

Ricerca di Sistema elettrico



Applicazione di nuove soluzioni per la gestione ottimizzata del sistema S.A.P.I.EN.T.E., anche tramite logiche Demand Side Management e di sistemi smart per la contabilizzazione individuale nel contesto delle CER e dell'AUC condominiale (LA4.2)

Alessandro Lorenzo Palma, Luca La Notte, Biagio Di Pietra, Ruggero Nissim, Alessandra Gugliandolo, Emilio Monno, Antonino Ciappa, Diana Cremoncini

LA 4.2 APPLICAZIONE DI NUOVE SOLUZIONI PER LA GESTIONE OTTIMIZZATA DEL SISTEMA S.A.P.I.EN.T.E., ANCHE TRAMITE LOGICHE DEMAND SIDE MANAGEMENT E DI SISTEMI SMART PER LA CONTABILIZZAZIONE INDIVIDUALE NEL CONTESTO DELLE CER E DELL'AUC CONDOMINIALE

A. L. Palma, L. La Notte, B. Di Pietra, R. Nissim, A. Gugliandolo, E. Monno, A. Ciappa (ENEA)
D. Cremoncini (Tirocinante Dottorato di Ricerca Università degli Studi di Pisa)

Con il contributo di: G. Landi, E. Calò, F. Erice (ENEA)

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione*

Progetto: *Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica*

Linea di attività: 4.2

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work Package: Biagio Di Pietra, ENEA

Responsabile Linea di Attività: ENEA

Mese inizio previsto: 19

Mese inizio effettivo: 19

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Indice

1	Risultati attesi.....	9
1.1	Sistema S.A.P.I.EN.T.E.....	9
1.2	Sistema hardware e software per l'implementazione di logiche tipo Demand Side Management ADLAS	9
1.3	EMPOWER: piattaforma web per migliorare la consapevolezza dei consumi degli utenti nei condomini	10
1.4	Smart Readiness Indicator	11
2	Risultati ottenuti	12
2.1	Sistema S.A.P.I.EN.T.E.	12
2.2	Sistema hardware e software per l'implementazione di logiche tipo Demand Side Management ADLAS	15
2.3	EMPOWER: piattaforma web per migliorare la consapevolezza dei consumi degli utenti nei condomini	16
2.4	Smart Readiness Indicator	18
3	Prodotti attesi.....	21
4	Prodotti sviluppati	22
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati	23
6	Sintesi delle attività svolte.....	24
7	Dettaglio delle attività svolte	25
7.1	Sistema S.A.P.I.EN.T.E.	25
7.1.1	Completamento dell'installazione dei nuovi componenti nel sistema S.A.P.I.EN.T.E. 25	
7.1.2	Esecuzione di prove con le nuove configurazioni del sistema ibrido S.A.P.I.EN.T.E. ampliato	27
7.1.3	Valutazione dei possibili vantaggi energetici ed economici ottenibili per una Configurazione AUC condominiale con sistema ibrido tipo S.A.P.I.EN.T.E. connesso come prosumer termico a una rete di teleriscaldamento tramite sottostazione termica bidirezionale.....	31
7.1.4	Integrazione in modalità hardware-in-the-loop tra sistema S.A.P.I.EN.T.E. e sottostazione termica bidirezionale sperimentale.....	33
7.1.5	Sistema hardware e software per l'implementazione di logiche tipo Demand Side Management ADLAS.....	38
7.2	Piattaforma web (EMPOWER) per il monitoraggio dei consumi nei contesti condominali	45

7.2.1	Installazione componentistica nuovo condominio: dispositivi di acquisizione e trasmissione dati.....	45
7.2.2	Aggiornamento del layout di EMPOWER e implementazione nuovi indicatori ...	48
7.2.3	Progettazione e implementazione di una specifica App per smartphone e tablet	55
7.3	Smart Readiness Indicator	55
7.3.1	Aggiornamento stato dell'arte servizi tecnici intelligenti nel contesto nazionale..	55
7.3.2	Analisi delle possibili correlazioni tra l'attestato di prestazione energetica (APE) degli edifici residenziali e lo Smart Readiness Indicator (SRI).....	57
7.3.2.1	SRI - APE: analisi comparativa considerando i soli domini (impianti) presenti nei singoli casi studio	58
7.3.2.2	Analisi comparativa SRI-APE basata sulla simulazione dei casi studio in differenti zone climatiche	64
7.3.3	Correlazioni indicatore SRI e risparmio energetico basate su analisi dinamica in differenti zone climatiche	69
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte	71
9	Pubblicazioni scientifiche.....	72
10	Eventi di disseminazione	73

Indice delle figure

Figura 1: Schema sistema dimostratore sperimentale S.A.P.I.EN.T.E. come realizzato nelle precedenti annualità.....	13
Figura 2: risultati funzionamento sistema integrato S.A.P.I.EN.TE - sottostazione termica: Grafico superiore: andamento della potenza termica in uscita dalla PdC (arancione) e in ingresso alla sottostazione bidirezionale lato sistema di generazione (blu). Grafico medio superiore: andamento della potenza lato TLR dello scambiatore attivo (rosso). Grafico medio inferiore: andamento della potenza elettrica assorbita dalla PdC (nero) e prodotta dal PV (grigio). Grafico inferiore: accensione PdC (grigio), funzionamento PdC in modalità inseguimento PV (rosso).	15
Figura 3: foglio di calcolo analisi sovraconsumi termici - primo livello. Correlazione sovra consumo con sovra-temperatura appartamento rispetto alla temperatura di set_point ideale (20°C).Q _{th} , consumi attesi, Q _{H,nd} : fabbisogno termico annuo calcolato in condizioni di Asset Rating, gg: gradi-giorno totali annui, GG gradi giorno (giornalieri),	18
Figura 4: foglio di calcolo analisi sovraconsumi termici - secondo livello: step 1 (tabella di destra), step 2 (tabella di sinistra).....	18
Figura 5 - Esterni della nuova cabina installata presso il C.R. Casaccia e relativo quadro elettrico.	25
Figura 6 - Carichi elettronici posti in opera all'interno della nuova cabina installata presso il C.R. Casaccia.	26
Figura 7 - Inverter caricabatterie e supercondensatori installati all'interno della nuova cabina installata presso il C.R. Casaccia.	26
Figura 8 - Schermate del sistema sinottico / SCADA rappresentanti un condominio alimentato dall'impianto S.A.P.I.EN.T.E. e la plancia di controllo della pompa di calore.	27
Figura 9 - Struttura Matlab/Simulink per la gestione in Real-Time delle variabili in lettura e scrittura dell'impianto S.A.P.I.EN.T.E.	28
Figura 10 - Implementazione in Matlab/Simulink di look-up table per la generazione dei profili di carico di acqua calda sanitaria e riscaldamento applicati ai relativi dry cooler e la creazione di profili di generazione da sorgenti rinnovabili non presenti presso il dimostratore S.A.P.I.EN.T.E.(e.g. eolico).....	28
Figura 11 - Prove 2 e 4: Andamento orario potenza generata dal fotovoltaico (prova 2) e eolico (prova 4) e assorbita dalla pompa di calore tramite logiche di inseguimento.....	29
Figura 12 - Prove 2 e 4: Andamento orario dei flussi economici per la prova della configurazione AUC con il generatore fotovoltaico (sinistra) ed eolico (destra): guadagno da ritiro dedicato, costo dell'energia acquistata, risparmio di energia dovuto all'autoconsumo fisico, ricavo da incentivi per autoconsumo virtuale.	30
Figura 13 - Prova 5: Andamento temporale dello scambio di potenza con la rete con supercondensatori (giallo) e senza supercondensatori (blu) - Positivo: potenza immessa in rete; Negativo potenza prelevata dalla rete.	30

Figura 14 - Schema della configurazione AUC condominiale simulata in Matlab/Simulink, collegata alla rete di teleriscaldamento tramite una sottostazione bidirezionale. Accumulo Acqua Calda Sanitaria (DHW TES): 2,5 m ³ ; Accumulo Caldo/Freddo: 15 m ³ (Hot/Cool TES); Pompa di calore (46kWt freddo, 70kWt caldo).	32
Figura 15 - Analisi di sensibilità, al variare della taglia dei TES (Thermal Energy Storage), sull'autosufficienza totale per la configurazione AUC condominiale in oggetto, con TLR (a) e senza TLR (b).	32
Figura 16 - Net Present Value per un sistema virtualmente connesso, con TLR (a) e senza TLR (b), in uno scenario di autoconsumo virtuale, al variare della taglia di TES.	33
Figura 17: Schema semplificato connessione hardware in the loop: sistema SAPIENTE (C.R ENEA Casaccia) - Sottostazione termica bidirezionale (Bolzano)	34
Figura 18 - Schema accoppiamento Energy Exchange lab/sottostazione e S.A.P.I.EN.T.E.	34
Figura 19 - Carico termico emulato al secondario dello scambiatore S2 e dal Dry-cooler	35
Figura 20 - Prova tipo 3, giorno invernale. Grafico superiore: andamento della potenza termica in uscita dalla PdC (Pth,HP, arancione) e in ingresso allo scambiatore S2 della sottostazione (Pth,S2+S3, blu). Grafico medio superiore: andamento della potenza termica ceduta all'utenza dallo scambiatore S2 (PthS2,User, verde) e ceduto alla rete di TLR dallo scambiatore S3 (PthS3,TLR rosso). Grafico medio inferiore: andamento della potenza elettrica assorbita dalla PdC (Pel,HP, nero) e prodotta dal FV (Pel,PV, grigio). Grafico inferiore: segnale di richiesta termica utente (Richiesta US, magenta), accensione PdC (HP ON-OFF, grigio), funzionamento PdC in modalità comfort (HPcomfort, blu) e inseguimento FV (HP PV, rosso).	36
Figura 21 - Architettura completa del sistema ADLAS	38
Figura 22 - Overview modello BIM impianto S.A.P.I.EN.T.E.	39
Figura 23 - Digital Twin - parametri accumulo ACS in tempo reale. Cliccando su "History" e poi "Slider" è possibile accedere a un selettore temporale nella parte bassa dello schermo, che permette di visualizzare istantanee passate del sistema, utile per trovare eventuali anomalie passate o semplicemente per verificare il corretto funzionamento durante degli esperimenti.	40
Figura 24 - ADLAS: interfaccia di gestione del sistema per il settaggio delle prove sperimentali	41
Figura 25 - Sistema ADLAS (case bianco in basso a sinistra) posto in opera presso il C.R. Casaccia.	42
Figura 26 - Sistema ADLAS posto in opera attivando la PDC per alimentare l'accumulo ACS e imponendo un carico termico attraverso i Dry Cooler. Le tubazioni attive sono colorate.	42
Figura 27 - Prova con sistema ADLAS applicato all'impianto S.A.P.I.EN.T.E.: Andamento temporale della produzione di energia elettrica da FV (cura celeste - segno delle ordinate negativo) e dell'assorbimento elettrico della pompa di calore (curva fucsia).	43
Figura 28 - Prova con ADLAS: andamento temporale della potenza termica prodotta dalla PDC (curva arancione - kWt), della potenza elettrica assorbita dalla PDC (curva blu - kW) e del relativo COP (curva celeste - u.a.).	43

Figura 29 – Prove con sistema ADLAS: andamento temporale dei profili di carico termico (curva scura) e ACS (curva chiara) ottenuti gestendo con ADLAS i relativi dry cooler	44
Figura 30 – Prova con ADLAS: andamento temporale della temperatura negli accumuli ACS (curva scura) e ACC (curva chiara) in base ai profili di carico imposti.	44
Figura 31 – Componentistica installata nel nuovo condominio integrato in EMPOWER: (a) dispositivo utente per l’acquisizione dei dati di consumo elettrico con indicazione luminosa del livello di potenza assorbita e della fascia oraria; (b) multisensore per la rilevazione dei parametri indoor relativi al comfort termico e alla qualità dell’aria con indicazione luminosa di temperatura, CO ₂ , VOC e umidità; (c) energy meter installato a valle del contatore di produzione FV; (d) energy meter installato a valle del contatore di scambio; (e) router e switch PoE installato in una cassetta elettrica nel vano contatori.	46
Figura 32 – Schema dell’infrastruttura di comunicazione dati all’interno del condominio inserito in EMPOWER. Lo switch PoE connesso al router 4G/LTE nel vano contatore alimenta quattro access point installati dentro scatole di derivazione nei pianerottoli delle due scale. La Wi-Fi generata acquisisce i dati dagli energy meter del contatore di produzione FV e del contatore di scambio e dai dispositivi utente e sensori nelle singole unità immobiliari.	47
Figura 33 – Schermata con la procedura guidata per l’importazione dei file .csv contenenti tutti i dati acquisiti dal controllore centralizzato connesso via modbus con i contatori di calore e di portata delle singole unità immobiliari. Tale procedura consente di selezionare solo i dati degli utenti partecipanti (19 appartamenti su 38 totali) e inserirli nei rispettivi database.....	48
Figura 34 – Screenshot della visualizzazione giornaliera del consumo termico, della CO ₂ e della temperatura media implementata nella precedente versione di EMPOWER.	49
Figura 35 – Cruscotto “Elettricità” di EMPOWER sviluppata per la visualizzazione dei dati provenienti dai dispositivi utente.	50
Figura 36 – Cruscotto “Interno” di EMPOWER sviluppato per la visualizzazione dei parametri di comfort termico (temperatura e umidità) e di qualità dell’aria (CO ₂ , PM2.5, VOC e indice globale)	51
Figura 37 – Grafico del consumo storico di energia termica in kWh della sezione “Analisi dati” di EMPOWER.	52
Figura 38 – Grafico del consumo storico di energia elettrica in kWh della sezione “Analisi dati” di EMPOWER. È stata selezionata una settimana specifica dal filtro custom.....	52
Figura 39 – Grafico dello storico delle temperature indoor orarie medie della sezione “Analisi dati” di EMPOWER. È stata selezionata una settimana specifica dal filtro custom	53
Figura 40 – Visualizzazione della modalità di acquisizione dati di energia prodotta, autoconsumata, prelavata ed immessa all’interno della sezione “Autoconsumo collettivo” di EMPOWER. La pagina visualizza anche il grafico dei flussi di energia scambiati con la rete in un giorno selezionato	53
Figura 41 – Anagrafica di appartamento editabile nel livello amministratore di EMPOWER. Si evidenziano in rosso i campi aggiunti relativi all’indicatore ACS (numero occupanti, soglia min ACS e soglia max ACS) e ai consumi termici anomali (FAULT+ e FAULT-).	54

Figura 42– Screenshot della app EMPOWER estratti da smartphone. Vengono mostrati la pagina per il login dell'utente e la dashboard che fornisce le informazioni più importanti della piattaforma in termini di consumi energetici e parametri di comfort e qualità dell'aria.	55
Figura 44 – Correlazione SRI e E _{pgl,n-ren} per ciascuno dei casi studio	62
Figura 45 – Correlazione consumi termici – SRI (Appartamenti A1 – A2)	64
Figura 46 – Andamento SRI per ciascun caso studio e per i tre scenari di intelligenza- Zona Climatica C	67
Figura 47 – Correlazione Classe energetica – SRI per la zona climatica C	68
Figura 48 – Correlazione E _{pgl,n-ren} (kWh/m ² a) – SRI per la zona climatica C.....	68

Indice delle tabelle

Tabella 1 – Riepilogo dei risultati delle prove sperimentali in termini di coefficienti energetici e di indicatori di ricavo ottenuti.	31
Tabella 2 – Prove sperimentali connessione hardware in the loop SAPIENTE – sottostazione termica bidirezionale: principali flussi energetici giornalieri e indicatori chiave per 7 giorni di funzionamento.	37
Tabella 3 - Logiche dell'automazione generale - Sovraproduzione	40
Tabella 4 - Logiche dell'automazione generale - Sovraconsumo.....	41
Tabella 5: EMPOWER – generazione dei messaggi di alert per consumi termici anomali relativo a un appartamento campione per un periodo selezionato. Il messaggio viene generato quando il consumo normalizzato cade al di fuori del range definito da FAULT- e FAULT+ (in questo caso: -0.72 e +1.72) derivati dai consumi termici storici dell'appartamento in esame.	54
Tabella 6 – Catalogo dei servizi SRI – Sintesi dei risultati dei questionari sullo stato delle tecnologie esistenti nel contesto italiano. In verde i livelli funzionali effettivamente implementabili, in giallo quelli implementabili ma suggeriti per casi ristretti (es. potenze termiche elevate) e in rosso quelli attualmente non implementabili.	57
Tabella 7 – Confronto SRI – APE: Caratteristiche tipologiche dei casi studio.....	58
Tabella 8 – Confronto SRI – APE: Dotazione impiantistica per i tre scenari simulati	58
Tabella 9 - Funzionalità smart minime degli impianti per lo scenario "energy"	59
<i>Tabella 10 - Funzionalità smart minime degli impianti per lo scenario "smart energy".....</i>	<i>60</i>
Tabella 11 – Confronto SRI – APE: risultati per ciascuno dei tre scenari Base, Energy, Smart Energy.....	61
Tabella 12 – Caso studio G: valutazione SRI per appartamenti A1 e A2 – confronto caso con termostato di zona e valvole termostatiche	63
Tabella 13 - Casi studio: caratteristiche tipologiche.....	64
Tabella 14 – Implementazioni negli scenari di tipo energy.....	65

Tabella 15 - Implementazioni negli scenari di tipo smart energy	65
Tabella 16 - Zona climatica C	66
Tabella 17 - Zona climatica D	66
Tabella 18 - Zona climatica E	67
Tabella 19 - Scenari migliorativi di livelli di smartness di correlazione valutazione EPgl,n-ren ed SRI	69

1 Risultati attesi

Si riporta di seguito l'elenco dei risultati attesi come previsti dalla LA 4.2:

1.1 Sistema S.A.P.I.EN.T.E.

- Completamento dell'installazione di nuovi componenti, progettati nella LA4.1, destinati ad ampliare le funzionalità della test facility sperimentale S.A.P.I.EN.T.E. In particolare, verranno eseguiti i lavori per: i) l'installazione di una nuova cabina e i relativi quadri elettrici per l'alimentazione dei nuovi componenti; ii) l'installazione di un sistema di carichi elettronici per emulare più utenze della microcomunità energetica riprodotta con S.A.P.I.EN.T.E.; iii) l'installazione di un nuovo convertitore dotato di sistema d'accumuli per gestire e connettere in corrente continua potenzialmente più sorgenti rinnovabili (e.g., fotovoltaico, termofotovoltaico o eolico); iv) il completamento del sistema sinottico per visualizzare i flussi di potenza e lo stato di funzionamento del singolo componente. Il sinottico verrà schematizzato con l'obiettivo di poter fornire le informazioni necessarie ad un contesto di autoconsumo collettivo condominiale in modo da visualizzare l'energia prodotta dall'impianto comune e le quote condivise dai singoli utenti (emulati tramite i carichi elettronici).
- Esecuzione di prove con le nuove configurazioni del sistema ibrido S.A.P.I.EN.T.E. ampliato come descritto. Le prove sperimentali consentiranno di verificare le prestazioni sia delle logiche power-to-heat applicate con il nuovo sistema di controllo, basato sull'utilizzo del sistema sinottico, sia delle logiche sviluppate in Simulink Real-Time. I risultati di ciascuna prova consentiranno di elaborare una analisi degli effettivi benefici economici ottenuti dalla gestione ottimizzata della configurazione AUC considerando gli attuali incentivi e le reali possibili fluttuazioni tariffarie dell'energia elettrica prelevata e ceduta alla rete.
- Valutazione dei possibili vantaggi energetici ed economici ottenibili per una configurazione AUC condominiale con sistema ibrido tipo S.A.P.I.EN.T.E. connesso alla rete di teleriscaldamento tramite sottostazione termica bidirezionale. La valutazione verrà condotta simulando in ambiente Matlab/Simulink una soluzione costituita da impianto FV centralizzato condominiale e pompa di calore connessa alla rete di teleriscaldamento tramite un modello di sottostazione bidirezionale gestito in modalità scambio sul posto termico.
- Verifica delle reali prestazioni ottenibili dall'integrazione del sistema FV-pompa di calore con la sottostazione termica bidirezionale tramite la conduzione di prove sperimentali che prevedono la connessione in modalità hardware-in-the-loop (online oppure offline) tra il sistema S.A.P.I.EN.T.E. e la sottostazione termica bidirezionale collocata presso altro laboratorio di ricerca. In particolare, le prove verranno condotte con la stessa sottostazione bidirezionale realizzata nelle precedenti annualità e studiata nella linea LA 3.15 del presente progetto.

1.2 Sistema hardware e software per l'implementazione di logiche tipo Demand Side Management ADLAS

- Realizzazione di un modello digitale in ambiente simulativo (digital twin) della rete S.A.P.I.EN.T.E. per uno sviluppo iniziale delle logiche DSM e DR predisposto alla comunicazione con il mondo fisico.

- Definizione delle specifiche e implementazione della piattaforma software per la gestione del nuovo sistema ADLAS.
- Prove di funzionamento della piattaforma software e verifica dei protocolli di comunicazione anche tramite prove in ambiente hardware-in-the-loop con dispositivi del sistema S.A.P.I.EN.T.E.
- Realizzazione del prototipo finale (ADLAS) con integrazione dell'interfaccia hardware e della piattaforma software e installazione nel contesto del sistema S.A.P.I.EN.T.E.
- Prove sperimentali con il prototipo ADLAS per attuare logiche DSM applicate ai dispositivi del sistema S.A.P.I.EN.T.E. in configurazioni di Autoconsumo Collettivo condominiale.

1.3 EMPOWER: piattaforma web per migliorare la consapevolezza dei consumi degli utenti nei condomini

- Descrizione dei layout d'impianto e dei sistemi per la trasmissione dati per la telelettura dei nuovi sistemi di smart metering, dei nuovi sensori multiparametrici e degli eventuali sistemi intelligenti di termoregolazione ambientale (previa verificata fattibilità tecnica), installati in almeno uno dei casi studio.
- Aggiornamento di EMPOWER per l'acquisizione e la visualizzazione delle misure fornite dai nuovi sensori multiparametrici, dai sistemi di smart metering e dagli eventuali sistemi intelligenti di termoregolazione ambientale. Inoltre, EMPOWER sarà aggiornata in base agli eventuali feedback forniti dagli utenti dei condomini esaminati durante la stagione climatica 2023/24.
- Implementazione in EMPOWER di nuovi indicatori energetici specifici per ACS e qualità dell'aria (IAQ) elaborati in funzione dei risultati forniti dall'Università di Cassino secondo lo studio condotto nella LA4.3.
- Realizzazione della nuova sezione di EMPOWER relativa ai nuovi indicatori semplificati per lo schema AUC, definiti nella LA4.1, in almeno uno dei casi studio.
- Realizzazione della nuova sezione di EMPOWER per il monitoraggio dello stato di funzionamento degli impianti centralizzati, per almeno uno dei condomini esaminati, basato sull'installazione di dispositivi di smart metering, previa verificata fattibilità tecnica.
- Ristrutturazione del layout di EMPOWER per accomodare le nuove sezioni e gli eventuali feedback da parte dei condomini su modifiche sostanziali che comportano una riprogettazione della grafica.
- Progettazione e implementazione di una specifica App per smartphone e tablet con le informazioni contenute nella piattaforma web.
- Implementazione in EMPOWER di consigli dinamici forniti agli utenti dei condomini tramite messaggi di alert e/o schede informative in risposta ai consumi anomali individuati dall'algoritmo sviluppato secondo i risultati dello studio condotto dall'Università di Cassino nella LA4.3.
- Implementazione su foglio di calcolo di un metodo per valutare le cause che determinano le differenze importanti tra consumi attesi (simulati con metodo tailored rating secondo UNI/TS11300) e consumi reali (misurati con telelettura del sistema di contabilizzazione termica individuale).

1.4 Smart Readiness Indicator

- Aggiornamento stato dell'arte servizi tecnici intelligenti nel contesto nazionale ottenuto da una indagine di mercato per aggiornare il catalogo dei servizi previsti dal foglio di calcolo dello SRI.
- Possibili correlazioni tra la prestazione energetica degli edifici residenziali e lo Smart Readiness Indicator; analisi condotta simulando in ambiente dinamico gli edifici con gli stessi servizi tecnici intelligenti valutati con il foglio di calcolo dello SRI. In particolare, sarà valutata la prestazione energetica e il livello di SRI dei condomini già monitorati dalla piattaforma EMPOWER.
- Prima analisi di un possibile metodo dinamico per il calcolo dello SRI e valutazione della potenziale implementazione sulla piattaforma di monitoraggio dei condomini EMPOWER.

2 Risultati ottenuti

Si riporta nei seguenti paragrafi la lista dei risultati ottenuti con per la linea di attività 4.2

2.1 Sistema S.A.P.I.EN.T.E.

Nel corso delle precedenti annualità è stato realizzato presso il Centro Ricerche di Casaccia il dimostratore sperimentale S.A.P.I.EN.T.E. (Sistema di Accumulo e Produzione Integrata di ENergia Termica ed Elettrica) con lo scopo di provare in scala reale schemi impiantistici innovativi e nuove logiche di controllo per le piccole comunità energetiche rinnovabili (CER) e per le configurazioni di Autoconsumo Collettivo (AUC) condominiali con lo scopo di ottimizzare la condivisione dell'energia prodotta localmente e migliorare i ricavi economici per i membri della comunità.

In particolare, come indicato nello schema di Figura 1, il sistema sperimentale realizzato nelle precedenti annualità è costituito dalle seguenti sezioni:

- generazione e accumulo di energia elettrica composta da: i) un impianto fotovoltaico da 11,6 kWp, ii) un impianto termofotovoltaico (PVT) da 6,4 kWp, iii) un sistema di accumulo elettrico composto da n°4 supercondensatori del tipo Sirius 3550-48 V da 3,55 kWh ciascuno.
- generazione e accumulo di energia termica costituita: i) una pompa di calore da 30 kWt con possibilità di gestire il numero di giri del compressore e quindi la potenza elettrica assorbita, ii) un sistema di accumulo termico composto da due serbatoi da 1500 litri per il caldo/freddo e un serbatoio da 1000 litri per l'acqua calda sanitaria. iii) un sistema di due drycooler per emulare i profili di carico termico caldo/freddo e ACS.
- utenza reale: l'impianto termico di S.A.P.I.EN.T.E. è connessa idraulicamente ad una delle colonne montanti dell'impianto idronico di riscaldamento e raffrescamento del vicino edificio uffici F-83.
- sistema di monitoraggio: effettuata tramite PLC e diversi moduli I/O per acquisire le misure principalmente con protocollo modbus dai diversi componenti e strumenti di misura termici ed elettrici. Un interfaccia web consente all'operatore di controllare il funzionamento di ogni componente dell'impianto sperimentale e di modificare i parametri del sistema di controllo. Tramite
- sistema di controllo: tramite PLC sono stati implementate le prime logiche di controllo che prevedono l'applicazione di un controllore PID al compressore della pompa di calore per modulare il numeri di giri al fine di inseguire la produzione del campo fotovoltaico locale (inseguimento FV) accumulando l'energia termica in eccesso rispetto al carico dell'utenza.

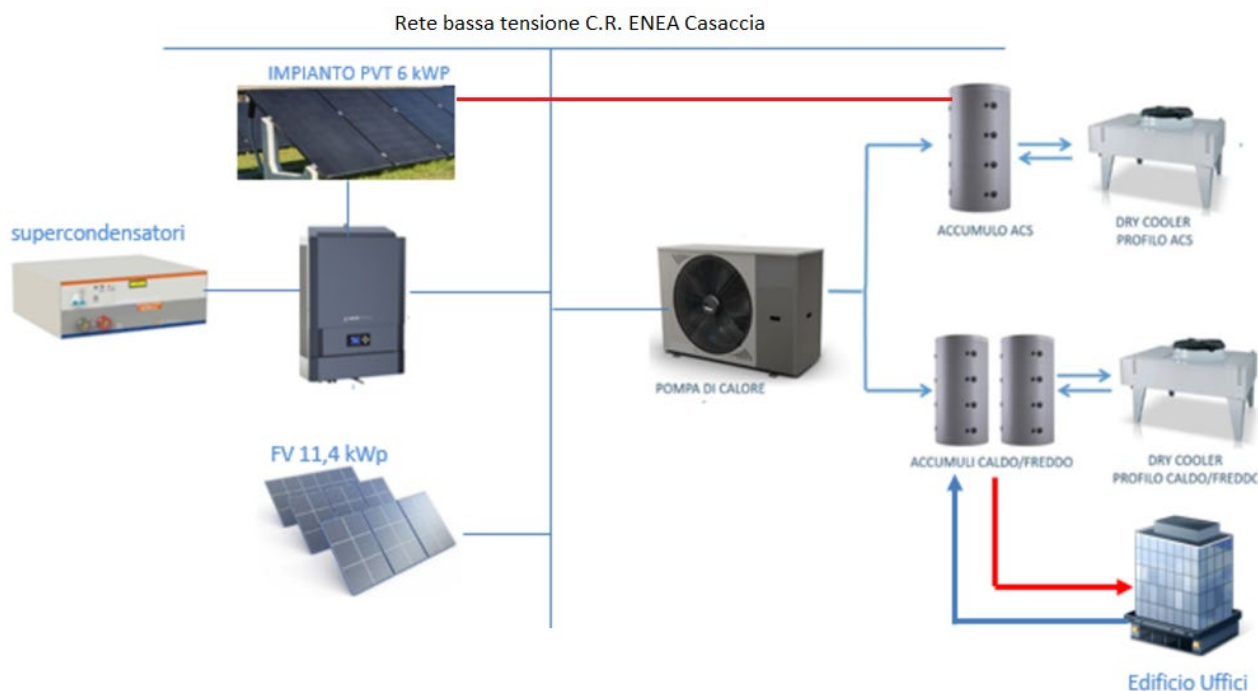


Figura 1: Schema sistema dimostratore sperimentale S.A.P.I.EN.T.E. come realizzato nelle precedenti annualità

Nel corso della LA 4.2, per studiare nuove configurazioni AUC e nuove sistemi di controllo che consentano di massimizzare l'autoconsumo delle FER locali, è stata ampliata la configurazione del dimostratore sperimentale S.A.P.I.EN.T.E. con l'installazione di nuovi componenti, progettati nella LA4.1. In particolare, sono stati eseguiti i seguenti lavori: i) installazione di una nuova cabina e relativo quadro elettrico per l'alimentazione dei nuovi componenti; ii) installazione di un sistema di carichi elettronici per emulare più utenze della microcomunità energetica riprodotta con S.A.P.I.EN.T.E.; iii) installazione di un nuovo inverter-carica/scarica batterie dotato di sistema d'accumulo a supercondensatori per gestire con logiche di compensazione a scambio zero con la rete potenzialmente tutte le sorgenti rinnovabili connesse nel sistema S.A.P.I.EN.T.E. (e.g., fotovoltaico, termofotovoltaico, eolico emulato); iv) completamento del nuovo sinottico realizzato su piattaforma SCADA. Quest'ultimo è caratterizzato da una grafica che riproduce l'applicazione del sistema S.A.P.I.EN.T.E. in una configurazione AUC condominiale, consentendo di visualizzare i flussi di potenza generati dalle sorgenti locali, l'energia elettrica e termica autoconsumate sul posto, l'energia elettrica scambiata con la rete e, infine, l'energia condivisa virtualmente

Sono state eseguite prove sperimentali con le nuove configurazioni del sistema ibrido S.A.P.I.EN.T.E. In particolare, le prove hanno riguardato nuove logiche sviluppate in Simulink Real-Time e l'applicazione di logiche Power-to-Heat con il nuovo sistema di controllo (gestione della pompa di calore centralizzata per inseguire in tempo reale la potenza elettrica prodotta dal fotovoltaico locale applicando un profilo di carico termico corrispondente ad un condominio di medie dimensioni). Considerando gli attuali incentivi per le CER e le reali tariffe dell'energia elettrica prelevata e ceduta alla rete, sono stati elaborati i risultati di ciascuna prova in termini degli effettivi benefici energetici ed economici ottenuti dalla applicazione delle logiche che ottimizzano la gestione della configurazione AUC.

Dalle prove sperimentali con il sistema S.A.P.I.EN.T.E. è stato verificato che uno dei problemi principali che limita l'applicazione delle logiche Power-to-Heat è dovuto alla limitata capacità dei sistemi di accumulo termici presenti nell'impianto in quanto l'energia termica prodotta in eccesso durante il funzionamento della pompa di calore ad inseguimento fotovoltaico determina un innalzamento della temperatura degli stessi portandoli in breve tempo in saturazione. Nell'ambito della LA 4.2 è stata indagata analiticamente e sperimentalmente una soluzione che potrebbe risolvere il problema, consentendo l'applicazione e il funzionamento della logica Power-to-Heat per un periodo prolungato garantendo livelli di autoconsumo della pompa di calore prossimi al 100%.

In particolare, sono stati valutati attraverso simulazioni in ambiente Matlab/Simulink i possibili vantaggi energetici ed economici ottenibili per una configurazione AUC condominiale con sistema ibrido tipo S.A.P.I.EN.T.E. connesso a una rete di teleriscaldamento (TLR) tramite sottostazione termica bidirezionale, riscontrando vantaggi nell'utilizzare la rete di teleriscaldamento come un accumulo termico potenzialmente infinito. Con l'ausilio di modelli implementati in Matlab sono stati valutati gli scenari corrispondenti alle configurazioni AUC ottimali costituite da impianto FV centralizzato condominiale e pompa di calore connessa ad un accumulo locale e alla rete di teleriscaldamento.

Per valutare sperimentalmente la possibilità di connettere una configurazione AUC condominiale ad una rete di teleriscaldamento in modalità attiva, è stata condotta una campagna di prove integrando il sistema S.A.P.I.EN.T.E. in modalità "hardware-in-the-loop" con il prototipo di sottostazione bidirezionale, studiata nella LA 3.15 del presente progetto, e installata presso Energy Exchange Lab di Eurac Research (maggiori dettagli sullo schema di connessione virtuale dei due sistemi sono riportati nel capitolo 7). Sono state condotte le prove di accoppiamento dei due sistemi riproducendo giornate tipo di funzionamento in inverno, autunno ed estate secondo tre diverse configurazioni: i) solo immissione in rete di teleriscaldamento della potenza termica prodotta dalla pompa di calore funzionante in modalità inseguimento FV, ii) potenza prodotta dalla pompa di calore in modalità inseguimento FV solo per soddisfare il carico termico del condominio (no immissione in rete di TLR), iii) immissione in rete di teleriscaldamento della sola potenza prodotta in eccesso dalla pompa di calore rispetto al carico termico del condominio. Anche nel terzo scenario la pompa di calore viene gestita in modalità inseguimento fotovoltaico.

Sono state condotte diverse verifiche sperimentali per determinare le condizioni di funzionamento del sistema integrato S.A.P.I.EN.T.E. - sottostazione bidirezionale. In particolare considerando la temperatura massima di funzionamento della pompa di calore pari a 55°C, la potenza termica massima erogabile (30kWt), è stato scelto di far funzionare la rete di TLR emulata con una temperatura di ritorno pari a 25°C e una temperatura di mandata pari a 40°C (rete di TLR a bassa temperatura); in queste condizioni con una portata con una portata pari a 3 mc/h riesce ad immettere nella rete emulata una potenza termica di circa 30 kWt.

Si riporta in Figura 2 un esempio di funzionamento in una giornata tipo del sistema integrato S.A.P.I.EN.T.E.-Sottostazione termica bidirezionale, secondo la configurazione: pompa di calore gestita in modalità inseguimento FV (logica Power to Heat), solo immissione in rete di TLR di tutta la potenza termica prodotta.

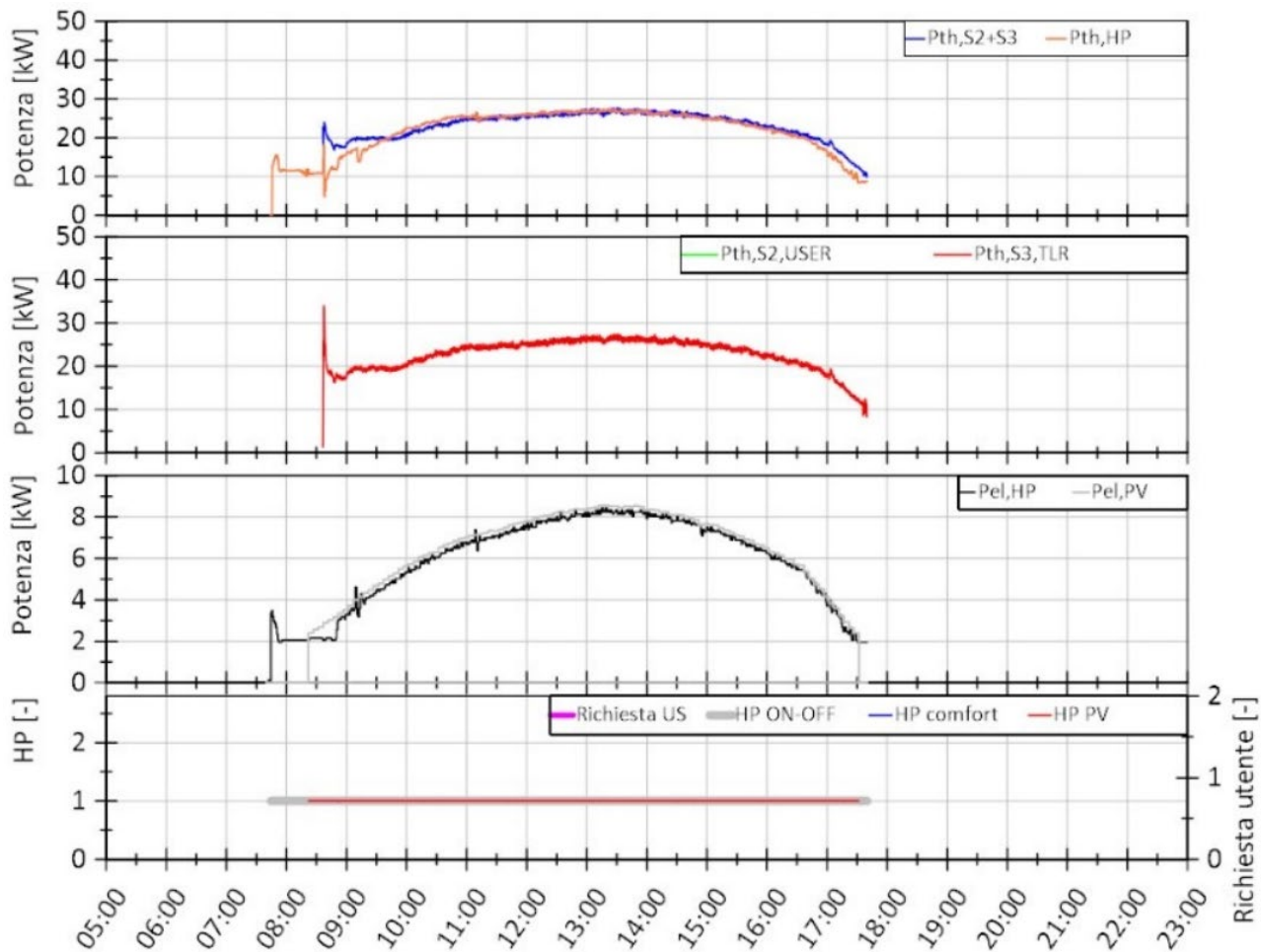


Figura 2: risultati funzionamento sistema integrato S.A.P.I.EN.TE - sottostazione termica: Grafico superiore: andamento della potenza termica in uscita dalla PdC (arancione) e in ingresso alla sottostazione bidirezionale lato sistema di generazione (blu). Grafico medio superiore: andamento della potenza lato TLR dello scambiatore attivo (rosso). Grafico medio inferiore: andamento della potenza elettrica assorbita dalla PdC (nero) e prodotta dal PV (grigio). Grafico inferiore: accensione PdC (grigio), funzionamento PdC in modalità inseguimento PV (rosso).

Dalle misure riportate nel grafico di Figura 2, oltre all'effettiva potenza termica immessa in rete di teleriscaldamento, si evince un funzionamento della pompa di calore del sistema S.A.P.I.EN.TE. in modalità Power to Heat per tutta la durata di produzione del FV (sovrapposizione della potenza assorbita dalla pdc a quella prodotta dal FV, curva nera e curva grigia Figura 2), raggiungendo un coefficiente di autoconsumo prossimo al 100 %. Considerando un possibile un regime di scambio sul posto termico con la rete di TLR (utilizzo della rete di teleriscaldamento come accumulo) l'autoconsumo e l'autosufficienza termica (riferita all'energia termica prodotta dalla pompa di calore funzionante in modalità Power to Heat, immessa in rete di TLR e riprelevata nelle ore successive) potrebbero raggiungere valori molto elevati, prossimi al 100%.

2.2 Sistema hardware e software per l'implementazione di logiche tipo Demand Side Management ADLAS

Continuando le attività avviate nella LA 4.1 è stato completato lo sviluppo della piattaforma hardware e software ADALS (Automatized DSM-DR Logics Application System) per

l'implementazione di logiche tipo Demand Side Management e la sua applicazione al dimostratore sperimentale S.A.P.I.EN.T.E. In particolare: i) per uno sviluppo iniziale delle logiche DSM e DR è stato realizzato un modello digitale in ambiente simulativo (Digital Twin) del sistema ibrido S.A.P.I.EN.T.E., predisposto alla comunicazione con il mondo fisico; ii) sono state definite le specifiche ed è stata implementata la piattaforma software per la gestione del nuovo sistema ADLAS; iii) sono state effettuate le prove di funzionamento della piattaforma software e sono stati verificati i protocolli di comunicazione, anche tramite prove in ambiente hardware-in-the-loop, con i dispositivi del sistema S.A.P.I.EN.T.E.; iv) è stato realizzato il prototipo finale (ADLAS) con integrazione dell'interfaccia hardware e della piattaforma software; v) è stato installato il prototipo ADLAS presso il sistema S.A.P.I.EN.T.E.; vi) sono state effettuate prove sperimentali preliminari con il prototipo ADLAS e verificato il pilotaggio del sistema S.A.P.I.EN.T.E. per l'attuazione delle dinamiche DSM.

2.3 EMPOWER: piattaforma web per migliorare la consapevolezza dei consumi degli utenti nei condomini

Proseguendo l'attività avviata nella linea di attività 4.1 è stata aggiornata e ottimizzata la piattaforma web EMPOWER (Energy Monitoring PORTal for aWare usERs) utile a migliorare la consapevolezza degli utenti finali sulla qualità dei propri consumi energetici nei contesti condominiali con impianti termici centralizzati. In particolare:

- Nel nuovo condominio oggetto di studio sono stati installati i seguenti dispositivi commerciali individuati nella LA4.1: i) per ciascuna unità immobiliare è stato fornito un sensore smart multiparametrico per misurare la qualità dell'aria e del comfort termoigrometrico; ii) in ciascuna unità immobiliare è stato fornito un Dispositivo Utente (DU); quest'ultimo, connettendosi tramite Power Line (linea elettrica dell'abitazione) alla chain 2 del contatore 2G, consente di leggere e trasmettere alla piattaforma EMPOWER il profilo di consumo elettrico dell'appartamento per successive elaborazioni; iii) a livello di condominio è stato installato uno smart meter per la lettura dei dati di produzione dell'impianto fotovoltaico e uno smart meter in corrispondenza del contatore di condominio per misurare la potenza immessa e prelevata dalla rete. I nuovi smart meeter consentono di misurare le grandezze e valutare i parametri della potenziale configurazione Autoconsumo Collettivo rappresentata dall'impianto fotovoltaico condominiale e dalle singole unità immobiliari; iv) è stata installata l'infrastruttura che permette l'acquisizione e la trasmissione dei dati provenienti dai dispositivi sopracitati. In particolare, si è realizzata una rete mesh Wi-Fi condominiale unificata collegando diversi access point a un router.

Nello stesso condominio non è stato possibile installare sistemi intelligenti di termoregolazione ambientale perché non compatibili con i terminali di emissione presenti nelle unità immobiliari (venticonvettori).

- Sono state implementate in EMPOWER le misure acquisite dai dispositivi installati nel nuovo condominio oggetto di studio. In particolare, sono visualizzabili in EMPOWER i consumi giornalieri termici e di acqua calda sanitaria (ACS), i dati di consumo elettrico e di potenza elettrica istantanea, i dati di produzione dell'impianto fotovoltaico e del contatore di scambio e i parametri indoor (temperatura, umidità, CO₂, composti organici volatili e particolato). Inoltre, EMPOWER è stato costantemente aggiornato in base ai

feedback forniti dagli utenti durante riunioni periodiche ai fini del miglioramento della fruibilità dei dati.

- È stato implementato in EMPOWER un indicatore specifico per ACS elaborato in funzione dei risultati forniti da UNICAS_DICEM (LA4.3) e un indicatore di qualità dell'aria (IAQ) che combina i dati di CO₂, PM2.5 e composti organici volatili.
- È stata inserita in EMPOWER una nuova e specifica sezione relativa all'Autoconsumo Collettivo per visualizzare i dati di produzione dell'impianto fotovoltaico e di consumo elettrico condominiale, al fine di sensibilizzare gli utenti sui valori di energia in gioco nell'ambito di una potenziale configurazione AUC.
- L'installazione di dispositivi di smart metering al fine di monitorare lo stato di funzionamento dell'impianto centralizzato nel nuovo condominio inserito in EMPOWER è stata valutata tecnicamente non fattibile a causa dei disservizi che si potevano arrecare ai condomini (ad es. sospensione servizio termico per installazione misuratore flusso di gas che arriva alle pompe di calore a gas).
- La grafica di EMPOWER è stata rivisitata e ridefinita in maniera sostanziale per accomodare le nuove sezioni e i feedback da parte dei condòmini. In particolare, si sono realizzati nella Home dei cruscotti semplificati per visualizzare i dati in tempo reale e i confronti con benchmark specifici, mentre la pagina Analisi dati mostra lo storico dei dati acquisiti.
- E' stata progettata una specifica app per smartphone e tablet con le informazioni contenute nella piattaforma web. L'App è stata poi implementata e resa fruibile dagli utenti.
- È stata predisposta in EMPOWER una logica per fornire messaggi di alert agli utenti dei condomini in risposta ai valori di consumo termico anomali individuati dall'algoritmo sviluppato da UNICAS_DICEM nella LA4.3.

Estendendo lo studio già avviato nel precedente triennio è stato implementato un foglio di calcolo a supporto della comprensione della cause che determinano i sovra consumi per riscaldamento rispetto al consumo ideale atteso; quest'ultimo viene determinato secondo la metodologia di calcolo in Asset Rating previsto dalla UNI/TS 11300 come descritto nel Report ENEA RdS/PTR2021/127. In particolare, il foglio di calcolo per l'analisi dei sovra consumi termici prevede due livelli di dettaglio:

- Primo livello di analisi (qualitativo): come indicato in Figura 3: i) viene visualizzato il consumo termico atteso Q_{th} giornaliero dell'unità immobiliare, ii) viene correlato il consumo atteso Q_{th} al consumo termico rilevato Q_R, calcolando l'indice di sovra consumo I_{sc}, iii) viene confrontata la temperatura media dell'appartamento con la temperatura ideale di set point (20°C), iv) l'utente può verificare, qualitativamente, se il sovra consumo corrisponde ad una temperatura media dell'appartamento superiore rispetto alla temperatura ideale di set point

Temperature media rilevate giornalmente per Appartamento 1A			T _{est} Rilevata e Calcolo Gradi Giorno Appartamento 1A			Consumi Attesi Asset Rating UNI TS 113000 Appartamento 1A		
Data	Appartamento 1A	Appartamento 1A	T _{est}	GG Asset Rating	GG Effettivi	Q _{th} : Consumi Attesi Asset		I _{sc} = QR/Q _{th}
	T _{Set Point}	T _{App Media}		(T _{set Point} - T _{est})	(T _{App Media} - T _{est})	QH _{nd} /gg = 1,58	QR: Consumi Rilevati	
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(kWh)	(kWh)	%
21/02/2024	20,00	21,32	10,52	9,48	10,80	14,96	24,00	60,48%
22/02/2024	20,00	21,42	10,94	9,06	10,48	14,29	25,00	74,91%
23/02/2024	20,00	21,47	10,94	9,06	10,53	14,29	22,00	53,92%
24/02/2024	20,00	21,60	12,22	7,78	9,38	12,27	19,00	54,80%
25/02/2024	20,00	22,02	12,80	7,20	9,22	11,36	18,00	58,47%

Figura 3: foglio di calcolo analisi sovraconsumi termici – primo livello. Correlazione sovra consumo con sovra-temperatura appartamento rispetto alla temperatura di set_point ideale (20°C). Qth, consumi attesi, QH,nd: fabbisogno termico annuo calcolato in condizioni di Asset Rating, gg: gradi-giorno totali annui, GG gradi giorno (giornalieri),

-Secondo livello di analisi (livello esperto): viene approfondita l'analisi confrontando i consumi misurati con i consumi termici simulati in condizioni reali di utilizzo (Tailored Rating secondo UNI TS 11300/1). In particolare, il secondo livello prevede due step (Figura 4):

Primo step aggiornamento gradi giorno : viene ricalcolato il consumo termico ideale Qth giornaliero considerando i GG effettivi giornalieri (Figura 3) valutati sostituendo la temperatura interna ideale (20°C) con quella media rilevata. Con il nuovo calcolo dell'indicatore I_{SC} è possibile verificare quanto pesa una regolazione alta della temperatura interna sullo scostamento tra consumo ideale e consumo rilevato.

Secondo step aggiornamento componente dovuto alla ventilazione naturale: viene ricalcolato il coefficiente Q_{H,nd}/gg scalando la componente dovuta alla ventilazione naturale aggiornando il valore dei ricambi d'aria rispetto al valore standard utilizzato per il calcolo in Asset rating (0,3 vol/h). Aumentando il valore dei ricambi d'ara il consumo calcolato si avvicina al consumo misurato valutando quanto il sovra consumo rispetto al consumo ideale possa essere dovuto ad un eccesso di ventilazione naturale (es. infiltrazioni o finestre aperte per molto tempo durante le ore di riscaldamento)

Consumi Attesi Tailored Appartamento A1			Consumi Attesi Tailored Appartamento A1		
GG reali (T _{media})			GG reali (T _{media})		
Ventilazione naturale Asset rating			Ventilazione naturale Tailored		
Consumi Attesi Tailored	Appartamento 1A		Consumi Attesi Tailored	Appartamento 1A	
QH_nd/gg = 1,58			QH_nd/gg = 1,90		
Qth =1.58*GG	QR: Consumi Rilevati	Isc	Qth =1.60*GG	Consumi	Isc
(kWh)	(kWh)	%	(kWh)	(kWh)	%
17,04	24,00	40,86%	20,52	24,00	16,96%
16,54	25,00	51,17%	19,92	25,00	25,52%
16,61	22,00	32,48%	20,00	22,00	10,00%
14,80	19,00	28,34%	17,83	19,00	6,56%
14,54	18,00	23,78%	17,51	18,00	2,77%

Figura 4: foglio di calcolo analisi sovraconsumi termici – secondo livello: step 1(tabella di destra), step 2(tabella di sinistra)

2.4 Smart Readiness Indicator

- Il catalogo dei servizi previsti dal foglio di calcolo dell'SRI è stato rivisto e aggiornato tenendo conto degli output di un'indagine di mercato sullo stato dell'arte dei servizi tecnici intelligenti nel contesto nazionale.
- Nell'ambito dello studio delle possibili correlazioni tra le prestazioni energetiche e l'SRI, sono state condotte simulazioni in regime dinamico di edifici residenziali (tra cui condomini monitorati in EMPOWER). In particolare, è stata effettuata: i) un'analisi comparativa considerando i soli domini (impianti) presenti nei singoli casi studio; ii) un'analisi comparativa, basata sulla simulazione dei casi studio in differenti zone climatiche. Questa attività è stata ampliata anche con un'analisi effettuata simulando in regime semi-stazionario.

- Dall'analisi delle potenzialità delle piattaforme per il monitoraggio e controllo degli edifici come EMPOWER, è stata valutata la possibilità di implementare un metodo dinamico per il calcolo dello Smart Readiness Indicator come previsto dallo studio tecnico della Commissione Europea¹. Quest'ultimo, infatti, prevede fondamentalmente tre metodologie di calcolo dello SRI:

Metodo A e Metodo B: (metodo adottato dal regolamento Delegato 2020/21551 della Commissione Europea) si basa sull'esame dei servizi tecnici intelligenti che sono presenti o previsti in fase di progettazione di un edificio secondo un approccio di tipo checklist diviso in tre fasi: i) individuazione, dopo un triage iniziale, dei servizi dell'immobile tra quelli presenti in un "catalogo dei servizi"; ii) attribuzione a ciascuno dei servizi di un punteggio secondo "sette criteri di impatto", in base al livello di intelligenza raggiunto secondo una scala di valori pre-implementata nello stesso catalogo ; iii) calcolo di un punteggio parziale e totale dello SRI complessivo dell'edificio con un metodo di valutazione di tipo multicriterio

E' previsti l'utilizzo di due cataloghi di servizi:

- Un catalogo di 27 servizi intelligenti da valutare, applicabile a edifici di bassa complessità (case unifamiliari, piccoli condomini), (Metodo A - semplificato, non associabile all'emissione di un certificato);
- Un catalogo completo contenente 54 servizi intelligenti, applicabile a edifici con un maggior grado di complessità (ad es. grandi edifici non residenziali, grandi condomini). Prevede un sopralluogo da parte di un esperto qualificato per valutare i servizi intelligenti. (Metodo B - completo).

Metodo C: (metodo ancora in fase di studio) Il Metodo C, considerato un potenziale evoluzione futura del Metodo B, è basato sulla capacità di quantificare gli effettivi livelli di smartness raggiunti dall'edificio. Dalle prime valutazioni condotte da ENEA nell'ambito della LA 4.2, il metodo C, o metodo dinamico, potrebbe essere implementato tramite un'analisi comparativa delle reali prestazioni dell'edificio (misurate) con i risultati ottenuti dalla simulazione in tempo reale del suo gemello digitale (digital twin).

Dalla suddetta comparazione sarebbe possibile calcolare degli indicatori dinamici (su base oraria o giornaliera) che penalizzano il punteggio ottenuto dal metodo B per ciascuno dei sette criteri di impatto (risparmi energetici, flessibilità, comfort, ecc) quando le prestazioni dei servizi tecnici si allontanano dai livelli ideali attesi.

Per l'implementazione del suddetto metodo è necessario: i) l'applicazione di un sistema di smart metering elettrico e termico per il monitoraggio e trasmissione delle misure ad una piattaforma di elaborazione dei dati, ii) un digital twin dell'edificio implementato in ambiente di simulazione dinamica in grado di far girare il modello in real time acquisendo le effettive condizioni al contorno (temperatura esterna, irraggiamento solare, ecc).

Le suddette condizioni possono essere applicabili estendendo le funzioni della piattaforma Empower. La stessa infatti si basa già sulla integrazione di un sistema di smart metering

¹ European Commission, Directorate-General for Energy, Verbeke, S., Aerts, D., Reynders, G. et al., *Final report on the technical support to the development of a smart readiness indicator for buildings – Summary*, Publications Office, 2020, <https://data.europa.eu/doi/10.2833/600706>

elettrico e termico (misura della potenza elettrica del singolo appartamento, misura della potenza scambiata con la rete, contabilizzazione individuale de consumi termici, misura della temperatura interna, misura dei livelli di CO2, ecc) con la piattaforma per la visualizzazione e l'elaborazione degli indici di energetici.

Per la possibile applicazione del metodo dinamico dello SRI, occorre sviluppare in ambiente di simulazione real time il modello software dello stesso edificio (Digital Twin) e far confluire sulla stessa piattaforma Empower i risultati della simulazione per confrontare le misure del funzionamento reale con i dati ottenuti dal funzionamento ideale degli impianti

3 Prodotti attesi

Lista dei prodotti attesi come da capitolato vigente:

- Report di dettaglio, contenente la descrizione delle attività condotte e dei risultati ottenuti
- Prototipo hardware-software "ADLAS" capace di supervisionare, monitorare e controllare la rete S.A.P.I.EN.T.E. con logiche DSM e DR.
- Piattaforma Web e App "EMPOWER" per migliorare la consapevolezza degli utenti condominiali sui propri consumi energetici.

4 Prodotti sviluppati

Lista dei prodotti sviluppati:

- Report tecnico comprendente una descrizione dettagliata delle attività condotte e dei risultati raggiunti
- Prototipo hardware-software "ADLAS" capace di supervisionare, monitorare e controllare la rete S.A.P.I.EN.T.E. con logiche DSM e DR.
- È stata ulteriormente sviluppata, ampliata e consolidata la piattaforma Web intitolata EMPOWER (Energy Monitoring POrtal for aWare usERs) avviata nel PTR 2019-21 con lo scopo di migliorare la consapevolezza degli utenti condominiali sui propri consumi energetici. (<https://nextgen.rienergygroup.com>)
- Nella presente LA, parallelamente al portale web, è stata sviluppata una app che visualizza i principali dati di EMPOWER su supporti mobile.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non si rilevano scostamenti rispetto a quanto riportato nel capitolato di progetto per la LA4.2.

6 Sintesi delle attività svolte

È stato ampliato il sistema S.A.P.I.EN.T.E. con nuovi componenti (cabina elettrica, carichi elettronici, inverter con supercondensatori e sinottico/SCADA). Sono state eseguite prove per verificare le logiche power-to-heat e valutare i benefici economici dell'Autoconsumo Collettivo (AUC). È stata valutata l'integrazione del sistema con una rete di teleriscaldamento tramite sottostazione termica bidirezionale tramite simulazioni e prove in configurazione hardware-in-the-loop. È stata ultimata, installata e testata la piattaforma ADLAS con digital twin della rete S.A.P.I.EN.T.E. È stata ampliata e rivisitata la piattaforma EMPOWER, implementando nuove sezioni e nuovi indici per accomodare i dati di un nuovo condominio e i feedback degli utenti. È stato aggiornato lo stato dell'arte dei servizi tecnici valutati dall'SRI tramite un'indagine di mercato e sono state analizzate le correlazioni tra prestazione energetica degli edifici e SRI mediante simulazioni semi stazionarie e dinamiche.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Sistema S.A.P.I.EN.T.E.

7.1.1 Completamento dell'installazione dei nuovi componenti nel sistema S.A.P.I.EN.T.E.

Nell'ambito del sistema sperimentale S.A.P.I.EN.T.E., nella presente LA è stata completata l'installazione dei nuovi componenti progettati nella LA4.1.

In particolare:

- è stata installata la nuova cabina con relativo quadro elettrico per l'alimentazione dei nuovi componenti (Figura 1);
- sono stati installati n.3 carichi elettronici da 15 kVA ciascuno² (Figura 2);
- è stato installato un inverter caricabatterie, dotato di un sistema d'accumulo a supercondensatori (SC), in grado di accogliere virtualmente in ingresso tutte le di sorgenti afferenti al sistema S.A.P.I.EN.T.E., incluse quelle emulate tramite carichi elettronici, attraverso un pilotaggio in ModBus (Figura 3).
- è stato completato e implementato in un controllore SCADA il sistema sinottico³ per applicazione in un contesto di Autoconsumo Collettivo (AUC) condominiale (Figura 4).



Figura 5 - Esterni della nuova cabina installata presso il C.R. Casaccia e relativo quadro elettrico.

² I carichi elettronici saranno utilizzati per emulare utenze nell'ambito delle configurazioni di autoconsumo collettivo condominiale (AUC) riprodotte con S.A.P.I.EN.T.E.

³ Il sinottico è in grado di visualizzare i flussi di potenza e lo stato di funzionamento dei singoli componenti, per fornire le informazioni necessarie ad un contesto di Autoconsumo Collettivo (AUC) condominiale e visualizzare l'energia prodotta dall'impianto comune e le quote condivise dai singoli utenti (emulati tramite i carichi elettronici). Attraverso l'interfaccia sinottico gli utenti possono monitorare real-time l'autoconsumo fisico ed effettuare scelte consapevoli nell'intento di massimizzare l'autoconsumo virtuale. Questo è un sinottico a "livello utente" per una gestione più user friendly dell'impianto. Il sistema ADLAS, trattato nel seguito, consiste in un digital twin dell'impianto e dà modo di operare su di esso ad un più basso livello di astrazione.



Figura 6 - Carichi elettronici posti in opera all'interno della nuova cabina installata presso il C.R. Casaccia.



Figura 7 - Inverter caricabatterie e supercondensatori installati all'interno della nuova cabina installata presso il C.R. Casaccia.

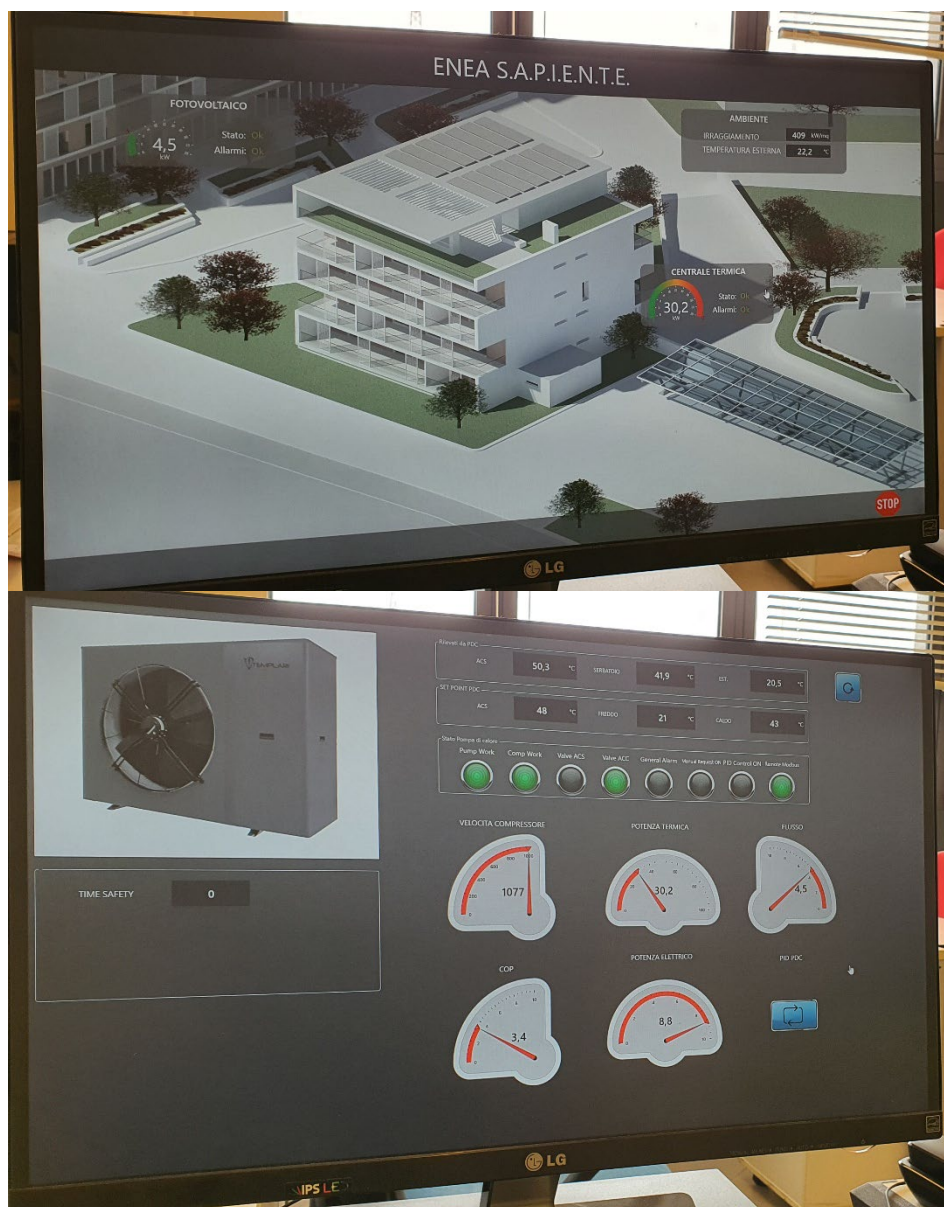


Figura 8 – Schermate del sistema sinottico / SCADA rappresentanti un condominio alimentato dall'impianto S.A.P.I.EN.T.E. e la plancia di controllo della pompa di calore.

7.1.2 Esecuzione di prove con le nuove configurazioni del sistema ibrido S.A.P.I.EN.T.E. ampliato

Sono state eseguite le prove con la nuova configurazione del sistema S.A.P.I.EN.T.E., le quali hanno consentito di verificare le prestazioni delle logiche Power-to-Heat (PtH)⁴, come di seguito descritto. In particolare, come mostrato in Figura 5 e Figura 6, sono state sviluppate in

⁴ Come descritto nella precedente LA4.1, la logica PtH si basa sulla gestione dell'assorbimento elettrico della pompa di calore modulando con un controllore PID il numero di giri del compressore in modo da inseguire la produzione in eccesso dell'impianto FER locale e minimizzare lo scambio di potenza con la rete. L'energia termica prodotta in eccesso dalla PDC rispetto al carico viene accumulata negli storage termici.

Simulink Real-Time nuove logiche per gestire i profili di carico termico applicati e controllare la pompa di calore con dinamica PtH per massimizzare l'autoconsumo fisico.

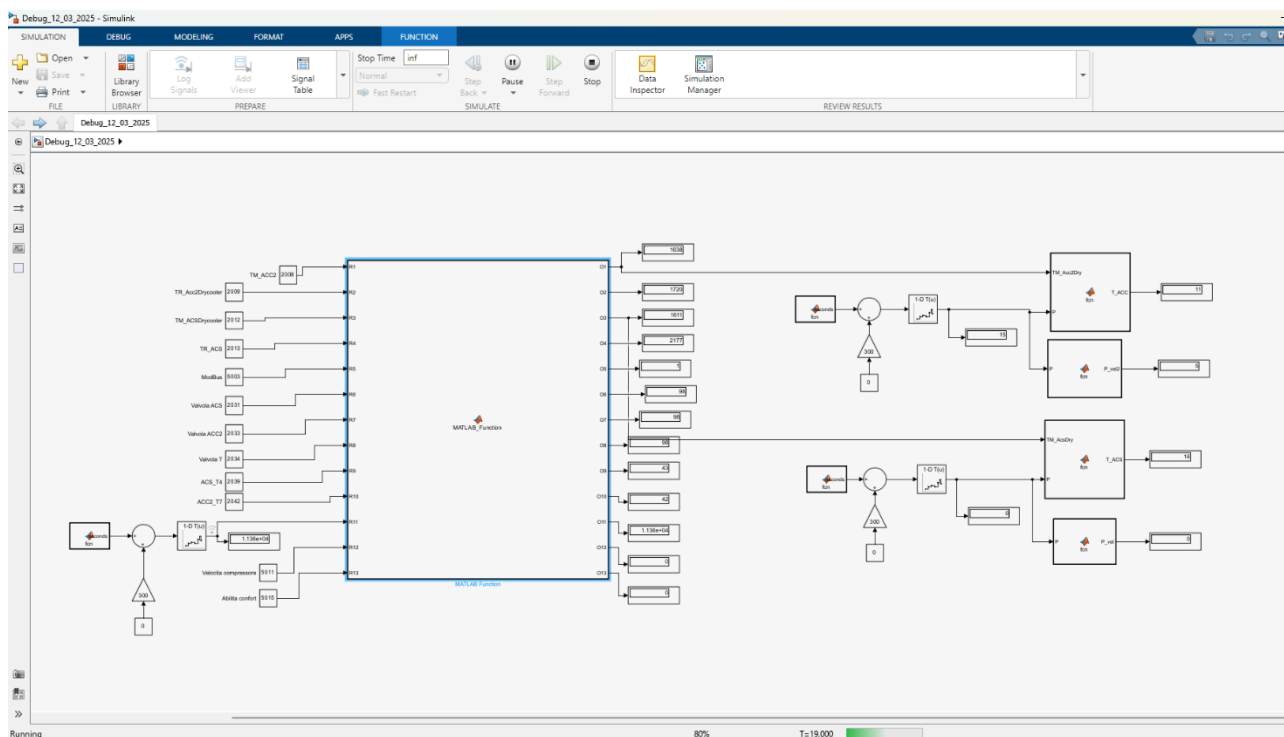


Figura 9 - Struttura Matlab/Simulink per la gestione in Real-Time delle variabili in lettura e scrittura dell'impianto S.A.P.I.EN.T.E.

```

1 clear all
2 t=(1:287).';% tempo
3 t1=t*300;
4 ED3=xlsread('acs.xlsx','B1:B287'); % ACS
5 profiloED3=[t1 ED3];
6 t2=t*300;
7 EF3=xlsread('scenario.xlsx','B1:B287'); % residenziale invernale
8 profiloEF3=[t2 EF3];
9 t3=t*300;
10 EH3=xlsread('source.xlsx','B1:B287'); % RES
11 profiloEH3=[t3 EH3];
    
```

Name	Value
ED3	287x1 double
EF3	287x1 double
EH3	287x1 double
logout	1x1 Dataset
profiloED3	287x2 double
profiloEF3	287x2 double
profiloEH3	287x2 double
t	287x1 double
t1	287x1 double
t2	287x1 double
t3	287x1 double
tout	54x1 double

Figura 10 - Implementazione in Matlab/Simulink di look-up table per la generazione dei profili di carico di acqua calda sanitaria e riscaldamento applicati ai relativi dry cooler e la creazione di profili di generazione da sorgenti rinnovabili non presenti presso il dimostratore S.A.P.I.EN.T.E.(e.g. eolico)

Utilizzando il nuovo sinottico e le logiche implementate in Matlab/Simulink, sono state effettuate prove sperimentali riproducendo con il sistema S.A.P.I.EN.T.E. una configurazione AUC condominiale comprendente: pompa di calore centralizzata (30 kWt), impianto condominiale a FER (FV 12 kW o eolico 9 kW), profili di carico elettrico e termico di un

condominio composto da quattro unità abitative indipendenti, sistema di accumulo termico (1,5 mc)/ACS (1 mc) e elettrico (supercondensatori 14 kWh).

Tali prove, qui di seguito riportate, hanno ricompreso l'analisi degli effettivi benefici economici associati alla gestione ottimizzata di una configurazione AUC, considerando:

- Per l'energia in eccesso immessa in rete, le tariffe del Ritiro Dedicato pubblicate dal GSE.
- Per l'energia prelevata dalla rete e l'autoconsumo fisico, il prezzo dell'energia elettrica per il consumatore domestico tipo in maggior tutela stabilito da ARERA.
- Per l'autoconsumo virtuale da parte dei membri della configurazione AUC emulata, gli incentivi previsti dal D.Lgs. 199/21.

Primo set di prove: influenza delle logiche PtH in configurazioni AUC con FV e eolico

- Prova 1 (baseline): garantite solo le condizioni di comfort⁵ con FV agli utenti del condominio senza applicazione di logiche PtH per ottimizzare l'autoconsumo.
- Prova 2: garantite condizioni di comfort e applicazione di logiche PtH con FV (Figura 11 e Figura 12).
- Prova 3 (baseline): garantite solo le condizioni di comfort con eolico agli utenti del condominio senza applicazione di logiche PtH per ottimizzare l'autoconsumo.
- Prova 4: garantite condizioni di comfort e applicazione di logiche PtH con eolico (Figura 11 e Figura 12).

Secondo set di prove: impatto SC in scenario residenziale, profili di carico termico diversi

- Prova 5 (baseline): garantite condizioni di comfort e applicazione di logiche PtH con FV (Figura 13).
- Prova 5 (baseline + SC): garantite condizioni di comfort e applicazione di logiche PtH con FV con SC (Figura 13).

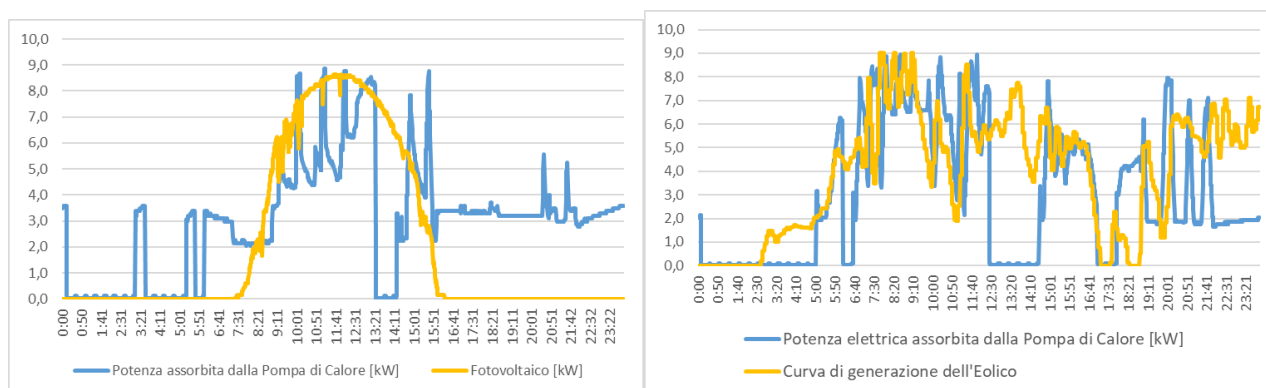


Figura 11 - Prove 2 e 4: Andamento orario potenza generata dal fotovoltaico (prova 2) e eolico (prova 4) e assorbita dalla pompa di calore tramite logiche di inseguimento.

⁵ Per "condizioni di comfort" si intende il mantenimento degli accumuli termici e ACS alle temperature prestabilite, indipendentemente dalla presenza o meno di disponibilità di energia da FER.

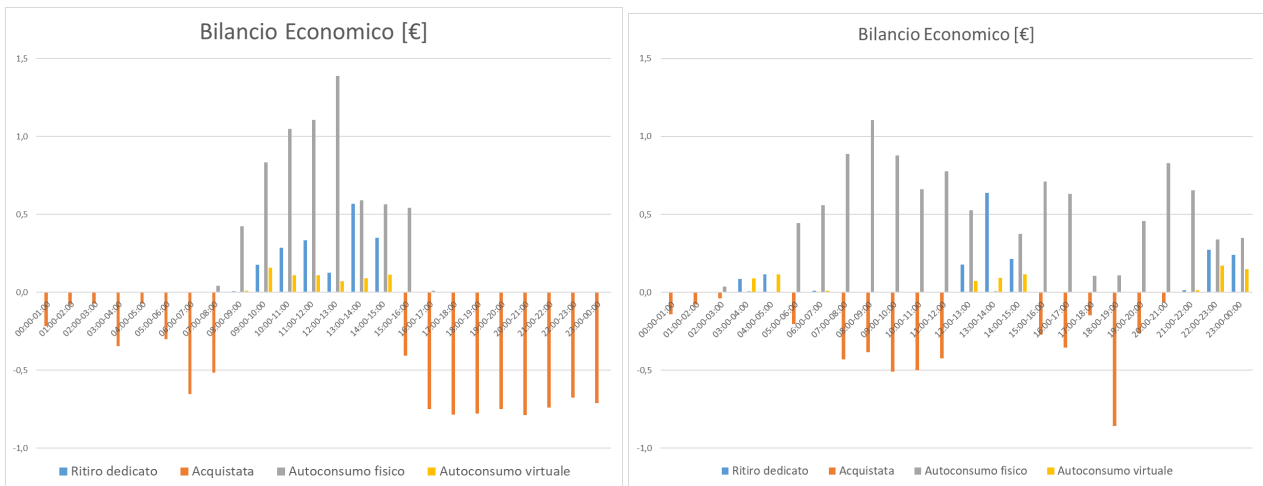


Figura 12 - Prove 2 e 4: Andamento orario dei flussi economici per la prova della configurazione AUC con il generatore fotovoltaico (sinistra) ed eolico (destra): guadagno da ritiro dedicato, costo dell'energia acquistata, risparmio di energia dovuto all'autoconsumo fisico, ricavo da incentivi per autoconsumo virtuale.

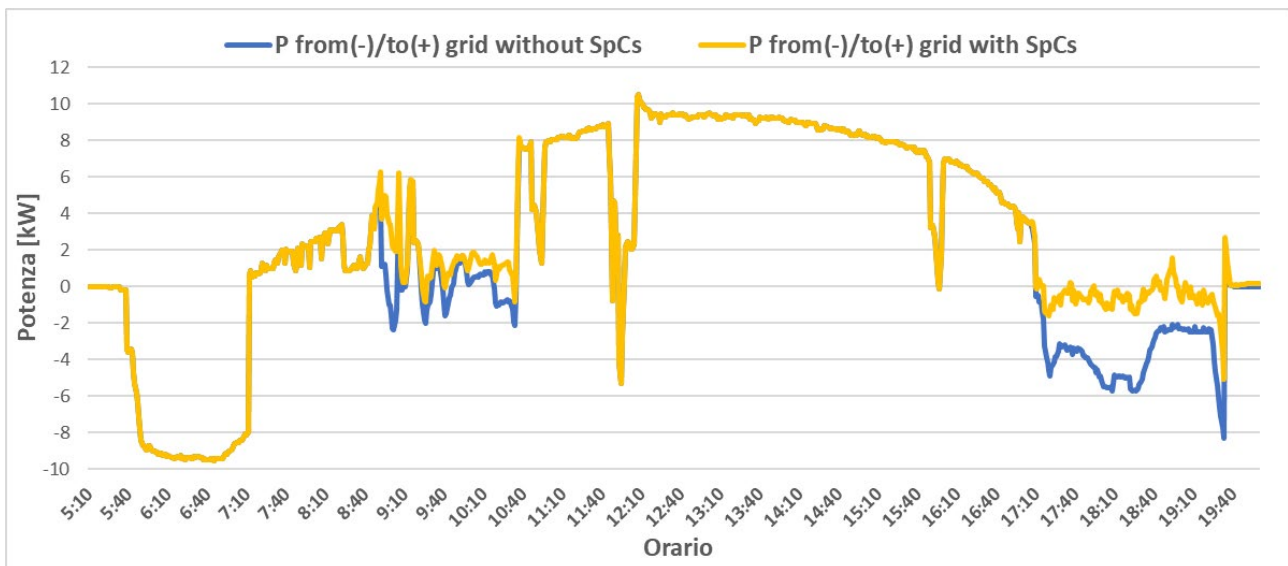


Figura 13 - Prova 5: Andamento temporale dello scambio di potenza con la rete con supercondensatori (giallo) e senza supercondensatori (blu) - Positivo: potenza immessa in rete; Negativo potenza prelevata dalla rete⁶.

In Tabella 1 sono riportati i risultati delle prove sperimentali in termini energetici ed economici.

⁶ Rispetto allo scenario uso uffici, lo scenario residenziale prevede la non contemporaneità tra produzione fotovoltaica e carico termico. Infatti, in quest'ultimo si prevede una presenza media degli utenti nelle prime ore della mattina e nel secondo pomeriggio, sia per quanto riguarda l'utilizzo di ACS che di energia termica per il riscaldamento ambientale. Nella fattispecie, è stato previsto che un utente residenziale utilizzi l'acqua calda sanitaria e l'accumulo termico al mattino, prima di andare al lavoro e nel pomeriggio, una volta tornato a casa. È stato impostato un carico termico e di ACS dalle 5.10 alle 7.10 circa e, successivamente, dalle 17.00 alle 19.30 circa.

Tabella 1 – Riepilogo dei risultati delle prove sperimentali in termini di coefficienti energetici e di indicatori di ricavo ottenuti.

# Prova	Configurazione	Autoconsumo FER [%]	Autosufficienza PDC [%]	Indicatore ricavo [%] ⁷
1 (baseline FV)	Comfort, FV	61	32	-
2	Comfort, FV, PtH	72	44	112
3 (baseline eolico)	Comfort, eolico	74	75	-
4	Comfort, eolico, PtH	78	82	15
5 (baseline)	Comfort, FV, PtH	21	47	-
5 (baseline + SC)	Comfort, FV e SC, PtH	31	71	69

Dai risultati riportati nella tabella precedente, si evincono i vantaggi che una configurazione AUC condominiale può ottenere laddove applicata la logica di funzionamento Power-to-Heat, sia in termini di coefficienti energetici, dove in ogni ambito si evince in miglioramento, sia in termini economici. In particolare, si osserva nella prova 2 come tale logica PtH determini un incremento dei ricavi giornalieri pari al 112% rispetto alla relativa baseline (prova 1) Inoltre, risulta evidente come l'uso dei SC contribuisca a minimizzare i prelievi dalla rete (Figura 9).

7.1.3 Valutazione dei possibili vantaggi energetici ed economici ottenibili per una Configurazione AUC condominiale con sistema ibrido tipo S.A.P.I.EN.T.E. connesso come prosumer termico a una rete di teleriscaldamento tramite sottostazione termica bidirezionale.

Sono state eseguite simulazioni in Matlab/Simulink al fine di effettuare una valutazione dei possibili vantaggi energetici ed economici ottenibili per una configurazione AUC condominiale con sistema ibrido tipo S.A.P.I.EN.T.E. connesso a una rete di teleriscaldamento (TLR) tramite sottostazione termica bidirezionale (STB) assumendo come utente un edificio residenziale di n.10 appartamenti per una superficie totale di 1000 m². Lo schema dettagliato della configurazione simulata è riportato in Figura 14.

⁷ $IR = \frac{Rs - Rb}{|Rb|}$ IR: indicatore di ricavo dello scenario considerato rispetto la baseline [%], Rs è il bilancio economico (costi-ricavi) dello scenario considerato [€], Rb è il bilancio economico (costi-ricavi) della baseline [€].

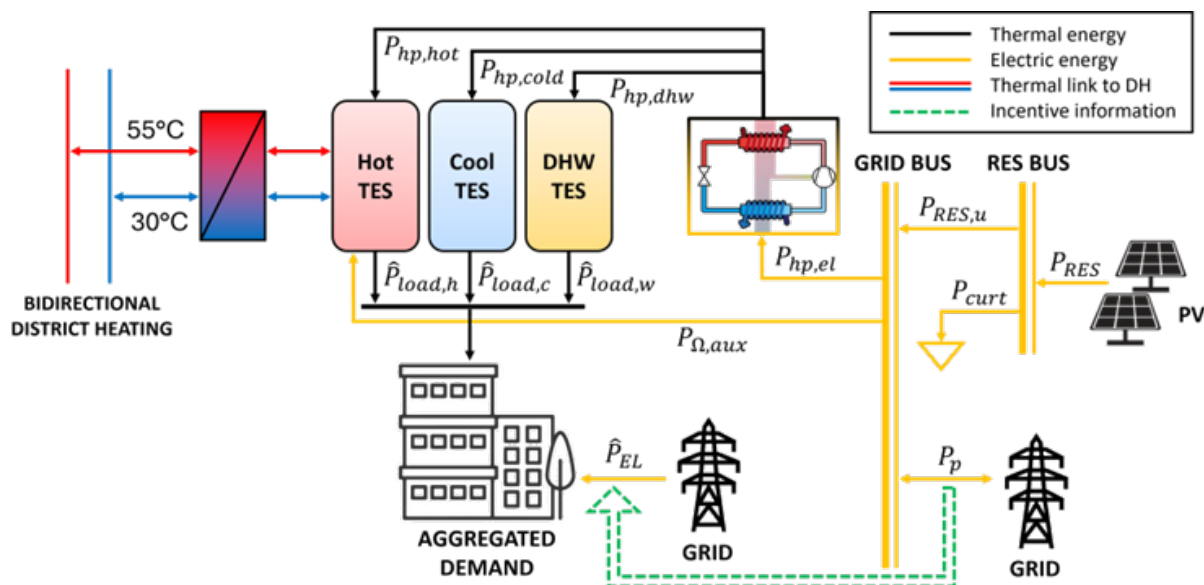


Figura 14 - Schema della configurazione AUC condominiale simulata in Matlab/Simulink, collegata alla rete di teleriscaldamento tramite una sottostazione bidirezionale. Accumulo Acqua Calda Sanitaria (DHW TES): 2,5 m³; Accumulo Caldo/Freddo: 15 m³ (Hot/Cool TES); Pompa di calore (46kWt freddo, 70kWt caldo).

Con l'obiettivo di massimizzare il ricavo associato alla vendita e all'acquisto di energia dalla rete, garantendo che qualsiasi domanda energetica venga sempre soddisfatta, sono stati sviluppati modelli di ottimizzazione matematica applicati al caso studio in esame⁸.

Si riportano in Figura 15 e in Figura 16 i risultati della simulazione annuale della configurazione AUC, applicando le logiche di ottimizzazione descritte.

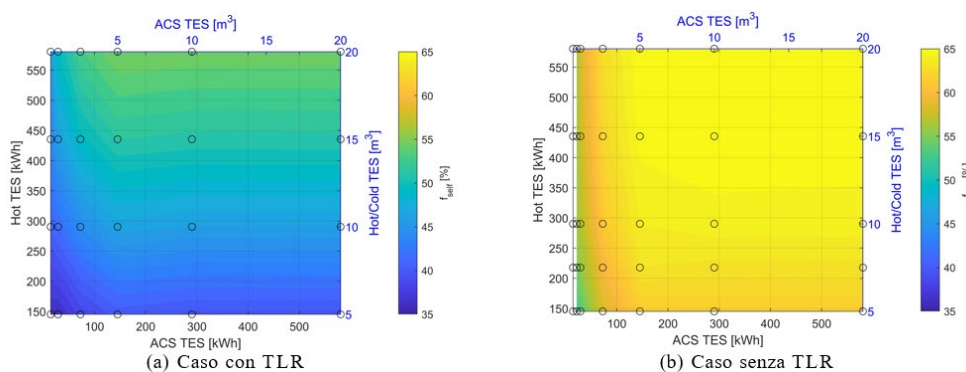


Figura 15 - Analisi di sensibilità, al variare della taglia dei TES (Thermal Energy Storage), sull'autosufficienza totale per la configurazione AUC condominiale in oggetto, con TLR (a) e senza TLR (b).

⁸ I modelli utilizzati sono basati sui seguenti dati:

- dimensioni, efficienza, limiti di potenza ed energia di ogni unità dispacciabile (sia un sistema di conversione energetica che di accumulo);
- curva di produzione di energia rinnovabile;
- domanda di energia elettrica e termica dipendente dal tempo;
- prezzo variabile nel tempo per la cessione e il prelievo di energia dalla rete.

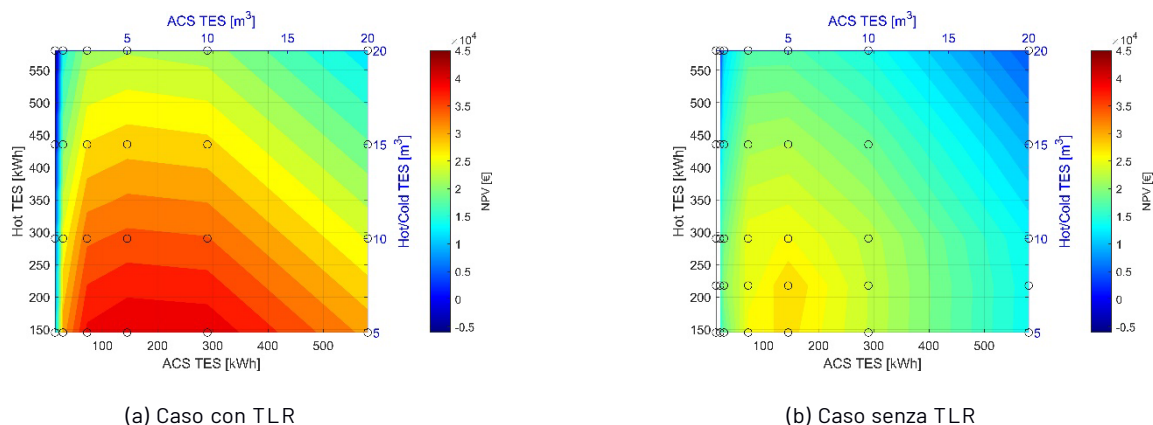


Figura 16 - Net Present Value per un sistema virtualmente connesso, con TLR (a) e senza TLR (b), in uno scenario di autoconsumo virtuale, al variare della taglia di TES.

Si riportano di seguito i principali risultati ottenuti dalla simulazione dello schema di Figura 14:

- Aumento dell'energia termica prodotta dalla PdC e dei ricavi dalla vendita sulla rete TLR⁹.
- Da un'analisi di sensibilità sul dimensionamento degli accumuli termici, il valore massimo di NPV risulta superiore nel caso con TLR, passando da 25 k€ a 40 k€ (Figura 16). Il massimo valore si ottiene per piccoli accumuli termici, 5m³ sia per caldo/freddo che ACS. Quando la rete TLR-STB è collegata all'accumulo termico, la dimensione ottimale di quest'ultimo diminuisce poiché tale rete fornisce un servizio assimilabile ad un serbatoio termico.
- Le logiche di ottimizzazione applicate alle simulazioni, favorendo i ricavi economici, hanno determinato una riduzione del coefficiente di autosufficienza, come riportato in Figura 15¹⁰.

7.1.4 Integrazione in modalità hardware-in-the-loop tra sistema S.A.P.I.EN.T.E. e sottostazione termica bidirezionale sperimentale

Sono state verificate sperimentalmente le reali prestazioni ottenibili dall'integrazione del sistema S.A.P.I.EN.T.E. del C.R. ENEA di Casaccia con la sottostazione termica bidirezionale (STB), collocata presso il laboratorio Energy Exchange di Eurac Research a Bolzano. Per realizzare la suddetta connessione è stata implementata una innovativa comunicazione hardware in the loop riuscendo a mettere in comunicazione in tempo reale i due impianti

⁹ Nel caso simulato, applicando il dimensionamento citato per gli accumuli, l'energia termica prodotta dalla pompa di calore aumenta rispetto al caso senza TLR e il 16% dell'energia prodotta annualmente viene venduta sulla rete TLR bidirezionale, generando ricavi aggiuntivi. L'energia termica che viene comprata sulla rete TLR ha valore trascurabile (0,1 MWh/y) rispetto a quella venduta, pari a 10-90 MWh/y a seconda delle taglie degli accumuli termici, scaturendo in un bilancio positivo in termini di scambi energetici.

¹⁰ Si segnala, che, da un'analisi di sensibilità effettuata sul dimensionamento degli accumuli, con o senza TLR, è risultato che l'autosufficienza in presenza di TLR può essere inferiore rispetto al caso senza TLR, a causa di una maggiore richiesta di energia elettrica prelevata dalla rete da parte della pompa di calore, per essere convertita in energia termica rivendibile sulla rete TLR. Questo processo è innescato dall'algoritmo di gestione, basato sull'ottimizzazione dei guadagni.

sperimentali secondo lo schema di principio di Figura 17 e lo schema impiantistico di dettaglio riportato in Figura 18.

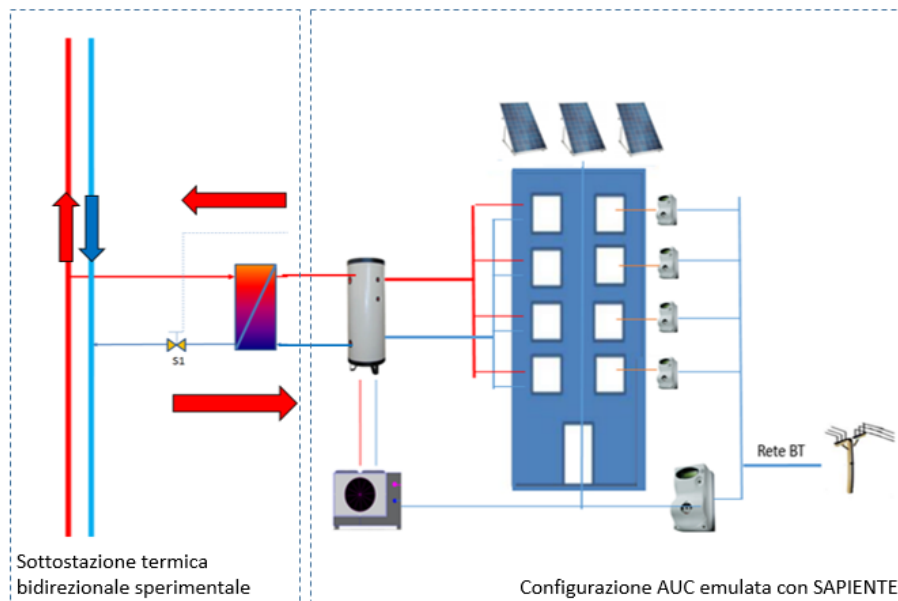


Figura 17: Schema semplificato connessione hardware in the loop: sistema SAPIENTE (C.R ENEA Casaccia) – Sottostazione termica bidirezionale (Bolzano)

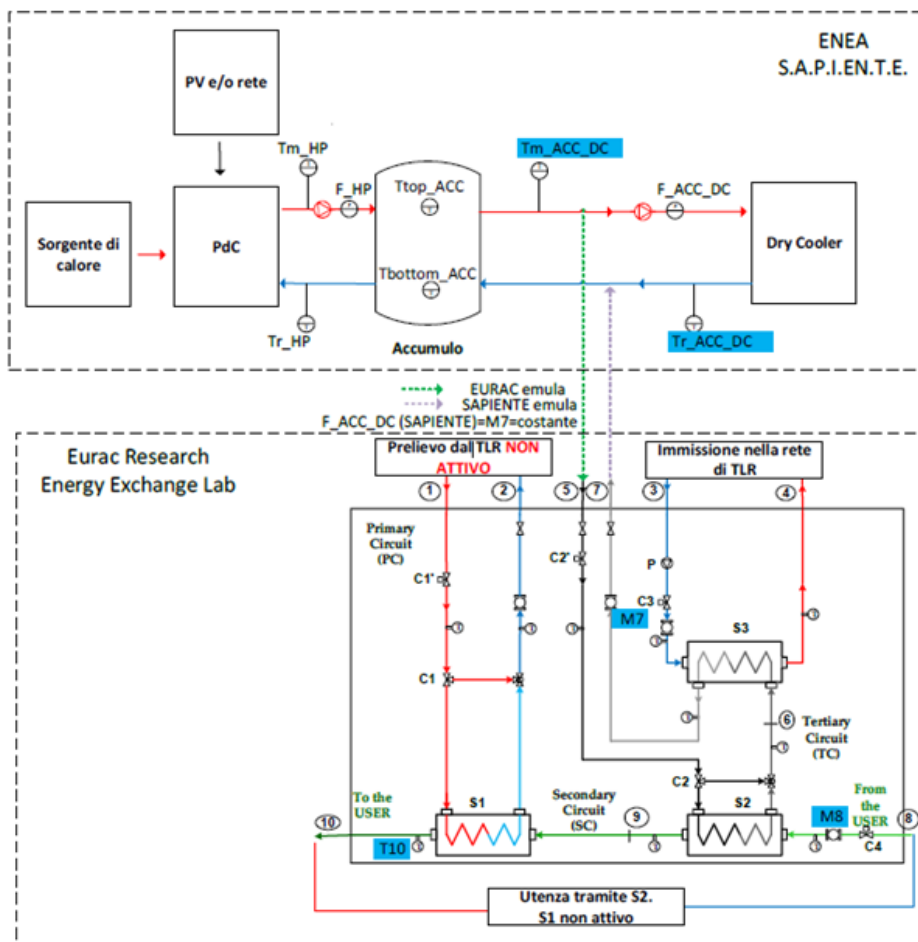


Figura 18 - Schema accoppiamento Energy Exchange lab/sottostazione e S.A.P.I.EN.T.E.

Come indicato in Figura 18 il punto di collegamento virtuale tra i due sistemi è rappresentato dalle linee tratteggiate: il secondario dell'accumulo termico di S.A.P.I.EN.T.E. (lato Dry-Cooler) è connesso con lo scambiatore S2 della STB¹¹.

Il PLC di S.A.P.I.EN.T.E., tramite protocollo TCP/IP, invia alla sottostazione termica di Bolzano il valore di temperatura in uscita dall'accumulo ($T_{m_ACC_DC}$). Questo valore è riprodotto nel laboratorio di Bolzano con l'utilizzo di una caldaia modulante in ingresso allo scambiatore S2 della STB.

Il valore di temperatura di ritorno dalla STB (T_7 in uscita dallo scambiatore S3) viene riprodotto in ingresso all'accumulo di S.A.P.I.EN.T.E. modulando con un PID la ventola del dry cooler. (il PID che modula la ventola ha in ingresso la temperatura T_7).

Per l'esecuzione della presente attività sperimentale sono stati utilizzati due principali controlli implementati in S.A.P.I.EN.T.E. i) logica PtH per gestire la pompa di calore in modalità inseguimento FV (da 12 kW); ii) PID applicato al dry cooler per riprodurre in tempo reale il carico termico (Figura 19) e la potenza termica immessa in rete TLR (Figura 20).

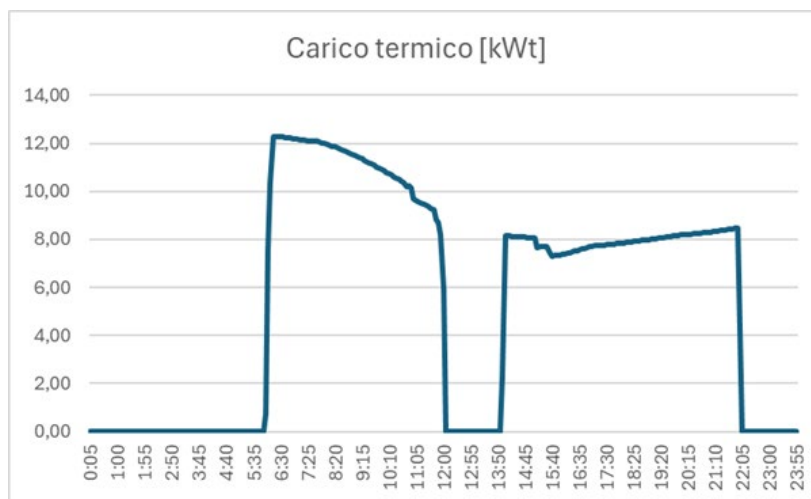


Figura 19 - Carico termico emulato al secondario dello scambiatore S2 e dal Dry-cooler

Le prove sperimentali sono state condotte secondo i seguenti tre scenari:

- Prova tipo 1: sola immissione in rete di teleriscaldamento: la PDC segue la produzione FV;
- Prova tipo 2: solo carico termico (Figura 19): la PDC soddisfa il carico termico senza immissione in rete;
- Prova tipo 3: soluzione mista: soddisfatto il carico termico (Figura 19); il surplus immesso nella rete TLR.

In particolare, si riportano in Figura 20, a titolo di esempio, i risultati di una giornata di "prova tipo 3".

¹¹ Per approfondimenti sulla sottostazione vedere i report ENEA RdS/PTR2019/057 e RdS/PTR2020/144.

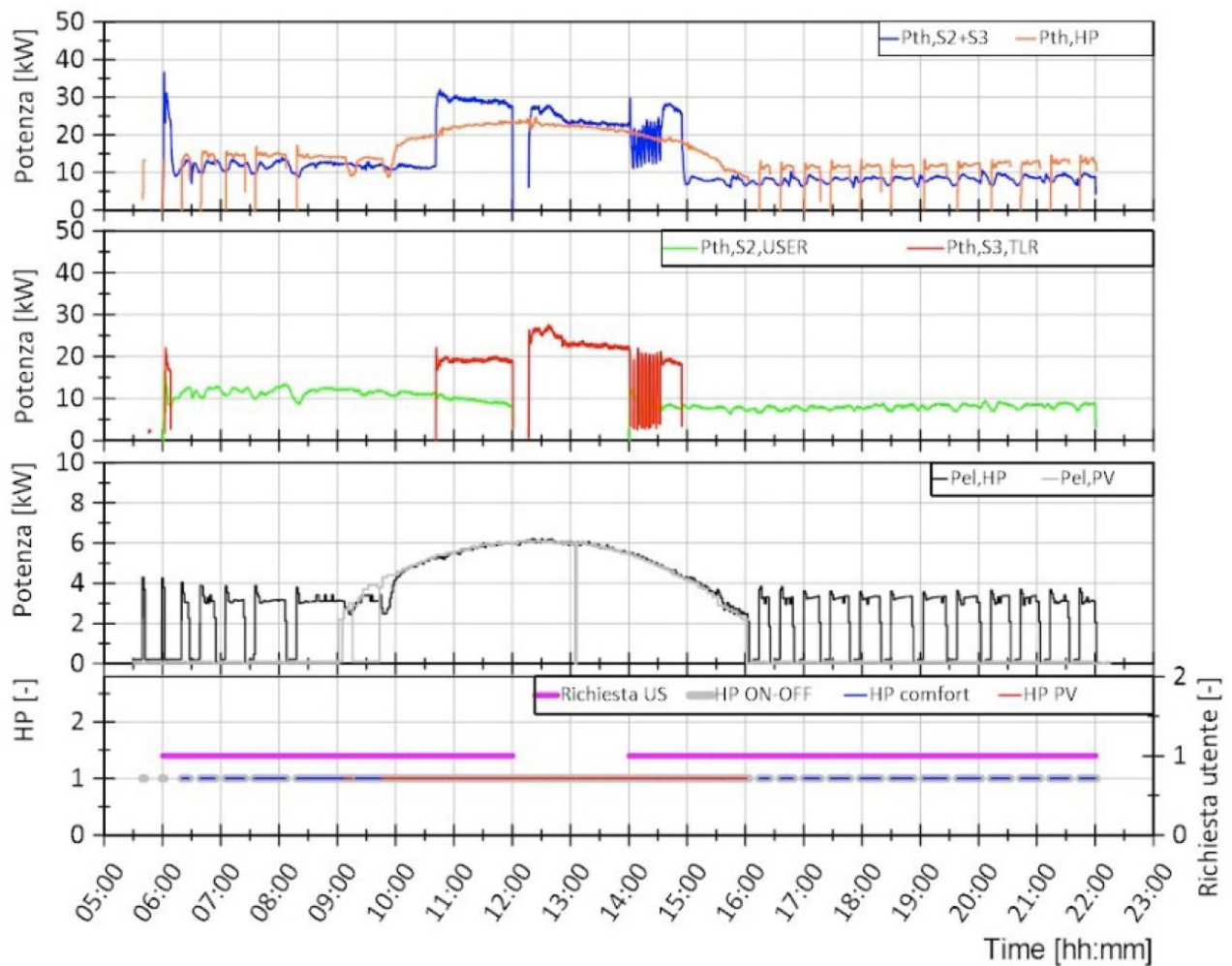


Figura 20 - Prova tipo 3, giorno invernale. Grafico superiore: andamento della potenza termica in uscita dalla PdC ($P_{th,HP}$, arancione) e in ingresso allo scambiatore S2 della sottostazione ($P_{th,S2+S3}$, blu). Grafico medio superiore: andamento della potenza termica ceduta all'utenza dallo scambiatore S2 ($P_{th,S2,USER}$, verde) e ceduto alla rete di TLR dallo scambiatore S3 ($P_{th,S3,TLR}$, rosso). Grafico medio inferiore: andamento della potenza elettrica assorbita dalla PdC ($P_{el,HP}$, nero) e prodotta dal FV ($P_{el,PV}$, grigio). Grafico inferiore: segnale di richiesta termica utente (Richiesta US, magenta), accensione PdC (HP ON-OFF, grigio), funzionamento PdC in modalità comfort (HP comfort, blu) e inseguimento FV (HP PV, rosso).

Dai grafici presenti in Figura 15 si nota: i) negli intervalli orari 6 - 9:30 e 16 - 22, la PdC ha funzionato in modalità comfort, garantendo nell'accumulo la temperatura minima (43°C). ii) Quando la potenza prodotta da FV supera la potenza minima di funzionamento della PdC, si avvia la modalità ad inseguimento PtH (assorbimento PdC = produzione FV); iii) quando la temperatura nell'accumulo supera i 45°C , si attiva lo scambio bidirezionale (dalle 10 alle 16), immettendo in rete la potenza termica in surplus rispetto al carico.

Come si osserva da Figura 20, grazie alla STB la temperatura dell'accumulo rimane sotto la soglia di spegnimento della PdC (52°C), consentendo alla stessa di funzionare ininterrottamente in modalità PtH e di raggiungere un valore di autoconsumo prossimo al 100% (Tabella 2-giorno 10).

La sintesi dei risultati delle prove sperimentali corrispondenti a sette giornate di funzionamento è riportata in Tabella 2.

Tabella 2 – Prove sperimentali connessione hardware in the loop SAPIENTE – sottostazione termica bidirezionale: principali flussi energetici giornalieri e indicatori chiave.¹² per 7 giorni di funzionamento.

Giorno		2	3	4	8	9	10	11
Profilo PV		Inverno	Autunno	Estate	Inverno	Inverno	Inverno	Autunno
Carico/immissione TLR		No/Si	No/Si	No/Si	Si/No	Si/No	Si/Si	Si/Si
Eel,PdC	kWh	34.6	54.0	63.3	33.3	34.0	53.4	54.9
Eth,PdC (Eth,ACC in)	kWh	140.5	179.5	223.7	130.8	126.9	206.5	197.8
Eth,ACC out (Eth,DC)	kWh	139.9	177.2	230.4	130.1	127.6	210.0	201.0
Eth,sub in	kWh	140.6	178.7	232.9	131.7	130.6	214.4	201.8
Eth,user (S2)	kWh	0.0	0.0	0.0	129.1	127.8	131.1	127.7
Eth,PdC to DHN (S3)	kWh	139.0	175.6	229.5	0.0	0.0	79.3	70.6
Eel,PdC comfort	kWh	0.0	0.0	0.0	19.6	20.2	20.5	21.2
Eth,PdC comfort	kWh	0.0	0.0	1.1	80.9	79.3	80.2	82.1
Eel,PdC,PV	kWh	34.6	54.0	63.3	12.2	12.7	31.9	31.0
Eth,PdC,PV	kWh	140.5	179.5	223.7	42.3	42.2	122.5	104.4
Eel,PV	kWh	34.3	53.8	62.8	34.3	34.3	34.3	53.8
Fattore accoppiamento Eurac/S.A.P.I.EN.T.E	%	99%	99%	99%	99%	98%	98%	100%
Sc,el	%	101%	100%	101%	35%	37%	93%	58%
Sc,th	%	0%	0%	0%	100%	100%	35%	32%
Ss,th	%	0%	0%	0%	33%	33%	33%	26%

I dati in Tabella 2 portano ad alcune considerazioni:

- Per i giorni con sola immissione (2, 3 e 4) tutta l'energia disponibile da FV viene consumata dalla pompa di calore per produrre energia termica da immettere in rete tramite STB, ottenendo **un valore dell'autoconsumo elettrico del 100%**. L'energia elettrica assorbita dalla pompa di calore di SAPIENTE, gestita in modalità PtH e l'energia termica immessa in rete rispettano l'andamento della produzione da FV;
- Per le giornate invernali (solo immissione giorno 2; solo carico giorno 8; immissione + carico giorno 10), si raggiunge il valore massimo del coefficiente di autoconsumo elettrico (100%) nel caso di sola immissione nella rete di TLR della potenza termica

¹² *Eel,PdC*: energia elettrica totale consumata dalla pompa di calore; *Eel,PdC,PV*: energia elettrica consumata dalla pompa di calore quando alimentata da FV; *Eel,PdC,comfort*: energia elettrica consumata quando funziona in modalità comfort; *Eel PV*: energia elettrica prodotta da FV; *EthPdC,PV*: energia termica prodotta dalla pompa di calore quando alimentata da FV; *Eth,PdC,comfort*: energia termica prodotta dalla pompa di calore in modalità confort; *Eth,PdC,PV*: energia termica prodotta dalla pompa di calore in modalità inseguimento FV; *EthACC,out*: energia termica in uscita dall'accumulo e smaltita dal dry-cooler; *Eth,sub,in*: energia termica in ingresso alla sottostazione; *EUser*: carico termico dell'utilizzatore finale, applicato al lato utente dello scambiatore S2 della sottostazione; *EthPdC to DHN*: energia termica prodotta dalla pompa di calore quando alimentata da FV e immessa nel TLR, valutata al lato TLR dello scambiatore S3 della sottostazione; Fattore di accoppiamento STB/S.A.P.I.EN.T.E. = $\frac{Eth_{ACC,out}}{Eth_{sub,in}}$; Autoconsumo elettrico SC,el = $100 \frac{E_{el,PdC,PV} - E_{el,PdC,comfort}}{E_{el,PV}}$; Autoconsumo termico SC,th = $100 \frac{E_{th,PdC,PV} - E_{th,PdC,to\ DHN}}{E_{th,PdC,PV}}$; Autosufficienza termica SS,th = $100 \frac{E_{th,PdC,PV} - E_{th,PdC,to\ DHN}}{E_{user}}$

prodotta (giorno 2), poiché si riesce a massimizzare l'utilizzo del FV con la logica PtH applicata alla PdC. Il valore più basso per il coefficiente di autoconsumo, pari al 35%, corrisponde alla prova con solo carico termico (giorno 8); infatti in questo caso, non essendo prevista la rete di TLR come accumulo termico, non è possibile gestire la PdC in modalità PtH per tutta la durata di funzionamento del FV (la temperatura dell'accumulo termico locale raggiunge presto il valore massimo tecnico, facendo spegnere la PdC).

Nella giornata di prova tipo 10 (sia carico termico che immissione in rete TLR), si ottiene un coefficiente di autoconsumo elettrico molto alto (circa 93%) e un coefficiente di autosufficienza termico basso (33%); considerando un regime di scambio sul posto termico con la TLR, (l'energia immessa nella rete di TLR viene prelevata nelle ore di non funzionamento FV) anche l'autosufficienza termica potrebbe raggiungere un valore prossimo al 100%.

7.1.5 Sistema hardware e software per l'implementazione di logiche tipo Demand Side Management ADLAS

Proseguendo le attività avviate nella LA4.1, è stato realizzato il sistema ADLAS¹³, (architettura riportata in Figura 21) implementato su piattaforma Raspberry Pi 5¹⁴ e basato su Digital Twin (DT), per la gestione avanzata, il monitoraggio in tempo reale e l'ottimizzazione della rete S.A.P.I.EN.T.E.¹⁵ attraverso le logiche di Demand Side Management (DSM) individuate nella precedente annualità.

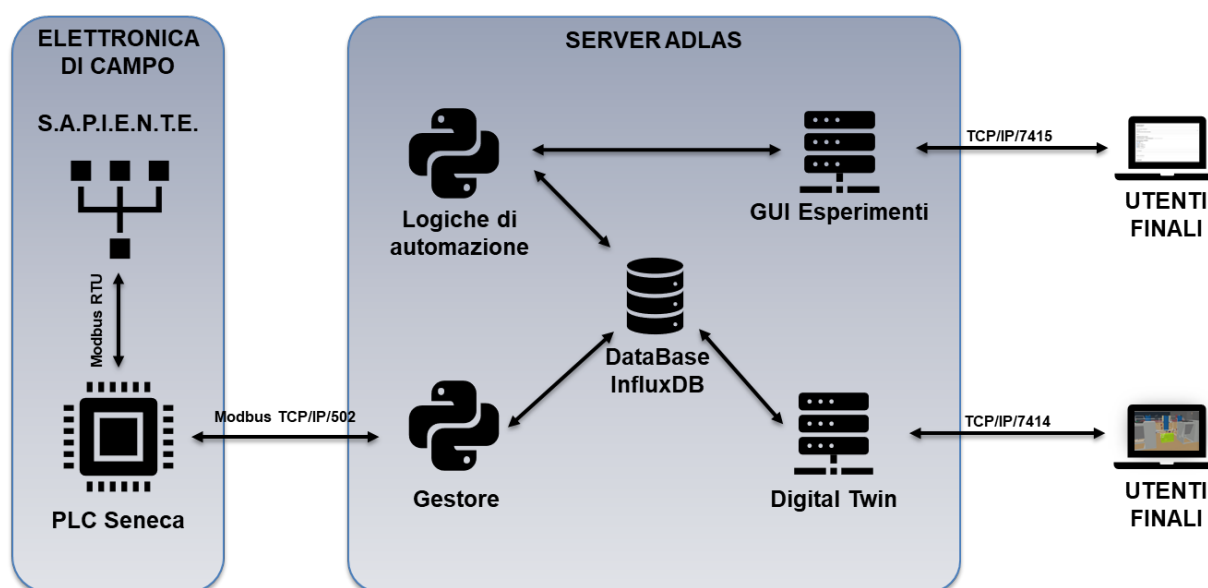


Figura 21 - Architettura completa del sistema ADLAS

¹³ "Automatized DSM-DR Logics Application System"

¹⁴ Il sistema è dotato di: Processore quad-core ARM Cortex-A76, RAM 8GB, archiviazione microSD da 64GB, connettività: Wi-Fi, Bluetooth, USB, HDMI, LAN, integrazione con SSD SATA/M.2 per future espansioni. Il server ospita più container Docker che gestiscono: Digital Twin per la visualizzazione della rete in 3D; Database temporale (InfluxDB) per la storicizzazione dei dati; Moduli di automazione per il controllo dei dispositivi di campo.

¹⁵ I dati vengono raccolti dalla rete Modbus RTU del sistema S.A.P.I.EN.T.E., processati dal relativo PLC e resi disponibili per ADLAS tramite protocollo Modbus TCP/IP sulla LAN della struttura.

Il DT, basato su un modello BIM (Building Information Modeling) della rete sperimentale S.A.P.I.E.N.T.E.¹⁶, fornisce una rappresentazione 3D interattiva del sistema¹⁷ (Figura 22, Figura 23), con dati aggiornati in tempo reale come: temperature¹⁸, potenze elettriche e termiche, flussi e stati operativi; gli utenti possono navigare nella rete, visualizzare dati storici e verificare anomalie operative¹⁹ (Figura 23).

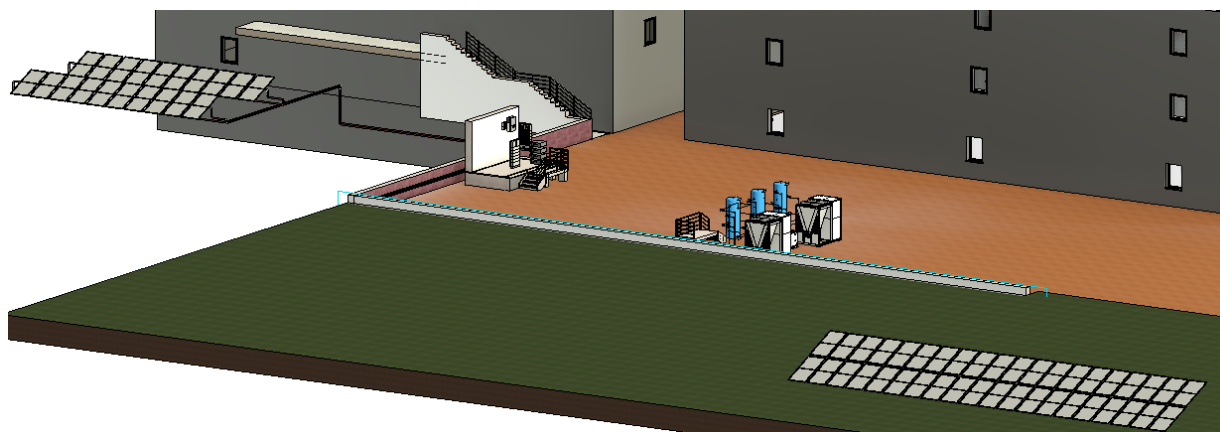


Figura 22 - Overview modello BIM impianto S.A.P.I.E.N.T.E.

¹⁶ Il modello BIM è stato sviluppato utilizzando Autodesk Revit e rappresenta l'intera infrastruttura, sia nella componente elettrica che termica. Include tutti i componenti fisici e digitali della rete, come tubazioni, dispositivi di generazione, accumuli e circuiti elettrici. È stato esportato in formato IFC (Industry Foundation Classes), uno standard open-source che garantisce compatibilità con diversi software di progettazione e simulazione. Integra parametri di comunicazione per ogni componente, permettendo di associare direttamente i dati operativi ai modelli 3D senza necessità di input manuali aggiuntivi.

¹⁷ Il sistema gestisce tre storage termici: ACS (Acqua Calda Sanitaria): 95°C max; ACC1 e ACC2 (Accumuli Termici): 70°C max; Temperatura minima per considerare uno storage scarico: 45°C;

L'algoritmo di controllo regola il sistema per minimizzare lo scambio di potenza con la rete, intervenendo su: Pompa di calore (PdC) - Output termico max 55°C, Consumo max 13 kW; Supercapacitori - Potenza di carica/scarica max 9 kW; Dry Cooler - regolazione tramite PID per emulare il carico termico richiesto; Resistenze di boost.

¹⁸ Colorazione delle tubazioni in base al calore del fluido, es. blu per basse temperature, rosso per alte

¹⁹ La piattaforma consente di navigare nel tempo, visualizzando lo storico delle operazioni della rete grazie all'integrazione con il database InfluxDB, che registra in maniera univoca ogni dato correlandolo al momento di acquisizione. Questo approccio migliora la manutenzione predittiva e la gestione delle anomalie, fornendo una visione immediata dello stato del sistema.

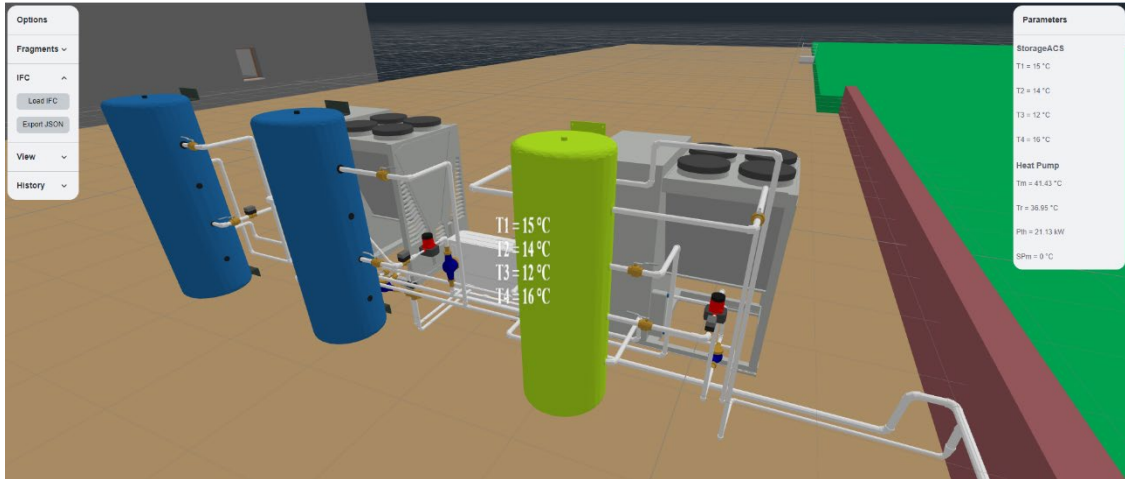


Figura 23 - Digital Twin - parametri accumulo ACS in tempo reale. Cliccando su "History" e poi "Slider" è possibile accedere a un selettore temporale nella parte bassa dello schermo, che permette di visualizzare istantanee passate del sistema, utile per trovare eventuali anomalie passate o semplicemente per verificare il corretto funzionamento durante degli esperimenti.

L'automazione delle dinamiche DSM-DR è basata sulle seguenti due modalità operative:

- Sovraproduzione: quando la generazione FV supera il consumo, la potenza in eccesso viene immagazzinata negli accumuli termici tramite la PdC o nei SC (Tabella 3).
- Sovraconsumo: quando il sistema S.A.P.I.EN.T.E. necessita di più energia rispetto alla produzione FV, gli accumuli vengono scaricati per compensare il deficit senza prelevare dalla rete esterna (Tabella 4).

Tabella 3 - Logiche dell'automazione generale - Sovraproduzione

	P poc	P s.cap	Priorità carica	SOCs.cap	Tacc	Ppdc-Ppoc	P pdc	R acc
S O V R A P R O D U Z I O N E	<-9kW	-9kW	Elettrico	≥ SOCmax	≥T pdc,max	OFF	OFF	+1
					<T pdc,max	< P pdc, mant	P pdc, mant	-1
					<T pdc,max	≥ P pdc, mant, < P pdc,max	Ppdc-Ppoc	-1
			≥T pdc,max		≥ P pdc,max	P pdc,max	+1	
			<T pdc,max		< P pdc, mant	P pdc, mant	-1	
			<T pdc,max		≥ P pdc, mant, < P pdc,max	Ppdc-Ppoc	-1	
	>-9kW, <0	P poc	Elettrico	< SOCmax	≥T pdc,max	OFF	OFF	+1
					<T pdc,max	< P pdc, mant	P pdc, mant	-1
					<T pdc,max	≥ P pdc, mant, < P pdc,max	Ppdc-Ppoc	-1
			≥T pdc,max		≥ P pdc,max	P pdc,max	+1	
			<T pdc,max		< P pdc, mant	P pdc, mant	-1	
			<T pdc,max		≥ P pdc, mant, < P pdc,max	Ppdc-Ppoc	-1	
>-9kW, <0	P poc	Termico	≥ SOCmax	≥T pdc,max	OFF	OFF	+1	
				<T pdc,max	< P pdc, mant	P pdc, mant	-1	
				<T pdc,max	≥ P pdc, mant, < P pdc,max	P pdc-P poc	-1	
		≥T pdc,max		≥ P pdc,max	P pdc,max	+1		
		<T pdc,max		< P pdc, mant	P pdc, mant	-1		
		<T pdc,max		≥ P pdc, mant, < P pdc,max	P pdc-P poc	-1		
>-9kW, <0	P poc	Termico	< SOCmax	≥T pdc,max	OFF	OFF	+1	
				<T pdc,max	< P pdc, mant	P pdc, mant	-1	
				<T pdc,max	≥ P pdc, mant, < P pdc,max	P pdc-P poc	-1	
		≥T pdc,max		≥ P pdc,max	P pdc,max	+1		
		<T pdc,max		< P pdc, mant	P pdc, mant	-1		
		<T pdc,max		≥ P pdc, mant, < P pdc,max	P pdc-P poc	-1		

Tabella 4 - Logiche dell'automazione generale - Sovraconsumo

SO VR RA CO NS UM O	P poc	P s.cap	Priorità scarica	SOCs.cap	Tacc	Ppdc-Ppoc	P pdc	R acc	
	>0, <9kW	P poc	Elettrico	≤ SOCmin	≤ T min	> P pdc, mant	P pdc, mant	-1	
						>T min	≥ 0, ≤ P pdc, mant		Ppdc-Ppoc
							< 0		OFF
							> SOCmin		P pdc, mant
							≤ T min		P pdc, mant
						Termico	≤ T min		> P pdc, mant
	>T min	≥ 0, ≤ P pdc, mant	Ppdc-Ppoc						
		< 0	OFF						
	>9kW	9 kW		≤ T min	> P pdc, mant			P pdc, mant	
>T min					≥ 0, ≤ P pdc, mant	Ppdc-Ppoc			
					< 0	OFF			

In entrambe le modalità (sovrapproduzione e sovraconsumo), le resistenze di boost vengono attivate o disattivate per gestire le temperature degli accumuli, garantendo che i carichi termici siano sempre soddisfatti.

ADLAS è dotato di un'interfaccia web (Figura 24) che consente di configurare e testare scenari energetici, caricando profili CSV per simulare diverse condizioni di carico.²⁰

Figura 24 – ADLAS: interfaccia di gestione del sistema per il settaggio delle prove sperimentali

Il sistema è predisposto per future implementazioni, come l'integrazione di profili concordati con il distributore per migliorare la risposta della microrete in ottica di demand response. Verificati i necessari protocolli di comunicazione, ADLAS è stato installato presso il centro di controllo del sistema S.A.P.I.EN.T.E. dell C.R. ENEA di Casaccia (Figura 20).

²⁰ Gli utenti possono: Selezionare quali impianti di generazione includere o escludere; Impostare priorità di carica/scarica tra accumuli termici ed elettrici; Definire soglie operative per componenti critici come pompe e supercondensatori; Analizzare dati storici e visualizzare trend per ottimizzare la gestione.

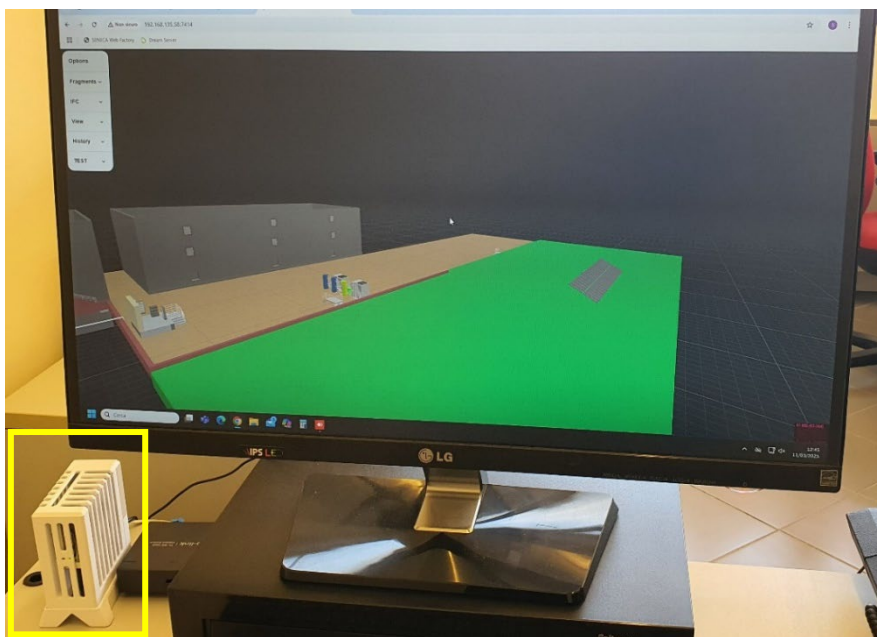


Figura 25 - Sistema ADLAS (case bianco in basso a sinistra) posto in opera presso il C.R. Casaccia.

Sono state realizzate prove iniziali di funzionamento del prototipo ADLAS (Figura 26), al fine di testarne le funzionalità in configurazioni AUC condominiale.

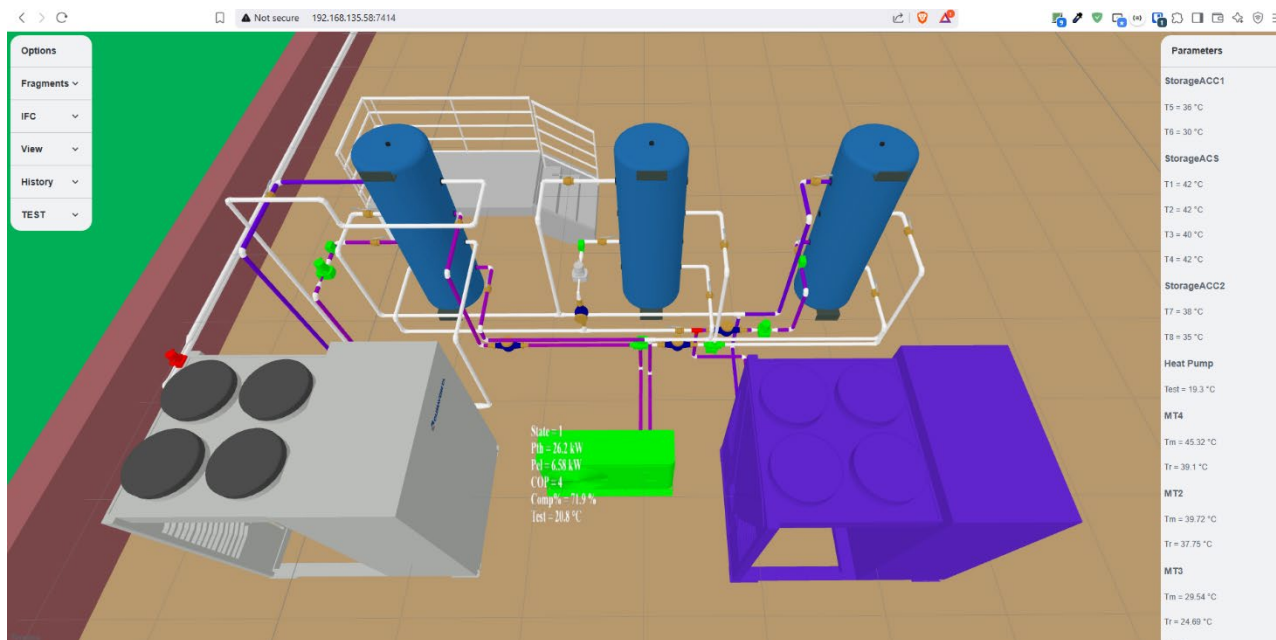


Figura 26 - Sistema ADLAS posto in opera attivando la PDC per alimentare l'accumulo ACS e imponendo un carico termico attraverso i Dry Cooler. Le tubazioni attive sono colorate.

Dalle prove effettuate è emerso un perfetto interfacciamento di ADLAS con il sistema S.A.P.I.EN.T.E. In particolare si è riusciti a: i) monitorare tutti i parametri elettrici (Figura 27) e termici (da Figura 28 a Figura 30); ii) imporre profili di carico termico e ACS (Figura 29) pilotando

i drycooler; iii) attivare dinamiche DSM secondo le logiche di Tabella 3 e Tabella 4, applicate alla PdC (Figura 28) per inseguire la produzione FV e mantenere il comfort termico (Figura 30).

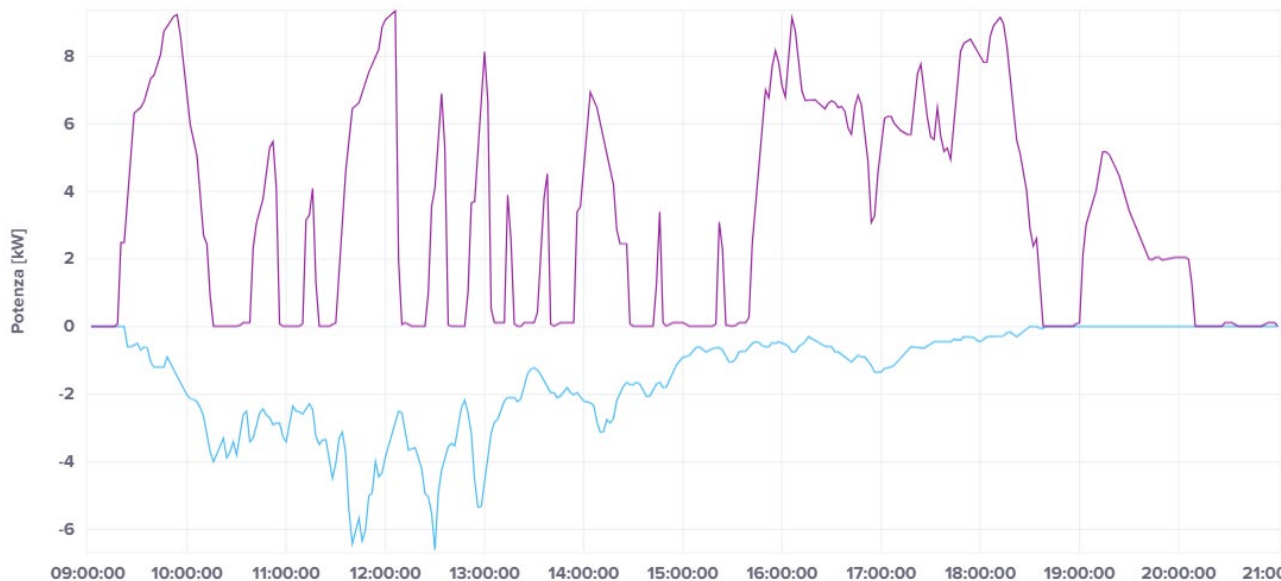


Figura 27 – Prova con sistema ADLAS applicato all’impianto S.A.P.I.EN.T.E.: Andamento temporale della produzione di energia elettrica da FV (cura celeste - segno delle ordinate negativo) e dell’assorbimento elettrico della pompa di calore (curva fucsia).



Figura 28 – Prova con ADLAS: andamento temporale della potenza termica prodotta dalla PdC (curva arancione - kWt), della potenza elettrica assorbita dalla PdC (curva blu - kW) e del relativo COP (curva celeste - u.a.).

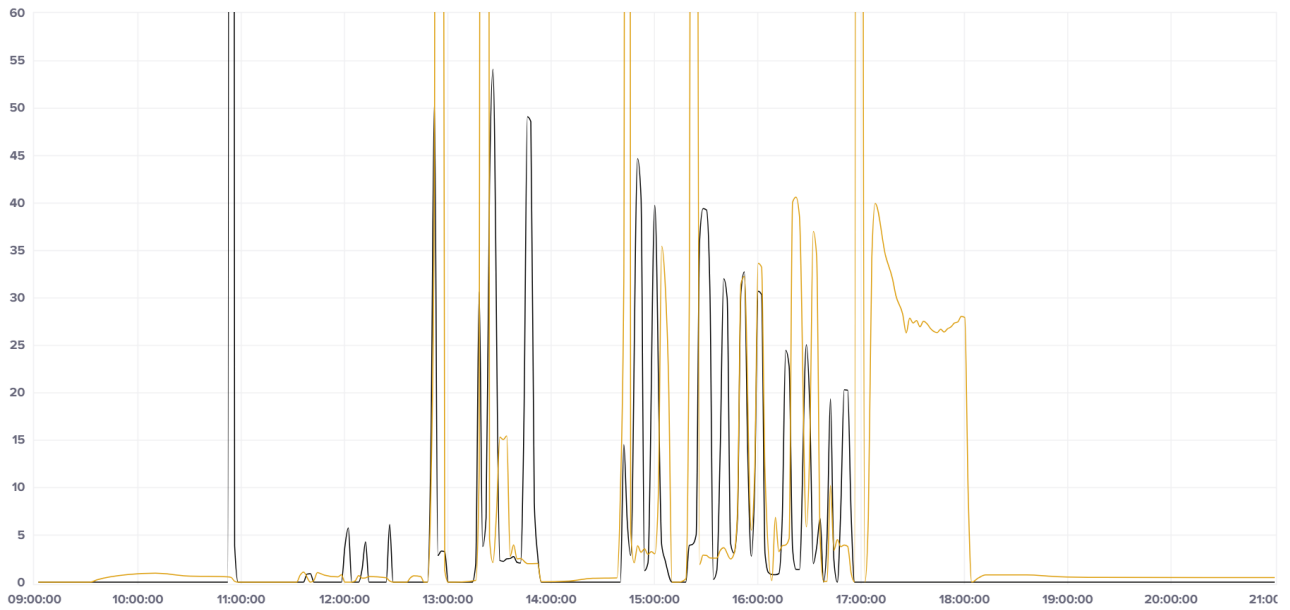


Figura 29 - Prove con sistema ADLAS: andamento temporale dei profili di carico termico (curva scura) e ACS (curva chiara) ottenuti gestendo con ADLAS i relativi dry cooler

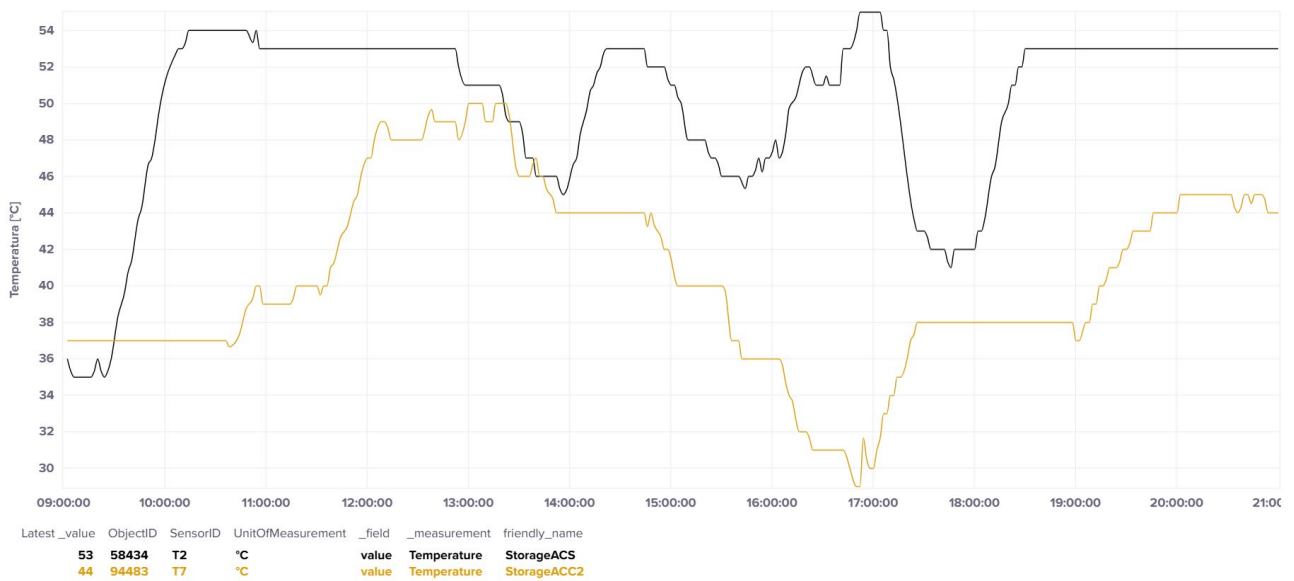


Figura 30 - Prova con ADLAS: andamento temporale della temperatura negli accumuli ACS (curva scura) e ACC (curva chiara) in base ai profili di carico imposti.

7.2 Piattaforma web (EMPOWER) per il monitoraggio dei consumi nei contesti condominiali

7.2.1 Installazione componentistica nuovo condominio: dispositivi di acquisizione e trasmissione dati

Nell'ottica di estendere EMPOWER a nuovi casi studio, nella LA4.1 è stato individuato un nuovo condominio e sono stati selezionati sul mercato i sistemi smart e di trasmissione dati per consentire l'integrazione nella piattaforma web. Tale componentistica è stata installata nella presente LA (Figura 31). In particolare, sono stati forniti agli utenti:

- i dispositivi utente Chain2Gate di Mac Srl;
- i multisensori QuAir della Upsens per il monitoraggio di parametri come temperatura, umidità relativa, CO₂, composti organici volatili e polveri sottili (PM1, PM2.5, PM10)²¹.

Inoltre, sono stati installati:

- un router 4G/LTE connesso a uno switch PoE nel vano contatori e quattro access point alimentati via PoE disposti in modo da realizzare una rete mesh Wi-Fi condominiale (Figura 32);
- due energy meter trifase Wi-Fi per la lettura del contatore di produzione dall'impianto fotovoltaico e del contatore di scambio.

²¹ Agli utenti è stata data l'indicazione di posizionare il multisensore nell'ambiente in cui si trascorre maggior tempo (es. living) e lontano da fonti di calore, in modo da avere rilevazioni più rispondenti alla realtà.

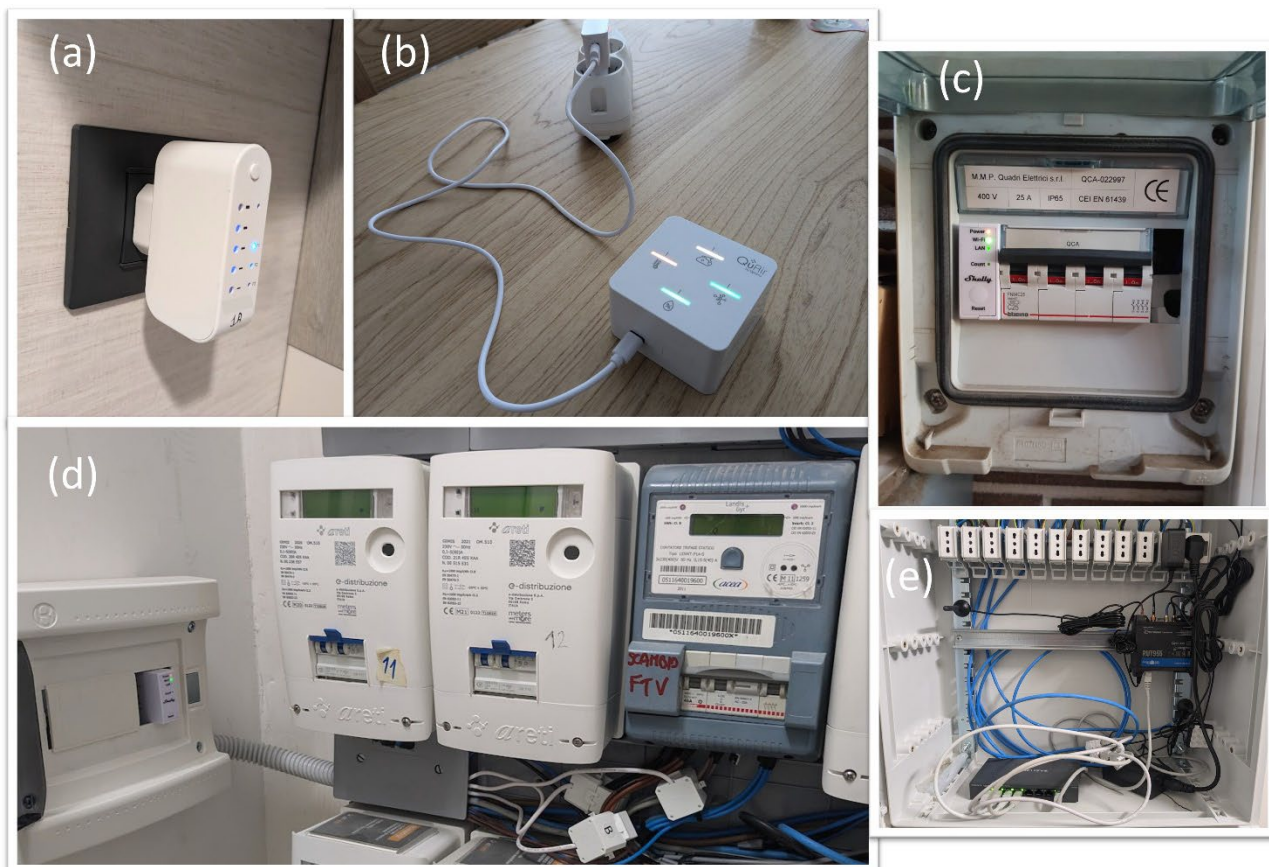


Figura 31 – Componentistica installata nel nuovo condominio integrato in EMPOWER: (a) dispositivo utente per l’acquisizione dei dati di consumo elettrico con indicazione luminosa del livello di potenza assorbita e della fascia oraria; (b) multisensore per la rilevazione dei parametri indoor relativi al comfort termico e alla qualità dell’aria con indicazione luminosa di temperatura, CO₂, VOC e umidità; (c) energy meter installato a valle del contatore di produzione FV; (d) energy meter installato a valle del contatore di scambio; (e) router e switch PoE installato in una cassetta elettrica nel vano contatori.

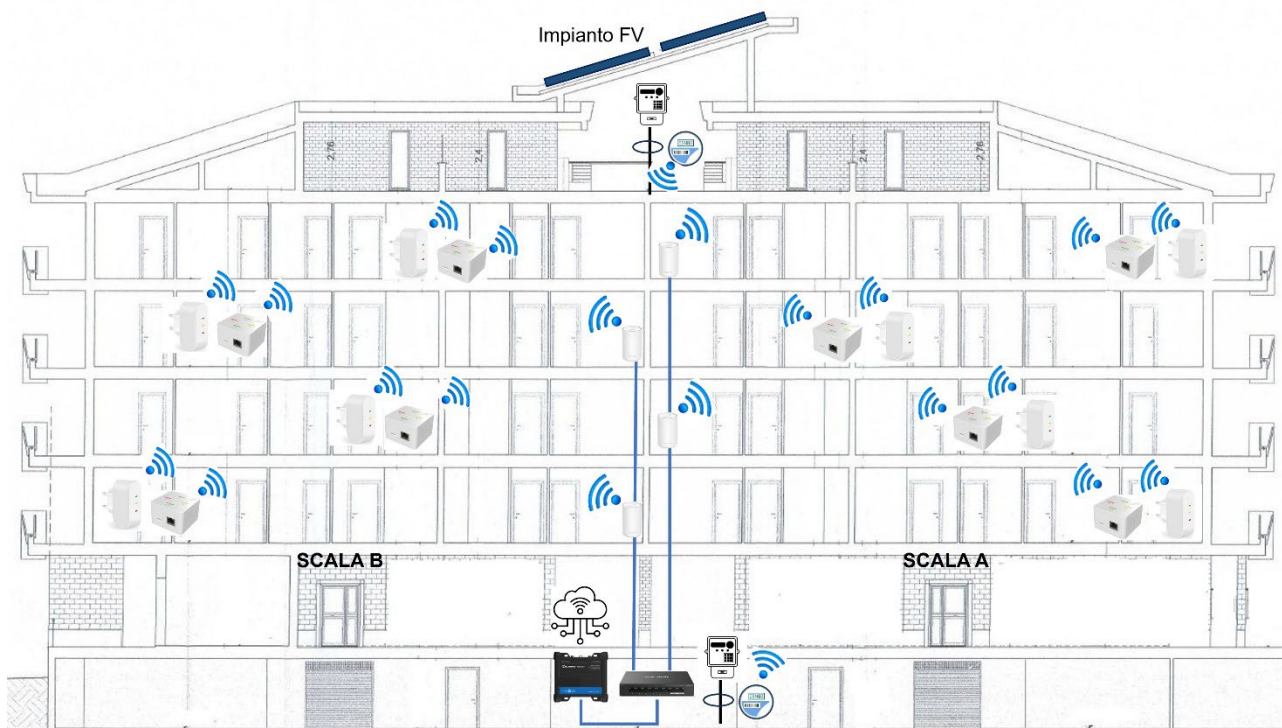


Figura 32 – Schema dell'infrastruttura di comunicazione dati all'interno del condominio inserito in EMPOWER. Lo switch PoE connesso al router 4G/LTE nel vano contatore alimenta quattro access point installati dentro scatole di derivazione nei pianerottoli delle due scale. La Wi-Fi generata acquisisce i dati dagli energy meter del contatore di produzione FV e del contatore di scambio e dai dispositivi utente e sensori nelle singole unità immobiliari.

Per quanto riguarda la lettura dei consumi termici (in kWh) e di ACS (in m³) provenienti dai contatori delle singole unità immobiliari, si è provveduto a sviluppare un parser (Figura 33) che consente al gestore (livello amministratore) di importare in EMPOWER i dati scaricati giornalmente dalla piattaforma cloud della società che gestisce il controllore centralizzato.

- Scarica template
- Importa file
- Verifica file → Database
- Carica file
- Verifica Database → File
- Ricarica pagina

Trascina qui il file che vuoi caricare oppure clicciami per selezionarne uno!
I file ammessi sono: .csv, .BIL, .REP, .rly

Mostra 25 elementi

Copia Excel PDF CSV JSON

Cerca:

ScalaB:- Int.07	24	898	899	1	0,62%	111	111	0	20,00	20,10	0,10	4,00%	0,20	0,20	0,00	0,20	0,20	0,00	
ScalaB:- Int.14	25	8.572	8.572	0		1.426	1.426	0	115,50	115,50	0,00		252,60	252,70	0,10	1,85%	0,20	0,20	0,00
ScalaB:- Int.13	26	6.431	6.431	0		3.162	3.162	0	27,30	27,30	0,00		229,70	229,80	0,10	1,85%	0,20	0,20	0,00
ScalaA:- Int.16B	27	55	55	0		49	49	0	33,90	34,10	0,20	8,00%	234,50	235,10	0,60	11,11%	0,20	0,20	0,00
ScalaB:- Int.15	28	11.956	11.968	12	7,41%	529	529	0	59,30	59,40	0,10	4,00%	404,50	405,10	0,60	11,11%	0,20	0,20	0,00
ScalaB:- Int.04	29	7.274	7.276	2	1,23%	867	867	0	143,30	143,30	0,00		224,00	224,10	0,10	1,85%	0,20	0,20	0,00
ScalaB:- Int.05	30	933	933	0		1.640	1.640	0	25,00	25,00	0,00		81,80	81,80	0,00		0,20	0,20	0,00
ScalaA:- Int.03	31	8.033	8.033	0		1.359	1.359	0	123,20	123,30	0,10	4,00%	301,90	302,00	0,10	1,85%	0,20	0,20	0,00

Figura 33 - Schermata con la procedura guidata per l'importazione dei file .csv contenenti tutti i dati acquisiti dal controllore centralizzato connesso via modbus con i contatori di calore e di portata delle singole unità immobiliari. Tale procedura consente di selezionare solo i dati degli utenti partecipanti (19 appartamenti su 38 totali) e inserirli nei rispettivi database.

7.2.2 Aggiornamento del layout di EMPOWER e implementazione nuovi indicatori

EMPOWER è stato aggiornato rivisitandone grafica e layout al fine di accomodare i dati provenienti dal nuovo condominio e i feedback degli utenti emersi durante gli incontri (aggiungere tabella con feedback). La Figura 34 riporta la grafica della precedente versione di EMPOWER riguardante i dati giornalieri di consumo termico, CO₂ e temperatura, basati sulla visualizzazione di range associati a emoticon.

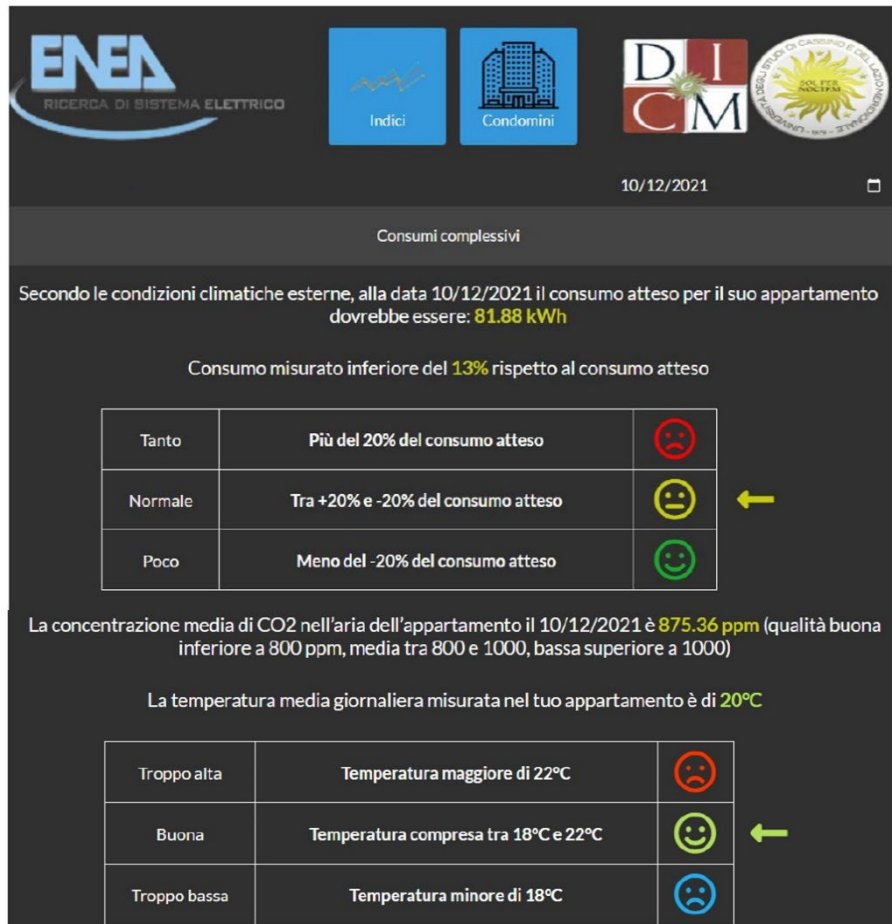


Figura 34 - Screenshot della visualizzazione giornaliera del consumo termico, della CO₂ e della temperatura media implementata nella precedente versione di EMPOWER.

Si è deciso di sostituire tale layout con dei cruscotti contenenti strumenti più immediati per la visualizzazione e comprensione dei dati (ad es. display contatore e tachimetro) con riduzione della parte testuale. La sezione "Home" presenta i seguenti cruscotti: Climatizzazione, ACS, Elettricità, Interno ed Esterno.²²

Come esempio, la Figura 35 mostra il cruscotto "Elettricità" con i dati acquisiti via power line dal dispositivo utente (DU) ed elaborati in modo da ottenere: i) consumo elettrico odierno dalla differenza tra "Lettura precedente" (prima lettura della giornata) e "Lettura attuale" (lettura al momento della visualizzazione) del contatore elettrico dell'unità immobiliare; ii) confronto del consumo della giornata antecedente con un benchmark di consumo tipico per la stessa tipologia di utente; iii) confronto con il consumo medio degli altri condomini partecipanti al progetto.

²² I cruscotti Interno ed Esterno si riferiscono rispettivamente ai parametri ambientali indoor (acquisiti all'interno delle unità immobiliari dal multisensore fornito agli utenti) e outdoor (acquisibili ad es. da centraline meteo installate nell'edificio o presenti nelle vicinanze).



Figura 35 - Cruscotto "Elettricità" di EMPOWER sviluppata per la visualizzazione dei dati provenienti dai dispositivi utente.

La Figura 36 mostra il cruscotto "Interno" che visualizza i parametri indoor divisi per comfort termico (temperatura ed umidità relativa) e qualità dell'aria (CO_2 , $PM_{2.5}$, VOC). Uno specifico algoritmo che si basa sullo standard RESET²³ permette di calcolare l'indice di qualità dell'aria che considera contemporaneamente CO_2 , $PM_{2.5}$ e VOC.

²³ Per approfondimenti <https://www.reset.build/resources/indexes/air>

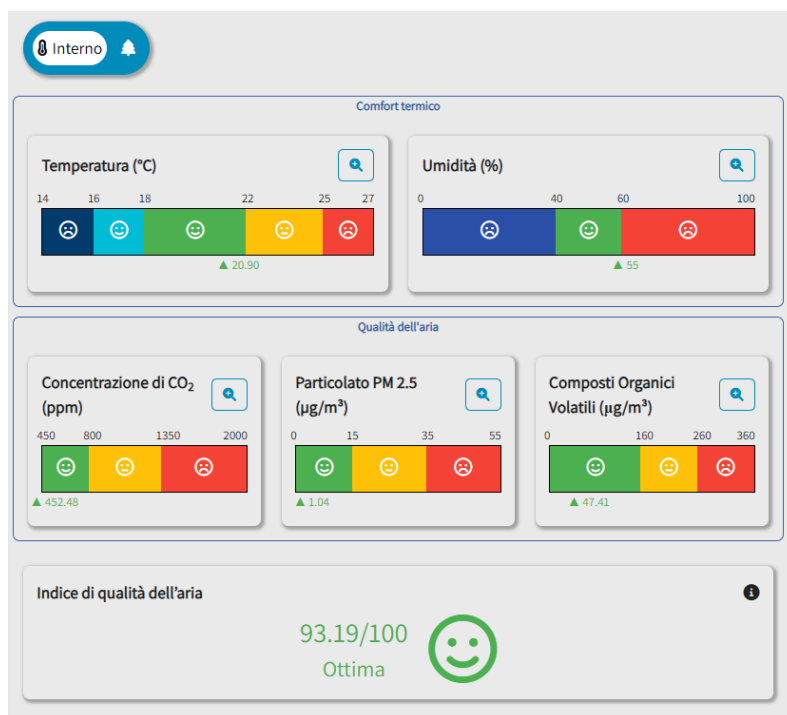


Figura 36 – Cruscotto “Interno” di EMPOWER sviluppato per la visualizzazione dei parametri di comfort termico (temperatura e umidità) e di qualità dell’aria (CO₂, PM2.5, VOC e indice globale)

La ristrutturazione grafica ha previsto, inoltre, la realizzazione di una sezione “Analisi dati” per la visualizzazione dello storico dei parametri acquisiti con la possibilità di filtrarlo secondo diversi periodi (settimana, mese, anno e custom). Figura 37 mostra, come esempio, il consumo storico giornaliero di energia termica di un’unità immobiliare.²⁴

²⁴ La sezione climatizzazione riporta sia i dati dei consumi di riscaldamento sia quelli di raffrescamento a seconda della modalità di funzionamento stagionale dell’impianto centralizzato.

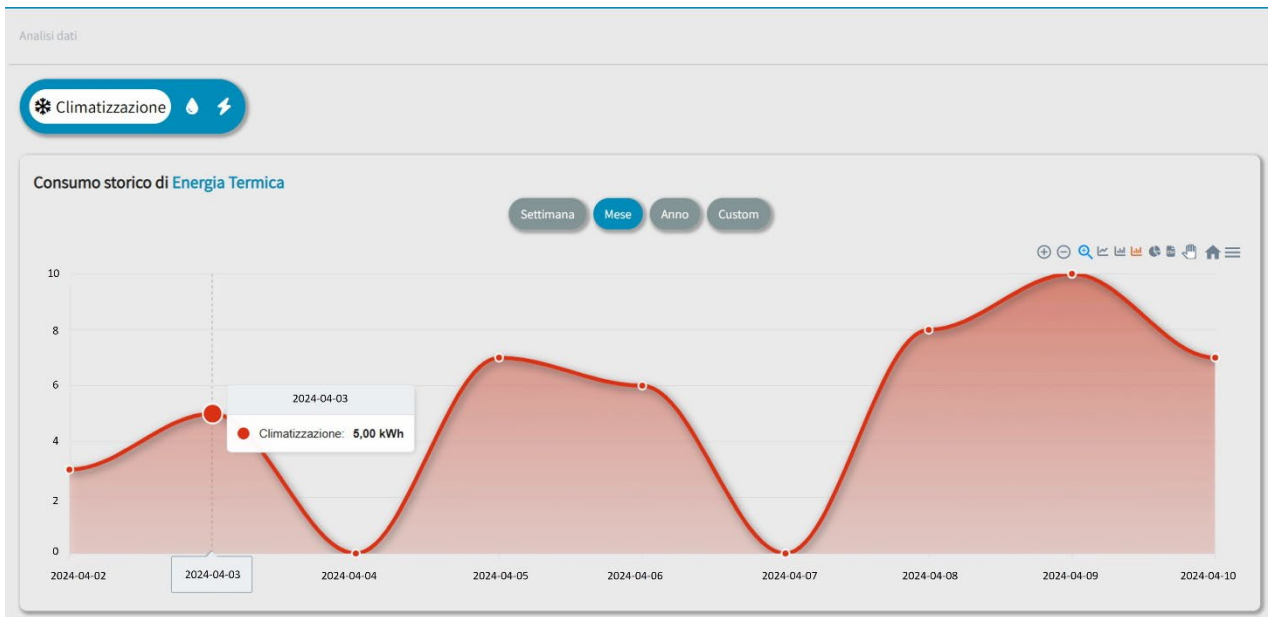


Figura 37 - Grafico del consumo storico di energia termica in kWh della sezione "Analisi dati" di EMPOWER.

Come ulteriore esempio, la Figura 38 riporta il consumo storico giornaliero di energia elettrica, sottoforma di istogrammi.



Figura 38 - Grafico del consumo storico di energia elettrica in kWh della sezione "Analisi dati" di EMPOWER. È stata selezionata una settimana specifica dal filtro custom

La Figura 39 mostra, infine, lo storico delle temperature registrate in una settimana selezionata nel filtro custom in un'unità immobiliare. Il passaggio del cursore su ogni punto del grafico visualizza la temperatura media, massima e minima giornaliera. Il grafico mostra anche le soglie di comfort impostate a 18°C e 22°C per permettere una comprensione più diretta delle condizioni di discomfort.

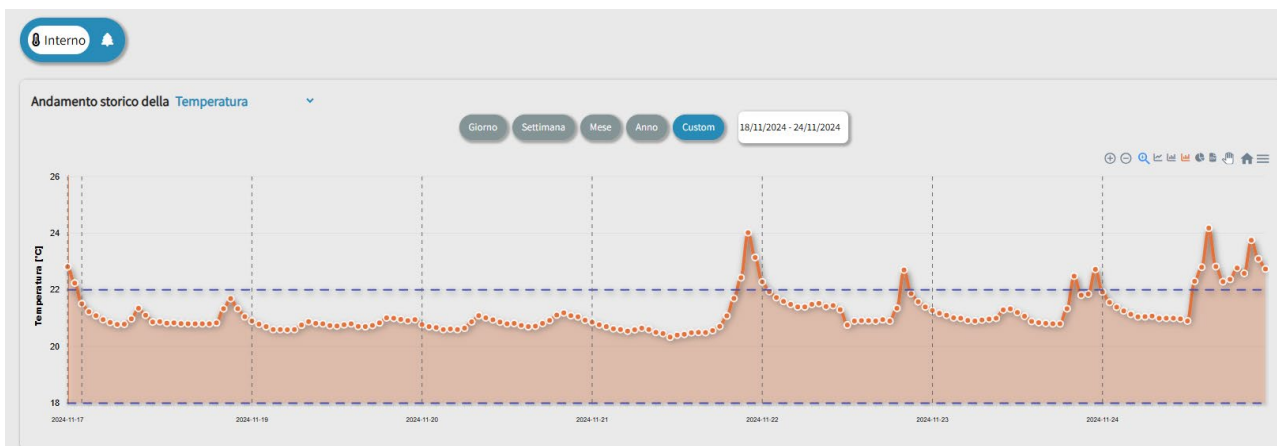


Figura 39 – Grafico dello storico delle temperature indoor orarie medie della sezione “Analisi dati” di EMPOWER. È stata selezionata una settimana specifica dal filtro custom

È stata implementata anche la sezione “Autoconsumo collettivo” per sensibilizzare gli utenti su questa potenziale configurazione a livello condominiale. Figura 35 mostra la pagina della sezione che visualizza: i) le modalità di acquisizione dei valori di energia in gioco; ii) il grafico dei flussi di energia scambiati con la rete in un giorno selezionato.

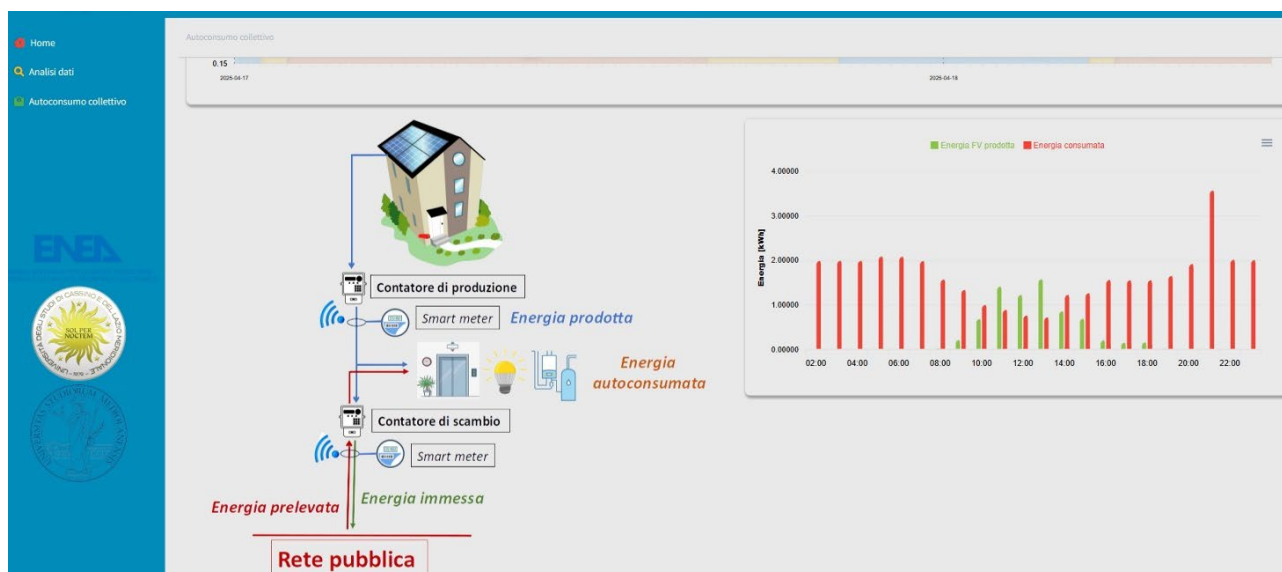


Figura 40 – Visualizzazione della modalità di acquisizione dati di energia prodotta, autoconsumata, prelevata ed immessa all'interno della sezione “Autoconsumo collettivo” di EMPOWER. La pagina visualizza anche il grafico dei flussi di energia scambiati con la rete in un giorno selezionato

Infine, su indicazioni fornite da UNICAS_DICEM nella LA4.3, l’aggiornamento di EMPOWER ha previsto l’implementazione di un indicatore specifico per i consumi di ACS e la predisposizione di una logica propedeutica a fornire messaggi di alert agli utenti sui consumi termici anomali. A tal fine, sono state integrate nell’anagrafica degli appartamenti (Figura 36), a livello amministratore, i campi per la compilazione delle seguenti informazioni: soglie min e max ACS (in litri al giorno per persona), numero occupanti, FAULT-, FAULT+.

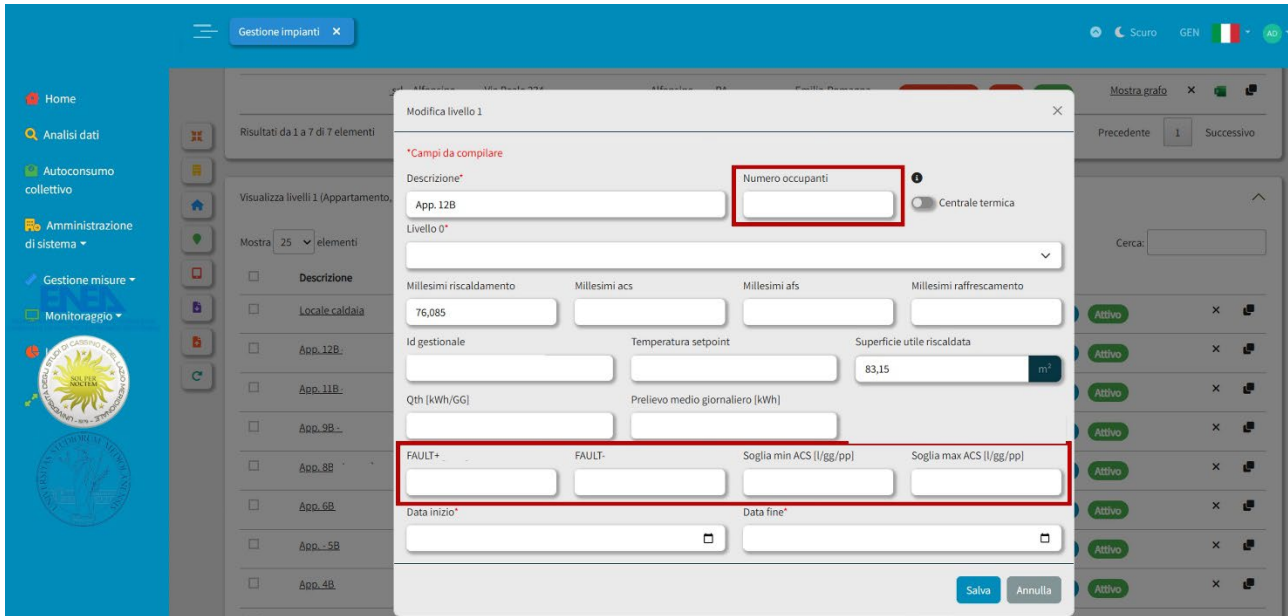


Figura 41 – Anagrafica di appartamento editabile nel livello amministratore di EMPOWER. Si evidenziano in rosso i campi aggiunti relativi all'indicatore ACS (numero occupanti, soglia min ACS e soglia max ACS) e ai consumi termici anomali (FAULT+ e FAULT-)

La Tabella 5 mostra un esempio di generazione dei messaggi di alert per consumi termici anomali sulla scorta dei dati termici (in kWh), temperature medie, massime e minime indoor e outdoor e gradi giorno, relativamente a un appartamento in un periodo selezionato²⁵.

Tabella 5: EMPOWER – generazione dei messaggi di alert per consumi termici anomali relativo a un appartamento campione per un periodo selezionato. Il messaggio viene generato quando il consumo normalizzato cade al di fuori del range definito da FAULT- e FAULT+ (in questo caso: -0.72 e +1.72) derivati dai consumi termici storici dell'appartamento in esame.

Data	Riscaldamento (kWh)	Temperatura Indoor					Temperatura Outdoor					Gradi Giorno	Consumo normalizzato				Messaggio
		media (°C)	max (°C)	min (°C)	var+	var-	media (°C)	max (°C)	min (°C)	var+	var-		FCC	+	-	0	
20/02/2024	7	20,76	21,5	20,1	0,7	0,7	11	15	8	4	3	9	0,78	0	0	0	
21/02/2024	8	20,58	22,5	20,1	1,9	0,5	10	17	5	7	5	10	0,80	0	0	0	
22/02/2024	7	20,87	23	20,3	2,1	0,6	10	17	4	7	6	10	0,70	0	0	0	
23/02/2024	7	20,86	22,6	20,4	1,7	0,5	11	17	4	6	7	9	0,78	0	0	0	
24/02/2024	7	20,89	22,5	20,5	1,6	0,4	11	14	8	3	3	9	0,78	0	0	0	
25/02/2024	8	20,94	23,7	20,5	2,8	0,4	13	14	11	1	2	7	1,14	0	0	0	
28/02/2024	2	20,71	22,7	20,3	2,0	0,4	12	16	6	4	6	8	0,25	0	0	0	
29/02/2024	13	21,19	22,7	20,5	1,5	0,7	10	12	9	2	1	10	1,30	0	0	0	
01/03/2024	13	21,35	24,8	20,5	3,4	0,9	13	18	9	5	4	7	1,86	1	1	0	Consumo alto!
02/03/2024	12	21,70	23,5	21,1	1,8	0,6	10	15	6	5	4	10	1,20	0	0	0	
03/03/2024	10	21,65	23,9	21	2,2	0,7	10	17	4	7	6	10	1,00	0	0	0	
04/03/2024	20	21,98	25,1	20,9	3,1	1,1	11	17	6	6	5	9	2,22	1	1	0	Consumo alto!
05/03/2024	6	21,97	23,4	21,3	1,4	0,7	11	17	5	6	6	9	0,67	0	0	0	
06/03/2024	9	21,58	22,9	21,1	1,3	0,5	11	16	5	5	6	9	1,00	0	0	0	
07/03/2024	0	21,13	21,6	20,9	0,5	0,2	13	18	10	5	3	7	0,00	0	0	0	
08/03/2024	0	20,81	21,4	20,6	0,6	0,2	16	19	12	3	4	4	0,00	0	0	0	
09/03/2024	6	20,87	23	20,4	2,1	0,5	15	18	13	3	2	5	1,20	0	0	0	
10/03/2024	8	21,56	23,5	21	1,9	0,6	14	18	10	4	4	6	1,33	0	0	0	
11/03/2024	7	22,22	24,3	21,6	2,1	0,6	14	16	13	2	1	6	1,17	0	0	0	
12/03/2024	5	21,57	22,7	21,1	1,1	0,5	14	16	12	2	2	6	0,83	0	0	0	
13/03/2024	0	21,65	22,9	21,2	1,3	0,4	16	20	13	4	3	4	0,00	0	0	0	
14/03/2024	4	22,37	24,1	21,7	1,7	0,7	15	20	12	5	3	5	0,80	0	0	0	
15/03/2024	6	21,53	22,8	21	1,3	0,5	11	13	8	2	3	9	0,67	0	0	0	

²⁵ L'analisi è basata sulle elaborazioni condotte dall'Università di Cassino e del Lazio Meridionale nel Report RdS_PTR 22-24_PR 1.5_LA4.3_085.

7.2.3 Progettazione e implementazione di una specifica App per smartphone e tablet

La parte finale dell'attività è stata incentrata sullo sviluppo di una app in modo da ampliare le modalità di accesso a EMPOWER attraverso strumenti più diffusi e immediati come smartphone e tablet. Sono state riprodotte su app le informazioni riguardanti i consumi, il comfort termico e la qualità dell'aria indoor (Figura 42) e sono state predisposte le pagine per l'analisi dati. Nell'ambito della linea di attività sono state indicate agli utenti del condominio inserito le modalità per scaricare e utilizzare la nuova app.

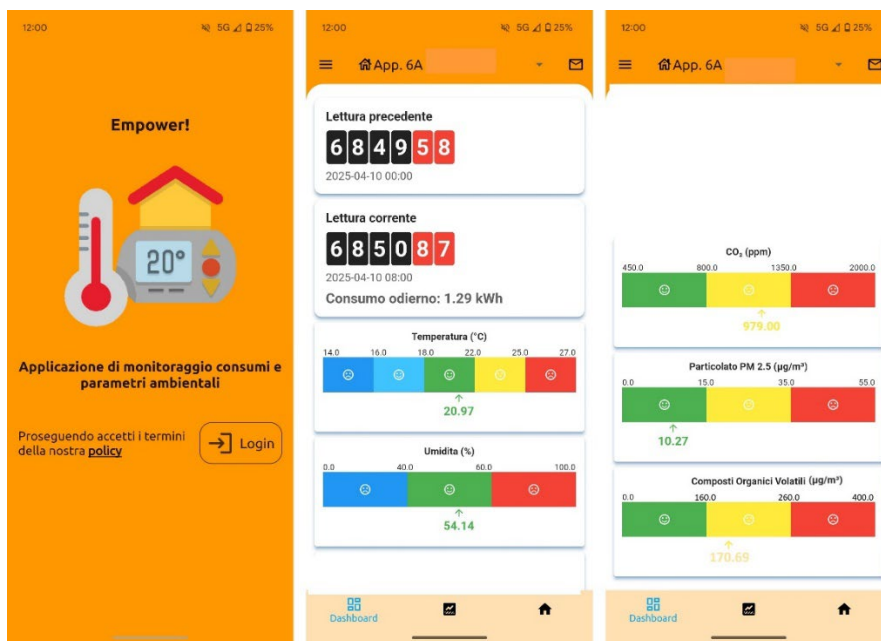


Figura 42- Screenshot della app EMPOWER estratti da smartphone. Vengono mostrati la pagina per il login dell'utente e la dashboard che fornisce le informazioni più importanti della piattaforma in termini di consumi energetici e parametri di comfort e qualità dell'aria.

7.3 Smart Readiness Indicator

7.3.1 Aggiornamento stato dell'arte servizi tecnici intelligenti nel contesto nazionale

L'attività sull'SRI ha previsto un'analisi di mercato con l'obiettivo di valutare lo stato dell'arte delle tecnologie intelligenti presenti nel catalogo dei servizi proposto dalla Commissione Europea per valutare il nuovo indicatore, verificandone l'effettiva applicabilità nel contesto edilizio nazionale. A tal fine è stato predisposto un questionario che, per ciascun servizio tecnico, richiede di indicare se i livelli di funzionalità corrispondenti siano raggiungibili tramite sistemi attualmente disponibili sul mercato rispondendo Sì o No, con la possibilità di riportare commenti. Il questionario è stato distribuito all'interno di tavoli tecnici su BACS e SRI nell'ambito di enti di normazione (CTI e CEI). I risultati sono riassunti nella Tabella 6. Si evince che sei domini su nove hanno dei servizi con livelli funzionali non applicabili al momento, principalmente a causa dell'assenza di tecnologie mature in ambito di interazione con la rete elettrica. In due casi sono emerse richieste di chiarimento e suggerimenti:

i) per i livelli funzionali del servizio "reporting sulla performance dell'impianto di riscaldamento", che prevedono il confronto con impianti di riferimento e l'individuazione predittiva dei guasti:

presupponendo che il riferimento sia il digital twin, i partecipanti al questionario esprimono dubbi sull'opportunità di applicarlo a edifici di piccole dimensioni aventi impianti con potenza termica ridotta;

ii) nel servizio "Controllo sequenziale di diversi generatori", il livello funzionale 3 prevede un sequenziamento basato sulla previsione del carico che, secondo gli intervistati, è ragionevolmente applicabile a potenze termiche elevate.

I risultati di questa attività sono propedeutici alla redazione di un catalogo dei servizi tecnici aggiornato da proporre nell'asseverazione dell'SRI nel contesto italiano.

Tabella 6 – Catalogo dei servizi SRI - Sintesi dei risultati dei questionari sullo stato delle tecnologie esistenti nel contesto italiano. In verde i livelli funzionali effettivamente implementabili, in giallo quelli implementabili ma suggeriti per casi ristretti (es. potenze termiche elevate) e in rosso quelli attualmente non implementabili.

	Servizi tecnici	Livello1	Livello2	Livello3	Livello4
Riscaldamento-1a	Controllo sistema di emissione				
Riscaldamento-1b	Controllo dell'emissione di strutture edili termo-attive (TABS)				
Riscaldamento-1c	Controllo della temperatura del fluido termovettore nella rete di distribuzione (impianti idronici o aeraulici)				
Riscaldamento-1d	Controllo delle pompe della rete di distribuzione				
Riscaldamento-1f	Accumulo di energia termica (esclusi i TABS)				
Riscaldamento-2a	Controllo del generatore termico (escluso pompe di calore)				
Riscaldamento-2b	Controllo del generatore a pompa di calore				
Riscaldamento-2d	Controllo sequenziale di generatori differenti				
Riscaldamento-3	Reporting sulla performance dell'impianto di riscaldamento				
Riscaldamento-4	Flessibilità ed interazione con la rete				
Acqua calda sanitaria-1a	Controllo del livello termico dell'accumulo di ACS (con riscaldamento elettrico diretto o pompa di calore elettrica integrata)				
Acqua calda sanitaria-1b	Controllo del livello termico dell'accumulo di ACS (utilizzando la generazione di acqua calda)				
Acqua calda sanitaria-1d	Controllo del livello termico dell'accumulo di ACS (con collettore solare o generazione di energia termica supplementare)				
Acqua calda sanitaria-2b	Sequenza in caso di diversi generatori di ACS				
Acqua calda sanitaria-3	Reporting sulla performance dell'impianto di ACS				
Raffrescamento-1a	Controllo di emissione				
Raffrescamento-1b	Controllo di emissione per impianto TABS (modalità raffrescamento)				
Raffrescamento-1c	Controllo della temperatura dell'acqua refrigerata della rete di distribuzione (mandata o ritorno)				
Raffrescamento-1d	Controllo delle pompe di distribuzione nelle reti				
Raffrescamento-1f	Interblocco per evitare il riscaldamento e il raffreddamento simultanei nello stesso ambiente				
Raffrescamento-1g	Controllo del sistema di accumulo termico				
Raffrescamento-2a	Controllo del generatore per il raffrescamento				
Raffrescamento-2b	Controllo sequenziale di diversi generatori				
Raffrescamento-3	Reporting relativo alle performance del sistema di raffrescamento				
Raffrescamento-4	Flessibilità e interazione con la rete				
Ventilazione meccanica-1a	Controllo del flusso d'aria di mandata a livello di ambiente				
Ventilazione-1c	Controllo del flusso d'aria o della pressione a livello di condizionatore d'aria				
Ventilazione meccanica-2c	Controllo del recupero termico: prevenzione del surriscaldamento				
Ventilazione meccanica-2d	Controllo della temperatura dell'aria di mandata a livello di unità di trattamento dell'aria				
Ventilazione meccanica-3	Tecnologia Free Cooling con sistema di ventilazione meccanica				
Ventilazione meccanica-6	Reporting relativo all'IAQ (qualità dell'aria indoor)				
illuminazione-1a	Controllo presenza				
illuminazione-2	Controllo del livello di illuminazione artificiale in base ai livelli di luce diurna				
Involucro dinamico-1	Controllo delle schermature solari				
Involucro dinamico-2	Controllo dell'apertura/chiusura delle finestre, combinato con sistema HVAC				
Involucro dinamico-4	Reportistica sulle prestazioni dei sistemi afferenti all'involucro dinamico				
Elettricità-2	Reportistica relativa alla generazione di energia elettrica a livello locale				
Elettricità-3	Accumulo di energia elettrica prodotta in loco				
Elettricità-4	Ottimizzazione dell'autoconsumo dell'energia elettrica generata localmente				
Elettricità-5	Controllo della centrale di cogenerazione (CHP)				
Elettricità-8	Supporto delle modalità di funzionamento della (micro)rete				
Elettricità-11	Reportistica riguardante l'accumulo di energia elettrica				
Elettricità-12	Reportistica riguardante il consumo di energia elettrica				
Ricarica di veicoli elettrici-15	Capacità di ricarica per i veicoli elettrici				
Ricarica di veicoli elettrici-16	Bilanciamento della rete di ricarica di veicoli elettrici				
Ricarica di veicoli elettrici-17	Informazioni e connettività				
Monitoraggio e controllo-3	Gestione in esercizio degli impianti HVAC				
Monitoraggio e controllo-4	Individuazione e diagnosi dei guasti relativi agli impianti tecnici dell'edificio (TBS)				
Monitoraggio e controllo-9	Rilevamento presenza: servizi connessi				
Monitoraggio e controllo-13	Reporting della performance dei servizi tecnici e dei profili di consumo				
Monitoraggio e controllo-25	Integrazione con la Smart Grid				
Monitoraggio e controllo-28	Reporting sulle performance e sulla gestione del carico (Demand Side Management)				
Monitoraggio e controllo-29	Disattivazione del DSM				
Monitoraggio e controllo-30	Piattaforma informatica che consente il controllo automatico e il coordinamento tra i servizi tecnici + ottimizzazione del flusso di energia in base ai segnali di presenza, climatici				

7.3.2 Analisi delle possibili correlazioni tra l'attestato di prestazione energetica (APE) degli edifici residenziali e lo Smart Readiness Indicator (SRI).

Nell'ambito dello studio delle possibili correlazioni tra l'Attestato di Prestazione Energetica (APE) e l'SRI, sono state condotte, come di seguito descritto, due metodologie basate su simulazioni in regime semi-stazionario e dinamico: i) un'analisi comparativa considerando i soli domini (impianti) presenti nei singoli casi studio; ii) un'analisi comparativa, basata sulla

simulazione dei casi studio in differenti zone climatiche. L'SRI è stato calcolato utilizzando il foglio di calcolo europeo (ver. 4.5) reso disponibile dalla Commissione Europea²⁶.

7.3.2.1 SRI – APE: analisi comparativa considerando i soli domini (impianti) presenti nei singoli casi studio

Al fine di analizzare la correlazione tra SRI e APE è stata condotta una modellazione energetica di tipo semi-stazionario con un software commerciale su edifici rappresentativi del parco edilizio italiano (denominati da A a G), le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 7.

Tabella 7 – Confronto SRI – APE: Caratteristiche tipologiche dei casi studio.²⁷

CASO STUDIO	LOCALITÀ	USO	AREA UTILE	EPOCA COSTRUTTIVA
A	Torino	Multifamiliare Small	500-1000 m ²	<1960
B	Trapani	Multifamiliare Large	1000- 10000 m ²	1960 -1990
C1	Anagni	Multifamiliare Small	500- 1000 m ²	1960 -1990
D	Ceprano	Multifamiliare Large	1000- 10000 m ²	1960 -1990
E	Milano	Multifamiliare Small	500- 1000 m ²	<1960
F	Cambiago	Multifamiliare Small	500- 1000 m ²	1990 -2010
G	Roma	Multifamiliare Large	1000- 10000 m ²	>2010

La modellazione in esame consta di tre differenti ipotesi di scenario, basate sull'analisi effettuata dall'Università di Cassino e del Lazio Meridionale (Report RdS/PTR2020/130):

- Scenario Base
- Scenario Energy
- Scenario Smart Energy.

Nello scenario Energy sono previsti interventi di efficientamento degli impianti tradizionali (caldaie, isolamento, illuminazione).

Nello scenario Smart-Energy sono previsti scenari di implementazione di tecnologie smart-ready (monitoraggio, automazione, soluzioni IoT).

Le dotazioni impiantistiche di riferimento per la modellazione energetica in regime semi-stazionario sono riassunte in Tabella 8.

Tabella 8 – Confronto SRI – APE: Dotazione impiantistica per i tre scenari simulati

	Scenario Base	Scenario Energy	Scenario Smart
Tipologia Impianto	Centralizzato Idronico	Centralizzato Idronico	Centralizzato Idronico
Tipologia distribuzione	Verticali Muri Esterni	Verticali Muri Esterni	Verticali Muri Esterni
Isolamento impianti	Si	Si	Si
Terminali di emissione	Radiatori	Radiatori	ventilconvettore
Tipologia Regolazione	Climatica	singolo +climatica	singolo +climatica
Portata impianto	Costante	Variabile	Variabile

²⁶ https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/smart-readiness-indicator_en#SRI-rating

²⁷ Gli edifici di Anagni, Roma e Cambiago e M sono monitorati dalla piattaforma EMPOWER

<i>Temperatura</i>	Variabile	Variabile	Variabile
<i>Tipologia Generazione</i>	Caldaia a Metano	Caldaia a condensazione a metano	Pompa di calore e caldaia condensazione ibrido
<i>Impianto Raffrescamento</i>	Assente	Assente	Presente
<i>Rinnovabili</i>	Assenti	Assenti	Fotovoltaico
<i>Impianto ACS</i>	Vedi riscaldamento	Vedi riscaldamento	Vedi riscaldamento
<i>Distribuzione ACS</i>	Diretta	Accumulo	Diretta

In Tabella 9 e in Tabella 10 si riportano i livelli funzionali corrispondenti allo scenario “energy” e allo scenario “smart energy” utilizzati per il calcolo dell’SRI.

Tabella 9 - Funzionalità smart minime degli impianti per lo scenario “energy”

Dominio	Sistema	Funzionalità minime del nuovo sistema installato	Esempio
Riscaldamento	<i>Generazione</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Rilevazione e controllo dei parametri ambientali (temperatura) e di sistema (temperatura di mandata, carico termico richiesto) - Controllo basato sulla domanda (temperatura di mandata del fluido termovettore) 	Sostituzione della caldaia monostadio senza regolazioni con caldaia a condensazione
	<i>Distribuzione</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Controllo automatico basato sulla temperatura esterna della temperatura di distribuzione del fluido termovettore 	
	<i>Emissione e regolazione</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Installazione sistemi di regolazione per singolo ambiente 	
Raffrescamento	<i>Generazione</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Rilevazione e controllo dei parametri ambientali (temperatura) e di sistema (temperatura di mandata, carico termico richiesto) - Controllo basato sulla domanda (temperatura di mandata del fluido termovettore) 	Installazione di un sistema di raffrescamento a pompa di calore (sistema ad espansione diretta mono-split o multi-split)
	<i>Distribuzione</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Controllo automatico basato sulla temperatura esterna della temperatura di distribuzione del fluido di raffrescamento 	
	<i>Emissione e regolazione</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Regolazione temperatura per singolo ambiente 	
Acqua calda sanitaria	<i>Generazione</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Produzione da FER 	Installazione di collettori solari termici e sistema di accumulo ACS
	<i>Accumulo</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Nessun controllo del livello termico 	
Illuminazione	<i>Controllo</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Controllo della potenza assorbita (dimming manuale per stanza/ambiente) 	Installazione di un sistema di dimming manuale dell’impianto di illuminazione
Involucro dinamico	<i>Controllo delle schermature</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Controllo motorizzato delle schermature 	Installazione di schermature mobili motorizzate a controllo manuale
Produzione di energia elettrica da FER	<i>Generazione</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Produzione da FER 	Installazione di un sistema di produzione di energia elettrica da FER (pannelli fotovoltaici)
	<i>Accumulo</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Nessun accumulo 	

Tabella 10 - Funzionalità smart minime degli impianti per lo scenario "smart energy"

Dominio	Sistema	Funzionalità minime del nuovo sistema installato	Esempio
Riscaldamento	<i>Generazione</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Connettività WLAN/WiFi/etc. - Gestione e controllo remoto (accensione/spegnimento/allarmi) - Rilevazione e controllo dei parametri ambientali (temperatura) e di sistema (temperatura di mandata, carico termico richiesto) - Smart metering (telelettura e telegestione del consumo di energia termica/gas/elettricità assorbita dal generatore) 	<ul style="list-style-type: none"> - Sostituzione della caldaia monostadio senza regolazioni con caldaia a condensazione smart dotata di interfaccia WLAN e applicazione per gestione remota integrata di sistema di monitoraggio in tempo reale dello stato del sistema, dei consumi e dell'efficienza di impianto; impostazione temperature desiderate; impostazione tempi di commutazione per il riscaldamento e l'acqua calda. - Installazione di valvole termostatiche intelligenti con connettività wireless con controllo remoto tramite applicazione web - Installazione termostati intelligente con funzionalità di auto-apprendimento in base alle abitudini e alle preferenze dell'utente
	<i>Distribuzione</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Controllo automatico basato sulla temperatura esterna della temperatura di distribuzione del fluido termovettore 	
	<i>Emissione e regolazione</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Connettività WLAN/WiFi/etc. - Gestione e controllo remoto (accensione/spegnimento/allarmi) - Regolazione per singolo ambiente - Auto-apprendimento 	
	<i>Informazione</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Report dei valori attuali e storici di temperatura/consumo 	
Raffrescamento	<i>Generazione</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Connettività WLAN/WiFi/etc. - Gestione e controllo remoto (accensione/spegnimento/allarmi) - Rilevazione e controllo dei parametri ambientali (temperatura) e di sistema (temperatura di mandata, carico termico richiesto) - Smart metering (telelettura e telegestione del consumo di energia termica/gas/elettricità assorbita dal generatore) 	<p>Installazione di un sistema di raffrescamento a pompa di calore (sistema ad espansione diretta multi-split) integrato di sistema di monitoraggio e controllo dei parametri ambientali, di sistema e sistema di monitoraggio energetico</p>
	<i>Distribuzione</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Controllo automatico basato sulla temperatura esterna della temperatura di distribuzione del fluido di raffrescamento 	
	<i>Emissione e regolazione</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Connettività WLAN/WiFi/etc. - Gestione e controllo remoto (accensione/spegnimento/allarmi) - Interblocco per evitare il simultaneo riscaldamento e raffrescamento - Regolazione temperatura per singolo ambiente 	
	<i>Informazione</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Report dei valori attuali e storici di temperatura/consumo 	
Acqua calda sanitaria	<i>Generazione</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Connettività WLAN/WiFi/etc. - Gestione e controllo remoto (accensione/spegnimento/allarmi) - Produzione da FER 	<p>Installazione di collettori solari termici e accumulo con gestione del carico termico</p>
	<i>Accumulo</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Nessun controllo del carico termico 	
	<i>Informazione</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Report dei valori attuali di temperatura/consumo 	
Illuminazione	<i>Controllo</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Controllo dell'occupazione (manuale con spegnimento automatico in caso di assenza) 	<p>Installazione di un sistema di illuminazione efficiente con sensore di presenza e dimmer</p>

		- Controllo della potenza assorbita (dimming manuale per stanza/ambiente)	
Involucro dinamico	<i>Controllo delle schermature</i>	- Controllo motorizzato delle schermature	Installazione di schermature mobili motorizzate a controllo manuale integrato di sistema informativo sullo stato delle chiusure e controllo remoto
	<i>Informazione</i>	- Monitoraggio stato delle chiusure e controllo remoto	
Produzione di energia elettrica da FER	<i>Generazione</i>	- Connettività WLAN/WiFi/etc. - Gestione e controllo remoto (accensione/spegnimento/allarmi) - Produzione da FER	Installazione di un sistema di produzione di energia elettrica da FER (pannelli fotovoltaici) con accumulo (batterie di piccola taglia) integrato di sistema di monitoraggio dello stato di carica
	<i>Accumulo</i>	- Controllo dello stato di carica	
	<i>Informazione</i>	- Report dei valori attuali di consumo e SOC accumulato	

I risultati dell'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile (E_{pgl,n-ren}) e della corrispondente classe energetica riportata nell'APE di ciascuno degli scenari sopra descritti, sono stati messi in correlazione con i valori di SRI ricavati applicando il foglio di calcolo europeo (Tabella 11).

Tabella 11 – Confronto SRI – APE: risultati per ciascuno dei tre scenari Base, Energy, Smart Energy

Caso Studio	Scenario Base			Scenario Energy			Scenario Smart		
	E _{pgl,n-ren} kWh/m ² a	Classe Energetica	SRI	E _{pgl,n-ren} kWh/m ² a	Classe Energetica	SRI	E _{pgl,n-ren} kWh/m ² a	Classe Energetica	SRI
A	214,98	F	4,60%	201,98	F	18,90%	120,94	D	37,70%
B	58,33	C	6,90%	49,67	C	18,90%	31,66	A2	37,70%
C1	156,41	E	6,90%	135,44	E	18,90%	93,59	C	37,70%
D	105,16	D	6,90%	90,49	D	18,90%	58,6	B	37,70%
E	138,28	D	4,60%	112,87	D	18,90%	78,27	B	37,70%
F	87,88	C	8,60%	77,37	B	18,90%	47,87	A3	41,70%
G	33,06	A2	30,77%	33,06	A2	30,77%	33,06	A2	37,70%

Dai risultati riportati in Tabella 11, si osserva come avendo considerato una ipotesi di efficientamento caratterizzate da dotazioni tecnologiche sostanzialmente simili, i valori dell'SRI dei casi studio risultano uniformarsi a seguito degli interventi previsti nei differenti scenari.

I dati di E_{pgl,n-ren} e SRI nei tre scenari simulati sono rappresentati in Figura 44. Si evince che gli interventi corrispondenti agli scenari energy e smart energy determinano sia un incremento dell'SRI sia una riduzione dell'E_{pgl,n-ren}. Inoltre, dai risultati di Tabella 11, si può osservare che un incremento di classe corrisponde a un incremento di SRI.

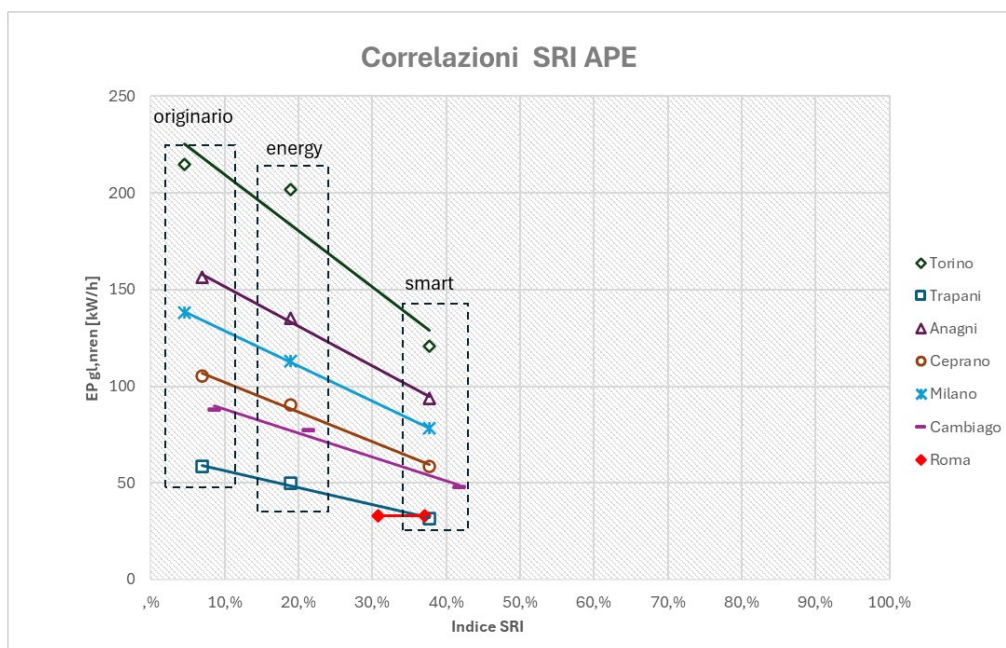


Figura 43 - Correlazione SRI e Epgl,n-ren per ciascuno dei casi studio

Nel caso studio G (Roma) gli interventi di efficientamento realizzabili nell'ambito dello scenario Smart Energy risultano limitati all'impiego per le sole dotazioni ICT di tecnologie Smart più performanti. Questo comporta un aumento del valore dell'SRI ma non produce miglioramenti energetici quantificabili nell'APE, mantenendo invariato il valore dell'Epgl,n-ren, come riportato in Figura 45.

Correlazioni indicatore SRI e risparmio energetico basate su analisi dinamica: applicazione al caso studio G:

Lo studio ha valutato la correlazione tra l'indicatore SRI (Smart Readiness Indicator) e le prestazioni energetiche di un edificio tramite simulazioni dinamiche orarie, superando i limiti dei metodi statici della normativa UNI TS 11300. Il caso studio denominato G è stato ulteriormente analizzato non considerando interventi sull'involucro, ma con scenari di efficientamento basati su impianti attivi e tecnologie smart.

Tramite simulazioni, effettuate su un modello BEM (*Building energy modelling*) tramite software dinamico TRNSYS, sono stati valutati due appartamenti tipo (A1 e A2), con esposizioni contrapposte: Nord-Ovest (A1) e Sud-Est (A2). È emerso che l'SRI riesca a cogliere i benefici dell'esposizione solare solo in presenza di sistemi automatici di gestione delle chiusure dei serramenti. In assenza di questi, i valori di SRI risultano invariati. L'analisi, di seguito riportata, si è focalizzata sul periodo di riscaldamento invernale.

Per i due appartamenti (A1 e A2) sono stati simulati due scenari di termoregolazione durante il periodo invernale di riferimento:

1. Regolazione di zona con termostato unico (nel soggiorno);
2. Regolazione puntuale con valvole termostatiche per ogni ambiente.

Si riportano nella Tabella 12 il valore dello SRI per i due scenari sopra indicati.

Tabella 12 – Caso studio G: valutazione SRI per appartamenti A1 e A2 – confronto caso con termostato di zona e valvole termostatiche

	<i>Valvole termostatiche</i>	<i>Termostato di Zona</i>
<i>Total SRI Score</i>	31,9%	30,8%
<i>Impact Scores</i>		
Energy efficiency	48,5%	45,6%
Energy flexibility and storage	19,2%	19,2%
Comfort	35,3%	32,4%
Convenience	28,9%	27,7%
Health, well-being and accessibility	27,1%	22,9%
Maintenance and fault prediction	36,1%	36,1%
Information to occupants	46,2%	46,2%
<i>Domain Scores</i>		
Heating	39,1%	33,6%
Domestic hot water	32,6%	32,6%
Cooling	45,9%	45,9%
Ventilation	0,0%	0,0%
Lighting	0,0%	0,0%
Dynamic building envelope	9,6%	9,6%
Electricity	37,6%	37,6%
Electric vehicle charging	0,0%	0,0%
Monitoring and control	30,0%	30,0%

Nella Figura 45 si riportala correlazione tra i consumi termici, evinti dalla simulazione dinamica sugli appartamenti A1 e A2 al variare dello scenario di termoregolazione, ed il rispettivo valore di SRI. Con lo studio in regime dinamico in oggetto, è stato possibile simulare il reale funzionamento di quei livelli funzionali che non possono essere presi in considerazione nella modellazione di tipo semi-stazionario, valutandone la correlazione con il livello di SRI. Dalla Figura 45 si evince che per entrambi gli appartamenti modellati, allo scenario relativo al livello funzionale più elevato (quello con valvole termostatiche) corrisponde un maggiore valore di SRI ed un minor consumo termico.

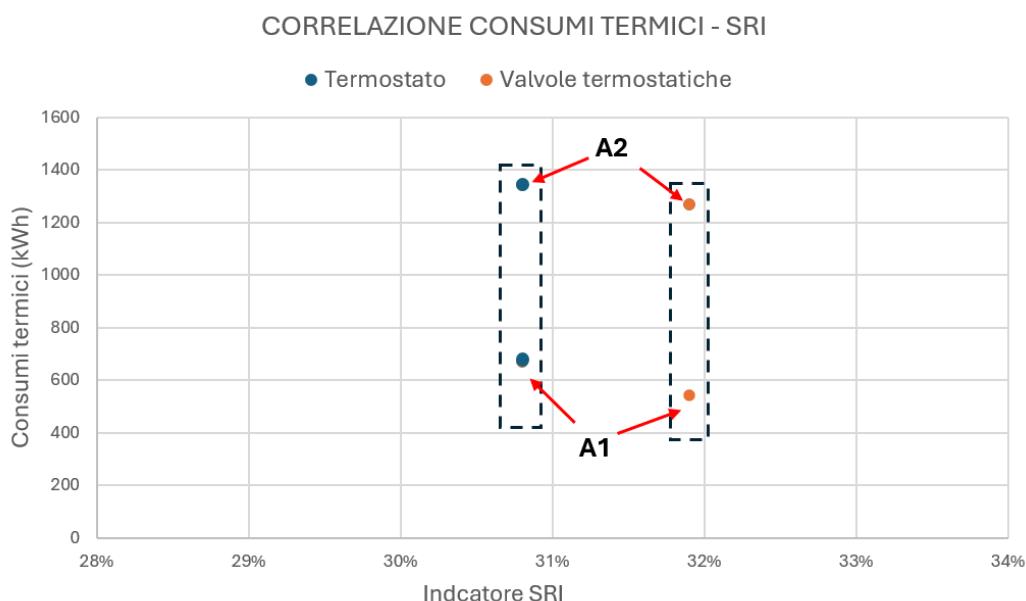


Figura 44 – Correlazione consumi termici - SRI (Appartamenti A1 - A2)

7.3.2.2 Analisi comparativa SRI-APE basata sulla simulazione dei casi studio in differenti zone climatiche

La seconda metodologia, condotta in regime semi-stazionario, ha come obiettivo la comprensione di come l'introduzione di soluzioni smart possa influenzare il fabbisogno energetico in differenti contesti climatici.

Sono stati modellati otto casi studio (denominati da A ad H), caratterizzati da dimensioni tipo a seconda che si tratti di fabbricati mono o plurifamiliari, suddivisi per:

- tipologia costruttiva, dimensioni, elevazioni fuori terra e anno di costruzione;
- stratigrafie di involucro, ricavate dal progetto TABULA (*Typology Approach for Building Stock Energy Assessment*), coerentemente con l'epoca costruttiva.

Tabella 13 - Casi studio: caratteristiche tipologiche

CASO STUDIO	USO	AREA UTILE	EPOCA COSTRUTTIVA
A	Monofamiliare	200 m ²	< 1980
B	Multifamiliare	800- 1000 m ²	< 1980
C1	Monofamiliare	200 m ²	1981 -1990
D	Multifamiliare	800- 1000 m ²	1981 -1990
E	Monofamiliare	200 m ²	1990 - 2005
F	Multifamiliare	800- 1000 m ²	1990 - 2005
G	Monofamiliare	200 m ²	>2006
H	Multifamiliare	800- 1000 m ²	>2006

Sono state identificate tre zone climatiche ritenute rappresentative per densità abitativa, zone C, D ed E.

A seguito delle modellazioni effettuate, sono stati elaborati degli elenchi tabellari che illustrano il comportamento degli edifici in esame, in cui sono riportati i risultati relativi all'EP_{gl,n-ren}, alla Classe energetica di riferimento e ai valori di SRI; l'analisi varia in funzione dei tre scenari (base, energy e smart) e per ciascuna delle zone climatiche identificate.

A valle dall'analisi sullo stato di fatto si è effettuata una modellazione sulla base di differenti ipotesi di scenario²⁸:

- Scenario Base
- Scenario Energy (Tabella 9)
- Scenario Smart Energy (Tabella 10)

È fatto d'obbligo evidenziare come, nel caso residenziale, il servizio di illuminazione non sia implementabile da modellazione energetica in regime semi-stazionario, poiché la normativa non lo prevede per le valutazioni APE.

Le dotazioni impiantistiche effettivamente implementate nel caso semi-stazionario sono riassunte nelle tabelle a seguire (Tabella 14, Tabella 15).

Tabella 14 - Implementazioni negli scenari di tipo energy

Dominio	Sistema	Funzionalità minime del nuovo sistema installato
Riscaldamento	Generazione	Sostituzione della caldaia monostadio senza regolazioni con caldaia a condensazione
	Distribuzione	Controllo automatico basato sulla temperatura esterna della temperatura di distribuzione del fluido termovettore
	Emissione e regolazione	Installazione sistemi di regolazione per singolo ambiente
Raffrescamento	Generazione	Rilevazione e controllo dei parametri ambientali (temperatura) e di sistema (temperatura di mandata, carico termico richiesto) Controllo basato sulla domanda (temperatura di mandata del fluido termovettore)
	Distribuzione	Controllo automatico basato sulla temperatura esterna della temperatura di distribuzione del fluido di raffrescamento
	Emissione e regolazione	Regolazione temperatura per singolo ambiente
Acqua calda sanitaria	Generazione	Installazione di collettori solari termici e accumulo con gestione del carico termico
	Accumulo	Nessun controllo del livello termico
Illuminazione	Non implementabile in un modello di simulazione semi-stazionario nel caso residenziale	
Involucro dinamico	Non implementabile in un modello di simulazione semi-stazionario	
Produzione di energia elettrica da FER	Generazione	Installazione di un sistema di produzione di energia elettrica da FER (pannelli fotovoltaici) con accumulo (batterie di piccola taglia) integrato di sistema di monitoraggio dello stato di carica

Tabella 15 - Implementazioni negli scenari di tipo smart energy

Dominio	Sistema	Funzionalità minime del nuovo sistema installato
Riscaldamento	Generazione	Rilevazione e controllo dei parametri ambientali (temperatura) e di sistema (temperatura di mandata, carico termico richiesto)
	Distribuzione	Controllo automatico basato sulla temperatura esterna della temperatura di distribuzione del fluido termovettore
	Emissione e regolazione	Regolazione per singolo ambiente
Raffrescamento	Generazione	Rilevazione e controllo dei parametri ambientali (temperatura) e di sistema (temperatura di mandata, carico termico richiesto)
	Distribuzione	Controllo automatico basato sulla temperatura esterna della temperatura di distribuzione del fluido di raffrescamento
	Emissione e regolazione	Regolazione temperatura per singolo ambiente

²⁸ Basate sulle elaborazioni condotte dall'Università di Cassino e del Lazio Meridionale nel Report RdS/PTR2020/130.

Acqua calda sanitaria	<i>Generazione</i>	Installazione di collettori solari termici e accumulo con gestione del carico termico
	<i>Accumulo</i>	Nessun controllo del carico termico
Illuminazione	Non implementabile in un modello di simulazione semi-stazionario nel caso residenziale	
Involucro dinamico	Non implementabile in un modello di simulazione semi-stazionario	
Produzione di energia elettrica da FER	<i>Generazione</i>	Installazione di un sistema di produzione di energia elettrica da FER (pannelli fotovoltaici) con accumulo (batterie di piccola taglia) integrato di sistema di monitoraggio dello stato di carica

Tabella 15, Tabella 16 e Tabella 17 sono riportati per le tre zone climatiche i valori di $E_{p,g,l,n,r,e,n}$ e della corrispondente classe energetica, correlati con l'SRI ricavato applicando il foglio di calcolo europeo.

Tabella 16 - Zona climatica C

Caso Studio	Scenario Base			Scenario Energy			Scenario Smart		
	$E_{p,g,l,n,r,e,n}$ (kWh/m ² a)	Classe energetica	SRI	$E_{p,g,l,n,r,e,n}$ (kWh/m ² a)	Classe energetica	SRI	$E_{p,g,l,n,r,e,n}$ (kWh/m ² a)	Classe energetica	SRI
A	582,74	G	0%	264,68	F	15%	244,11	F (caso A)	27%
B	192,71	G	9%	180,16	G	15%	152,47	F (caso B)	27%
C	248,92	G	12%	231,04	E	15%	228,27	E (caso C)	27%
D	130,44	G	23%	116,29	E	23%	112,83	E (caso D)	28%
E	46,91	A3	17%	17,52	A3	19%	16,31	A4 (caso E)	31%
F	48,33	D	17%	62,3	B	19%	57,67	B (caso F)	31%
G	87,03	B	20%	86,13	B	19%	86,13	B (caso G)	30%
H	30,7	A3	23%	30,3	A3	23%	30,3	A3 (caso G)	31%

Tabella 17 - Zona climatica D

Caso Studio	Scenario Base			Scenario Energy			Scenario Smart		
	$E_{p,g,l,n,r,e,n}$ (kWh/m ² a)	Classe energetica	SRI	$E_{p,g,l,n,r,e,n}$ (kWh/m ² a)	Classe energetica	SRI	$E_{p,g,l,n,r,e,n}$ (kWh/m ² a)	Classe energetica	SRI
A	808,46	G	0%	363,19	G	15%	335,15	G	27%
B	293,12	G	9%	265,11	G	15%	224,45	F	27%
C	380,32	G	12%	314,41	F	15%	309,81	F	27%
D	202,33	G	23%	163,02	F	23%	157,23	E	28%
E	49,8	A3	17%	28,62	A3	19%	26,91	A4	31%
F	80,71	F	17%	87,28	C	19%	84,49	C	31%
G	138,2	C	20%	136,81	C	19%	136,81	C	30%
H	43,86	A2	23%	43,08	A2	23%	43,08	A2	31%

Tabella 18 - Zona climatica E

Caso Studio	Scenario Base			Scenario Energy			Scenario Smart		
	Ep _{gl,n-ren} (kWh/m ² a)	Classe energetica	SRI	Ep _{gl,n-ren} (kWh/m ² a)	Classe energetica	SRI	Ep _{gl,n-ren} (kWh/m ² a)	Classe energetica	SRI
A	944,79	G	0%	466,87	G	15%	434,52	G	27%
B	374	G	9%	332,55	G	15%	281,7	G	27%
C	486,28	G	12%	405,3	G	15%	399,24	G	27%
D	260,29	G	23%	213,02	G	23%	205,37	G	28%
E	46,2	A3	17%	36,68	A3	19%	34,63	A3	31%
F	102,88	E	17%	102,18	D	19%	99,75	D	31%
G	181,66	D	20%	179,81	D	19%	179,81	D	30%
H	53,65	A1	23%	52,6	A1	23%	52,6	A1	31%

Per una migliore comprensione dei risultati, si riporta, a titolo esemplificativo, in Figura 41 l'andamento dei valori di SRI per una delle zone climatiche (zona C)

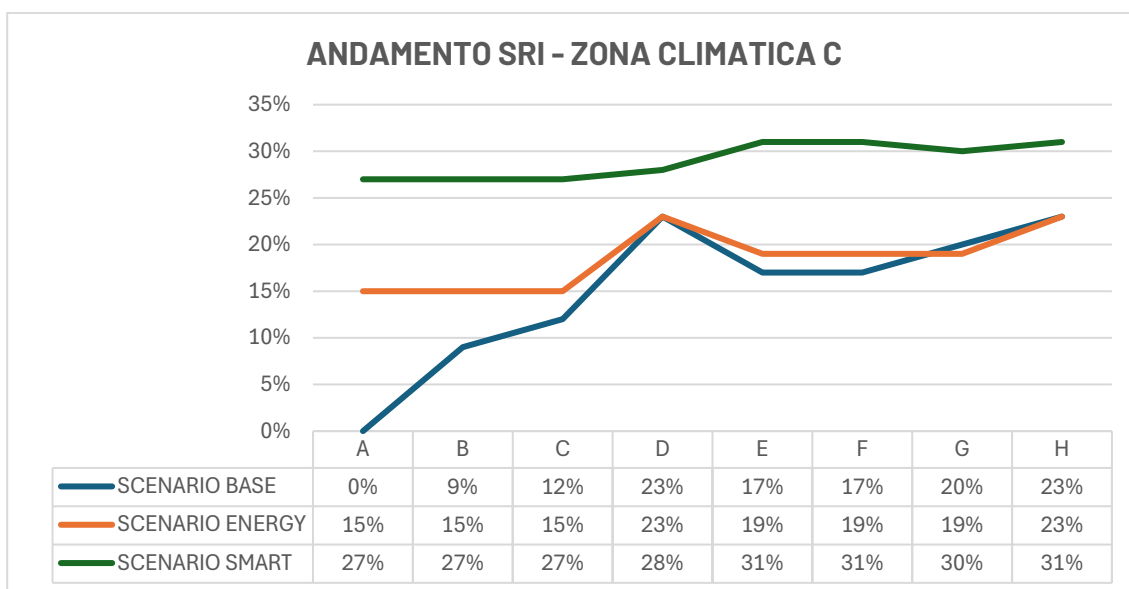


Figura 45 - Andamento SRI per ciascun caso studio e per i tre scenari di intelligenza- Zona Climatica C

In Figura 42 e in Figura 43 si riportano rispettivamente: i) la correlazione tra SRI e Classe energetica, ii) la correlazione tra SRI ed EP_{gl,n-ren}.

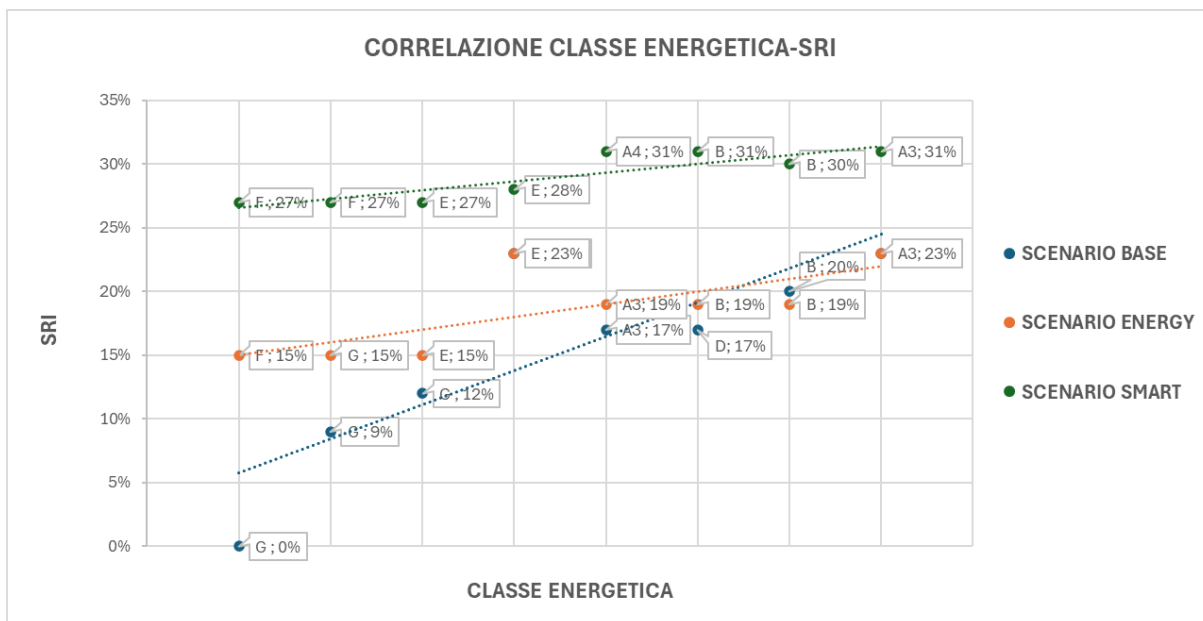


Figura 46 - Correlazione Classe energetica - SRI per la zona climatica C

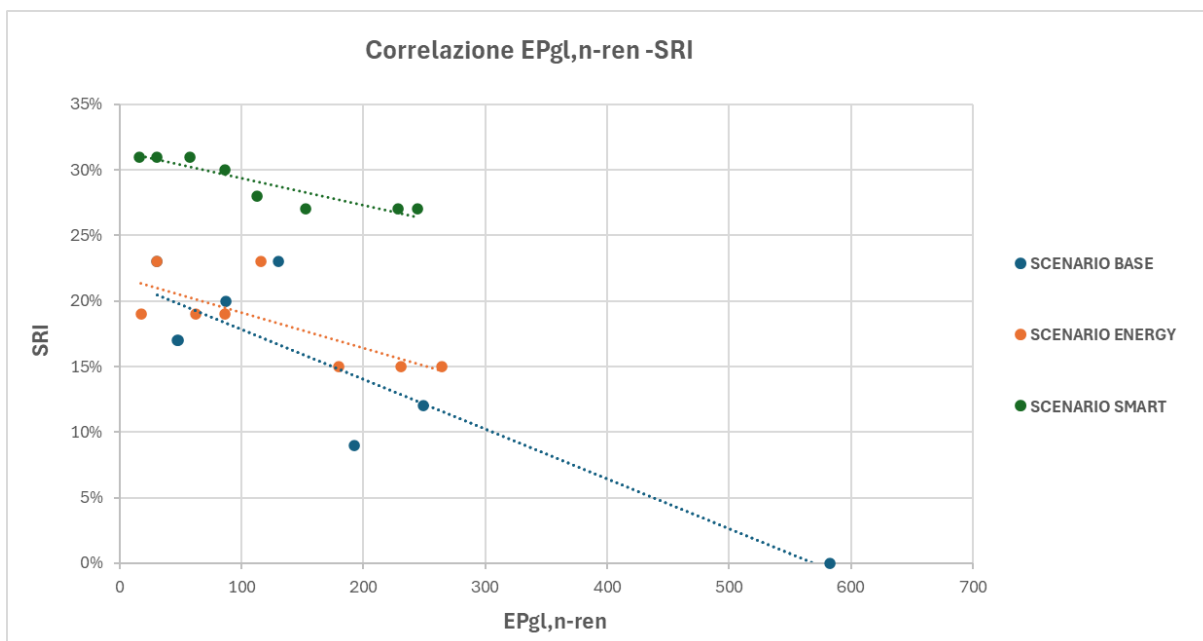


Figura 47 - Correlazione EPgl,n-ren (kWh/m²a) - SRI per la zona climatica C

Anche in questo secondo studio, come per i risultati riportati al paragrafo precedente, si conferma un'effettiva correlazione tra i livelli SRI raggiunti e il fabbisogno energetico del fabbricato, valutato con l'Attestato di Prestazione Energetica.

L'adozione di soluzioni smart porta a un progressivo miglioramento energetico rispetto allo scenario base. I benefici variano a seconda delle zone climatiche: nelle zone climatiche C e D migliorano soprattutto le classi energetiche in relazione all'aumento dell'SRI. Nella zona climatica E questa tendenza non è altrettanto evidente a causa del maggiore fabbisogno termico invernale.

7.3.3 Correlazioni indicatore SRI e risparmio energetico basate su analisi dinamica in differenti zone climatiche

Rispetto all'analisi riportata nel precedente paragrafo, per indagare le correlazioni tra l'SRI e il fabbisogno energetico valutato con un metodo di modellazione dinamica si è proceduto con le seguenti fasi:

- È stato costruito un modello tabellare con scenari di implementazioni di integrazione dei domini impiantistici, previsti dal foglio di calcolo SRI Europeo, a partire da uno scenario base (scenario 1) fino ad uno scenario che prende in considerazione tutti i domini previsti dal catalogo dei servizi (scenario 8).
- Sono stati individuati gli scenari che prevedono la possibile implementazione dei servizi tecnici in DesignBuilder (3, 4 e 5) e per gli stessi è stato calcolato il relativo valore SRI.: scenario 3 - raffrescamento, acs, riscaldamento; scenario 4 - raffrescamento, acs, riscaldamento e ventilazione meccanica; scenario 5 - raffrescamento, acs, riscaldamento e illuminazione.
- Tali scenari sono stati simulati sia con un modello semi-stazionario (software commerciale), sia con un modello dinamico (*DesignBuilder*), in modo da confrontare l'impatto delle metodologie di calcolo sulla correlazione tra l'indicatore di prestazione energetica e l'SRI.
- La simulazione dello stesso fabbricato è stata replicata per tre differenti zone climatiche italiane, corrispondenti alle città di: Palermo (zona B), Roma (zona D), Milano (zona E)

Nel modello semi-stazionario, l'impossibilità di implementare il servizio di illuminazione e quello di ventilazione meccanica ha comportato una parziale esclusione dei relativi servizi nelle relative valutazioni effettuate.

Per ciascun caso, sono stati estratti e confrontati i valori di SRI e di $E_{pgl,n-ren}$, riportati in Tabella 19.

Tabella 19 – Scenari migliorativi di livelli di smartness di correlazione valutazione $E_{Pgl,n-ren}$ ed SRI.²⁹

CASO STUDIO	Scenario 3		Scenario 4		Scenario 5	
	$E_{pgl,n-ren}$	SRI	$E_{pgl,n-ren}$	SRI	$E_{pgl,n-ren}$	SRI
<i>Semi-stazionario Roma</i>	285,63	9,20%	202,17	11,80%	202,17	12,50%
<i>Dinamico Roma</i>	108,32	9,20%	108,35	11,80%	113,12	12,50%
<i>Semi-stazionario Palermo</i>	181,17	9,20%	128,95	11,80%	128,95	12,50%
<i>Dinamico Palermo</i>	73,24	9,20%	73,29	11,80%	78,06	12,50%
<i>Semi-stazionario Milano</i>	415,46	9,20%	304,72	11,80%	304,72	12,50%
<i>Dinamico Milano</i>	150,5	9,20%	150,55	11,80%	155,31	12,50%

Come si evince dalla Tabella 19 la valutazione con il metodo semi-stazionario conferma i risultati ottenuti nei paragrafi precedenti (un aumento del fabbisogno energetico corrisponde ad una

²⁹ Correlazione studiate sia in regime semi-stazionario che dinamico

riduzione dell'SRI). Altresì dai risultati ottenuti con il metodo dinamico si osserva un andamento opposto, dovuto al fatto che gli scenari implementati non corrispondono ad un incremento dei livelli funzionali (smartness degli impianti) ma ad un incremento del numero dei domini (impianti).

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non erano previste attività di consulenza da capitolato di progetto per la LA4.2.

9 Pubblicazioni scientifiche

Elenco delle pubblicazioni scientifiche risultanti dall'attività svolta nella LA 4.2:

- Alessandro Lorenzo Palma, Luca La Notte, Ruggero Nissim, Biagio Di Pietra, S.A.P.I.EN.T.E. Hybrid System: An Experimental Test Facility Focused on Energy Generation and Hybrid Storage for Self-Consumption Strategies, 2024 IEEE 15th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Luxembourg, Luxembourg, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/PEDG61800.2024.10667415.
- Alessandro Lorenzo Palma, Luca La Notte, Biagio Di Pietra and Ruggero Nissim, *Supercapacitors as a System-Level Solution for Enhanced Self-Consumption Strategies*, 2024 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2024 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Rome, Italy, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope61470.2024.10751531.

10 Eventi di disseminazione

Elenco degli eventi di disseminazione risultanti dall'attività svolta nella LA4.2:

- Seconda Conferenza Nazionale della Rete Italiana Fotovoltaico per la Ricerca e l'Innovazione, 11-12 giugno 2024 - NOI Techpark / Eurac Research - Bolzano **Presentazione orale** "Application of a demand-response-optimized electrical load profile to a plant supplying an energy micro-community" (A.L. Palma)
- 24th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering & 8 I&CPS Industrial and Commercial Power Systems Europe, 17-20 giugno 2024 - Università degli Studi di Roma "La Sapienza" - Facoltà di Ingegneria **Presentazione orale** "Supercapacitors as a system-level solution for enhanced self-consumption strategies" (A.L. Palma)
- IEEE 15th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG 2024), 23-26 giugno 2024, Parc Hotel Alvisse - Lussemburgo **Presentazione orale** "S.A.P.I.EN.T.E. hybrid system: an experimental test facility focused on energy generation and hybrid storage for self-consumption strategies" (A.L. Palma)
- 63rd ERSAs Congress: Regional Science Dialogues for Peace and Sustainable Development. 26 - 30 August 2024, Terceira Island, Portogallo **Presentazione orale** "Studies on an experimental test facility for the emerging energy microcommunities" (A.L. Palma)
- Convegno di Focus Condominio, Milano, 06 Giugno 2024 **Presentazione orale** "EMPOWER, un portale per migliorare la consapevolezza sui consumi energetici nei condomini" (L. La Notte)
- Eurosun 2024 the ISES and IEA SHC International Conference on Sustainable and Solar Energy for Buildings and Industry. 26 - 30 August in Limassol, Cyprus. (R.Nissim)
- Incontri con gli utenti dei condomini inseriti in EMPOWER in collaborazione con UNICAS_DICEM e UNIMILBCA: 09 Luglio 2024 (online), 11 Novembre 2024 (online), 12 Dicembre 2024 (ibrida)
- Incontri presso il CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano) con professionisti e associazioni di categoria sul tema Smart Readiness Indicator: 18 Novembre 2024 (online), 12 Dicembre 2024 (Milano)

- Convegno conclusivo del Progetto 1.5 del Piano Triennale di realizzazione 2022-2024 della Ricerca di Sistema elettrico nazionale (RdS) - Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica - Risultanze dei WP3 e WP4, mercoledì 27 novembre 2024 (URL: <https://www.eventi.enea.it/eventi/eventi-in-primo-piano/dedicato-a/media/piano-triennale-di-realizzazione-della-rds-i-risultati-dei-progetti-1-5-e-1-6.html>):
 - **Presentazione orale** "Applicazione di nuove soluzioni per la gestione ottimizzata del sistema S.A.P.I.EN.T.E." (A.L. Palma, R. Nissim).
 - **Presentazione orale** "Sviluppo di una piattaforma web basata su tecnologie intelligenti per i condomini con impianti termici centralizzati e prime applicazioni dello Smart Readiness Indicator" (L. La Notte).
- Intervento al seminario "Da Consumer a Prosumer" nell'ambito del Corso di aggiornamento professionale di ANACI - 29 Giugno 2024 - Titolo intervento: Strumenti e soluzioni per l'efficientamento energetico dei condomini" (B. Di Pietra)
- Intervento al seminario: Comunità energetiche rinnovabili in Sicilia, organizzato dall'Ordine degli Ingegneri della provincia di Palermo, 25 Novembre 2024. Titolo intervento: S.A.P.I.EN.T.E.- Sistema di Accumulo e Produzione Integrata di ENergia Termica ed Elettrica - realizzato da ENEA per studiare soluzioni innovative per l'Autoconsumo di Energia Rinnovabile nei contesti Condominiali (B. Di Pietra)
- Partecipazione a Convegno Smart Building Conference, Milano 12 giugno 2024. Titolo Intervento Smart Readiness Indicator (SRI), il nuovo indicatore di predisposizione all'intelligenza degli edificio (B. Di Pietra)
- Partecipazione a Workshop Smart Building: un paradigma in continua evoluzione - nell'ambito dell'evento mcTER, Verona 16 ottobre 2024. Titolo intervento: Smart Readiness Indicator (SRI), il nuovo indicatore di predisposizione all'intelligenza degli edifici (B. Di Pietra)
- Partecipazione alla seconda edizione della Community Smart Building organizzata da The European Hous - Ambrosetti - 6 febbraio 2024 (on line) - Titolo intervento: Smart Readiness Indicator (SRI) Aggiornamenti previsti dalla revisione della Direttiva EPBD - prime valutazioni per una prossima applicazione (B. Di Pietra)