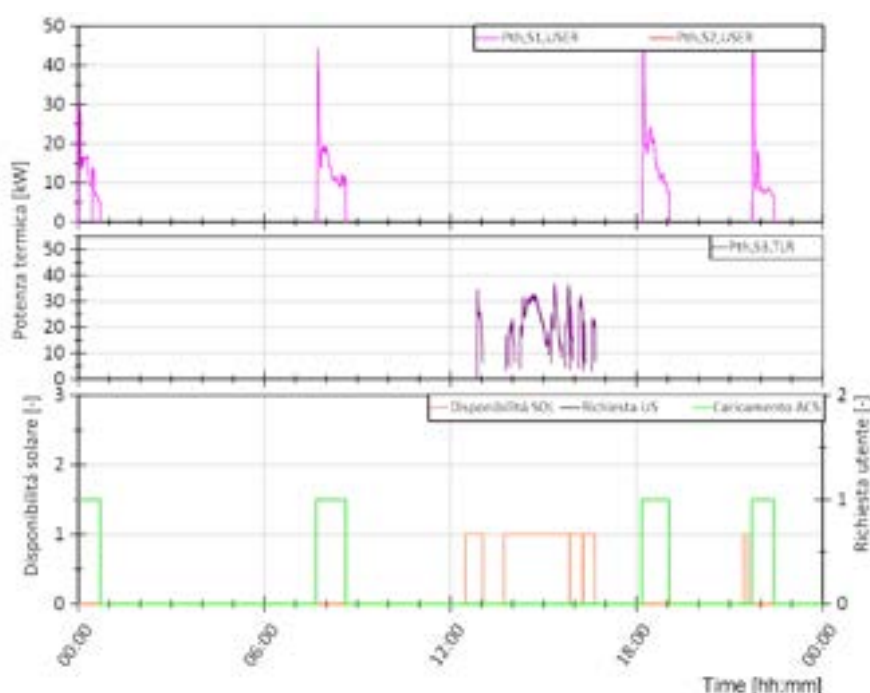


Figura 5.60. Sessione B1, Giorno 4. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità energia solare nell'accumulo (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

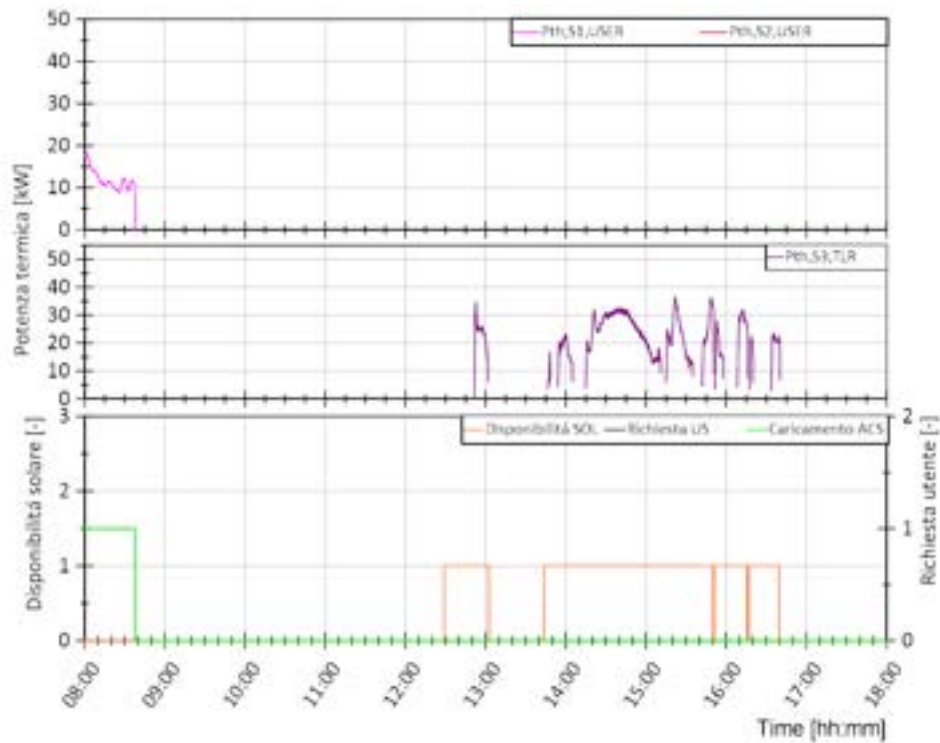


Figura 5.61. Sessione B1, Giorno 4 - Dettaglio. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità energia solare nell'accumulo (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

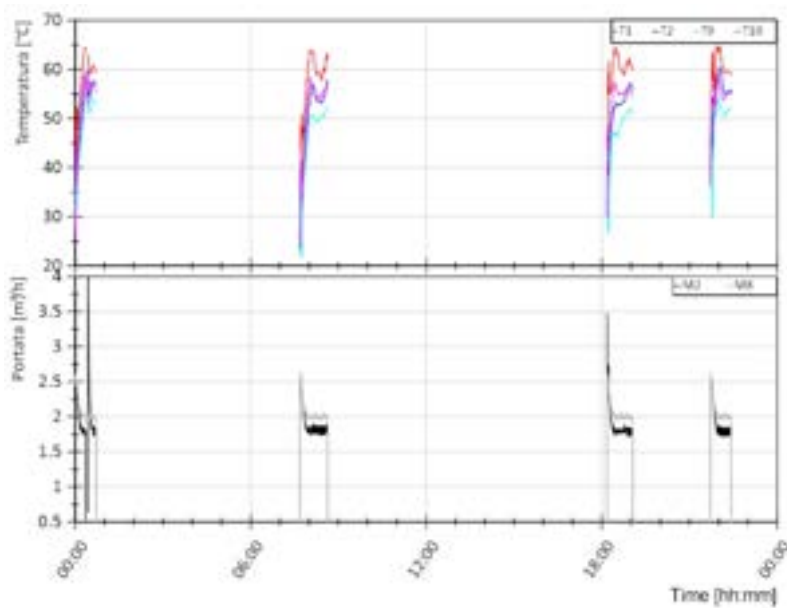


Figura 5.62. Sessione B1, Giorno 4. Andamento delle temperature lato teleriscaldamento (mandata dal teleriscaldamento T1, ritorno al teleriscaldamento T2) e lato utenza (uscita dallo scambiatore S2 T9, mandata all'utenza T10) dello scambiatore S1 (grafico superiore), andamento della portata lato teleriscaldamento (M2) e lato utenza (M8) dello scambiatore S1 (grafico inferiore)

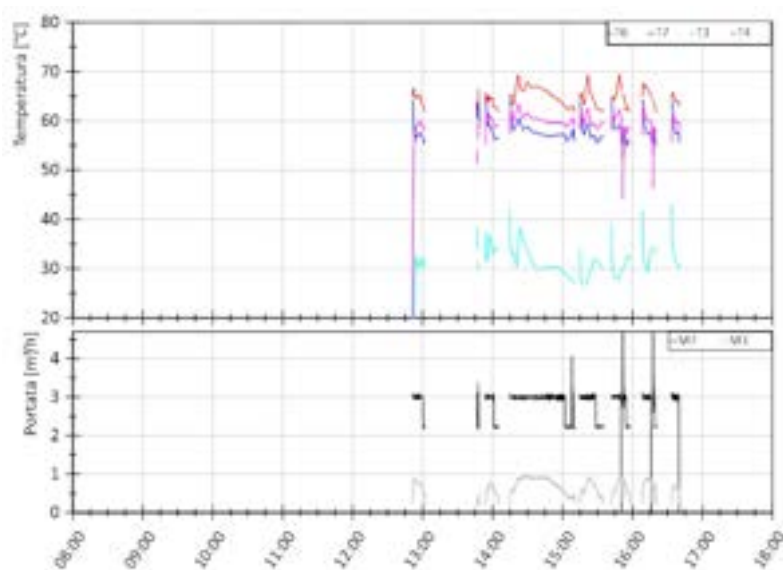


Figura 5.63. Sessione B1, Giorno 4 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (ingresso scambiatore S3 T6 e ritorno al sistema di generazione T7) e lato TLR (ritorno dal TLR T3, mandata al TLR T4) dello scambiatore S3 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato TLR (M3) dello scambiatore S3 (grafico inferiore)

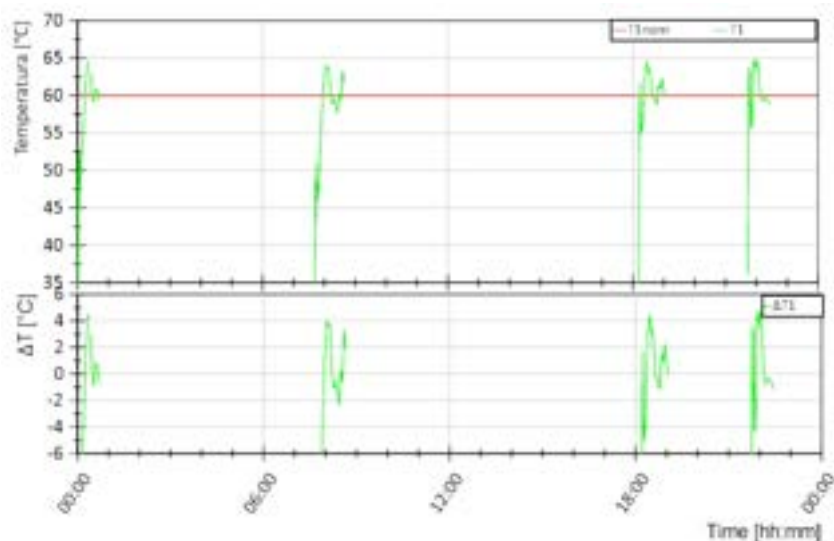


Figura 5.64. Sessione B1, Giorno 4. Andamento della temperatura di mandata dal teleriscaldamento T1 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T1nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

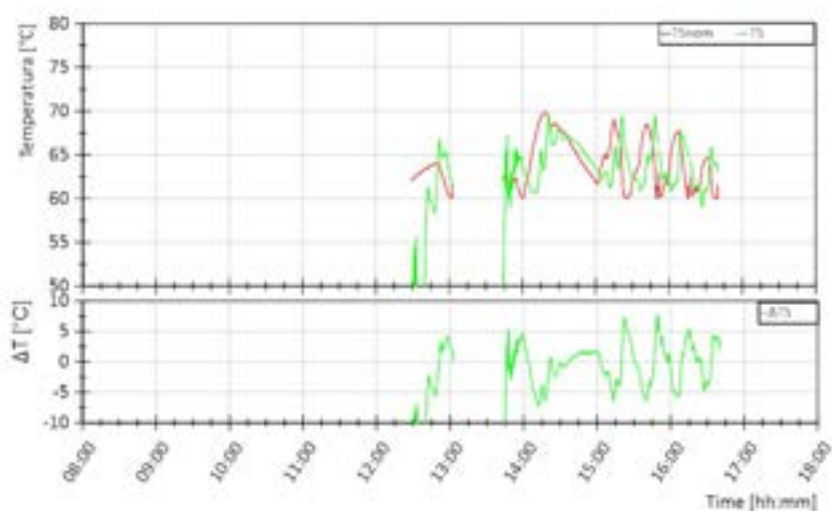


Figura 5.65. Sessione B1, Giornata 4 - Dettaglio. Andamento della temperatura di mandata dal sistema di generazione T5 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T5nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

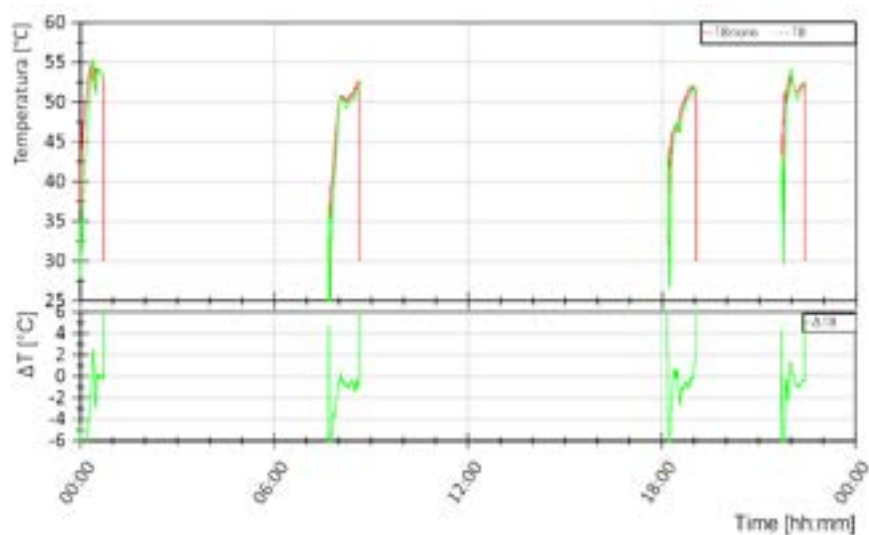


Figura 5.66. Sessione B1, Giornata 4. Andamento della temperatura di ritorno dall'utenza T8 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T8nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

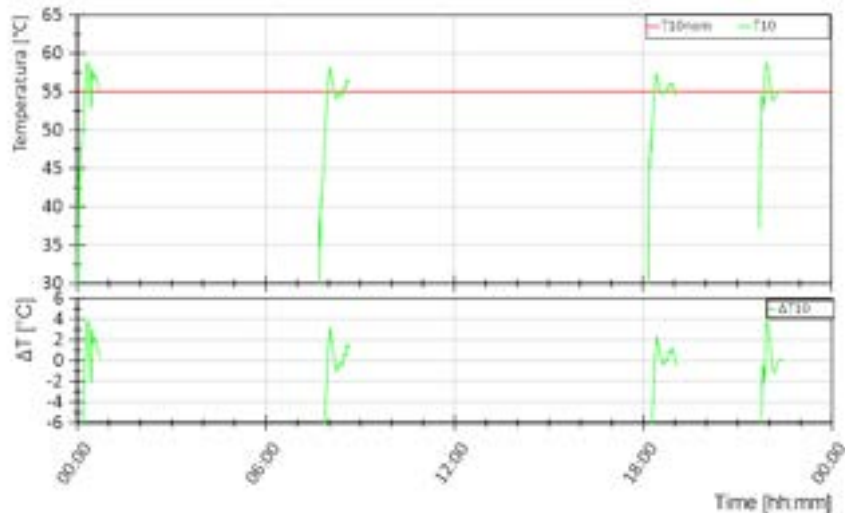


Figura 5.67. Sessione B1, Giorno 4. Andamento della temperatura di mandata all’utenza T10 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T10nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

Con riferimento alla Figura 5.68 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T4nom e il valore misurato T4 sia inferiore a $\pm 2^{\circ}\text{C}$ per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T4 da parte della sottostazione, nonostante le oscillazioni registrate in ingresso allo scambiatore S3. Si ha una maggiore discrepanza all’avviamento e nei momenti in cui la temperatura di ingresso lato generazione (T6) è prossima ad 62°C , così come descritto per il giorno 1. In Figura 5.69 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in 3 dei 10 appartamenti dell’edificio e la temperatura ambiente e nel grafico inferiore la temperatura nell’accumulo di ACS (in grigio) nonché la portata di caricamento (in arancione) e di ricircolo (in blu). Per quanto riguarda l’ACS, si può notare come la temperatura dell’accumulo aumenta ogni qualvolta avviene una carica fino a raggiungere i 53°C , e diminuisce per effetto delle perdite termiche o richiesta da parte dell’utente che si verifica in corrispondenza di una portata di ricircolo maggiore di $0,27\text{ m}^3/\text{h}$.



Figura 5.68. Sessione B1, Giorno 4 - Dettaglio. Andamento della temperatura di immissione in rete T4 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T4nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

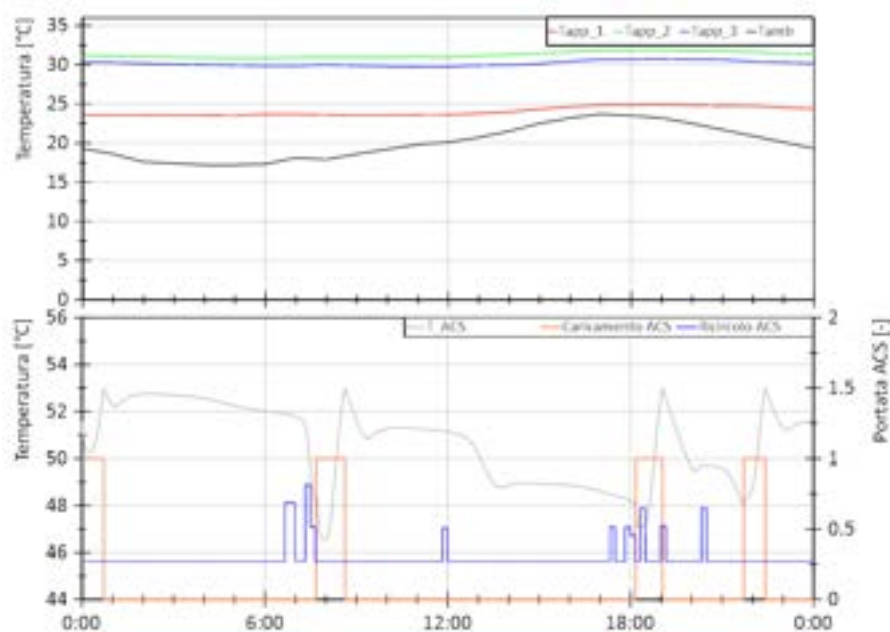


Figura 5.69. Sessione B1, Giorno 4. Andamento della temperatura in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio (curve in blu, verde e rosso del grafico superiore) e temperatura esterna (curva in nero grafico superiore), andamento della temperatura nell'accumulo di ACS e portata di caricamento e ricircolo dell'accumulo di ACS (rispettivamente curva un grigio, in arancione e in blu del grafico inferiore)

In Figura 5.70 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in ingresso e uscita dal campo solare e la portata circolante e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo solare (in grigio) e l'intervallo di scarica (in arancione) che indica il periodo in cui l'energia solare viene inviata dall'accumulo alla sottostazione. Dal grafico superiore si evince che in una prima fase di avviamento del campo solare non si ha un caricamento dell'accumulo: la temperatura di uscita dal campo solare è infatti inferiore rispetto alla temperatura nell'accumulo; la carica inizia quando questa temperatura diventa superiore alla temperatura nell'accumulo. Ciò emerge anche dalla Figura 5.71 confrontando la potenza termica prodotta dal campo solare e quella in ingresso all'accumulo solare (rispettivamente in rosso e magenta). Con riferimento alla Figura 5.70, nei momenti in cui si ha la carica dell'accumulo, si assiste ad un aumento della temperatura dello stesso. Tale temperatura può diminuire in corrispondenza di una scarica se la potenza richiesta dalla sottostazione è superiore a quella immessa nell'accumulo in quell'istante o può aumentare in caso contrario. Da ciò si deduce che se non si ha un perfetto bilanciamento tra potenza prodotta e quella utilizzata si va incontro ad un funzionamento intermittente della sottostazione. Nel caso in esame, si registra un funzionamento intermittente di S3 dato che si ha una produzione solare minore di 25 kW (valore minimo di potenza che è in grado di scambiare), come descritto per il giorno 1 della sessione B1.

In Tabella 5.6 si riporta l'energia termica al primario e al secondario dei diversi scambiatori e le relative efficienze per la prova considerata.

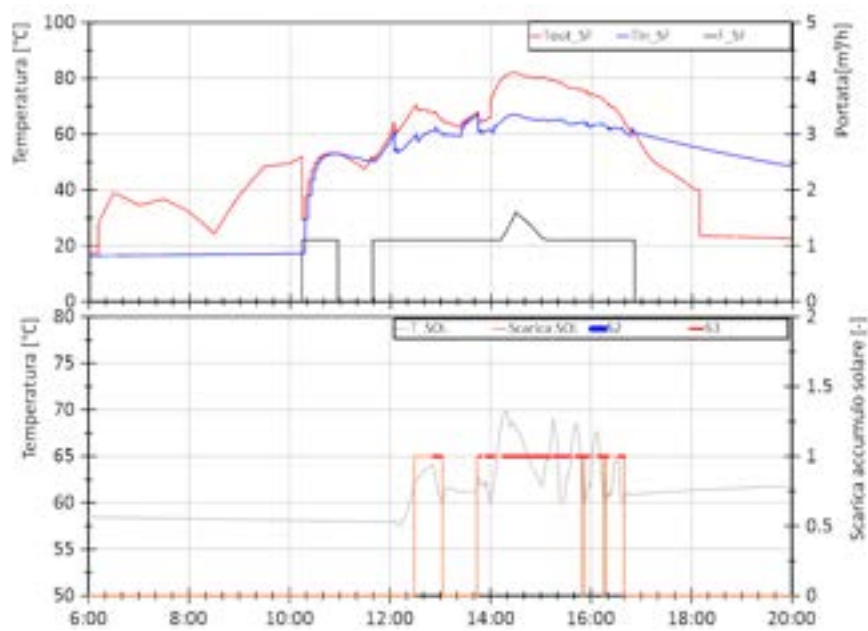


Figura 5.70. Sessione B1, Giorno 4 - Dettaglio. Andamento della temperatura in uscita dal campo solare, in ingresso e la portata (rispettivamente curva in rosso, blu e nero del grafico superiore), andamento della temperatura nell’accumulo solare e intervallo di scarica dell’accumulo solare (rispettivamente curva un grigio e in arancione del grafico inferiore)

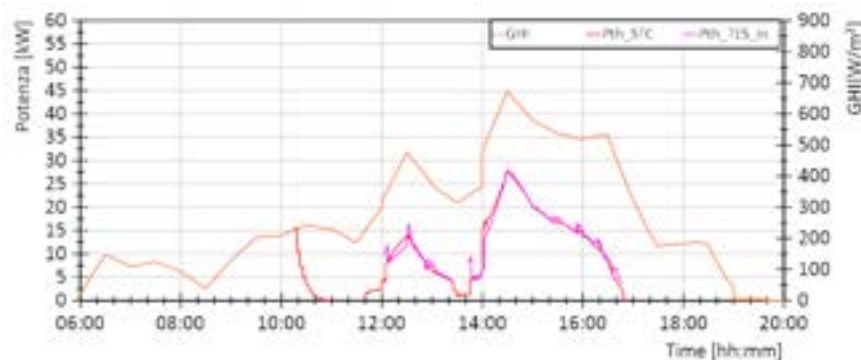


Figura 5.71. Sessione B1, Giorno 4 - Dettaglio. Andamento della radiazione globale sul piano orizzontale (GHI in arancione), della potenza termica prodotta dal campo solare (in rosso) e di quella in ingresso all’accumulo solare (in magenta)

Tabella 5.6. Sessione B1, Giorno 4. Energie termiche al primario e al secondario dei diversi scambiatori della sottostazione e relative efficienze

Eth,S1,TLR [kWh]	Eth,S1,US [kWh]	η_{s1} [%]	Eth,S3,GEN [kWh]	Eth,S3,US [kWh]	η_{s3} [%]
48,10	44,97	93%	50,41	50,04	99%

5.4.6 Sessione B1 - Giorno 6

Il giorno di test 6 è il 05/11 per il quale sono presenti richieste di ACS e riscaldamento da parte dell’utente, rientrando nel periodo di riscaldamento.

In Figura 5.72 viene mostrato, nel grafico inferiore, in nero il comando di avvio della sottostazione per richiesta da parte dell’utente sia per riscaldamento che per ACS, in verde le richieste di caricamento dell’accumulo di ACS e in arancione la disponibilità di energia solare nell’accumulo solare che può essere utilizzata dalla sottostazione. Nel grafico superiore si riporta in magenta la potenza termica fornita dallo

scambiatore S1 e in rosso quella fornita dallo scambiatore S2 per soddisfare le richieste termiche. Nel grafico centrale si riporta in viola la potenza termica fornita dallo scambiatore S3 alla rete di teleriscaldamento. Dal confronto tra i tre grafici si può notare che le richieste termiche dell'utente sono principalmente soddisfatte dallo scambiatore S1 e quindi dalla rete di TLR. All'avviamento della sottostazione e quando si hanno richieste di caricamento dell'accumulo di ACS si registrano degli incrementi improvvisi nelle potenze termiche scambiate per effetto sia di variazione dinamiche di temperature e portata tipiche dell'avviamento, che di un'effettiva maggiore richiesta da parte dell'utente dovuta al caricamento dell'accumulo di ACS. Inoltre, la disponibilità di energia solare nell'accumulo solare è contemporanea alla richiesta termica dell'utente: tramite lo scambiatore S2, parte della potenza termica richiesta dall'utente viene fornita dall'impianto solare e ciò avviene tra le 14:00 e le 16:00 circa. Nello stesso intervallo di tempo, la restante disponibilità solare viene immessa nella rete di TLR tramite lo scambiatore S3. In Figura 5.73 viene riportato un ingrandimento della Figura 5.72 al fine di visualizzare in dettaglio le ore di funzionamento degli scambiatori S2 ed S3. Si verifica un funzionamento contemporaneo di S2 ed S3 tra le 14:30 e le 15:30. Così come per il giorno 1, confrontando la potenza termica lato utenze (S1+S2) e quella immessa nella rete di TLR (S3) del giorno 6 della sessione A e della sessione B1, si possono notare sia una minore richiesta da parte dell'utente che una maggiore disponibilità di energia solare utilizzabile dalla sottostazione nella sessione B1 rispetto allo stesso giorno della sessione A. Si riportano nel seguito gli andamenti delle temperature di ingresso e uscita al primario e al secondario degli scambiatori S1, S2 ed S3 e le portate quando questi sono in funzione (Figura 5.74-Figura 5.76). In particolare per gli scambiatori S2 ed S3 si utilizza una scala temporale basata sui momenti di funzionamento al fine di facilitarne la lettura.

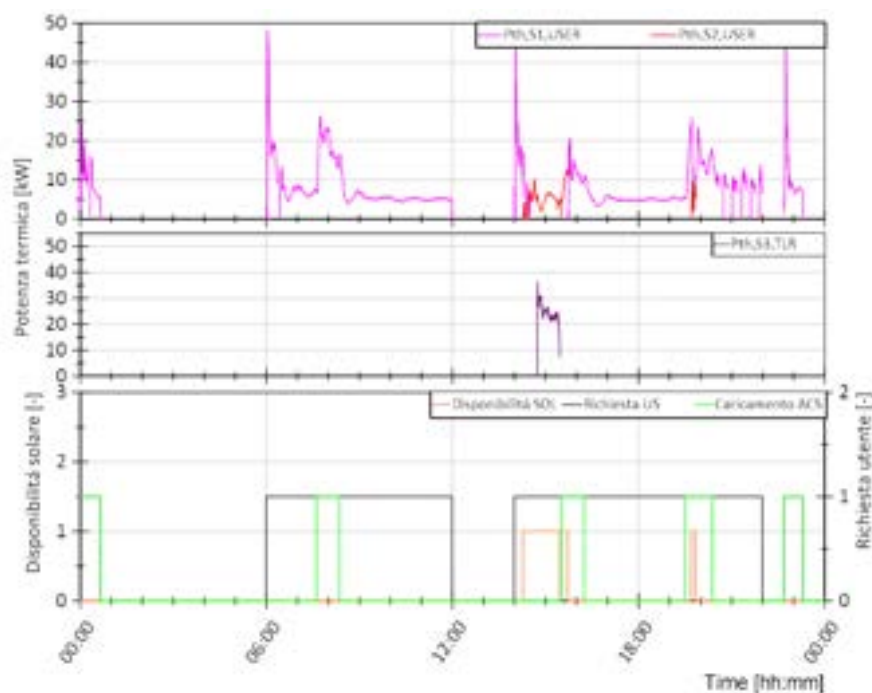


Figura 5.72. Sessione B1, Giorno 6. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità energia solare nell'accumulo (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

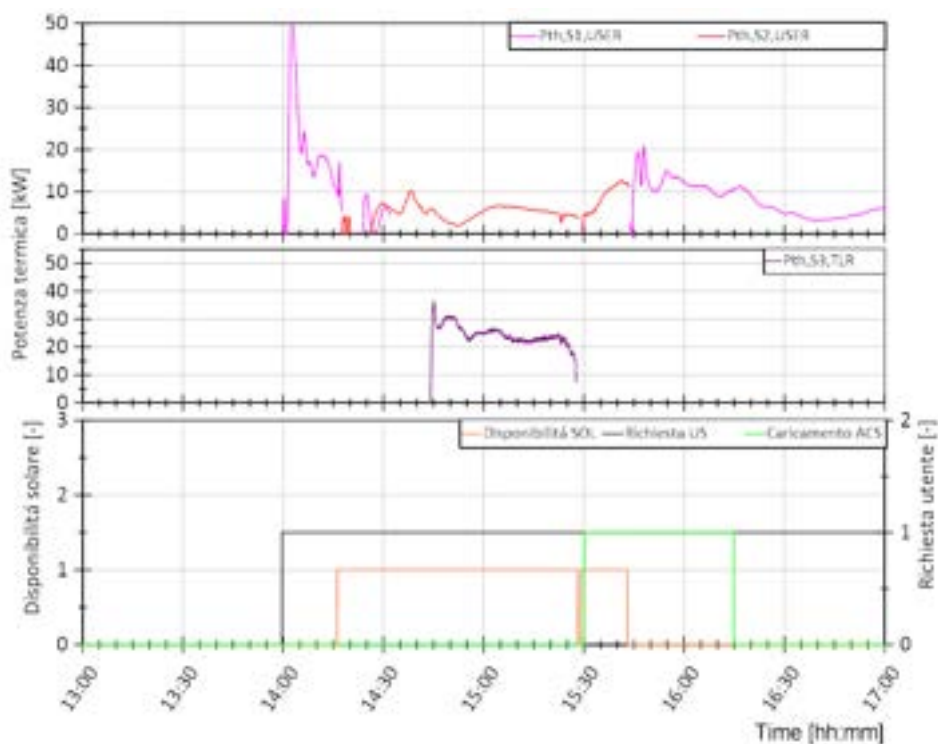


Figura 5.73. Sessione B1, Giorno 6 - Dettaglio. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità energia solare nell'accumulo (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

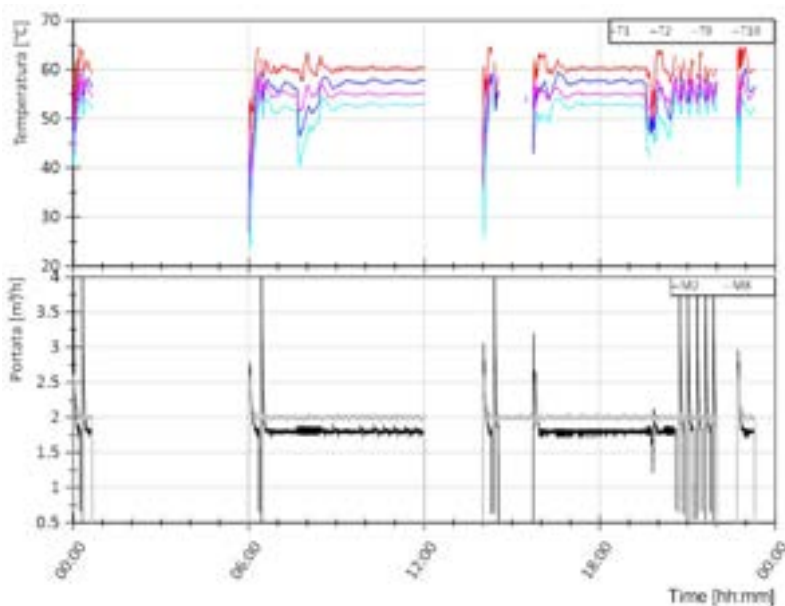


Figura 5.74. Sessione B1, Giorno 6. Andamento delle temperature lato teleriscaldamento (mandata dal teleriscaldamento T1, ritorno al teleriscaldamento T2) e lato utenza (uscita dallo scambiatore S2 T9, mandata all'utenza T10) dello scambiatore S1 (grafico superiore), andamento della portata lato teleriscaldamento (M2) e lato utenza (M8) dello scambiatore S1 (grafico inferiore)

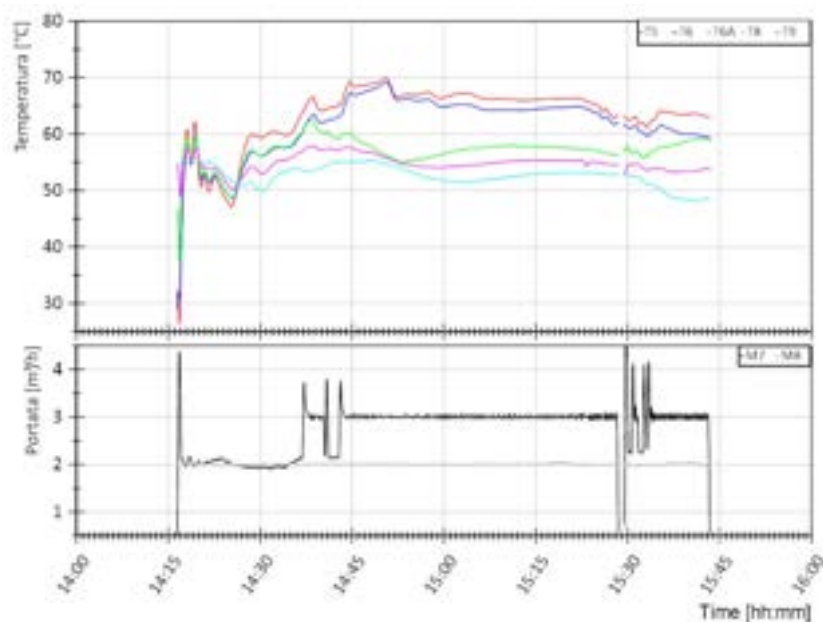


Figura 5.75. Sessione B1, Giorno 6 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (mandata dal sistema di generazione T5, ritorno al sistema di generazione T6 e uscita scambiatore S2 T6A) e lato utenza (ritorno dall'utenza T8, mandata all'utenza T9) dello scambiatore S2 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato utenza (M8) dello scambiatore S2 (grafico inferiore)

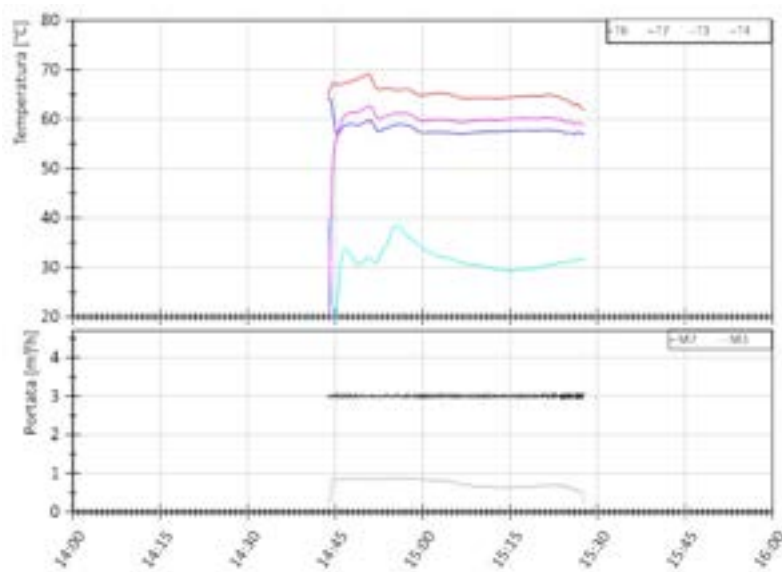


Figura 5.76. Sessione B1, Giorno 6 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (ingresso scambiatore S3 T6 e ritorno al sistema di generazione T7) e lato TLR (ritorno dal TLR T3, mandata al TLR T4) dello scambiatore S3 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato TLR (M3) dello scambiatore S3 (grafico inferiore)

I tre grafici di cui sopra riportanti le temperature e le portate nei tre scambiatori mettono in luce alcune caratteristiche relative ai controlli di temperatura e portata sia della test facility che della sottostazione, così come esposto nella descrizione dei test eseguiti nella sessione A.

Nel seguito si riportano alcune considerazioni riguardo il controllo di temperatura da parte della test facility in T1, T5 e T8 e il controllo di temperatura da parte della sottostazione in T4 e T10. Il funzionamento di tali controllo è paragonabile a quanto osservato per i test della sessione A. Si rimanda, quindi, alla descrizione dei giorni di test della sessione A per maggiori dettagli, con particolare riferimento ai giorni 1 e 2.

Con riferimento alla Figura 5.77 si può notare come l'andamento del valore misurato T1 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa ± 2 °C quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento o caricamento dell'accumulo di ACS. Così come descritto nel seguito, tali oscillazioni non compromettono il soddisfacimento delle richieste termiche dell'utente.

Con riferimento alla Figura 5.78 si può notare come l'andamento del valore misurato T5 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa ± 5 °C quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento.

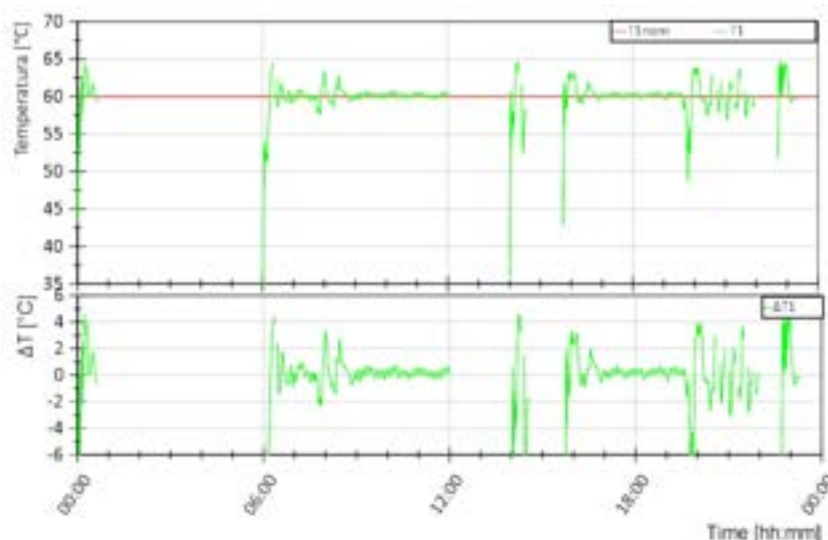


Figura 5.77. Sessione B1, Giorno 6. Andamento della temperatura di mandata dal teleriscaldamento T1 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T1nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

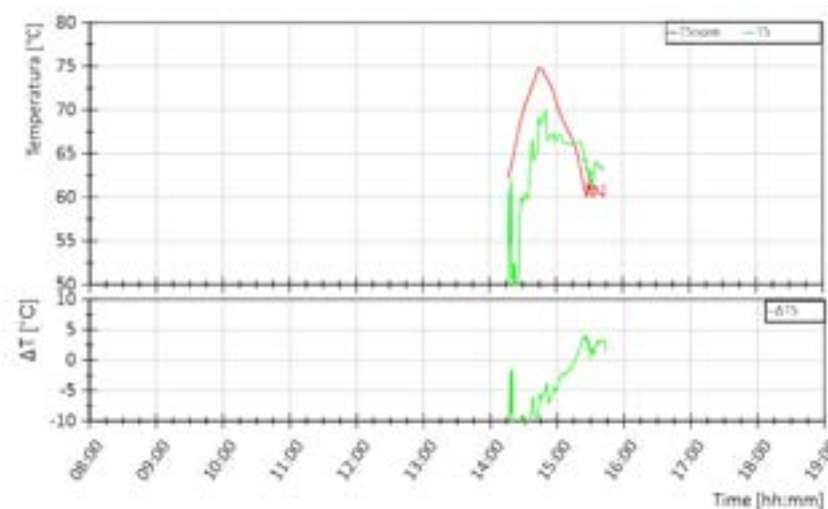


Figura 5.78. Sessione B1, Giorno 6 - Dettaglio. Andamento della temperatura di mandata dal sistema di generazione T5 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T5nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

Con riferimento alla Figura 5.79, si può notare come l'andamento del valore misurato T8 (curva verde nel grafico superiore) sia in ritardo rispetto all'andamento del valore di riferimento T8nom (curva rossa nel grafico superiore). Questo ritardo è dovuto essenzialmente alla distanza circuitale tra il punto della test facility in cui T8 viene controllata al valore di riferimento e il punto della sottostazione in cui T8 viene misurata. Di conseguenza si hanno scostamenti assoluti rilevanti rispetto al valore di riferimento in corrispondenza di una brusca variazione del valore di riferimento ma contenuti in ± 1 °C nel funzionamento in condizioni stabili.

Con riferimento alla Figura 5.80 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T10nom e il valore misurato T10 sia inferiore a $\pm 1^\circ\text{C}$ per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T10 da parte della sottostazione, nonostante le oscillazioni registrate in ingresso allo scambiatore S1 ed S2. Si ha una maggiore discrepanza nella condizione di richiesta massima da parte dell'utenza e all'avviamento: in questa condizione si registrano anche degli abbassamenti maggiori di 5°C nella temperatura T1 e quindi gli scambiatori S1 ed S2 operano in condizioni di funzionamento diverse da quelle di progetto non riuscendo a garantire 55°C in uscita ma comunque riuscendo a soddisfare le richieste termiche dell'utente, come risulta da descrizione dei grafici in Figura 5.82 e Figura 5.83 riportati nel seguito.

Con riferimento alla Figura 5.81 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T4nom e il valore misurato T4 sia inferiore a $\pm 2^\circ\text{C}$ per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T4 da parte della sottostazione, nonostante le oscillazioni registrate in ingresso allo scambiatore S3. Si ha una maggiore discrepanza all'avviamento e nei momenti in cui la temperatura di ingresso lato generazione (T6) è prossima a 62°C , così come descritto per il giorno 1.



Figura 5.79. Sessione B1, Giorno 6. Andamento della temperatura di ritorno dall'utenza T8 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T8nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

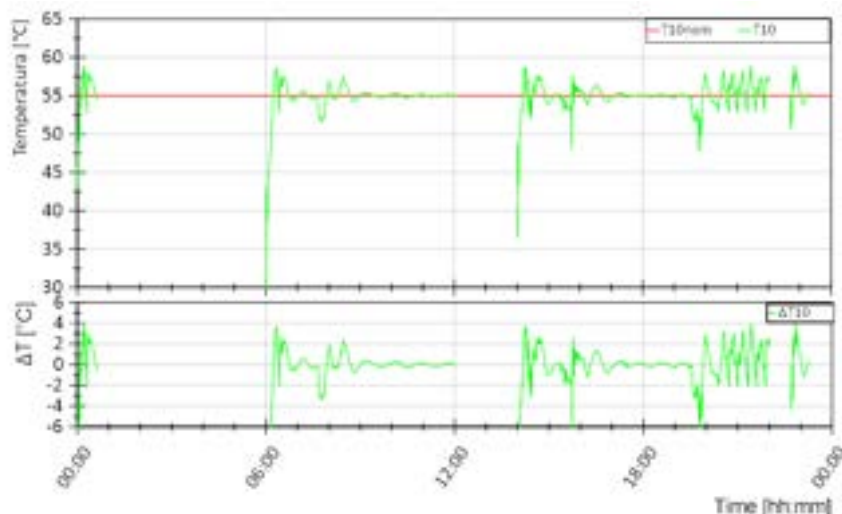


Figura 5.80. Sessione B1, Giorno 6. Andamento della temperatura di mandata all'utenza T10 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T10nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

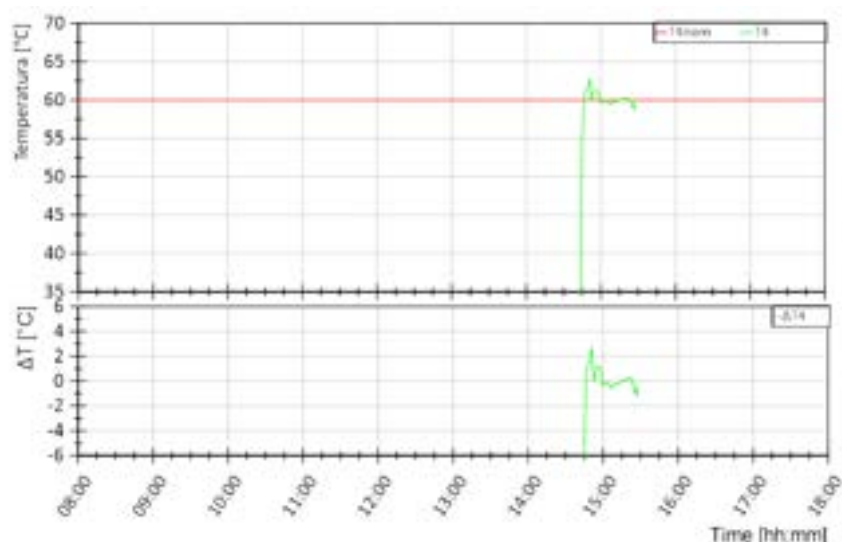


Figura 5.81. Sessione B1, Giorno 6 - Dettaglio. Andamento della temperatura di immissione in rete T4 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T4nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

In Figura 5.82 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio e la temperatura ambiente e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo di ACS (in grigio) nonché la portata di caricamento (in arancione) e di ricircolo (in blu). Si può notare dal grafico superiore come la temperatura all'interno degli appartamenti sia tenuta essenzialmente sopra i 20 °C durante le ore di riscaldamento. Inoltre, dalla Figura 5.83 risulta che la valvola miscelatrice presente nel modello riesce a controllare la temperatura di mandata al riscaldamento secondo curva climatica teorica durante tutto il test, eccetto che per qualche minuto all'avviamento. Per quanto riguarda l'ACS, si può notare come la temperatura dell'accumulo aumenta ogni qualvolta avviene una carica, fino a raggiungere i 53 °C, e diminuisce per effetto delle perdite termiche o richiesta da parte dell'utente che si verifica in corrispondenza di una portata di ricircolo maggiore di 0,27 m³/h.

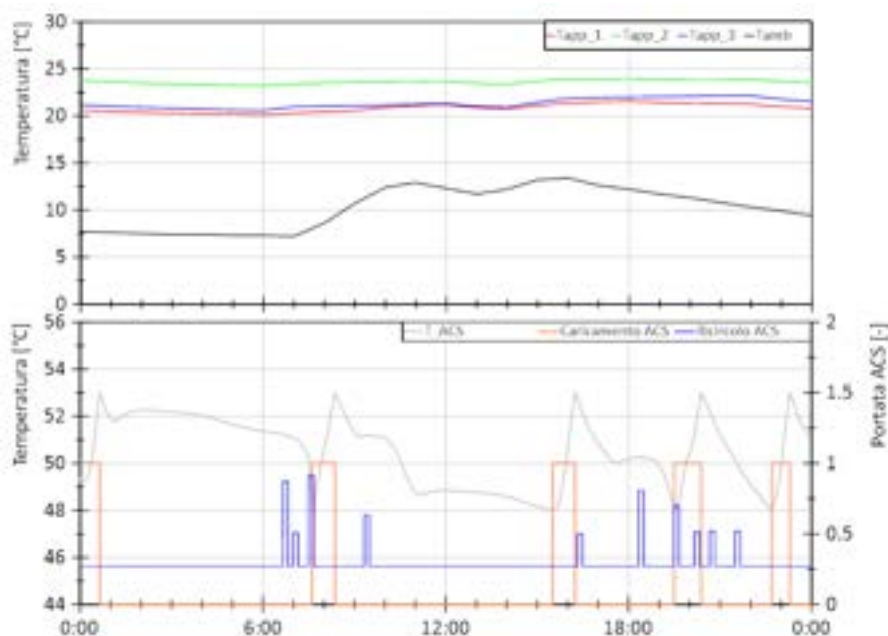


Figura 5.82. Sessione B1, Giorno 6. Andamento della temperatura in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio (curve in blu, verde e rosso del grafico superiore) e temperatura esterna (curva in nero grafico superiore), andamento della temperatura nell'accumulo di ACS e portata di caricamento e ricircolo dell'accumulo di ACS (rispettivamente curva un grigio, in arancione e in blu del grafico inferiore)

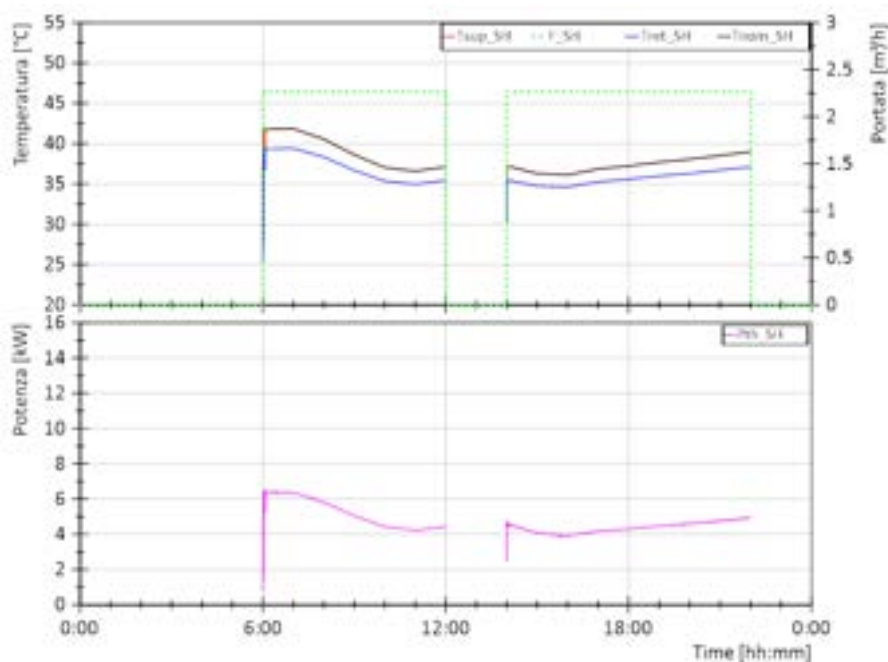


Figura 5.83. Sessione B1, Giorno 6. Andamento della temperatura di mandata e ritorno e portata nel circuito di riscaldamento (curva in rosso, blu e tratteggiata verde nel grafico superiore rispettivamente) e andamento della temperatura di mandata al riscaldamento di riferimento (curva in nero), andamento della potenza termica per riscaldamento (curva in magenta grafico inferiore)

In Figura 5.84 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in ingresso e uscita dal campo solare e la portata circolante e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo solare (in grigio) e l'intervallo di scarica (in arancione) che indica il periodo in cui l'energia solare viene inviata dall'accumulo alla sottostazione. Dal grafico superiore si evince che in una prima fase di avviamento del campo solare non si ha un caricamento dell'accumulo: la temperatura di uscita dal campo solare è infatti inferiore rispetto alla temperatura nell'accumulo; la carica inizia quando questa temperatura diventa superiore alla temperatura nell'accumulo. Ciò emerge anche dalla Figura 5.85 confrontando la potenza termica prodotta dal campo solare e quella in ingresso all'accumulo solare (rispettivamente in rosso e magenta). Con riferimento alla Figura 5.84, nei momenti in cui si ha la carica dell'accumulo, si assiste ad un aumento della temperatura dello stesso. Tale temperatura può diminuire in corrispondenza di una scarica se la potenza richiesta dalla sottostazione è superiore a quella immessa nell'accumulo in quell'istante o può aumentare in caso contrario. Da ciò si deduce che se non si ha un perfetto bilanciamento tra potenza prodotta e quella utilizzata si va incontro ad un funzionamento intermittente della sottostazione. Nel caso in esame, si registra un funzionamento continuo di S2 e di S3 nelle ore di richiesta da parte dell'utente e di contemporanea disponibilità solare, portando ad una scarica dell'accumulo solare che coincide con la fine della produzione da solare.

In Tabella 5.7 si riporta l'energia termica al primario e al secondario dei diversi scambiatori e le relative efficienze per la prova considerata.

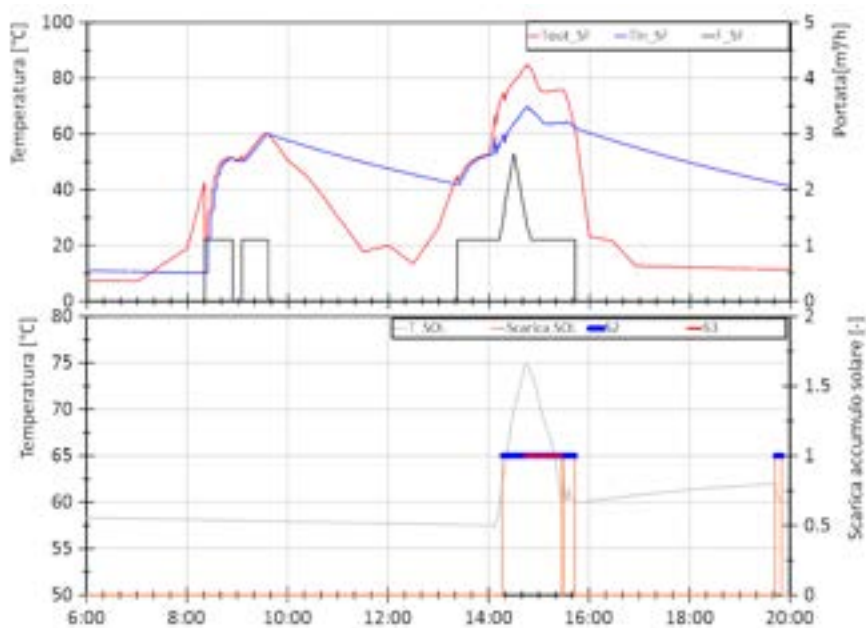


Figura 5.84. Sessione B1, Giornata 6 - Dettaglio. Andamento della temperatura in uscita dal campo solare, in ingresso e la portata (rispettivamente curva in rosso, blu e nero del grafico superiore), andamento della temperatura nell'accumulo solare e intervallo di scarica dell'accumulo solare (rispettivamente curva un grigio e in arancione del grafico inferiore)

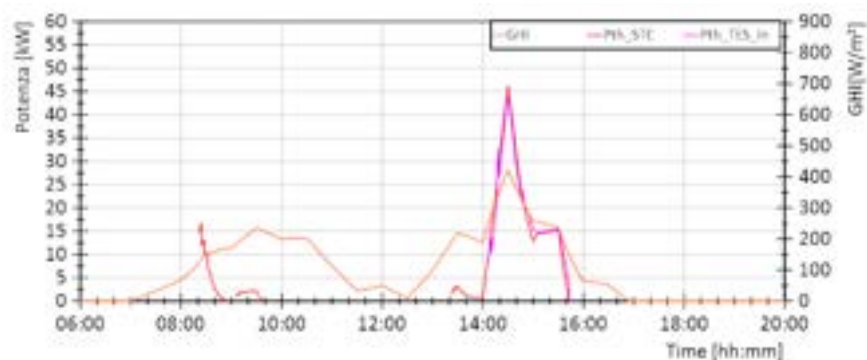


Figura 5.85. Sessione B1, Giornata 6 - Dettaglio. Andamento della radiazione globale sul piano orizzontale (GHI in arancione), della potenza termica prodotta dal campo solare (in rosso) e di quella in ingresso all'accumulo solare (in magenta)

Tabella 5.7. Sessione B1, Giornata 6. Energie termiche al primario (lato teleriscaldamento, TLR, o sistema di generazione, GEN) e al secondario (lato teleriscaldamento, TLR, o utente, US) dei diversi scambiatori della sottostazione e relative efficienze

Eth,S1,TLR [kWh]	Eth,S1,US [kWh]	η_{S1} [%]	Eth,S2,GEN [kWh]	Eth,S2,US [kWh]	η_{S2} [%]	Eth,S3,GEN [kWh]	Eth,S3,US [kWh]	η_{S3} [%]
119,22	112,40	94%	8,72	7,99	92%	18,41	17,67	96%

5.4.7 Sessione B2 - Giornata 2

Il giorno di test 2 è il 24/03 per il quale sono presenti richieste di ACS e riscaldamento da parte dell'utente, rientrando nel periodo di riscaldamento.

In Figura 5.86 viene mostrato, nel grafico inferiore, in nero il comando di avvio della sottostazione per richiesta da parte dell'utente sia per riscaldamento che per ACS, in verde le richieste di caricamento dell'accumulo di ACS e in arancione la disponibilità di calore di scarto dal processo considerato che può essere utilizzata dalla sottostazione. Nel grafico superiore si riporta in magenta la potenza termica fornita dallo

scambiatore S1 e in rosso quella fornita dallo scambiatore S2 per soddisfare le richieste termiche. Nel grafico centrale si riporta in viola la potenza termica fornita dallo scambiatore S3 alla rete di teleriscaldamento. Dal confronto tra i tre grafici si può notare che le richieste termiche dell'utente sono soddisfatte sia dallo scambiatore S1 (rete di TLR) che dallo scambiatore S2 (calore di scarto). Il profilo di carico utente è analogo a quanto esposto per il giorno 2 della sessione B1. La disponibilità di calore di scarto è in parte contemporanea alla richiesta termica dell'utente: tramite lo scambiatore S2, parte della richiesta termica dell'utente è soddisfatta dal calore di scarto e ciò avviene tra le 07:00 e le 14:00 circa. La restante disponibilità di calore di scarto viene immessa nella rete di TLR tramite lo scambiatore S3 per il quale si registra un funzionamento principalmente continuo. In Figura 5.87 viene riportato un ingrandimento della Figura 5.86 al fine di visualizzare in dettaglio le ore di funzionamento degli scambiatori S2 ed S3. Si verifica un funzionamento contemporaneo di S2 ed S3 per la gran parte del periodo di disponibilità di calore di scarto, con una distribuzione di potenza diversa a seconda delle richieste da parte dell'utente, a fronte di una disponibilità di calore di scarto di circa 55 kW: ad una maggiore richiesta da parte dell'utente (S2) corrisponde una minore potenza immessa nella rete di TLR (S3) e viceversa. Si può notare come nei momenti in cui non si ha richiesta da parte dell'utente la potenza immessa in rete di TLR da S3 è di circa 55 kW che corrisponde alla disponibilità di calore di scarto considerata per questi test.

Si riportano nel seguito gli andamenti delle temperature di ingresso e uscita al primario e al secondario degli scambiatori S1, S2 ed S3 e le portate quando questi sono in funzione (Figura 5.88-Figura 5.90). In particolare per gli scambiatori S2 ed S3 si utilizza una scala temporale basata sui momenti di funzionamento al fine di facilitarne la lettura.

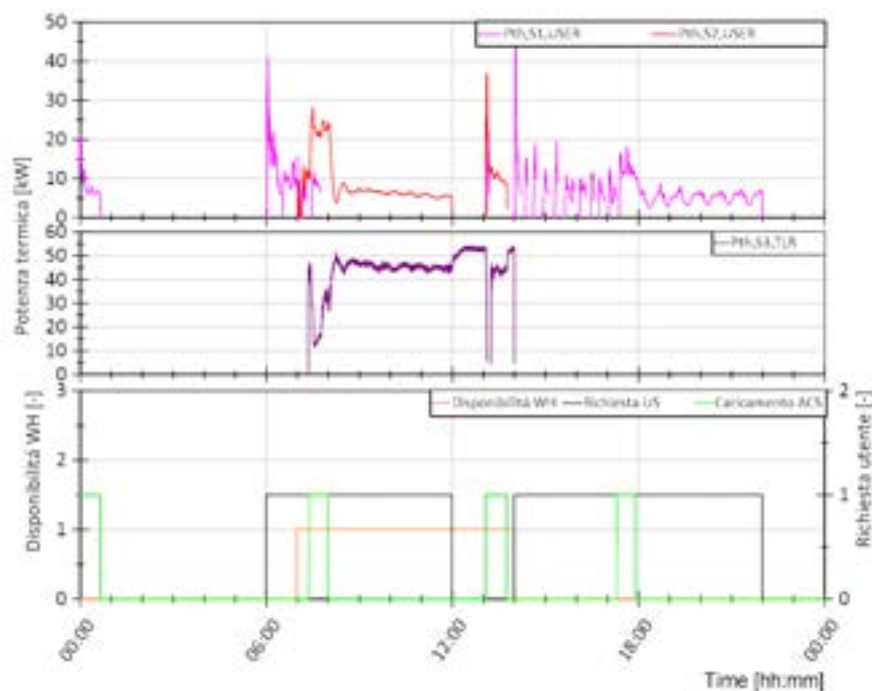


Figura 5.86. Sessione B2, Giorno 2. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità di calore di scarto (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

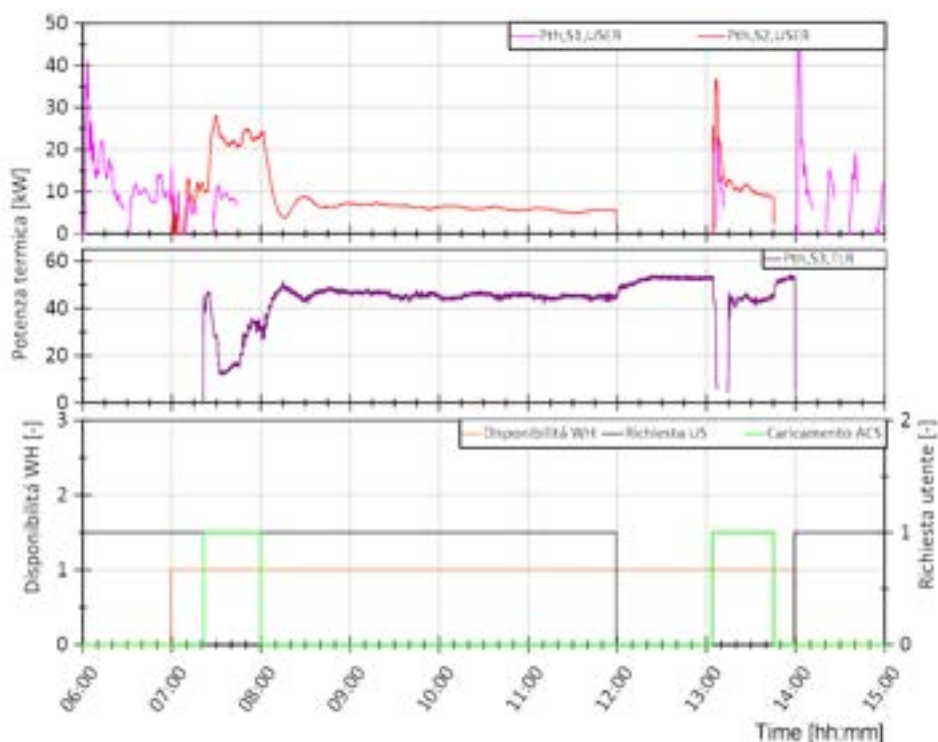


Figura 5.87. Sessione B2, Giorno 2 - Dettaglio. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità di calore di scarto (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

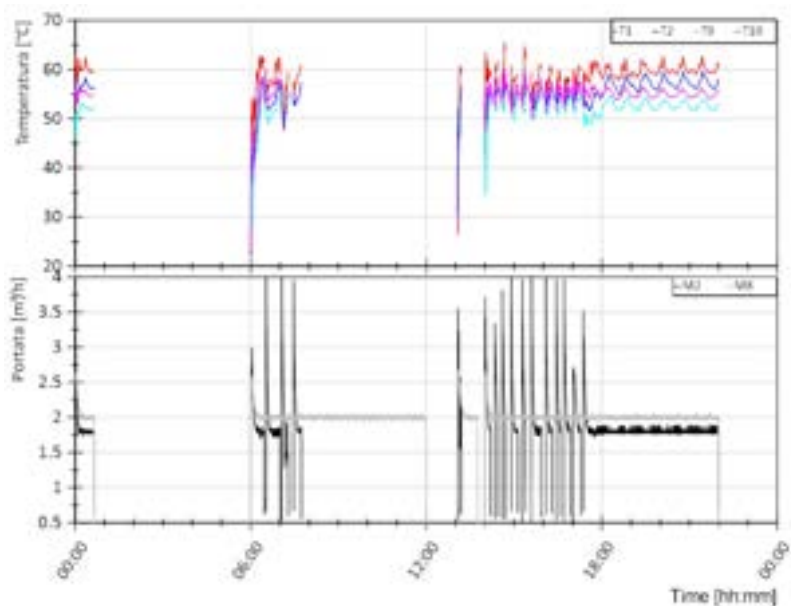


Figura 5.88. Sessione B2, Giorno 2. Andamento delle temperature lato teleriscaldamento (mandata dal teleriscaldamento T1, ritorno al teleriscaldamento T2) e lato utenza (uscita dallo scambiatore S2 T9, mandata all'utenza T10) dello scambiatore S1 (grafico superiore), andamento della portata lato teleriscaldamento (M2) e lato utenza (M8) dello scambiatore S1 (grafico inferiore)

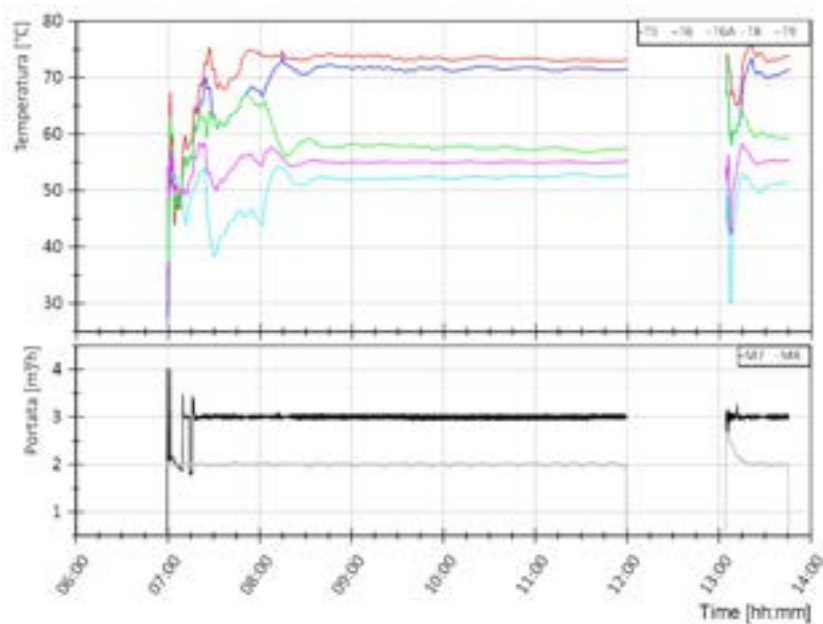


Figura 5.89. Sessione B2, Giorno 2 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (mandata dal sistema di generazione T5, ritorno al sistema di generazione T6 e uscita scambiatore S2 T6A) e lato utenza (ritorno dall'utenza T8, mandata all'utenza T9) dello scambiatore S2 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato utenza (M8) dello scambiatore S2 (grafico inferiore)

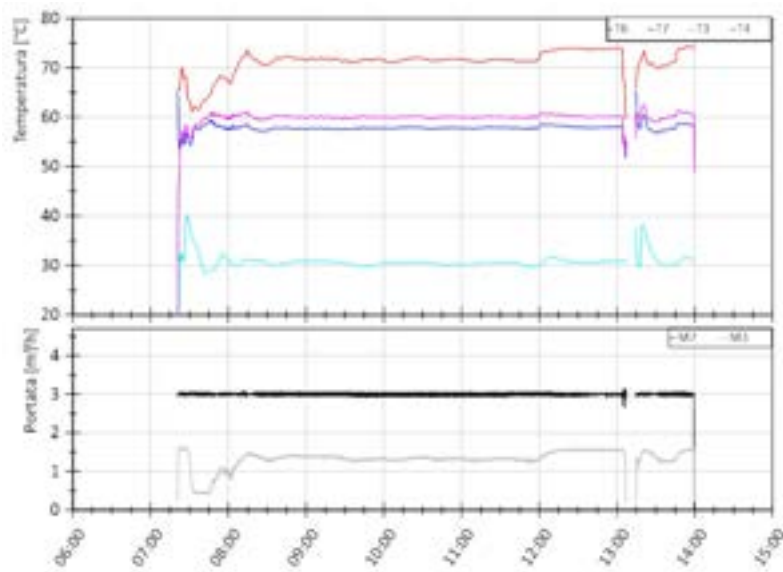


Figura 5.90. Sessione B2, Giorno 2 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (Ingresso scambiatore S3 T6 e ritorno al sistema di generazione T7) e lato TLR (ritorno dal TLR T3, mandata al TLR T4) dello scambiatore S3 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato TLR (M3) dello scambiatore S3 (grafico inferiore)

I tre grafici di cui sopra riportanti le temperature e le portate nei tre scambiatori mettono in luce alcune caratteristiche relative ai controlli di temperatura e portata sia della test facility che della sottostazione, così come esposto nella descrizione dei test eseguiti nella sessione A.

Nel seguito si riportano alcune considerazioni riguardo il controllo di temperatura da parte della test facility in T1, T5 e T8 e il controllo di temperatura da parte della sottostazione in T4 e T10. Il funzionamento di tali controllo è paragonabile a quanto osservato per i test della sessione A. Si rimanda, quindi, alla descrizione dei giorni di test della sessione A per maggiore dettagli, con particolare riferimento ai giorni 1 e 2.

Con riferimento alla Figura 5.91 si può notare come l'andamento del valore misurato T1 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa ± 2 °C quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento o caricamento dell'accumulo di ACS. Inoltre, tra le 14:00 e le 18:00 si registra un funzionamento intermittente di S1 per le stesse motivazioni esposte nella descrizione dei giorni 2 e 3 della sessione B1: tale intermittenza è strettamente legata alle oscillazioni che si hanno nelle temperature T1 e T10 (illustrata nella Figura 5.94). Così come descritto nel seguito, tali oscillazioni non compromettono il soddisfacimento delle richieste termiche dell'utente.

Con riferimento alla Figura 5.92 si può notare come l'andamento del valore misurato T5 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa ± 5 °C quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento. Si registra, comunque, una differenza minore di ± 1 °C rispetto al valore di riferimento di 73 °C (valore di temperatura a cui è disponibile il calore di scarto nel processo considerato) per la gran parte del tempo.

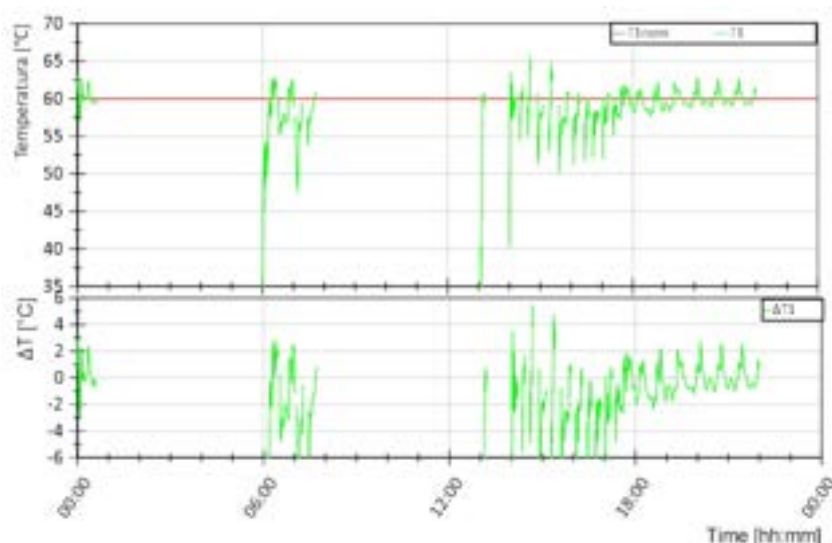


Figura 5.91. Sessione B2, Giorno 2. Andamento della temperatura di mandata dal teleriscaldamento T1 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T1nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

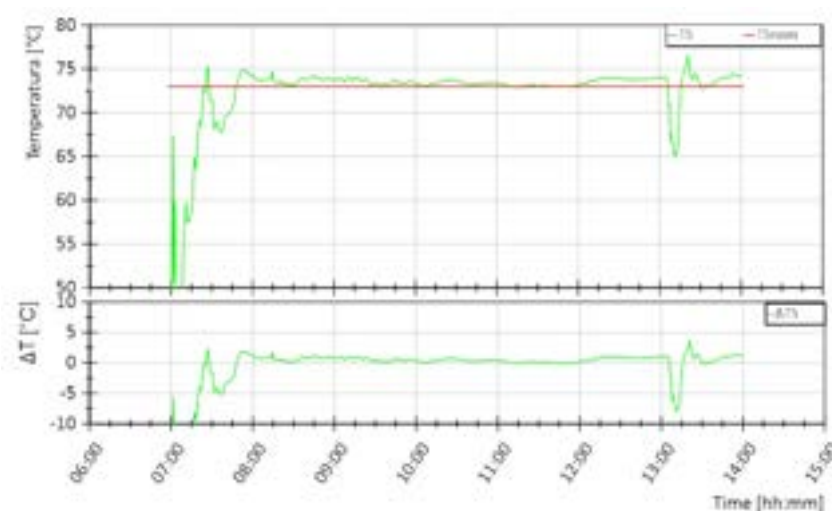


Figura 5.92. Sessione B2, Giorno 2 - Dettaglio. Andamento della temperatura di mandata dal sistema di generazione T5 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T5nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

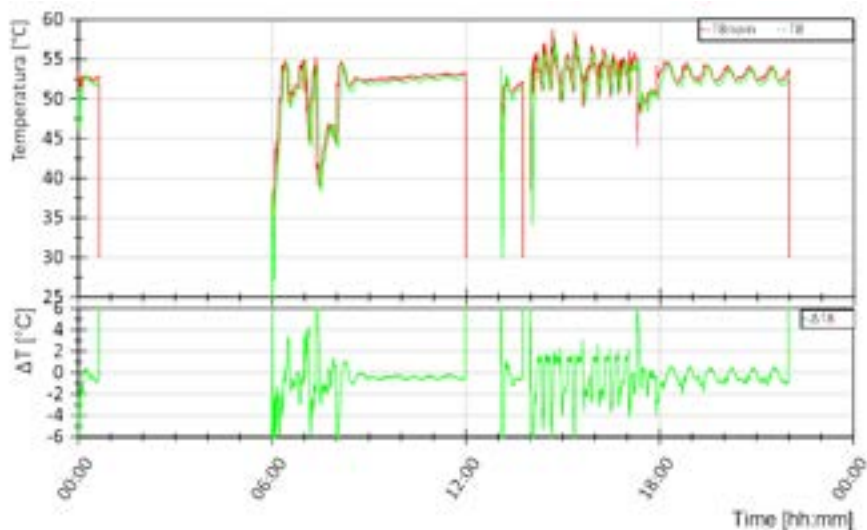


Figura 5.93. Sessione B2, Giorno 2. Andamento della temperatura di ritorno dall'utenza T8 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T8nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

Con riferimento alla Figura 5.94 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T10nom e il valore misurato T10 sia inferiore a ± 2 °C per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T10 da parte della sottostazione che deve garantire 55 °C all'utente al fine di soddisfarne le richieste termiche.

Con riferimento alla Figura 5.95 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T4nom e il valore misurato T4 sia inferiore a ± 1 °C per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T4 da parte della sottostazione.

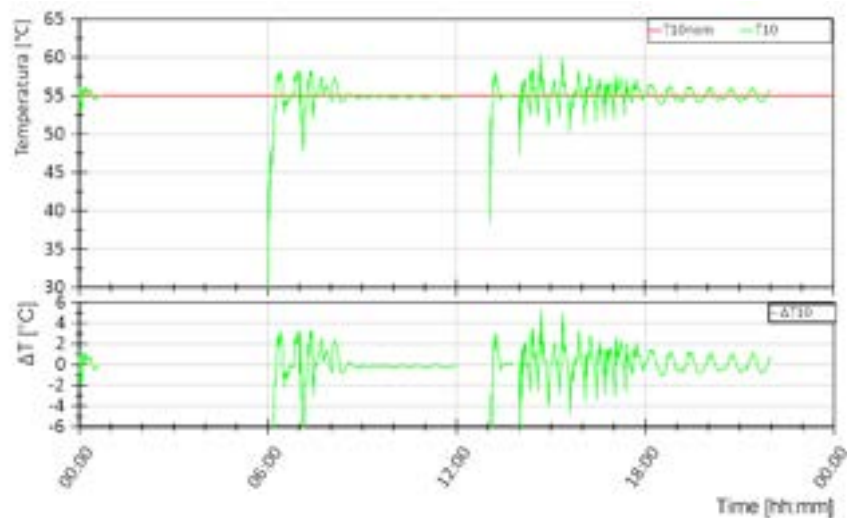


Figura 5.94. Sessione B2, Giorno 2. Andamento della temperatura di mandata all'utenza T10 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T10nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

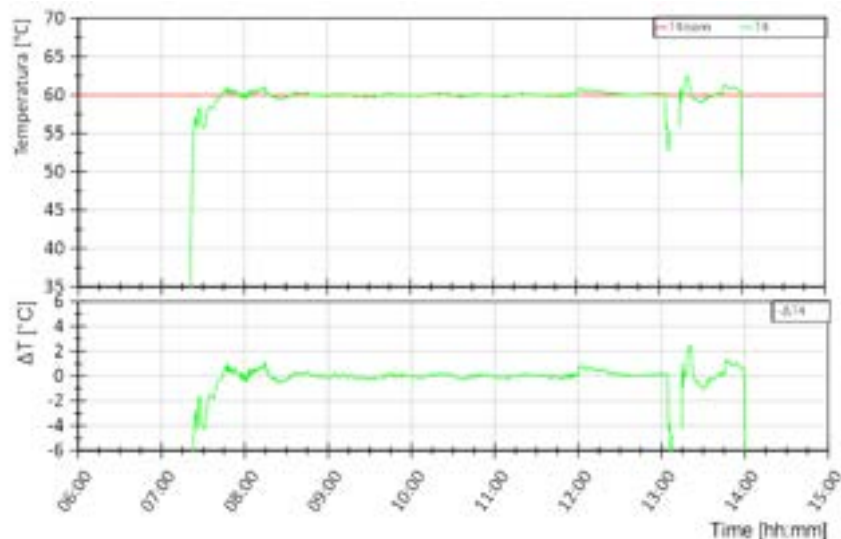


Figura 5.95. Sessione B2, Giorno 2. Andamento della temperatura di immissione in rete T4 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T4nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

In Figura 5.96 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio e la temperatura ambiente e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo di ACS (in grigio) nonché la portata di caricamento (in arancione) e di ricircolo (in blu). Si può notare dal grafico superiore come la temperatura all'interno degli appartamenti sia tenuta essenzialmente sopra i 20 °C durante le ore di riscaldamento. Inoltre, dalla Figura 5.97 risulta che la valvola miscelatrice presente nel modello riesce a controllare la temperatura di mandata al riscaldamento secondo curva climatica teorica, nonostante le oscillazioni che si hanno all'avviamento in T1 e T5 e al funzionamento intermittente di S1. Per quanto riguarda l'ACS, si può notare come la temperatura dell'accumulo aumenta ogni qualvolta avviene una carica, fino a raggiungere i 53 °C, e diminuisce per effetto delle perdite termiche o richiesta da parte dell'utente che si verifica in corrispondenza di una portata di ricircolo maggiore di 0,27 m³/h.

In Figura 5.98 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature di mandata e di ritorno del calore di scarto e la relativa portata. Da notare che tali grandezze corrispondono rispettivamente alla temperatura T5 e T7 della sottostazione e alla portata M7. Da queste grandezze è possibile, quindi, ricavare la potenza disponibile da calore di scarto in ingresso alla sottostazione riportata nel grafico inferiore (curva in grigio). Nello stesso grafico viene anche mostrato come si distribuisce nel tempo la disponibilità di calore di scarto tra gli scambiatori S2 ed S3 (curva in blu e rosso rispettivamente). Nel caso in esame, non appena si ha disponibilità di calore di scarto si avvia lo scambiatore S2. Lo scambiatore S3 si avvia poco dopo in seguito al raggiungimento della temperatura di riferimento in T5 (73 °C), indice che le dinamicità di avviamento si sono esaurite. La potenza da calore di scarto varia mediamente tra circa 52 kW e 55 kW, raggiungendo anche picchi di 60 kW. Gli andamenti delle temperature sono simili a quanto descritto per il giorno 1 sessione B2 al quale si rimanda per ulteriori dettagli.

In Tabella 5.8 si riporta l'energia termica al primario e al secondario dei diversi scambiatori e le relative efficienze per la prova considerata.

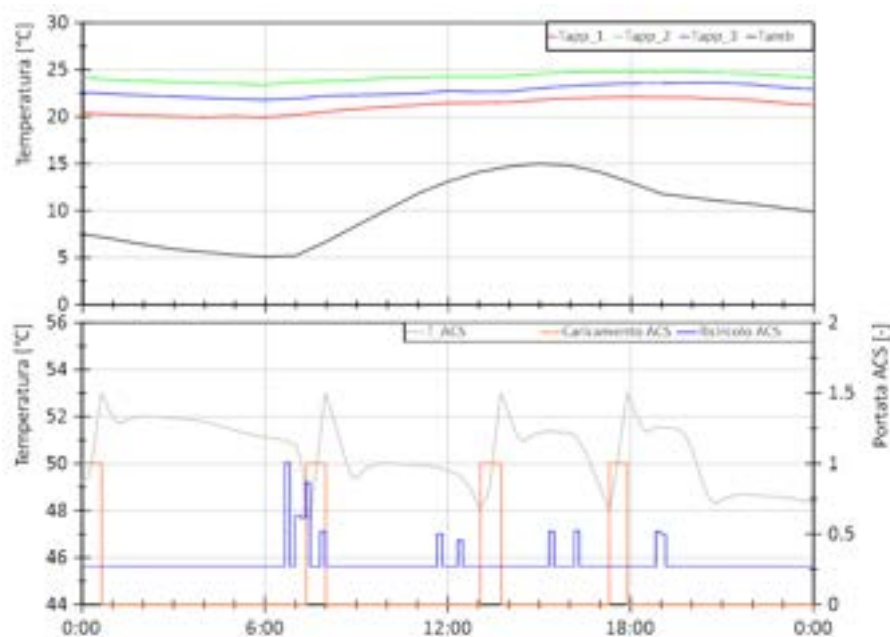


Figura 5.96. Sessione B2, Giornata 2. Andamento della temperatura in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio (curve in blu, verde e rosso del grafico superiore) e temperatura esterna (curva in nero grafico superiore), andamento della temperatura nell'accumulo di ACS e portata di caricamento e riciccolo dell'accumulo di ACS (rispettivamente curva in grigio, in arancione e in blu del grafico inferiore)

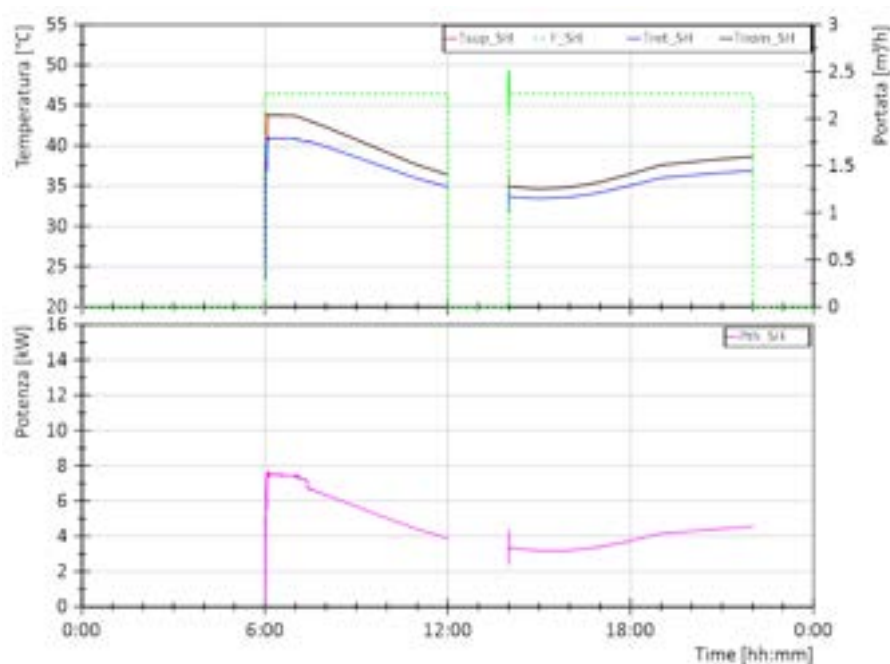


Figura 5.97. Sessione B2, Giornata 2. Andamento della temperatura di mandata e ritorno e portata nel circuito di riscaldamento (curve in rosso, blu e tratteggiata verde nel grafico superiore rispettivamente) e andamento della temperatura di mandata al riscaldamento di riferimento (curva in nero), andamento della potenza termica per riscaldamento (curva in magenta grafico inferiore)

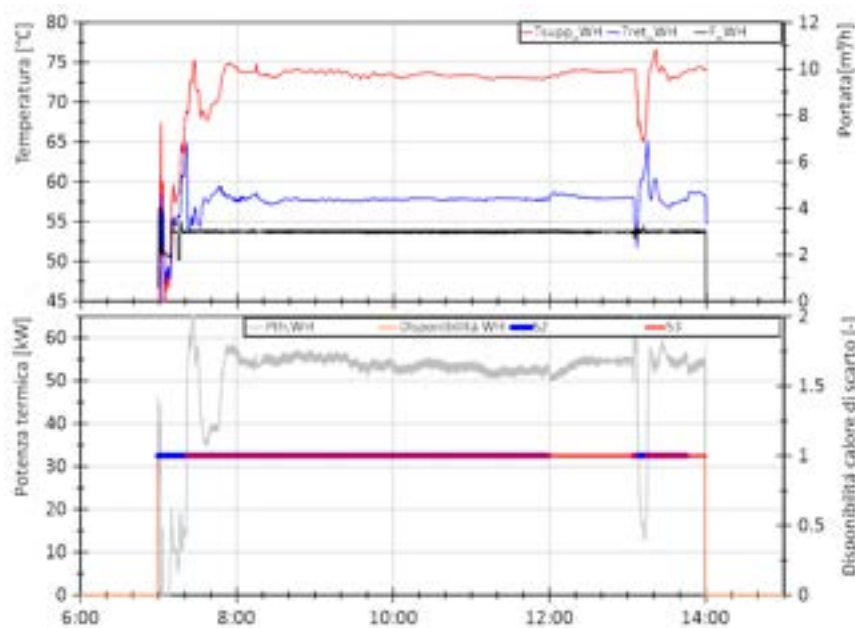


Figura 5.98. Sessione B2, Giorno 2 - Dettaglio. Andamento della temperatura di mandata, ritorno e la portata (rispettivamente curva in rosso, blu e nero del grafico superiore) del calore di scarto, andamento della potenza da calore di scarto in ingresso alla sottostazione e intervallo di disponibilità (curva in arancione) e utilizzo da parte dello scambiatore S2 e S3 (rispettivamente curva in blu e rosso del grafico inferiore)

Tabella 5.8. Sessione B2, Giorno 2. Energie termiche al primario (lato teleriscaldamento, TLR, o sistema di generazione, GEN) e al secondario (lato teleriscaldamento, TLR, o utente, US) dei diversi scambiatori della sottostazione e relative efficienze

Eth,S1,TLR [kWh]	Eth,S1,US [kWh]	η_{s1} [%]	Eth,S2,GEN [kWh]	Eth,S2,US [kWh]	η_{s2} [%]	Eth,S3,GEN [kWh]	Eth,S3,US [kWh]	η_{s3} [%]
69,43	64,6	93%	51,88	51,09	98%	300,35	290,58	97%

5.4.8 Sessione B2 - Giorno 4

Il giorno di test 4 è il 24/05 per il quale sono presenti solo richieste di ACS da parte dell'utente essendo al di fuori del periodo di riscaldamento.

In Figura 5.99 viene mostrato, nel grafico inferiore, in nero il comando di avvio della sottostazione per richiesta da parte dell'utente sia per riscaldamento che per ACS, in verde le richieste di caricamento dell'accumulo di ACS e in arancione la disponibilità di calore di scarto dal processo considerato che può essere utilizzata dalla sottostazione. Nel grafico superiore si riporta in magenta la potenza termica fornita dallo scambiatore S1 e in rosso quella fornita dallo scambiatore S2 per soddisfare le richieste termiche. Nel grafico centrale si riporta in viola la potenza termica fornita dallo scambiatore S3 alla rete di teleriscaldamento.

Dal confronto tra i tre grafici si può notare che le richieste termiche dell'utente sono soddisfatte sia dallo scambiatore S1 (rete di TLR) che dallo scambiatore S2 (calore di scarto). Il profilo di carico utente è analogo a quanto esposto per il giorno 4 della sessione B1. In Figura 5.100 viene riportato un ingrandimento della Figura 5.99 al fine di visualizzare in dettaglio le ore di funzionamento degli scambiatori S2 ed S3. Si verifica un funzionamento contemporaneo di S2 ed S3 per una carica dell'accumulo ACS, ovvero tra le 8:00 e le 9:00 circa. Si può notare come nei momenti in cui non si ha richiesta da parte dell'utente la potenza immessa in rete di TLR da S3 è di circa 55 kW che corrisponde alla disponibilità di calore di scarto considerata per questi test.

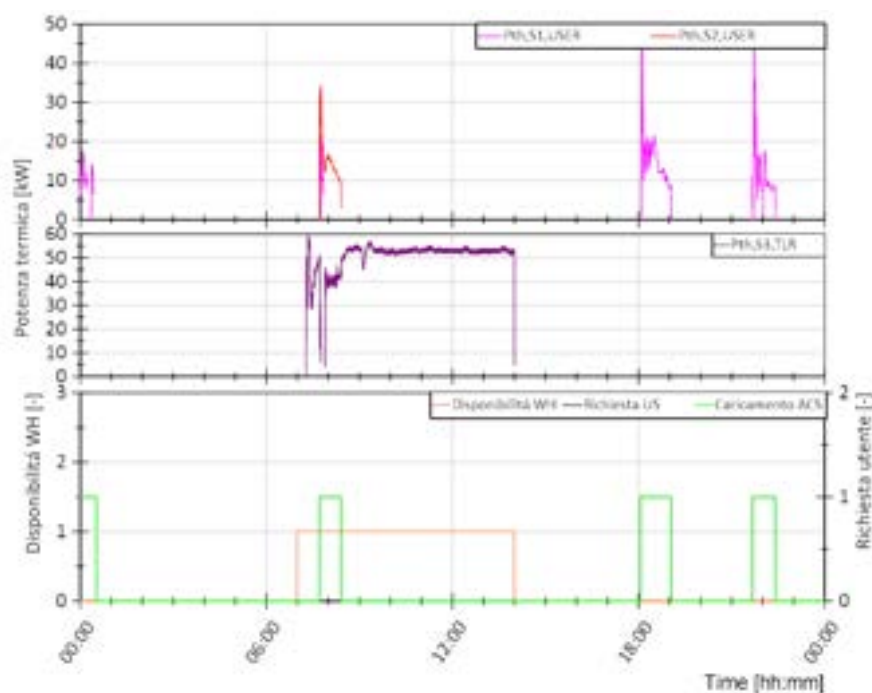


Figura 5.99. Sessione B2, Giorno 4. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità di calore di scarto (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

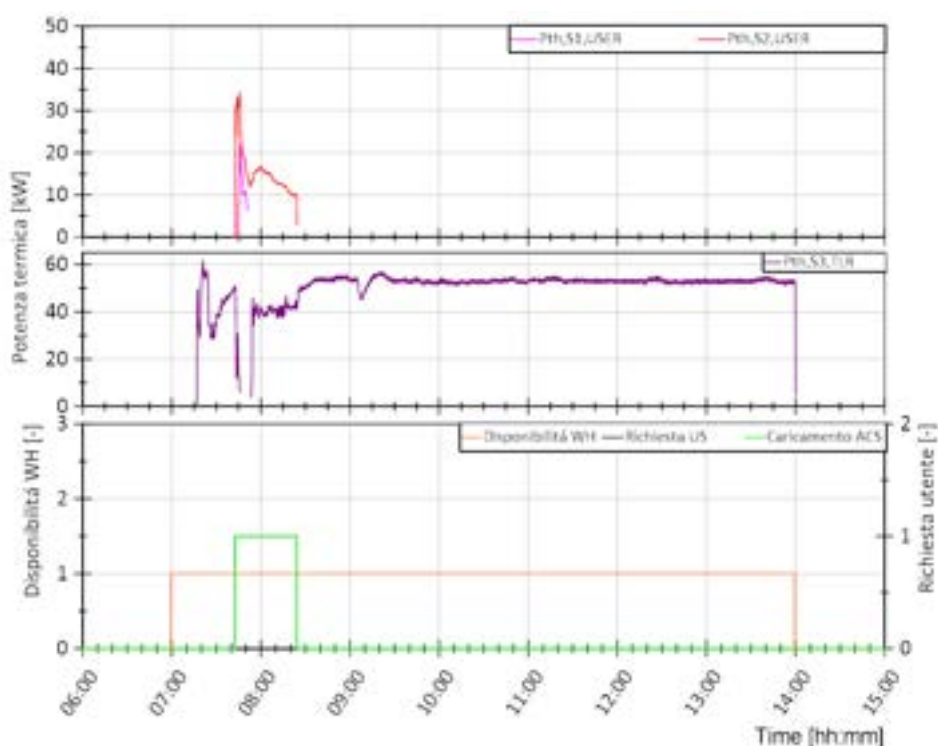


Figura 5.100. Sessione B2, Giorno 4 - Dettaglio. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità di calore di scarto (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

Si riportano nel seguito gli andamenti delle temperature di ingresso e uscita al primario e al secondario degli scambiatori S1, S2 ed S3 e le portate quando questi sono in funzione (Figura 5.101-Figura 5.103). In

particolare per gli scambiatori S2 ed S3 si utilizza una scala temporale basata sui momenti di funzionamento al fine di facilitarne la lettura.

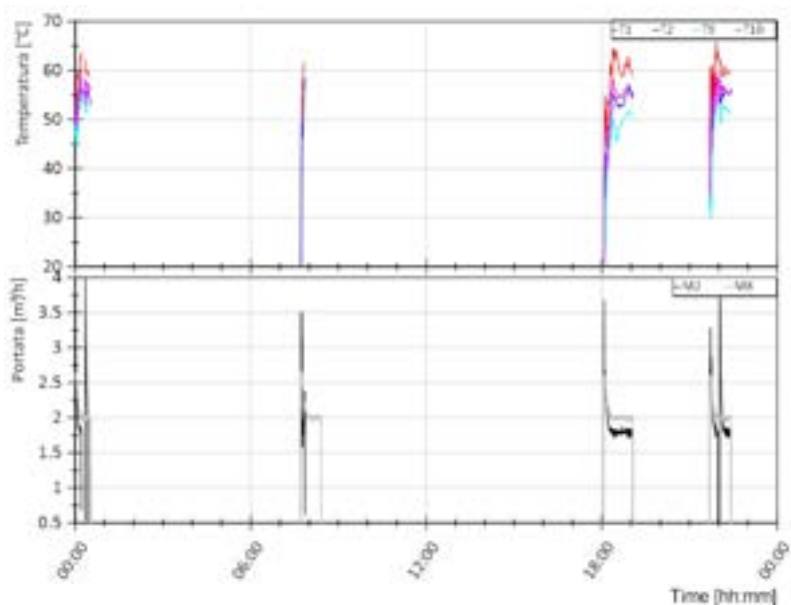


Figura 5.101. Sessione B2, Giorno 4. Andamento delle temperature lato teleriscaldamento (mandata dal teleriscaldamento T1, ritorno al teleriscaldamento T2) e lato utenza (uscita dallo scambiatore S2 T9, mandata all'utenza T10) dello scambiatore S1 (grafico superiore), andamento della portata lato teleriscaldamento (M2) e lato utenza (M8) dello scambiatore S1 (grafico inferiore)

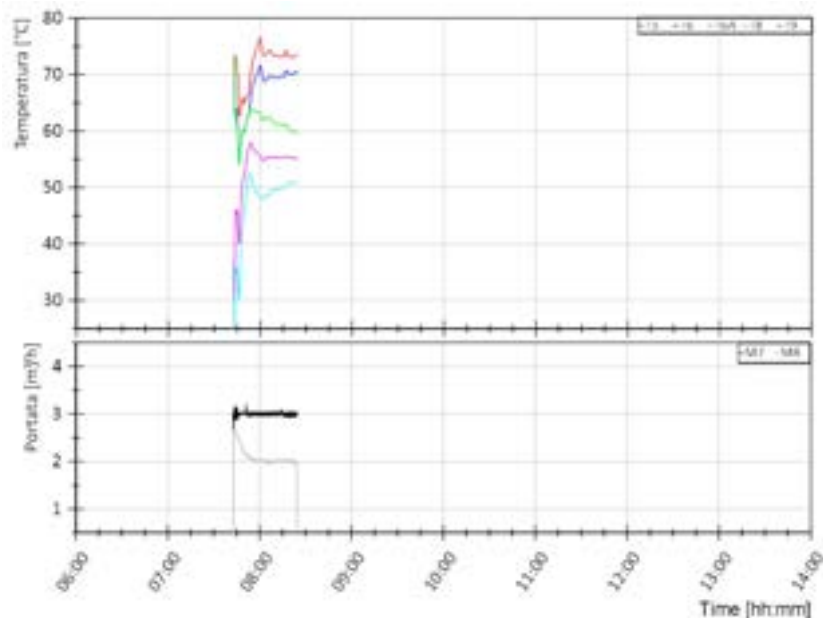


Figura 5.102. Sessione B2, Giorno 4 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (mandata dal sistema di generazione T5, ritorno al sistema di generazione T6 e uscita scambiatore S2 T6A) e lato utenza (ritorno dall'utenza T8, mandata all'utenza T9) dello scambiatore S2 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato utenza (M8) dello scambiatore S2 (grafico inferiore)

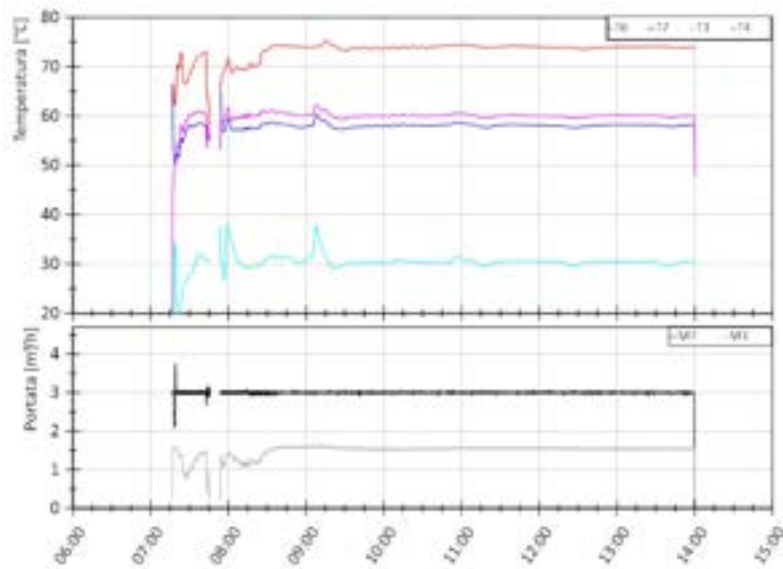


Figura 5.103. Sessione B2, Giorno 4 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (ingresso scambiatore S3 T6 e ritorno al sistema di generazione T7) e lato TLR (ritorno dal TLR T3, mandata al TLR T4) dello scambiatore S3 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato TLR (M3) dello scambiatore S3 (grafico inferiore)

I tre grafici di cui sopra, riportanti le temperature e le portate nei tre scambiatori, mettono in luce alcune caratteristiche relative ai controlli di temperatura e portata sia della test facility che della sottostazione, così come esposto nella descrizione dei test eseguiti nella sessione A.

Nel seguito si riportano alcune considerazioni riguardo il controllo di temperatura da parte della test facility in T1, T5 e T8 e il controllo di temperatura da parte della sottostazione in T4 e T10. Il funzionamento di tali controllo è paragonabile a quanto osservato per i test della sessione A. Si rimanda, quindi, alla descrizione dei giorni di test della sessione A per maggiore dettagli.

Con riferimento alla Figura 5.104 si può notare come l'andamento del valore misurato T1 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa ± 2 °C quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento o caricamento dell'accumulo di ACS. Così come descritto nel seguito, tali oscillazioni non compromettono il soddisfacimento delle richieste termiche dell'utente.

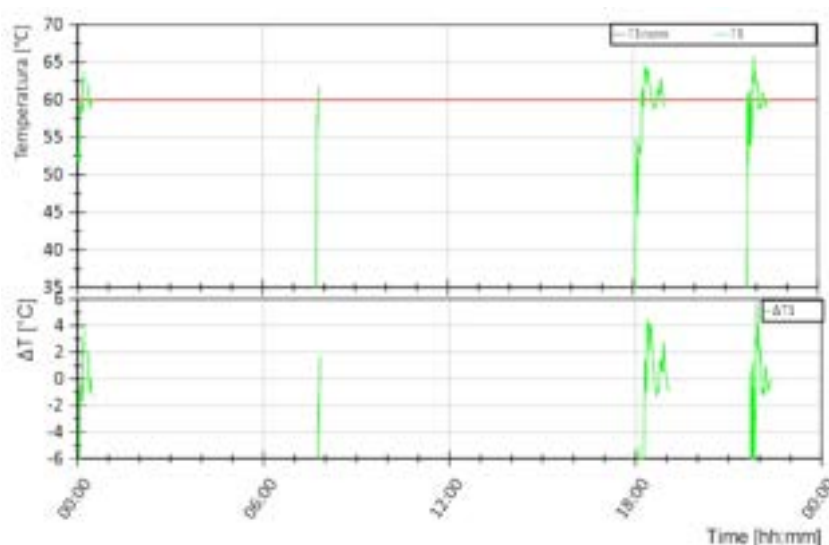


Figura 5.104. Sessione B2, Giorno 4. Andamento della temperatura di mandata dal teleriscaldamento T1 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T1nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

Con riferimento alla Figura 5.105 si può notare come l'andamento del valore misurato T5 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa ± 5 °C quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento. Si registra, comunque, una differenza minore di ± 1 °C rispetto al valore di riferimento di 73 °C (valore di temperatura a cui è disponibile il calore di scarto nel processo considerato) per la gran parte del tempo.

Con riferimento alla Figura 5.107 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T10nom e il valore misurato T10 sia inferiore a ± 2 °C per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T10 da parte della sottostazione che deve garantire 55 °C all'utente al fine di soddisfarne le richieste termiche.

Con riferimento alla Figura 5.108 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T4nom e il valore misurato T4 sia inferiore a ± 1 °C per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T4 da parte della sottostazione.

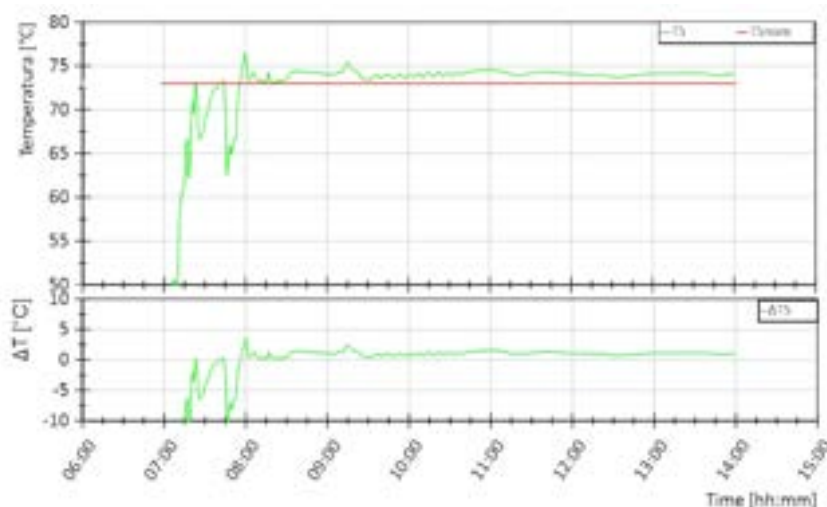


Figura 5.105. Sessione B2, Giorno 4 - Dettaglio. Andamento della temperatura di mandata dal sistema di generazione T5 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T5nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

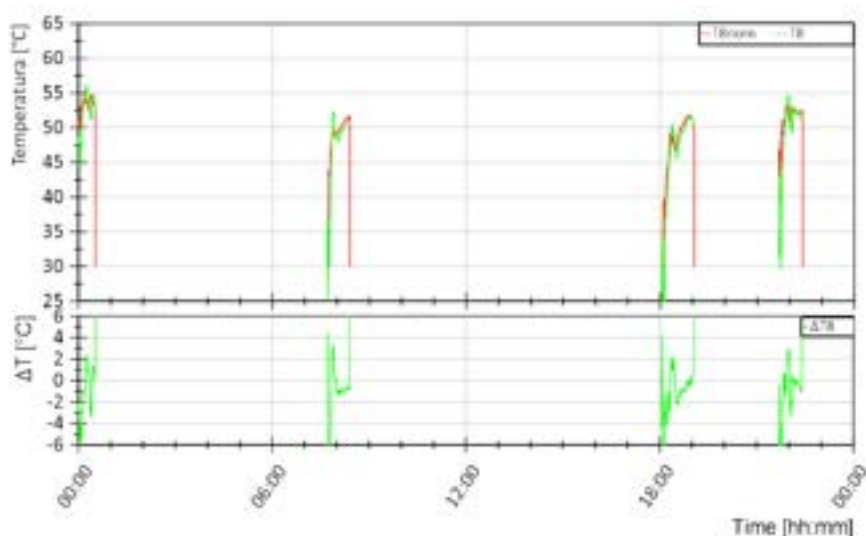


Figura 5.106. Sessione B2, Giorno 4. Andamento della temperatura di ritorno dall'utenza T8 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T8nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

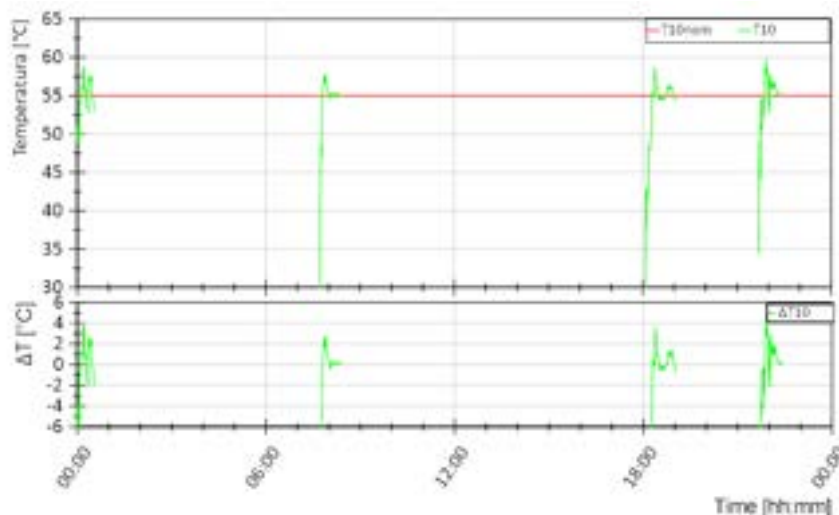


Figura 5.107. Sessione B2, Giornata 4. Andamento della temperatura di mandata all'utenza T10 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T10nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

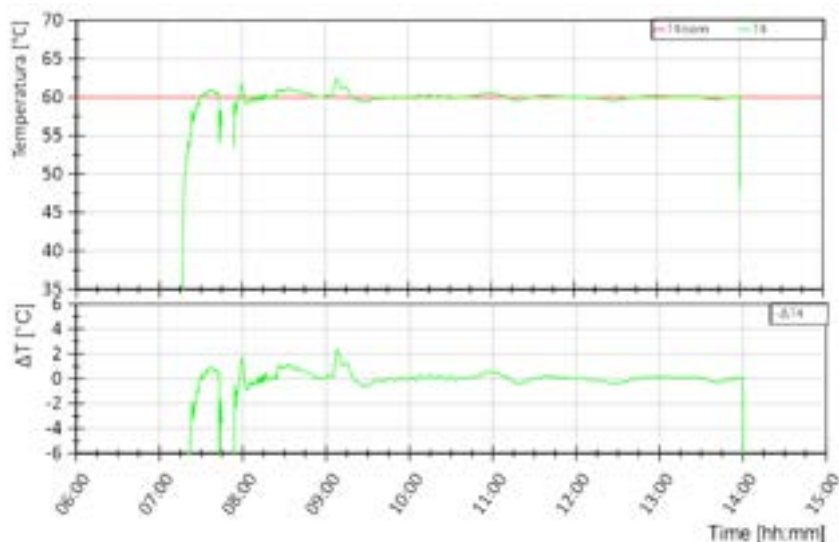


Figura 5.108. Sessione B2, Giornata 4 - Dettaglio. Andamento della temperatura di immissione in rete T4 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T4nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

In Figura 5.109 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio e la temperatura ambiente e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo di ACS (in grigio) nonché la portata di caricamento (in arancione) e di ricircolo (in blu). Per quanto riguarda l'ACS, si può notare come la temperatura dell'accumulo aumenta ogni qualvolta avviene una carica, fino a raggiungere i 53 °C, e diminuisce per effetto delle perdite termiche o richiesta da parte dell'utente che si verifica in corrispondenza di una portata di ricircolo maggiore di 0,27 m³/h.

In Figura 5.110 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature di mandata e di ritorno del calore di scarto e la relativa portata. Da notare che tali grandezze corrispondono rispettivamente alla temperatura T5 e T7 della sottostazione e alla portata M7. Da queste grandezze è possibile, quindi, ricavare la potenza disponibile da calore di scarto in ingresso alla sottostazione riportata nel grafico inferiore (curva in grigio). Nello stesso grafico viene anche mostrato come si distribuisce nel tempo la disponibilità di calore di scarto tra gli scambiatori S2 ed S3 (curva in blu e rosso rispettivamente). Nel caso in esame, non appena si ha disponibilità di calore di scarto si avvia lo scambiatore S2. Lo scambiatore S3 si avvia poco dopo in seguito al raggiungimento della temperatura di riferimento in T5 (73 °C), indice che le dinamicità di avviamento si sono esaurite. La potenza da calore di scarto varia mediamente tra circa 52 kW e 55 kW, raggiungendo anche

picchi di 60 kW. Gli andamenti delle temperature sono simili a quanto descritto per il giorno 1 sessione B2 al quale si rimanda per ulteriori dettagli.

In Tabella 5.9 si riporta l'energia termica al primario e al secondario dei diversi scambiatori e le relative efficienze per la prova considerata.

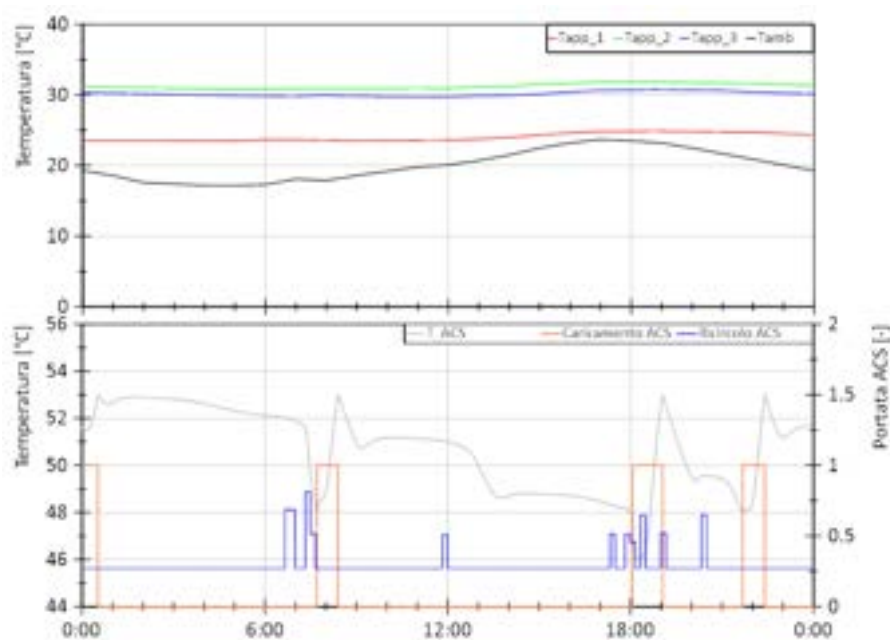


Figura 5.109. Sessione B2, Giorno 4. Andamento della temperatura in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio (curve in blu, verde e rosso del grafico superiore) e temperatura esterna (curva in nero grafico superiore), andamento della temperatura nell'accumulo di ACS e portata di caricamento e ricircolo dell'accumulo di ACS (rispettivamente curva un grigio, in arancione e in blu del grafico inferiore)

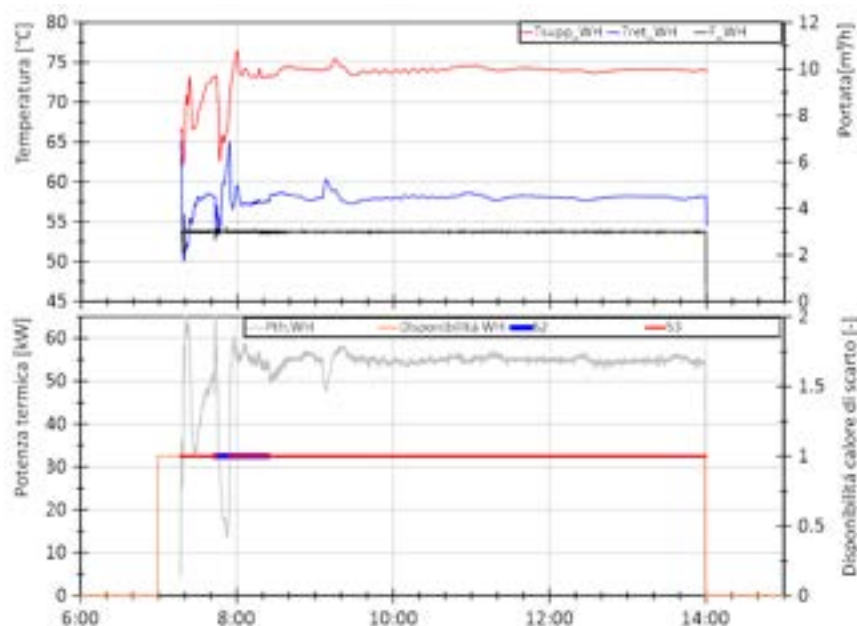


Figura 5.110. Sessione B2, Giorno 4 - Dettaglio. Andamento della temperatura di mandata, ritorno e la portata (rispettivamente curva in rosso, blu e nero del grafico superiore) del calore di scarto, andamento della potenza da calore di scarto in ingresso alla sottostazione e intervallo di disponibilità (curva in arancione) e utilizzo da parte dello scambiatore S2 e S3 (rispettivamente curva in blu e rosso del grafico inferiore)

Tabella 5.9. Sessione B2, Giorno 4. Energie termiche al primario (lato teleriscaldamento, TLR, o sistema di generazione, GEN) e al secondario (lato teleriscaldamento, TLR, o utente, US) dei diversi scambiatori della sottostazione e relative efficienze

Eth,S1,TLR [kWh]	Eth,S1,US [kWh]	η_{s1} [%]	Eth,S2,GEN [kWh]	Eth,S2,US [kWh]	η_{s2} [%]	Eth,S3,GEN [kWh]	Eth,S3,US [kWh]	η_{s3} [%]
30,03	27,3	91%	10,81	10,55	98%	345,93	336,7	97%

5.4.9 Sessione B2 - Giorno 6

Il giorno di test 6 è il 05/11 per il quale sono presenti richieste di ACS e riscaldamento da parte dell'utente, rientrando nel periodo di riscaldamento.

In Figura 5.111 viene mostrato, nel grafico inferiore, in nero il comando di avvio della sottostazione per richiesta da parte dell'utente sia per riscaldamento che per ACS, in verde le richieste di caricamento dell'accumulo di ACS e in arancione la disponibilità di calore di scarto dal processo considerato che può essere utilizzata dalla sottostazione. Nel grafico superiore si riporta in magenta la potenza termica fornita dallo scambiatore S1 e in rosso quella fornita dallo scambiatore S2 per soddisfare le richieste termiche. Nel grafico centrale si riporta in viola la potenza termica fornita dallo scambiatore S3 alla rete di teleriscaldamento.

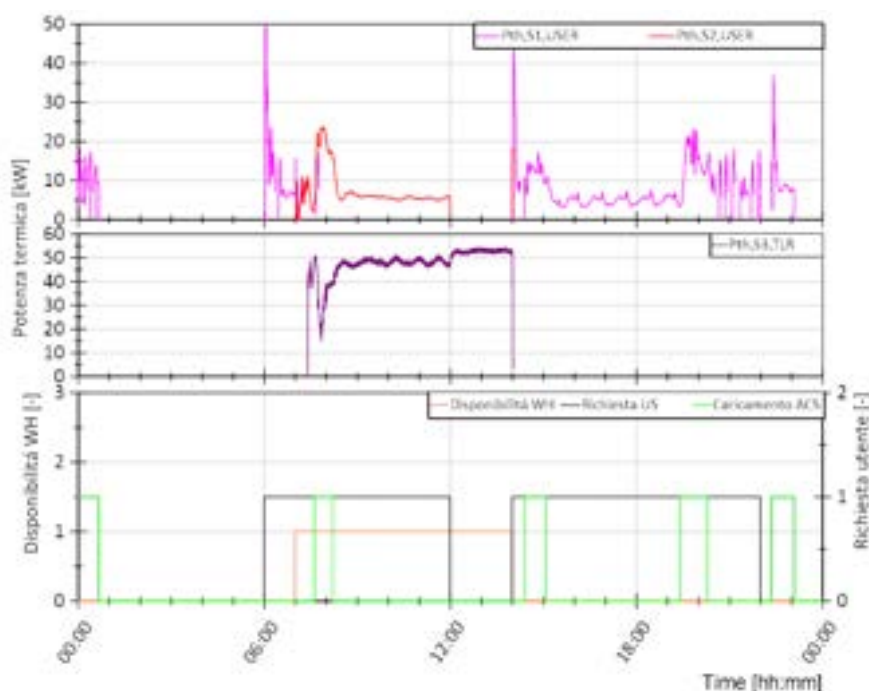


Figura 5.111. Sessione B2, Giorno 6. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità di calore di scarto (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

Dal confronto tra i tre grafici si può notare che le richieste termiche dell'utente sono soddisfatte sia dallo scambiatore S1 (rete di TLR) che dallo scambiatore S2 (calore di scarto). Il profilo di carico utente è analogo a quanto esposto per il giorno 6 della sessione B1. La disponibilità di calore di scarto è in parte contemporanea alla richiesta termica dell'utente: tramite lo scambiatore S2, parte della richiesta termica dell'utente è soddisfatta dal calore di scarto e ciò avviene tra le 07:00 e le 12:00 circa. La restante disponibilità di calore di scarto viene immessa nella rete di TLR tramite lo scambiatore S3 per il quale si registra un funzionamento principalmente continuo. In Figura 5.112 viene riportato un ingrandimento della Figura 5.111 al fine di visualizzare in dettaglio le ore di funzionamento degli scambiatori S2 ed S3. Si verifica un funzionamento contemporaneo di S2 ed S3 per la gran parte del periodo di disponibilità di calore di scarto, con una distribuzione di potenza diversa a seconda delle richieste da parte dell'utente, a fronte di una

disponibilità di calore di scarto di circa 55 kW: ad una maggiore richiesta da parte dell'utente (S2) corrisponde una minore potenza immessa nella rete di TLR (S3) e viceversa. Si può notare come nei momenti in cui non si ha richiesta da parte dell'utente la potenza immessa in rete di TLR da S3 è di circa 55 kW che corrisponde alla disponibilità di calore di scarto considerata per questi test.

Si riportano nel seguito gli andamenti delle temperature di ingresso e uscita al primario e al secondario degli scambiatori S1, S2 ed S3 e le portate quando questi sono in funzione (Figura 5.113-Figura 5.115). In particolare per gli scambiatori S2 ed S3 si utilizza una scala temporale basata sui momenti di funzionamento al fine di facilitarne la lettura. I tre grafici mettono in luce alcune caratteristiche relative ai controlli di temperatura e portata sia della test facility che della sottostazione, così come esposto nella descrizione dei test eseguiti nella sessione A.

Nel seguito si riportano alcune considerazioni riguardo il controllo di temperatura da parte della test facility in T1, T5 e T8 e il controllo di temperatura da parte della sottostazione in T4 e T10. Il funzionamento di tali controllo è paragonabile a quanto osservato per i test della sessione A. Si rimanda, quindi, alla descrizione dei giorni di test della sessione A per maggiore dettagli.

Con riferimento alla Figura 5.116 si può notare come l'andamento del valore misurato T1 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa ± 2 °C quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento o caricamento dell'accumulo di ACS. Inoltre, tra le 20:00 e le 22:00 si registra un funzionamento intermittente di S1 per le stesse motivazioni esposte nella descrizione dei giorni 2 e 3 della sessione B1. Così come descritto nel seguito, tali oscillazioni non compromettono il soddisfacimento delle richieste termiche dell'utente.

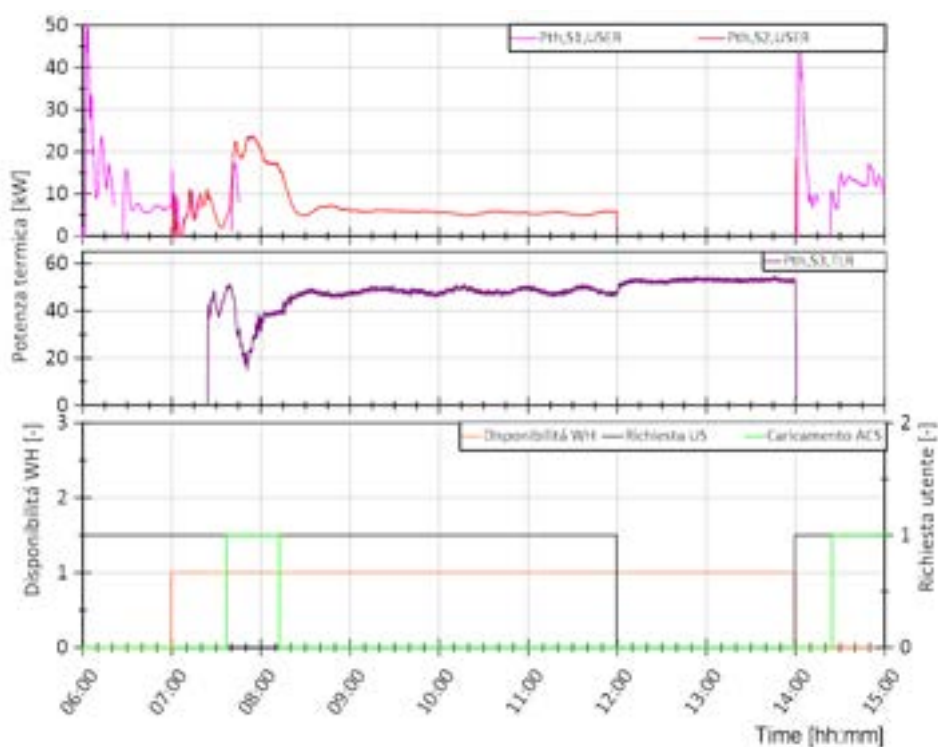


Figura 5.112. Sessione B2, Giorno 6 - Dettaglio. Andamento della potenza termica lato utenza dello scambiatore S1 ed S2 nel grafico superiore, andamento della potenza termica lato TLR dello scambiatore S3 nel grafico centrale e segnale di disponibilità di calore di scarto (arancione), richiesta termica utente (nero) e richiesta di caricamento accumulo ACS (verde) nel grafico inferiore

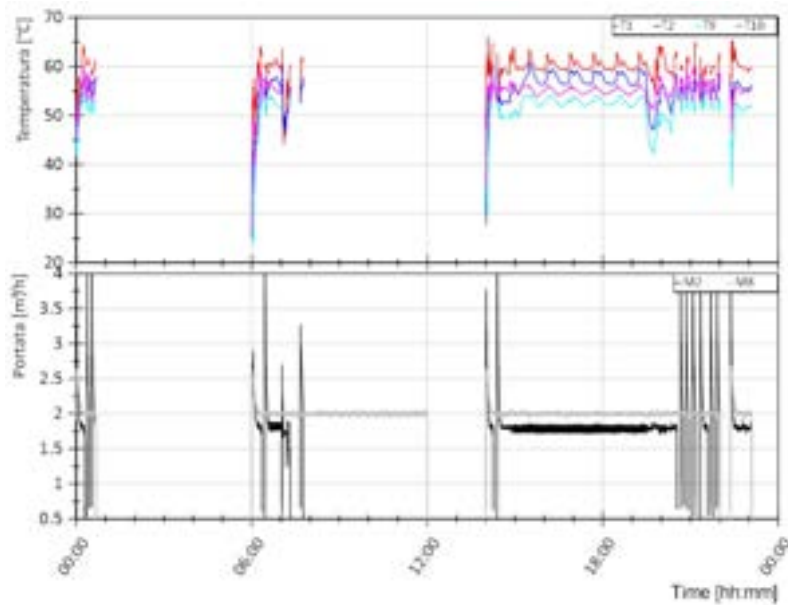


Figura 5.113. Sessione B2, Giorno 6. Andamento delle temperature lato teleriscaldamento (mandata dal teleriscaldamento T1, ritorno al teleriscaldamento T2) e lato utenza (uscita dallo scambiatore S2 T9, mandata all'utenza T10) dello scambiatore S1 (grafico superiore), andamento della portata lato teleriscaldamento (M2) e lato utenza (M8) dello scambiatore S1 (grafico inferiore)

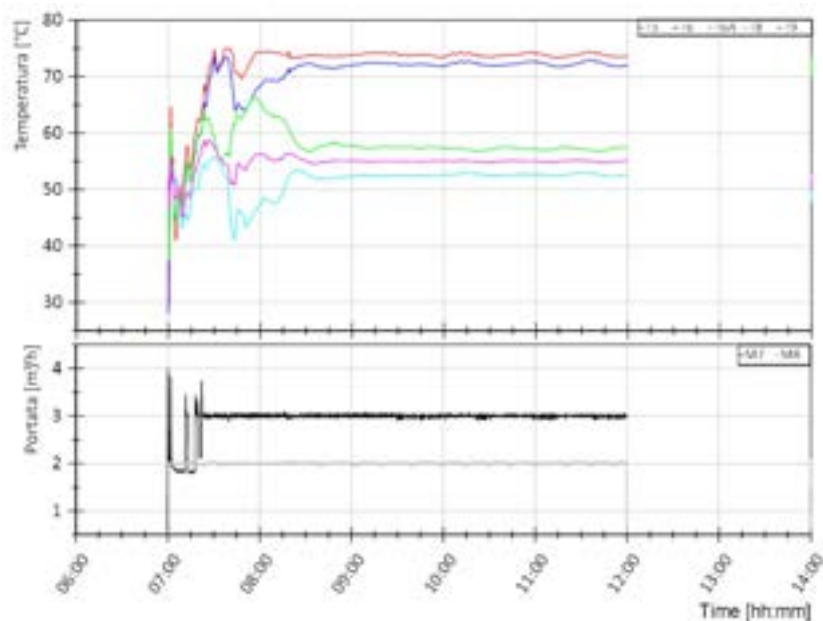


Figura 5.114. Sessione B2, Giorno 6 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (mandata dal sistema di generazione T5, ritorno al sistema di generazione T6 e uscita scambiatore S2 T6A) e lato utenza (ritorno dall'utenza T8, mandata all'utenza T9) dello scambiatore S2 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato utenza (M8) dello scambiatore S2 (grafico inferiore)

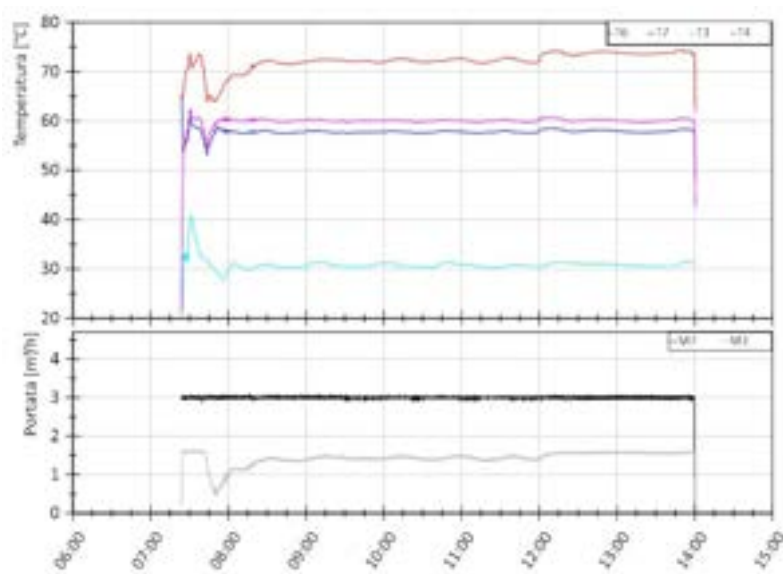


Figura 5.115. Sessione B2, Giorno 6 - Dettaglio. Andamento delle temperature lato sistema di generazione (Ingresso scambiatore S3 T6 e ritorno al sistema di generazione T7) e lato TLR (ritorno dal TLR T3, mandata al TLR T4) dello scambiatore S3 (grafico superiore), andamento della portata lato sistema di generazione (M7) e lato TLR (M3) dello scambiatore S3 (grafico inferiore)

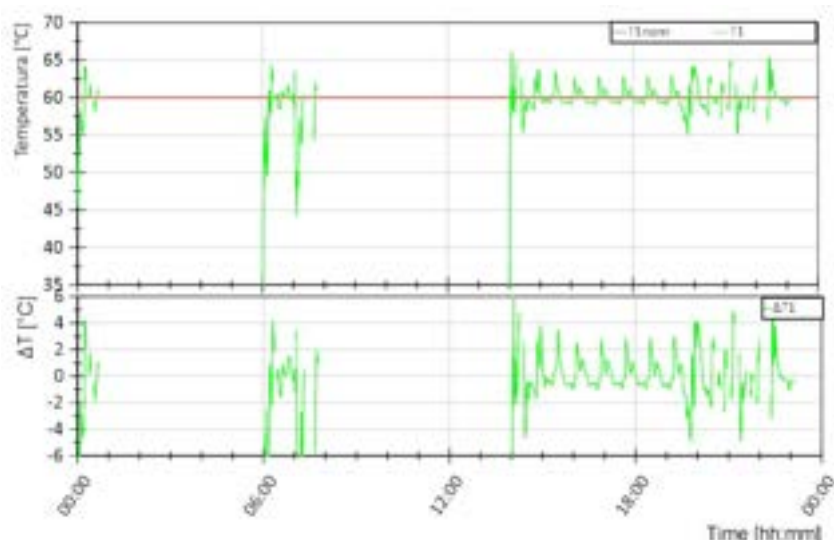


Figura 5.116. Sessione B2, Giorno 6. Andamento della temperatura di mandata dal teleriscaldamento T1 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T1nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

Con riferimento alla Figura 5.117 si può notare come l'andamento del valore misurato T5 (curva verde nel grafico superiore) sia caratterizzato da oscillazioni di circa ± 5 °C quando si ha un funzionamento stazionario del sistema e maggiori in caso di avviamento. Si registra, comunque, una differenza minore di ± 1 °C rispetto al valore di riferimento di 73 °C (valore di temperatura a cui è disponibile il calore di scarto nel processo considerato) per la gran parte del tempo.

Con riferimento alla Figura 5.119 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T10nom e il valore misurato T10 sia inferiore a ± 2 °C per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T10 da parte della sottostazione che deve garantire 55 °C all'utente al fine di soddisfarne le richieste termiche.

Con riferimento alla Figura 5.120 si può notare come la differenza tra il valore di riferimento T_{4nom} e il valore misurato T_4 sia inferiore a $\pm 1^\circ\text{C}$ per la gran parte del test. Questo risultato va a confermare il corretto funzionamento del controllo della T_4 da parte della sottostazione.

In Figura 5.121 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio e la temperatura ambiente e nel grafico inferiore la temperatura nell'accumulo di ACS (in grigio) nonché la portata di caricamento (in arancione) e di ricircolo (in blu). Si può notare dal grafico superiore come la temperatura all'interno degli appartamenti sia tenuta essenzialmente sopra i 20°C durante le ore di riscaldamento. Inoltre, dalla Figura 5.122 risulta che la valvola miscelatrice presente nel modello riesce a controllare la temperatura di mandata al riscaldamento secondo curva climatica teorica, nonostante le oscillazioni che si hanno all'avviamento in T1 e T5 e al funzionamento intermittente di S1. Per quanto riguarda l'ACS, si può notare come la temperatura dell'accumulo aumenta ogni qualvolta avviene una carica, fino a raggiungere i 53°C , e diminuisce per effetto delle perdite termiche o richiesta da parte dell'utente che si verifica in corrispondenza di una portata di ricircolo maggiore di $0,27\text{ m}^3/\text{h}$.

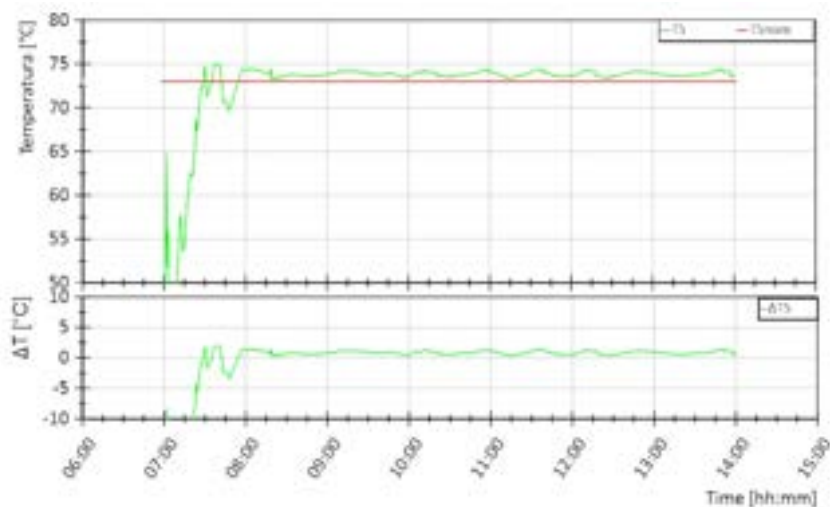


Figura 5.117. Sessione B2, Giorno 6 - Dettaglio. Andamento della temperatura di mandata dal sistema di generazione T5 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T5nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

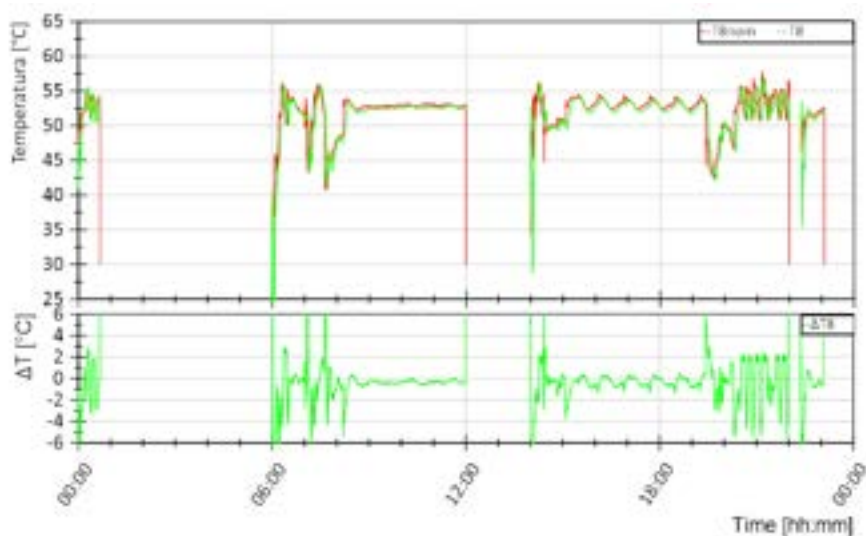


Figura 5.118. Sessione B2, Giorno 6. Andamento della temperatura di ritorno dall'utenza T8 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T8nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

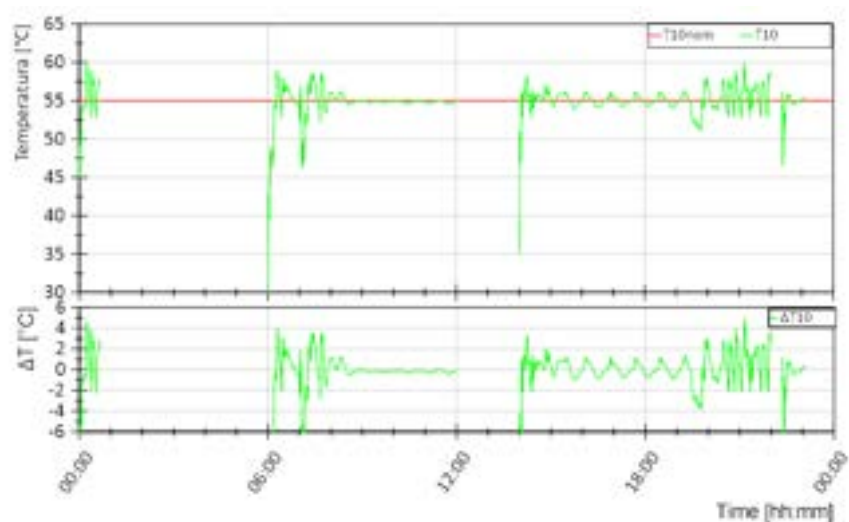


Figura 5.119. Sessione B2, Giorno 6. Andamento della temperatura di mandata all'utenza T10 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T10nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

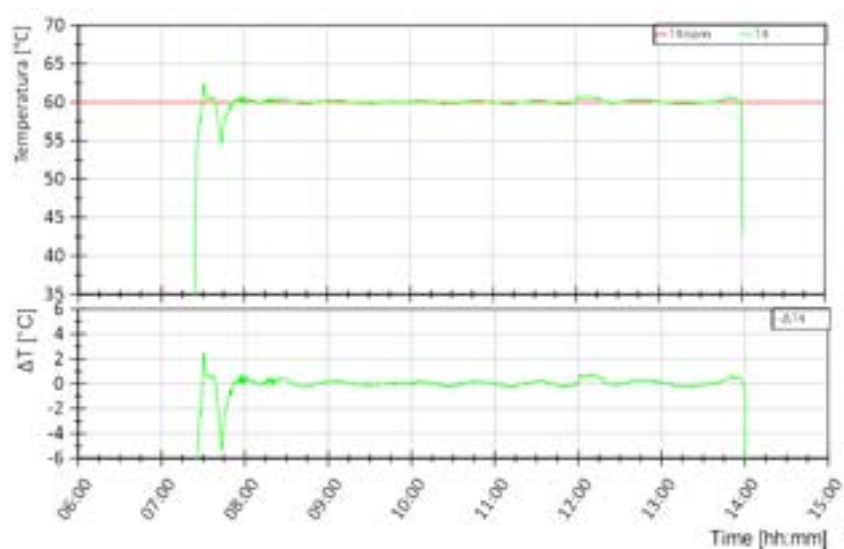


Figura 5.120. Sessione B2, Giorno 6. Andamento della temperatura di immissione in rete T4 (curva verde, grafico superiore) e differenza rispetto al valore di riferimento T4nom in termini assoluti (curva verde, grafico inferiore)

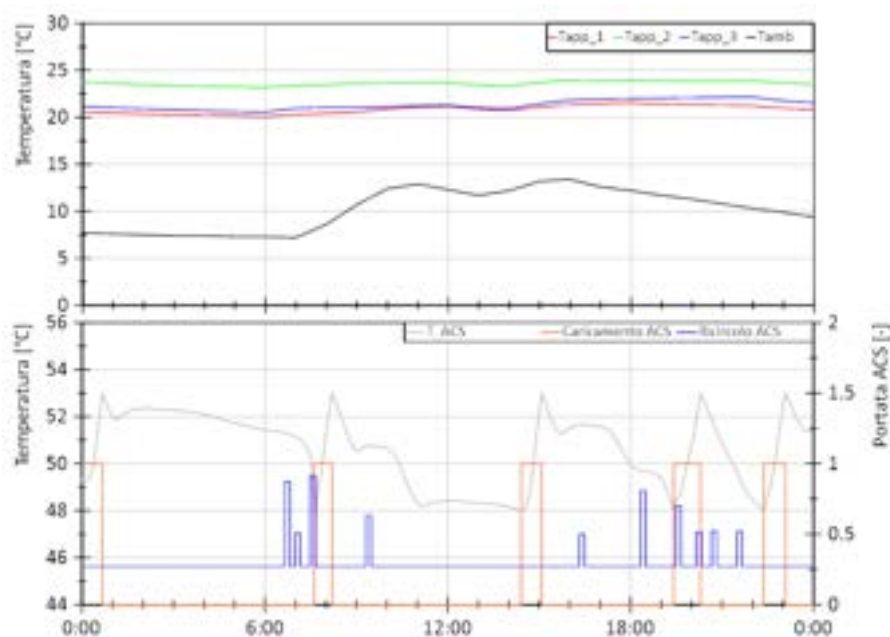


Figura 5.121. Sessione B2, Giorno 6. Andamento della temperatura in 3 dei 10 appartamenti dell'edificio (curve in blu, verde e rosso del grafico superiore) e temperatura esterna (curva in nero grafico superiore), andamento della temperatura nell'accumulo di ACS e portata di caricamento e ricircolo dell'accumulo di ACS (rispettivamente curva un grigio, in arancione e in blu del grafico inferiore)

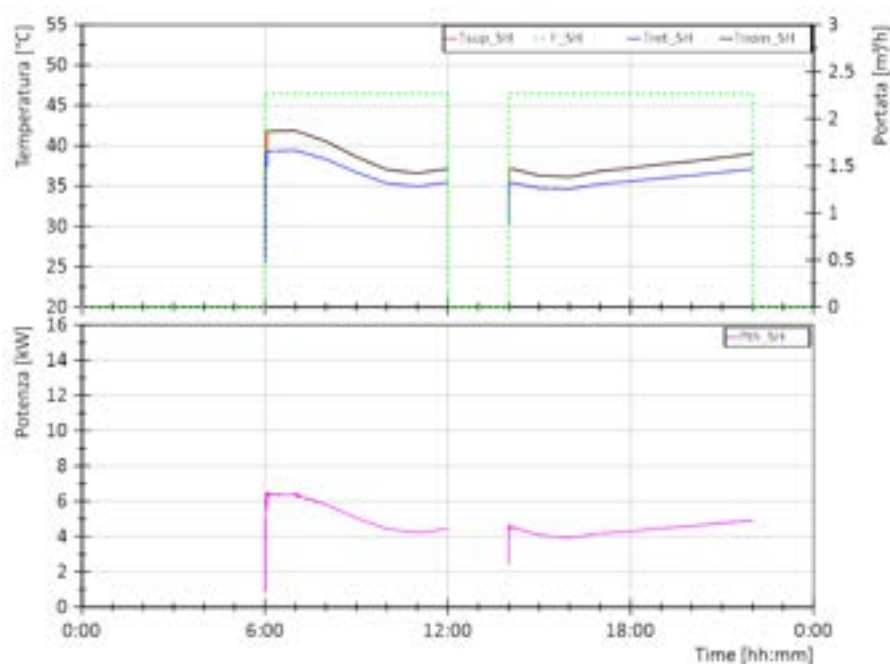


Figura 5.122. Sessione B2, Giorno 6. Andamento della temperatura di mandata e ritorno e portata nel circuito di riscaldamento (curva in rosso, blu e tratteggiata verde nel grafico superiore rispettivamente) e andamento della temperatura di mandata al riscaldamento di riferimento (curva in nero). Andamento della potenza termica per riscaldamento (curva in magenta grafico inferiore).

In Figura 5.123 si riportano nel grafico superiore gli andamenti delle temperature di mandata e di ritorno del calore di scarto e la relativa portata. Da notare che tali grandezze corrispondono rispettivamente alla temperatura T5 e T7 della sottostazione e alla portata M7. Da queste grandezze è possibile, quindi, ricavare la potenza disponibile da calore di scarto in ingresso alla sottostazione riportata nel grafico inferiore (curva in grigio). Nello stesso grafico viene anche mostrato come si distribuisce nel tempo la disponibilità di calore di scarto tra gli scambiatori S2 ed S3 (curva in blu e rosso rispettivamente). Nel caso in esame, non appena si

ha disponibilità di calore di scarto si avvia lo scambiatore S2. Lo scambiatore S3 si avvia poco dopo in seguito al raggiungimento della temperatura di riferimento in T5 (73 °C), indice che le dinamicità di avviamento si sono esaurite. La potenza da calore di scarto varia mediamente tra circa 52 kW e 55 kW, raggiungendo anche picchi di 60 kW. Gli andamenti delle temperature sono simili a quanto descritto per il giorno 1 sessione B2 al quale si rimanda per ulteriori dettagli.

In

Tabella 5.10 si riporta l’energia termica al primario e al secondario dei diversi scambiatori e le relative efficienze per la prova considerata.

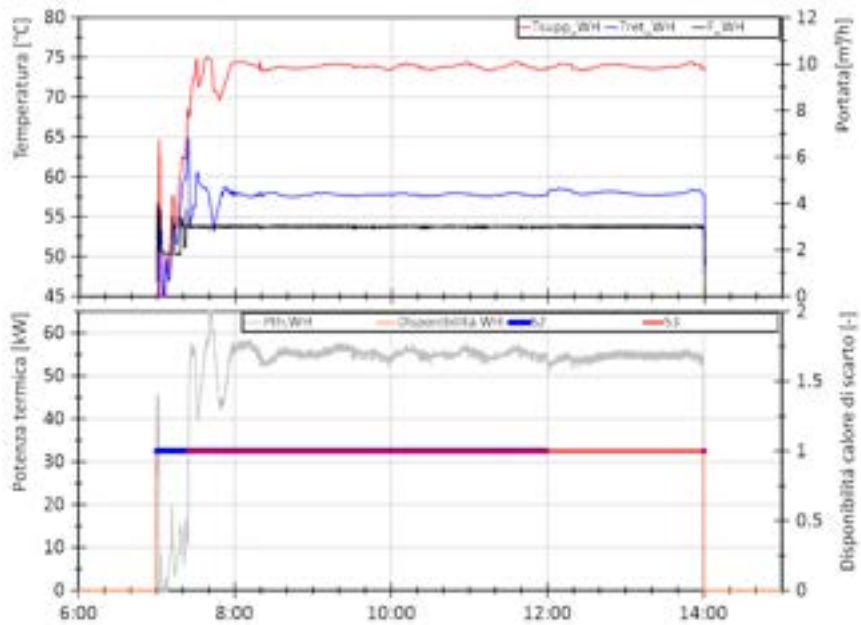


Figura 5.123. Sessione B2, Giorno 6 - Dettaglio. Andamento della temperatura di mandata, ritorno e la portata (rispettivamente curva in rosso, blu e nero del grafico superiore) del calore di scarto, andamento della potenza da calore di scarto in ingresso alla sottostazione e intervallo di disponibilità (curva in arancione) e utilizzo da parte dello scambiatore S2 e S3 (rispettivamente curva in blu e rosso del grafico inferiore)

Tabella 5.10. Sessione B2, Giorno 6. Energie termiche al primario (lato teleriscaldamento, TLR, o sistema di generazione, GEN) e al secondario (lato teleriscaldamento, TLR, o utente, US) dei diversi scambiatori della sottostazione e relative efficienze

Eth,S1,TLR [kWh]	Eth,S1,US [kWh]	η_{s1} [%]	Eth,S2,GEN [kWh]	Eth,S2,US [kWh]	η_{s2} [%]	Eth,S3,GEN [kWh]	Eth,S3,US [kWh]	η_{s3} [%]
89,1	84,12	94%	37,12	36,33	98%	325,26	317,13	98%

Riferimenti bibliografici

- [1] M. Ricci, P. Sdringola, S. Tamburrino, G. Puglisi, B. Di Pietra and M. Caldera, "Test sperimentali su un prototipo di sottostazione per TLR attivo e implementazione di modelli per l'analisi di reti termiche efficienti," ENEA, 2020.
- [2] S. e. a. Klein, "TRNSYS 18: A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison. USA," 2017. [Online]. Available: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>.
- [3] "Database of energy, environmental and economic indicators of renovation packages for European residential buildings," [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109427>.
- [4] *Decreto interministeriale 26 giugno 2015 "Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici"*.
- [5] *UNI/TS 11300-1:2014 Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale*.
- [6] *Legge 9 gennaio 1991, n. 10. Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso nazionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia*.
- [7] "Database Meteonorm," [Online]. Available: <https://meteonorm.com/en/>.
- [8] D. Menegon, A. Soppelsa and R. Fedrizzi, "Clustering methodology for defining a short test sequence for whole system testing of solar and heat pump systems," in *IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry*, <http://proceedings.ises.org/paper/swc2017/swc2017-0044-Menegon.pdf>, 2017.
- [9] *UNI 9182:2010 Impianti di alimentazione e distribuzione d'acqua fredda e calda - Progettazione, installazione e collaudo*.
- [10] *UNI/TS 11300-2:2019 Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione*.
- [11] *SIA 2024:2015. Dati d'utilizzo di locali per l'energia e l'impiantistica degli edifici*.
- [12] J. Quijiera, M. González Alriols and J. Labidi, "Integration of a solar thermal system in a dairy process," *Renewable Energy, Elsevier*, vol. 36, no. 6, pp. 1843-1853, 2011.
- [13] A. Allouhi, Y. Agrouaz, M. Benzakour Amine, S. Rehman, M. Buker, T. Kousksou, A. Jamil and A. Benbassou, "Design optimization of a multi-temperature solar thermal heating system for an industrial process," *Applied Energy, Elsevier*, vol. 206, pp. 382-392, 2017.
- [14] *UNI EN ISO 13370:2018 Prestazione termica degli edifici - Trasferimento di calore attraverso il terreno - Metodi di calcolo*.