RdS
RICERCA DI SISTEMA

ENEA
AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA SICUREZZA ENERGETICA

Ricerca di Sistema elettrico

Valutazione e gestione CER: Modelli di pre-elaborazione delle serie temporali e di ottimizzazione RES per il digital twin delle CE (LA1.13)

A. Borghetti, C. A. Nucci, F. Napolitano, A. Prevedi, F. Tossani

ALMA MATER STUDIORUM UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA E DELL'INFORMAZIONE "GUGLIELMO MARCONI"

RdS_PTR 22-24_PR1.7_LA1.13_330

Valutazione e gestione CER: Modelli di pre-elaborazione delle serie temporali e di ottimizzazione RES per il digital twin delle CE

LA 1.13 - Valutazione e gestione CER: Modelli di pre-elaborazione delle serie temporali e di ottimizzazione RES per il digital twin delle CE (LA 1.13)

A. Borghetti, C. A. Nucci, F. Napolitano, A. Prevedi, F. Tossani (Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione "Guglielmo Marconi")

Gennaio 2025

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: Tema di ricerca 1.7 – Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Linea di attività: LA 1.13

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work Package: Angelo Frascella, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Fabio Napolitano – Università di Bologna

Mese inizio previsto: 13

Mese inizio effettivo: 13

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione tra l'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA) e il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione dell'Università di Bologna (Unibo - DEI) per l'attività di ricerca dal titolo: Valutazione e gestione CER: Modelli di pre-elaborazione delle serie temporali e di ottimizzazione RES per il digital twin delle CE.

Indice

1 Risultati attesi 5
2 Risultati ottenuti 7
3 Prodotti attesi 8
4 Prodotti sviluppati 9
4.1 Codici di identificazione dato anomalo 9
4.2 Codici di calcolo delle energie autoconsumate in comunità energetica 9
5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati 10
6 Sintesi delle attività svolte 11
7 Dettaglio delle attività svolte 12
7.1 Consumi residenziali monitorati nell'ambito del progetto Self-User 12
7.2 Profili standard per tipologia di utenza 13
7.3 Modelli di previsione del carico elettrico 16
7.4 Algoritmi per il riconoscimento dei dati anomali di consumo 17
7.4.1 Metodo basato sulla trasformata wavelet 17
7.4.2 Metodo basato sul KS test 18
7.5 Algoritmi di gestione dei sistemi di accumulo 19
8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte 21
9 Pubblicazioni scientifiche 22
10 Eventi di disseminazione 23

Indice delle figure

Figura 1. Confronto tra il profilo di potenza originale e corretto in giorno anomalo dei carichi residenziali aggregati monitorati durante il progetto Self-User. 13

Figura 2. Consumi elettrici uffici nei giorni: A) lavorativi; B) prefestivi e festivi. 14

Figura 3. Consumi elettrici di scuole nei giorni: A) feriali, B) prefestivi, C) festivi. 14

Figura 4. Consumi elettrici di magazzini refrigerati e uffici, nei giorni: A) feriali; B) prefestivi e festivi. 15

Figura 5. Consumo da misure (nero) e consumo da curva GSE (rosso) 15

Figura 6. Andamento del valore RMS della differenza tra il profilo standard GSE e l'aggregazione di *N* utenti, per ciascun giorno dell'anno....16

Figura 7. Consumo reale e previsto dal modello SARIMA 17

Figura 8. Andamento del *Mean Absolute Scaled Error* MASE calcolato su intervalli di 1 ora, 6 ore e 24 ore in corrispondenza di misure affette da errore. 17

Figura 9. Risultato del programma di identificazione delle anomali mediante wavelet. Cerchiati In rosso i consumi riconosciuti come anomali....18

Figura 10. funzione di densità di probabilità (a), probabilità cumulata (b) del 15 giugno. Utente 5280. 18

Figura 11 Andamento dei consumi dell'utente 5262 dal 13 al 31 maggio: a) energia giornaliera; b) potenza istantanea 19

1 Risultati attesi

Oggetto della Linea di Attività è:

- l'individuazione dei modelli e la realizzazione dei componenti necessari per il trattamento delle serie temporali di input errate e/o incomplete così da renderle consistenti per la successiva elaborazione all'interno di un simulatore di comunità energetica;
- la definizione degli algoritmi di ottimizzazione per la gestione del carico e dell'accumulo nel medio/lungo periodo nel contesto delle comunità energetiche e i modelli tecnico-economici per la previsione del ritorno dell'investimento in diversi scenari.

Nell'ambito dello sviluppo di un simulatore per rappresentare digitalmente il comportamento delle comunità energetiche (digital twin della CE) è prevista la realizzazione di strumenti informatici per l'analisi di dati relativi a serie temporali e la modellazione dei componenti energetici.

Nello specifico risulta necessario definire la tipologia di carichi, elettrici e termici, e gli algoritmi di gestione dei sistemi di accumulo inclusi nella comunità, prevedendo l'utilizzo di dati storici e reali come input al sistema.

Tali dati di input consistono in serie temporali soggette ai seguenti problemi:

1. risultati di misure possono essere affetti da errore, e il sistema di raccolta e comunicazione del dato può esperire la perdita del dato per periodi più o meno lunghi. L'utilizzo di dati reali richiede quindi l'implementazione di algoritmi di riconoscimento del dato anomalo e loro correzione mediante l'adozione di modelli di previsione che forniscano andamenti realistici. Tali modelli previsionali sono utili anche per poter stimare come i carichi possano variare nel tempo in funzione di parametri opportunamente scelti.
2. Nelle configurazioni reali di comunità energetiche e nelle corrispondenti digital twins, è necessario definire i dati in ingresso ai sistemi di gestione degli accumuli elettrici. I sistemi di accumulo al servizio di comunità energetiche, infatti, riescono a massimizzare l'energia condivisa a livello di comunità solo se sia nota, in tempo reale, la domanda complessiva di energia elettrica a livello di comunità e la produzione di energia elettrica di ogni prosumer. Una tale conoscenza richiede l'adozione di un sistema di misura distribuito ed una infrastruttura di raccolta e comunicazione del dato articolata, oltre ad algoritmi di stima dello stato in grado di sostituire i dati mancanti o errati e flussi di dati asincroni.

Le attività previste nel presente contratto riflettono la risoluzione di tali problemi e consistono quindi nei seguenti punti:

- Sviluppo di modelli di carichi elettrici, per diverse tipologie di utenze e potenze contrattuali, da perfezionare sulla base di dati reali messi a disposizione da ENEA e disponibili in letteratura. Tali modelli verranno implementati in codici di calcolo in grado di gestire dati provenienti da sistemi di misura distribuiti eventualmente affetti da errori che hanno lo scopo di riconoscere la congruità dei dati ed eventualmente correggerli per gli scopi di sistemi di gestione ottimali delle risorse controllabili di comunità energetiche. Tali modelli verranno resi parametrizzabili, allo scopo di rendere possibile la previsione di profili di carico in diversi possibili scenari futuri ed effettuare studi di sensitività dei flussi di cassa e dei tempi di ritorno dell'investimento al variare degli scenari ipotizzati.

- Sviluppare sistemi di gestione della ricarica dei sistemi di accumulo che implementano modelli di carico e di irraggiamento solare al fine di poter gestire sia la disponibilità di dati provenienti da sistemi di misura distribuiti, ma con flussi asincroni o errati, sia la loro assenza o il loro aggiornamento regolare ad esempio ogni 24 ore. Tra gli scenari che verranno presi in considerazione vi sono diverse configurazioni di risorse di approvvigionamento elettrico e termico nei settori residenziali, terziario o industriale e diverse possibili evoluzioni dell'inquadramento legislativo e regolamentare delle comunità energetiche, come anche la possibilità di effettuare compravendita di energia elettrica tra utenti finali.

2 Risultati ottenuti

L'attività di ricerca condotta in tale linea di attività ha prodotto i seguenti risultati:

- modelli di carichi elettrici per diverse tipologie di utenze;
- sintesi dello stato dell'arte sui modelli di previsione dei carichi elettrici;
- test di caratterizzazione probabilistica di consumi elettrici residenziali;
- modello SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average) di previsione del carico elettrico;
- analisi e correzione dei dati raccolti durante la campagna di monitoraggio condotta nell'ambito del progetto Self-User;
- metodo di riconoscimento del dato anomalo di carico elettrico basato sulle distribuzioni di probabilità dei consumi quartorari e sua implementazione in codice Matlab;
- metodo di riconoscimento del dato anomalo di carico elettrico basato sull'uso della trasformata wavelet e sua implementazione in codice Matlab;
- algoritmi di simulazione delle energie autoconsumate, prodotte e condivise all'interno di comunità energetiche con diverse possibili strategie di gestione dei sistemi di accumulo e sua implementazione in codici Matlab o Excel.

In particolare, i modelli di carico elettrici descritti e condivisi sono: i carichi domestici residenziali inferiti durante la campagna di monitoraggio del progetto Self-User; carichi standard di produzione e consumo forniti da GSE; carichi civili quali uffici e scuole, i primi forniti da Enea, i secondi reperiti in letteratura; carichi di attività industriale raccolti presso il CAAB di Bologna durante il progetto Climate-Kic GECO.

I risultati ottenuti sono in linea con quanto previsto dal capitolato e consentono di poter simulare i flussi di potenza all'interno di comunità energetiche, con e senza sistemi di accumulo, che possono essere gestiti secondo quanto previsto dalle regole tecniche attualmente vigenti in Italia oppure secondo regole diverse. Tali risultati consentono di valutare le energie scambiate, i tassi di autoconsumo ed i costi di approvvigionamento di comunità energetiche al variare della loro taglia e composizione.

Gli algoritmi di riconoscimento del dato anomalo di produzione e consumo sviluppati sono concepiti per processare i consumi quartorari di utenti finali raccolti mediante dispositivi utente in grado di ricevere i dati dal contatore oppure dispositivi di misura del tipo NILM (non intrusive load monitoring); tali algoritmi consentono di rilevare sia l'errore di misura sia il dato corretto che si discosta dall'andamento tipico dei periodi precedenti.

3 Prodotti attesi

I prodotti attesi sono:

- modelli di carichi elettrici, per diverse tipologie di utenze;
- algoritmi di riconoscimento e correzione del dato anomalo di consumo;
- algoritmi di gestione della ricarica dei sistemi di accumulo per comunità energetiche
- rapporto tecnico di dettaglio sulle attività svolte;
- codici di calcolo in linguaggio Matlab/Octave integrabile all'interno del simulatore sviluppato per rappresentare digitalmente il comportamento delle comunità energetiche.

4 Prodotti sviluppati

4.1 Codici di identificazione dato anomalo

I programmi sviluppati hanno lo scopo di identificare giorni o slot temporali anomali del profilo di consumo dell'utente finale non aggregato. L'anomalia consiste nel rilevare un pattern di consumo differente da quello considerato 'normale'; la definizione di anomalia avviene mediante la definizione di soglie.

I codici sono stati sviluppati nell'ipotesi di dati con risoluzione temporale quartoraria e vengono eseguiti una volta a disposizione i consumi dell'arco di una giornata.

Il programma che utilizza la trasformata wavelet è preposto ad analizzare i profili di consumo e restituisce l'informazione di possibile consumo anomalo con le rispettive date. Il programma, messo a punto su dati di consumi domestici residenziale, identifica sia i valori di carico riconducibili ad errori di misura o comunicazione sia quelli che risultano anomali perché legati a cambiamenti significativi delle abitudini degli occupanti della residenza.

È stato sviluppato anche un altro codice di identificazione dato anomalo che si basa sul Kolmogorov–Smirnov (KS) test, ossia sulla distanza tra due distribuzioni di probabilità cumulata, quella dei consumi quartorari della giornata in esame e quella definita utilizzando profili di consumo assunti come riferimento.

Vengono controllati anche i marcatori temporali delle misure allo scopo di verificare l'assenza di qualche dato al fine della sua eventuale sostituzione con valore verosimile.

4.2 Codici di calcolo delle energie autoconsumate in comunità energetica

I codici sviluppati, due in matlab ed uno in excel, consentono di stimare le energie prodotte ed autoconsumate di una comunità energetica, su base annua, al variare della composizione della comunità, ossia numero e tipologia di utenti, del numero e della taglia di generatori fotovoltaici, e della strategia di gestione dei sistemi di accumulo dell'energia elettrica eventualmente presenti.

Le possibili strategie di gestione dei sistemi di accumulo considerate sono: 1) massimizzazione dell'autoconsumo del singolo prosumer; 2) massimizzazione dell'energia condivisa con ricarica da rete esterna inibita; 3) massimizzazione dell'energia condivisa con possibilità di ricarica da rete esterna o da altri prosumer della comunità.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non si ravvisano scostamenti tecnici o economici rispetto al preventivo né criticità particolari.

6 Sintesi delle attività svolte

L'attività svolta è stata in primo luogo il data cleaning dei dati di consumo domestico residenziale raccolti nel progetto Self-User, relativi a 46 appartamenti su di un arco di 31 mesi. È stata effettuata l'analisi sullo stato dell'arte dei modelli di previsione di carico elettrico e modelli di caratterizzazione probabilistica dei consumi residenziali. Sono stati definiti modelli di carichi residenziali, commerciali, civili e industriali utilizzabili in simulatori e digital twin di comunità energetiche. Sono stati sviluppati e implementati metodi di riconoscimento dei dati anomali basati su distribuzioni di probabilità e trasformata wavelet. Sono stati messi a punto algoritmi di simulazione degli scambi di energie in comunità energetiche, considerando diverse strategie di gestione dei sistemi di accumulo.

7 Dettaglio delle attività svolte

Per quanto riguarda l'attività condotta sulla definizione dei modelli di carico elettrico, è stata effettuata l'analisi dei dati di consumo domestico residenziale raccolti durante il progetto Self-User. I dati anomali sono stati sostituiti mediante interpolazione lineare ed un programma in Visual Basic è stato predisposto per consentire l'aggregazione delle utenze finali. Ulteriori dettagli nella sezione 7.1.

Le potenze, mediate sul quarto d'ora, su di un anno, sono state selezionate per diverse tipologie di carichi: carichi domestici residenziali, uffici, scuole, carico elettrico per condizionamento, carichi di attività commerciale e di distribuzione, come illustrato in sezione 7.2. Il numero di utenze residenziali da aggregare per ottenere un profilo prevedibile e meno aleatorio è stato inoltre identificato.

È stata effettuata l'analisi della letteratura su modelli di previsione del carico elettrico e sugli indicatori dell'errore di previsione. È stato sviluppato un modello SARIMA di previsione del carico elettrico, di cui si discute brevemente nella sezione 7.3

Due algoritmi di riconoscimento del dato anomalo di consumo sono stati messi a punto: uno basato sull'utilizzo della trasformata wavelet, l'altro basato sul KS tesi, vedi sezione 7.4.

La sezione 7.5 discute dei possibili algoritmi per la gestione di sistemi di accumulo in comunità energetiche, secondo diversi possibili regole tecniche di connessione, utili per la stima dei flussi di cassa e della remunerativitá dei flussi di potenza in comunità energetiche.

Ulteriori dettagli sui metodi sviluppati ed implementati sono illustrati nella documentazione di dettaglio prodotta nel corso della collaborazione.

7.1 Consumi residenziali monitorati nell'ambito del progetto Self-User

Nell'ambito del progetto Self-User è stata implementata una campagna di misura dei consumi elettrici presso un condominio situato nella località di Scandiano (RE). La campagna di misura è stata effettuata utilizzando dispositivi di tipo NILM (non-intrusive load monitoring) per un totale di 56 dispositivi, uno per ogni POD (point of delivery).

I dispositivi installati hanno frequenza di campionamento pari ad 1 s. La raccolta dati è partita ad ottobre 2020 e terminata il 14 maggio 2023 portando al recupero di una significativa quantità di dati. I dati raccolti in alcune occasioni sono affetti da errori: tipicamente il dato è ripetuto identicamente per un periodo più o meno lungo o è assente. Il riconoscimento del dato anomalo è stato effettuato inizialmente in modo manuale al fine di selezionare una base di dati su cui verificare l'efficacia di algoritmi automatici di data cleaning.

Il risultato dell'analisi è stato inserito in un file Excel di sintesi (data.xlsx) che riporta la data, la settimana dell'anno, l'indicazione della presenza delle misure e la loro accettabilità, inferita sulla presenza più o mena estesa di anomalie, ed eventuali note.

Per gli anni 2021 e 2022, il cui monitoraggio copre l'intero anno solare, sono stati generati i file "self_user_aggregato_2021.xlsx" e "self_user_aggregato_2022.xlsx" che contengono il profilo di potenza, mediata sui 15 minuti, risultante dall'aggregazione di tutti gli appartamenti. Nella scheda *originale* è riportato il profilo ottenuto dalla somma delle misure grezze, non processate, mentre nella scheda *corretto* è stato inserito un profilo corretto, ovvero in cui i giorni classificati come *non accettabili* vengono ricostruiti utilizzando una interpolazione lineare dei consumi, delle giornate precedenti e successive, ritenuti accettabili.

La Figura 1 rappresenta, ad esempio, il confronto per il giorno 19 maggio 2022 del profilo corretto e di quello originale.

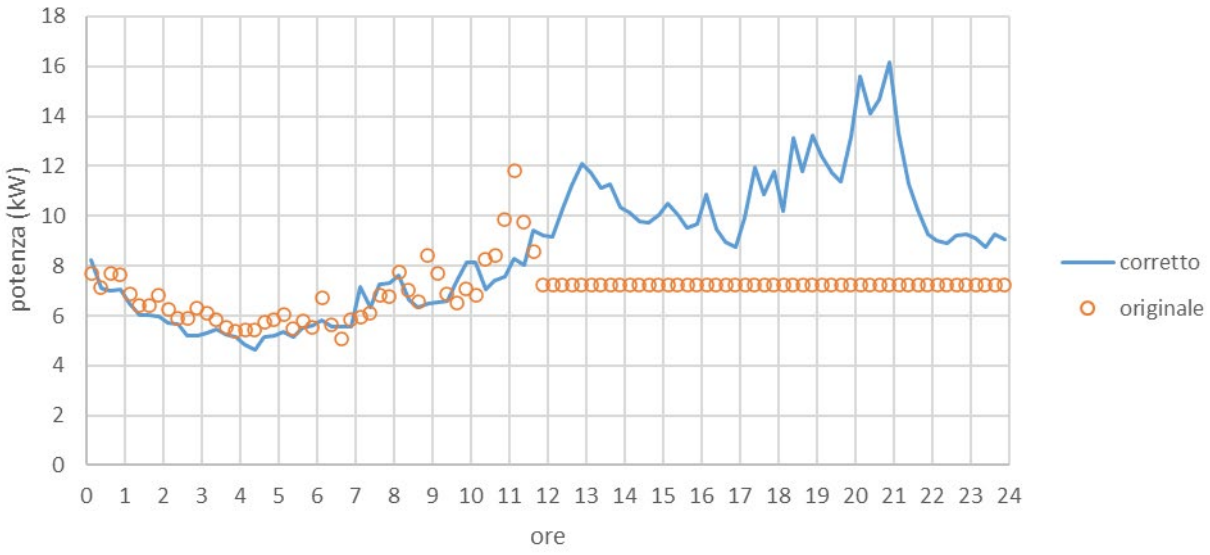


Figura 1. Confronto tra il profilo di potenza originale e corretto in giorno anomalo dei carichi residenziali aggregati monitorati durante il progetto Self-User.

Al fine di realizzare uno strumento per la visualizzazione delle curve di consumo dei singoli appartamenti è stato realizzato il file "self_user_partial_rev2.xlsm" che consente di caricare i consumi del 2021 degli appartamenti selezionati tramite checkbox. Il file mostra anche il confronto dei consumi selezionati con la previsione effettuata interpolando linearmente i consumi dello stesso quarto d'ora dei tre giorni precedenti.

Il file "self_user_partial_corr.xlsm" consente di selezionare uno o più appartamenti come in "self_user_partial_rev2.xlsm" ma con i dati sottoposti ad opportuno data cleaning.

7.2 Profili standard per tipologia di utenza

Sono stati selezionati profili standard per carichi domestici residenziali, uffici (Figura 2), scuole (Figura 3), e utenze industriali (Figura 4), basandosi su diverse campagne di monitoraggio oppure su letteratura.

È stata utilizzata una procedura di creazione di un insieme di profili quartorari su di un arco di tempo annuale, che tiene conto del diverso andamento nei giorni feriali, festivi e prefestivi, delle festività nazionali e locali e delle caratteristiche specifiche del carico elettrico (quali ad esempio la chiusura delle scuole nei mesi estivi). Tali profili sono stai utilizzati negli algoritmi di simulazione di comunità energetiche di cui al paragrafo 7.5

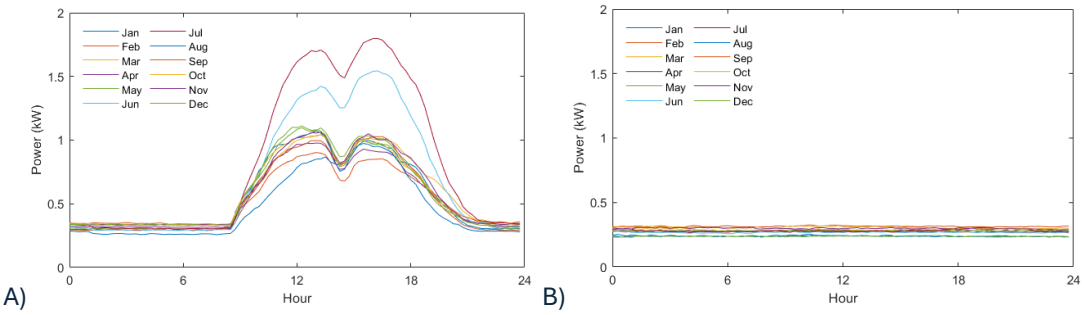


Figura 2. Consumi elettrici uffici nei giorni: A) lavorativi; B) prefestivi e festivi.

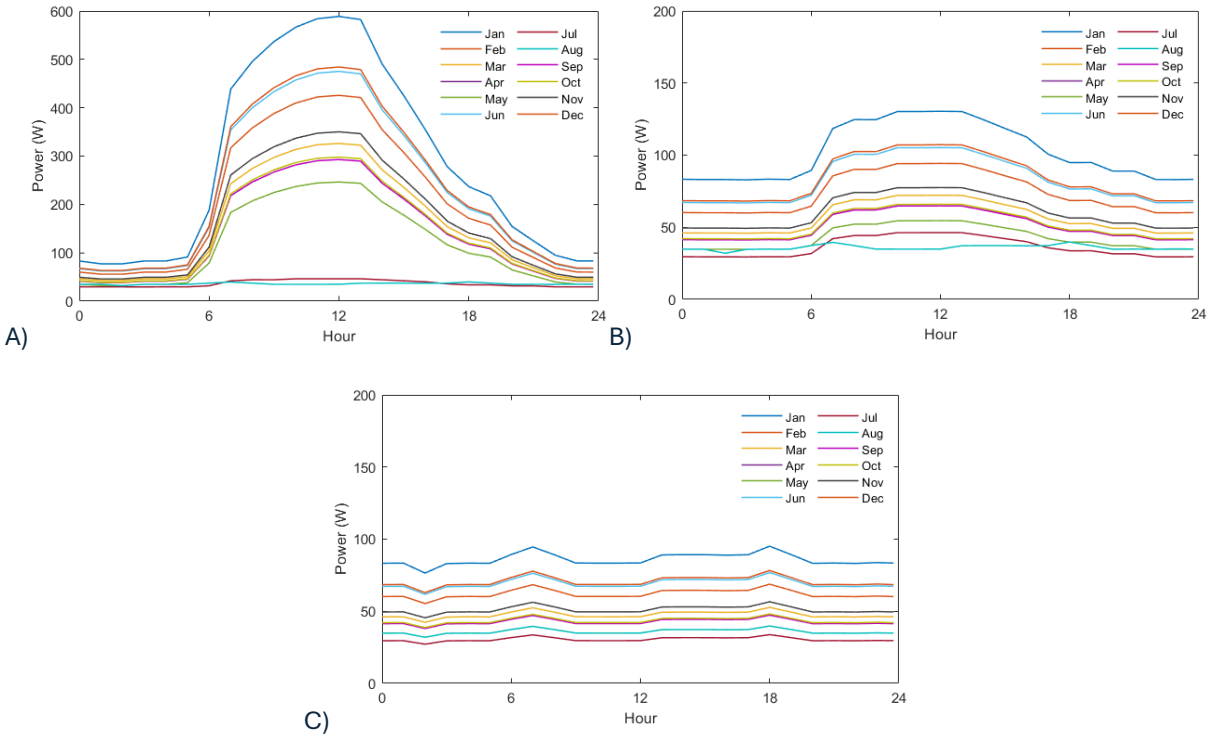


Figura 3. Consumi elettrici di scuole nei giorni: A) feriali, B) prefestivi, C) festivi.

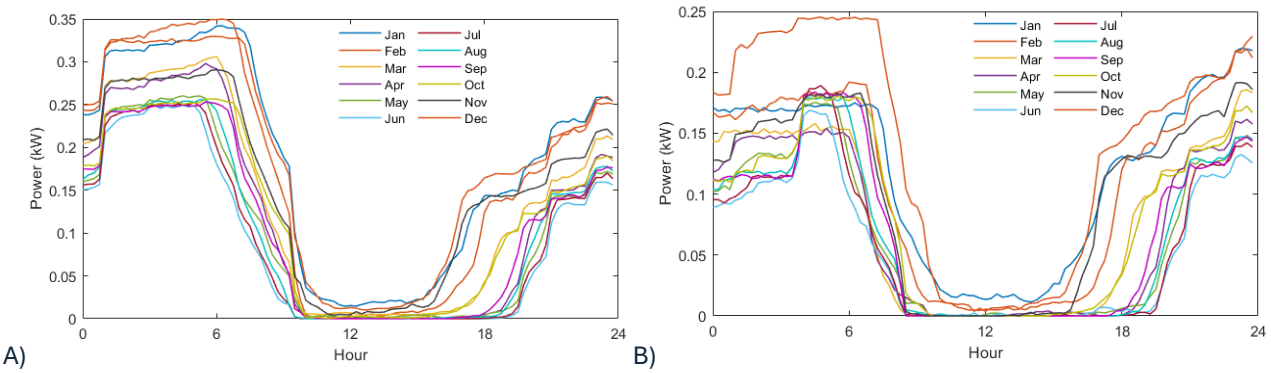


Figura 4. Consumi elettrici di magazzini refrigerati e uffici, nei giorni: A) feriali; B) prefestivi e festivi.

Il profilo domestico aggregato e mediato dedotto dai dati del progetto Self-User è stato confrontato con i profili standard forniti dal GSE, mostrando un sostanziale accordo (Figura 5).

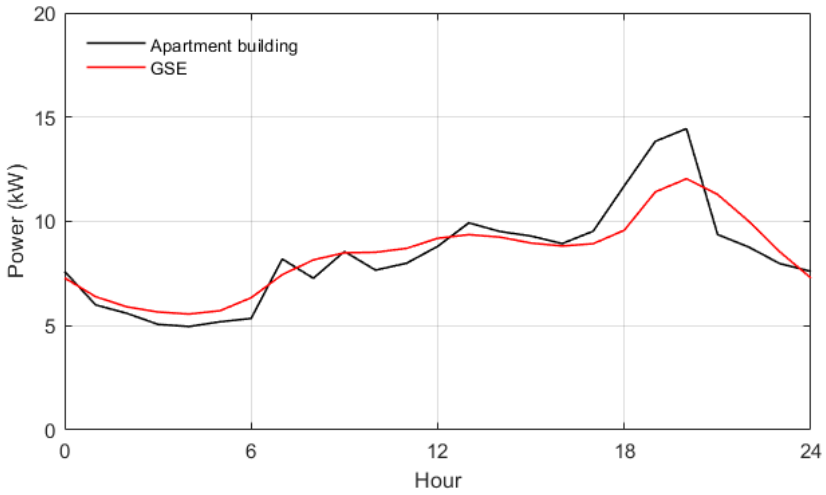


Figura 5. Consumo da misure (nero) e consumo da curva GSE (rosso)

È stato stimato il numero minimo di utenze da aggregare per poter considerare il profilo aggregato prossimo al profilo standard sulla base dell'andamento dell'errore RMS al variare del numero di utenti, ottenendo l'indicazione di una numerosità minima di circa 15 utenti finali, si veda la Figura 6.

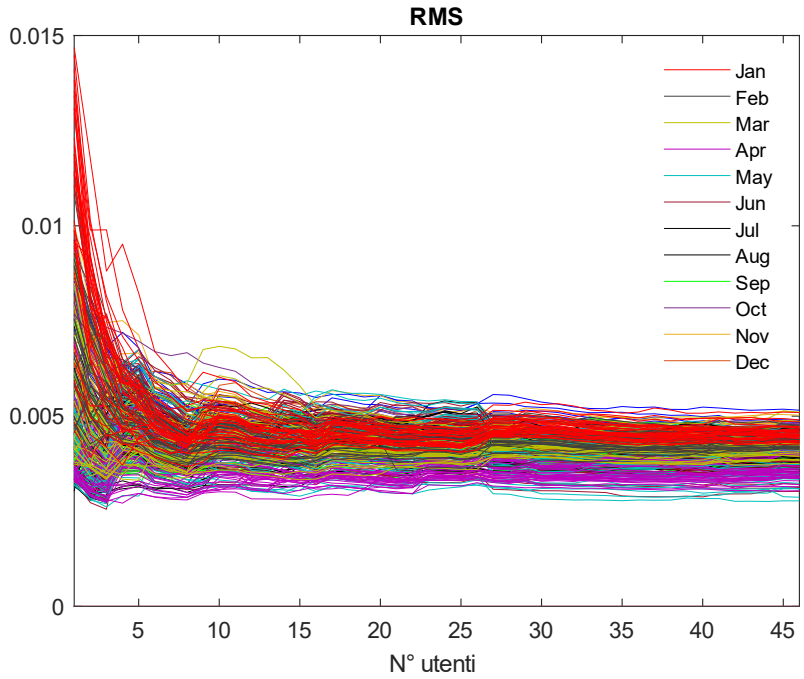


Figura 6. Andamento del valore RMS della differenza tra il profilo standard GSE e l'aggregazione di *N* utenti, per ciascun giorno dell'anno.

7.3 Modelli di previsione del carico elettrico

Sulla base dell'analisi della letteratura sui modelli di previsone di carico elettrico è stato individuato il *Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average* (SARIMA) come modello autoregressivo più adeguato per prevedere il consumo in un dato istante della giornata in funzione dei consumi delle ore precedenti. In particolare, il modello realizzato è una estensione del modello *autoregressive integrated moving average* (ARIMA) utilizzato quando le serie temporali hanno una componente stagionale.

In Figura 7 è mostrato il confronto tra la previsione per le successive 24 ore effettuata dal SARIMA alla mezzanotte ed i valori reali successivamente misurati, nel caso di consumo aggregato del condominio Self-User nella giornata del 1 febbraio 2021.

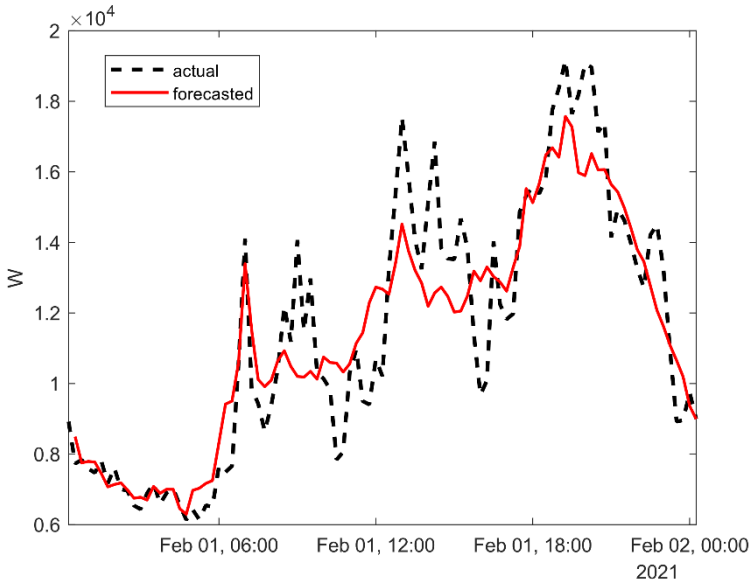


Figura 7. Consumo reale e previsto dal modello SARIMA

È stata verificata la possibilità di utilizzare il modello di previsione SARIMA per rilevare dati anomali mediante misura della somiglianza del dato misurato con quello previsto.

Dall'analisi effettuata segue che l'indicatore più utile in tal senso è il *Mean Absolute Scaled Error* (MASE), con finestra di osservazione pari a 6 ore. si veda la Figura 8 in cui sono riportati i valori per finestre di 1, 6 e 24 ore.

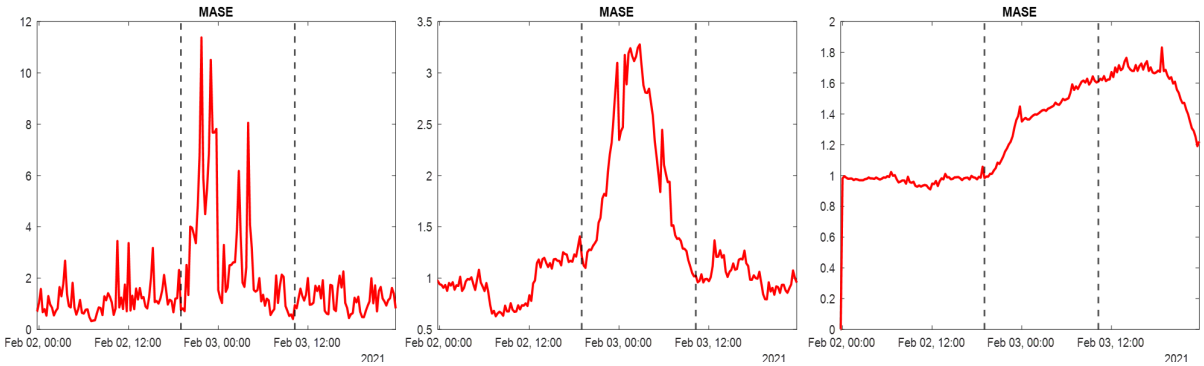


Figura 8. Andamento del *Mean Absolute Scaled Error* MASE calcolato su intervalli di 1 ora, 6 ore e 24 ore in corrispondenza di misure affette da errore.

7.4 Algoritmi per il riconoscimento dei dati anomali di consumo

7.4.1 Metodo basato sulla trasformata wavelet

Si è sviluppato un metodo che utilizza la trasformata wavelet, con madre wavelet *bior*. La trasformata wavelet viene applicata al profilo di consumo delle 24 ore precedenti. L'identificazione di una potenziale anomalia nel pattern di consumo viene eseguita calcolando la deviazione standard dell'approssimazione filtrata dalla trasformazione.

L'utilizzo dell'approssimazione permette di tracciare il profilo di consumo smussando i picchi tipici del profilo di un utente non aggregato pur mantenendone l'informazione temporale. Il profilo è considerato anomalo se la deviazione standard non rientra nell'intervallo compreso tra la deviazione standard minima e massima selezionata per l'utente. Il metodo implementato è utile non solo per identificare le misure affette da errore ma anche i consumi anomali perché corrispondenti a variazioni nelle abitudini dei consumatori. In Figura 9, ad esempio, viene mostrato il risultato del programma che mostra come anomali consumi insolitamente bassi.

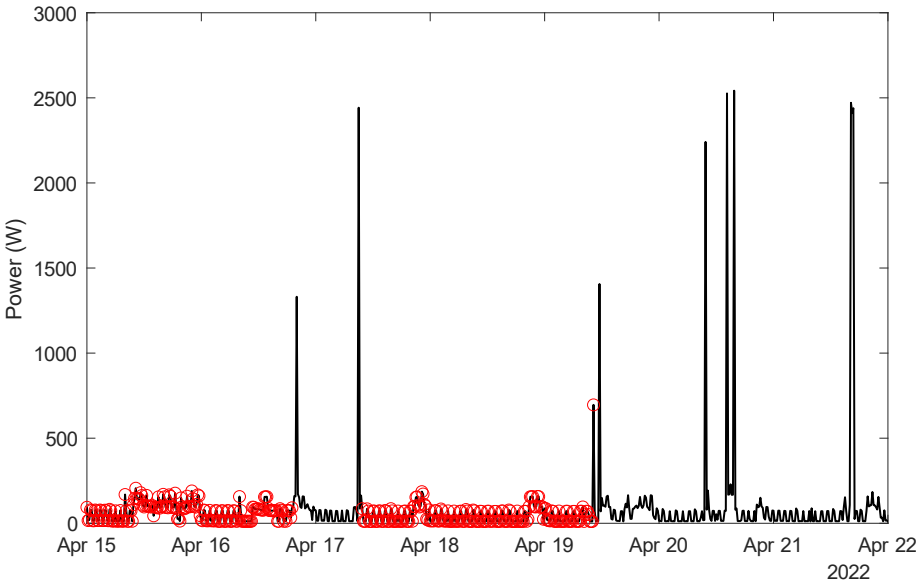
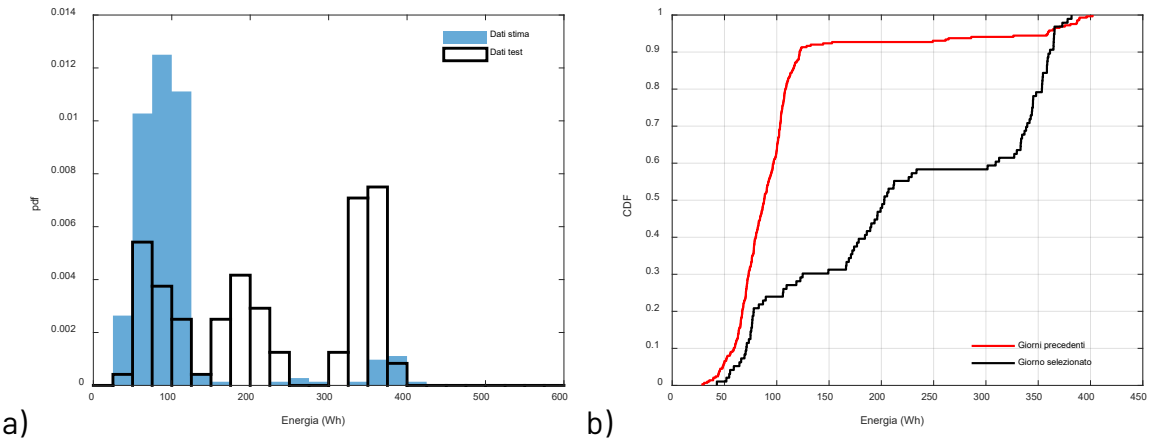


Figura 9. Risultato del programma di identificazione delle anomali mediante wavelet. Cerchiati In rosso i consumi riconosciuti come anomali.

7.4.2 Metodo basato sul KS test

Il metodo proposto consiste nel confrontare la distribuzione di probabilità della potenza media calcolata ogni 15 minuti per il giorno considerato con quella ottenuta da uno o più giorni presi come riferimento della stessa categoria (feriale, festivo o prefestivo). Il KS test fornisce un'indicazione della distanza tra le due curve di probabilità cumulata. In Figura 10 è riportato il confronto ottenuto tra i dati di consumo del 15 giugno con quelli del 10, 11 e 14 giugno. In questo caso, nel giorno monitorato i consumi si spostano verso valori sensibilmente maggiori, fino a 400 Wh, probabilmente dovuto all'utilizzo di sistemi di condizionamento.



a) b)

Figura 10. funzione di densità di probabilità (a), probabilità cumulata (b) del 15 giugno. Utente 5280.

Il metodo messo a punto consente di rilevare la diversa distribuzione del consumo anche rispetto a giorni caratterizzati da una energia giornaliera paragonabile, come nel caso dell'utenza ID 5262 che il 23 maggio viene disabitata (Figura 11).

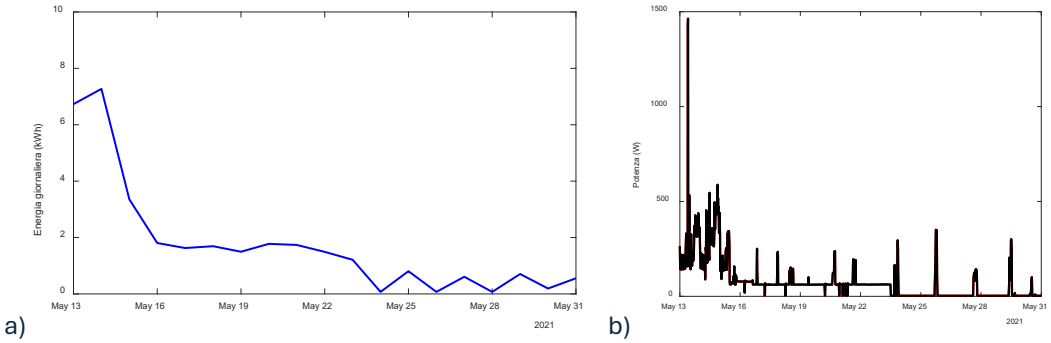


Figura 11 Andamento dei consumi dell'utente 5262 dal 13 al 31 maggio: a) energia giornaliera; b) potenza istantanea

7.5 Algoritmi di gestione dei sistemi di accumulo

La gestione dei sistemi di accumulo in comunità energetiche è resa complicata da alcuni aspetti legislativi e regolamentari sull'origine rinnovabile della fonte primaria utilizzata per produrre l'energia elettrica immagazzinata nel sistema di accumulo.

Il sistema di accumulo che condivide il bus DC con l'impianto fotovoltaico è connesso con il resto dell'impianto da un inverter in genere bidirezionale che può essere impostato perché la ricarica della batteria dall'esterno non venga mai effettuata.

La ricarica dall'esterno può essere abilitata quando l'inverter è impostato per effettuare la ricarica durante le ore in cui il prezzo dell'energia è più bassa.

Il servizio di *time shifting* fornito dai sistemi di accumulo può essere convenientemente implementato nelle comunità energetiche ma occorre tenere presente alcuni limiti di applicazione, alla luce delle regole di incentivazione e di mercato dell'energia attualmente vigenti in Italia.

Tali limiti dipendono essenzialmente dal fatto che l'energia prelevata dalla rete ha in genere un costo maggiore del prezzo corrisposto dal GSE per il ritiro dell'energia immessa in rete e che l'energia autoconsumata a livello di comunità, che riceve l'incentivo, viene in genere diminuita mediante un opportuno fattore nel caso in cui il sistema di accumulo viene ricaricato mediante energia prelevata dalla rete. Da ciò segue che ricaricare il sistema di accumulo dalla rete, o da un altro produttore della comunità, può essere conveniente solo per coprire il carico proprio del prosumer (o consumatore puro) sfruttando il minor prezzo dell'energia durante l'arco della giornata. Non vi è invece convenienza a ricaricare il sistema di accumulo dalla rete, o da altro produttore della comunità, per aumentare l'energia autoconsumata a livello di comunità (quella che nelle previgenti regole tecniche del GSE era definita "energia condivisa").

Può essere conveniente spostare nel tempo l'iniezione in rete dell'energia prodotta dal prosumer per aumentare il tasso di autoconsumo collettivo solo se l'energia è prodotta sotto lo

stesso POD del prosumer. Quest'ultimo caso risulta di interesse solo nel caso di utente con grande potenza installata di produzione e accumulo e carico limitato, poiché il risparmio in bolletta per autoconsumo proprio "sotto il contatore" è in genere più consistente, per MWh, della remunerazione dell'energia condivisa, essendo l'incentivo in genere inferiore al costo dell'energia per l'utente finale.

Alla luce delle precedenti considerazioni, le logiche di gestione dei sistemi di accumulo possono essere le seguenti:

- Ottimizzazione del tasso di autoconsumo istantaneo del singolo prosumer;
- Massimizzazione dell'energia autoconsumata del singolo prosumer, tenendo conto delle tariffe multiorarie;
- Massimizzazione dell'energia autoconsumata del singolo prosumer, tenendo conto delle tariffe multiorarie, e dell'energia condivisa a livello di comunità.

La strategia 1 richiede il solo monitoraggio della potenza istantanea al contatore di scambio M1.

La strategia 2 richiede il monitoraggio della potenza istantanea al contatore di scambio M1, ma anche la previsione del carico e della produzione del prosumer.

La strategia 3 richiede il monitoraggio della potenza istantanea al contatore di scambio M1, la previsione del carico e della produzione del prosumer e del resto della comunità.

Tenuto conto dei costi di una infrastruttura distribuita di misura, la strategia 3 risulta percorribile nel caso in cui il carico del resto della comunità sia facilmente prevedibile e non richiede un monitoraggio continuo (servizi continui, illuminazione).

Tenuto conto che il risparmio in bolletta è in genere più consistente dell'incentivo, non conviene implementare la strategia 3 mediante ottimizzazione solo istantanea, che insegua il tasso di condivisione a discapito dell'autoconsumo proprio nelle ore successive. Un tale modello di ottimizzazione istantanea è stato sviluppato nel progetto Self-User, in cui dopo la scarica completa dei sistemi di accumulo può avvenire l'acquisto di energia dalla rete per il carico proprio.

Modelli di gestione della batteria 1, 2 e 3 sono stati implementati al fine di determinare le energie vendute, autoconsumate e condivise su base annuale per diverse configurazioni di comunità energetiche, a fini di dimensionamento dei sistemi di accumulo. Ulteriori dettagli sono disponibili nella documentazione prodotta nel corso della collaborazione.

È stata inoltre ipotizzata una evoluzione delle regole di mercato dell'energia all'interno delle comunità, con abolizione del divieto di compravendita di energia tra privati. Il prezzo di compravendita di energia è stato considerato intermedio tra il prezzo di acquisto e vendita ed è stata considerata la possibilità di ricarica di sistemi di accumulo da energia proveniente da altri produttori della comunità.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state utilizzate consulenze all'interno della LA.

9 Pubblicazioni scientifiche

Pubblicazioni scientifiche relative all'attività svolta sono in preparazione.

10 Eventi di disseminazione

I risultati dell'attività di ricerca non sono stati ancora oggetto di disseminazione.