



UNIVERSITA POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA DI INGEGNERIA

Corso di laurea triennale in Ingegneria Elettronica

**Analisi dei contributi aggregati e dei singoli carichi in ambito
residenziale per load monitoring and management**

**Analysis of aggregate contributions and individual loads in
residential settings for load monitoring and management**

Tesi di Laurea di:

Matteo Foria

Relatore: Chiar.mo

Prof. Emanuele Principi

Correlatori:

Prof. Stefano Squartini

Dott.ssa Giulia Tanoni

Anno Accademico 2023/2024

Sommario

1. Introduzione	4
1.1 Obiettivi della tesi.....	6
1.2 Importanza del load monitoring and management in ambito residenziale.....	7
1.3 Metodi di monitoraggio intrusivi e non intrusivi	7
1.4 Studi precedenti sul risparmio energetico in ambito residenziale.....	9
2. Descrizione dei dataset.....	12
2.1 Il dataset REFIT	12
2.2 Il dataset MAC.....	14
2.3 Ricampionamento e pulizia dei dati pre-analisi	17
3. Analisi del consumo aggregato	19
3.1 Discussione generale sul load variability index	19
3.2 Analisi del consumo medio e del picco di potenza su base giornaliera ed oraria	21
3.3 Rappresentazione grafica: istogrammi delle osservazioni	22
3.4 Correlazione dei consumi tra giorni consecutivi e tra stessi giorni di settimane consecutive	33
3.5 Scatter plot relativi alle correlazioni.....	34
3.6 Load variability index su base giornaliera	38
3.7 Rappresentazione grafica del LVI.....	39
4. Analisi dei singoli elettrodomestici.....	43
4.1 Numero di accensioni ora per ora per ogni giorno della settimana	43
4.2 Rappresentazione grafica dell'andamento delle accensioni	44
4.3 Consumo medio e picco di potenza.....	53
4.4 Rappresentazione grafica del consumo medio e del picco di potenza	54
4.5 Consumo energetico in wattora giornaliero	63
4.6 Rappresentazione grafica dell'energia in wattora consumata	63
5. Conclusioni.....	74
6. Bibliografia.....	76

1.Introduzione

L'efficienza energetica è diventata una priorità nella gestione delle risorse globali, specialmente nel settore residenziale, che rappresenta una quota significativa del consumo energetico complessivo. In questo contesto, il monitoraggio e la gestione dei carichi elettrici sono strumenti essenziali per ottimizzare i consumi e promuovere il risparmio energetico. Il load monitoring consiste nella misurazione ed analisi dei consumi elettrici di un edificio, con l'obiettivo di identificare i pattern di utilizzo dei vari dispositivi elettrici. Quando questa analisi viene combinata con strategie di gestione ottimizzata dei carichi (load management), diventa possibile ridurre i consumi energetici fino al 30%, secondo studi recenti. Un'analisi accurata del consumo energetico in ambito residenziale consente, infatti, di identificare opportunità di risparmio energetico attraverso l'introduzione di strategie di risposta alla domanda (demand response) o di gestione intelligente dei dispositivi. Conoscere i profili di consumo degli elettrodomestici ed il loro impatto sul carico aggregato è il primo passo per sviluppare sistemi che possano regolare automaticamente l'uso dell'energia in base alla disponibilità di risorse, ai costi energetici e alle esigenze degli utenti. Gli elettrodomestici, specialmente quelli più energivori, contribuiscono in modo significativo al consumo complessivo di un'abitazione, ed è per questo motivo che un'analisi dettagliata del loro comportamento è essenziale per ottimizzare l'efficienza energetica. Studi precedenti hanno dimostrato che la disaggregazione del carico ed il monitoraggio specifico degli elettrodomestici possono portare a significativi risparmi energetici, soprattutto quando gli utenti sono informati sui propri consumi in tempo reale. La disponibilità di queste informazioni permette di adottare comportamenti più consapevoli e di implementare soluzioni di automazione domestica, che riducono il consumo complessivo. La sfida principale è riuscire ad elaborare una strategia che non solo tenga conto del consumo energetico complessivo all'interno di una casa, ma che prenda in esame il profilo di carico di ciascun elettrodomestico, identificando le sue caratteristiche di utilizzo e le sue possibili inefficienze. In particolare, l'analisi di diversi dataset di consumi elettrici (monitorati costantemente) in edifici residenziali permette di esplorare i comportamenti energetici delle abitazioni, sia in modo aggregato che disaggregato, offrendo una panoramica completa sui principali carichi elettrici e le loro variazioni nel corso della giornata, della settimana, e delle stagioni. Un'adeguata conoscenza dei consumi non solo consente di ridurre i costi energetici, ma offre anche la possibilità di implementare soluzioni di gestione dei

carichi automatizzate, capaci di distribuire l'energia in modo ottimale tra le varie utenze domestiche.

1.1 Obiettivi della tesi

L'obiettivo di questa tesi è quello di sviluppare un'analisi approfondita dei consumi energetici in ambito residenziale per comprendere i pattern di utilizzo dei carichi elettrici e identificare strategie ottimali di gestione dei consumi. Per farlo, si utilizzeranno due dataset che, dopo un opportuno preprocessing, monitorano i consumi elettrici ogni 8 secondi all'interno di un arco di tempo ben definito. Il primo dataset (REFIT) è relativo ad una casa della Gran Bretagna mentre il secondo ad una casa italiana. I dati a disposizione sono processati utilizzando il software Matlab, al fine di produrre codici (salvati in un'apposita cartella GitHub [1]) che effettuano calcoli analitici sui consumi in esame, fornendo anche rappresentazioni grafiche che aiutano a comprendere l'utilizzo quotidiano dell'energia nelle due case analizzate. Verrà effettuata un'analisi sul consumo aggregato riguardante i seguenti aspetti:

- Analisi del consumo medio e del picco di potenza su base giornaliera ed oraria
- Correlazioni dei consumi aggregati relativi a giorni consecutivi e a stessi giorni di settimane consecutive
- Load variability index: indice di variabilità dei consumi giornalieri per vedere se la casa può essere inclusa in strategie di demand-response.

In aggiunta, la tesi esplorerà la disaggregazione del carico tramite l'analisi di specifici elettrodomestici (due per dataset), riguardante:

- Il numero di accensioni ora per ora per ogni giorno della settimana
- Analisi del consumo medio e del picco di potenza
- Analisi del consumo di energia in wattora giornaliero

L'analisi dei singoli carichi aiuterà a comprendere come il monitoraggio individuale possa contribuire ad una maggiore consapevolezza da parte degli utenti e facilitare l'adozione di tecniche di automazione domestica e demand response.

In sostanza, il lavoro punta a dimostrare come un'analisi accurata dei dati di consumo possa portare a una riduzione dei costi energetici e all'introduzione di strategie di gestione automatizzata che migliorino l'efficienza energetica complessiva in ambiente residenziale.

1.2 Importanza del load monitoring and management in ambito residenziale

Il load monitoring e la gestione dei carichi (load management) in ambito residenziale, hanno acquisito una crescente rilevanza negli ultimi anni, soprattutto a causa della necessità di ridurre i consumi energetici e migliorare l'efficienza nelle abitazioni. Questo settore rappresenta una parte significativa del consumo energetico globale, ed è proprio attraverso un monitoraggio accurato che si possono identificare inefficienze ed opportunità di ottimizzazione. Il monitoraggio dei carichi offre vantaggi non solo per i singoli residenti, ma anche per la stabilità complessiva delle reti elettriche, contribuendo a mitigare i picchi di domanda e a distribuire l'energia in modo più efficiente. Nelle abitazioni, gli elettrodomestici come lavatrici, lavastoviglie, e frigoriferi contribuiscono in modo significativo ai consumi complessivi. Il monitoraggio permette di ottenere profili di consumo dettagliati, che possono essere utilizzati per sviluppare strategie di demand response, in cui gli utenti modificano i propri comportamenti di consumo in base ai prezzi dinamici o agli incentivi forniti dalle utility elettriche.

Un'adeguata gestione dei carichi elettrici può portare, come si è detto, a risparmi energetici del 30%, soprattutto quando si implementano sistemi di smart energy management nelle abitazioni. Questi sistemi, basati sul monitoraggio continuo e sull'automazione, consentono di ridurre i consumi energetici, migliorare la sostenibilità e ridurre le emissioni di anidride carbonica, contribuendo così al raggiungimento di obiettivi ambientali e di risparmio economico.

L'importanza del load management si riflette anche nel miglioramento della sicurezza domestica e nella prevenzione di sovraccarichi elettrici, che possono compromettere la stabilità della rete o danneggiare gli apparecchi. Attraverso il monitoraggio tramite contatori intelligenti, si possono infatti prevenire incidenti o guasti dovuti ad un utilizzo inappropriato dell'energia. In sintesi, l'integrazione del load monitoring e management in ambito residenziale non solo permette di ottimizzare i consumi energetici, ma offre anche un contributo significativo alla stabilità della rete elettrica, alla riduzione dei costi ed al miglioramento della sicurezza, rendendo questo approccio fondamentale per le abitazioni moderne.

1.3 Metodi di monitoraggio intrusivi e non intrusivi

Il monitoraggio dei carichi energetici residenziali può essere realizzato principalmente attraverso due approcci: intrusivo e non intrusivo.

Il monitoraggio intrusivo (ILM-Intrusive Load Monitoring) prevede l'installazione di sensori dedicati su ciascun elettrodomestico o gruppo di apparecchi. Questa metodologia offre un'elevata precisione nella misurazione dei consumi elettrici,

poiché ogni dispositivo ha un proprio sensore che registra direttamente i dati di utilizzo. Tuttavia, questo metodo richiede un'infrastruttura costosa ed invasiva, con cablaggi complessi e interventi tecnici su larga scala. I sensori devono essere collocati in ogni punto di utilizzo energetico, rendendo il sistema meno pratico in termini di implementazione e manutenzione su vasta scala. I vantaggi principali di questa prima tecnica di monitoraggio sul consumo sono l'alta precisione nei dati raccolti e il monitoraggio diretto di ogni elettrodomestico, mentre gli svantaggi riguardano il costo elevato di installazione e la complessità nella gestione dei sensori distribuiti.

Il monitoraggio non intrusivo (NILM-Non Intrusive Load Monitoring) è invece una tecnica più recente e flessibile, che mira ad ottenere informazioni dettagliate sui consumi degli elettrodomestici utilizzando un singolo punto di misura, come il contatore generale della casa. In questo caso, il consumo elettrico totale viene disaggregato attraverso algoritmi di analisi delle variazioni di tensione e corrente, per identificare i consumi specifici dei vari apparecchi senza la necessità di sensori aggiuntivi. Uno dei principali vantaggi del NILM è la facilità di installazione ed il minor costo, rendendolo una soluzione più accessibile e scalabile rispetto al monitoraggio intrusivo. Tuttavia, la precisione dipende dall'efficacia degli algoritmi utilizzati per distinguere i profili degli elettrodomestici, che possono variare notevolmente in base alla complessità dei dispositivi monitorati.

I vantaggi principali di questa seconda tecnica di monitoraggio sul consumo sono il costo ridotto e la facilità di installazione, nonché la possibilità di applicazione su larga scala, dato che non prevede nessuna modifica all'infrastruttura elettrica esistente.

Gli svantaggi riguardano invece la minor precisione rispetto al monitoraggio intrusivo, specialmente con elettrodomestici che presentano consumi energetici simili e la dipendenza dagli algoritmi di disaggregazione per identificare correttamente i dispositivi specifici.

Per riassumere, il monitoraggio intrusivo fornisce dati più dettagliati ed accurati sui consumi di ogni elettrodomestico, ma la sua applicazione è limitata dai costi e dalla complessità, mentre il monitoraggio non intrusivo offre un approccio più economico e flessibile, particolarmente adatto a scenari residenziali, ma può avere difficoltà a distinguere correttamente i dispositivi con profili di consumo simili o che operano in modalità intermittente.

In sintesi, la scelta tra il monitoraggio intrusivo e non intrusivo dipende dagli obiettivi e dalle risorse disponibili. Se è necessaria un'accuratezza elevata e le risorse finanziarie non risultano un problema, il metodo intrusivo può essere la

scelta migliore.

Tuttavia, per applicazioni su larga scala, specialmente nel contesto di case intelligenti e sistemi di gestione energetica residenziali, il monitoraggio non intrusivo rappresenta la soluzione più promettente, grazie alla sua flessibilità e costi contenuti.

1.4 Studi precedenti sul risparmio energetico in ambito residenziale

Il risparmio energetico in ambito residenziale è stato oggetto di numerosi studi che hanno evidenziato come un monitoraggio dettagliato dei profili di consumo e l'adozione di tecnologie intelligenti possano migliorare l'efficienza energetica. Gli studi trattati in questa sezione analizzano vari approcci per ridurre i consumi energetici, con una particolare attenzione all'utilizzo di elettrodomestici e alla flessibilità di domanda. Di seguito vengono descritti i principali studi, le metodologie impiegate ed i risultati ottenuti.

Un primo studio [2], riguarda l'utilizzo quotidiano dell'energia nei nuovi edifici residenziali, concentrandosi sul consumo energetico di elettrodomestici come frigoriferi, lavatrici ed asciugatrici.

Il lavoro ha analizzato le variazioni temporali nell'uso degli elettrodomestici, cercando di comprendere come i consumi energetici variano in base alle abitudini degli utenti all'interno della casa.

I ricercatori coinvolti hanno utilizzato un sistema di monitoraggio continuo non intrusivo su oltre 40 abitazioni, raccogliendo dati di consumo energetico per un periodo di un anno. I consumi energetici sono stati monitorati ad intervalli regolari e confrontati tra le varie famiglie.

Dallo studio emerse che gli elettrodomestici, in particolare i frigoriferi, hanno mostrato consumi energetici stabili, mentre lavatrici ed asciugatrici hanno evidenziato consumi variabili in funzione dell'utilizzo giornaliero. È stato inoltre rivelato che un approccio di gestione della domanda potrebbe ridurre i picchi di consumo e migliorare l'efficienza energetica complessiva.

Le abitazioni analizzate erano principalmente nuove costruzioni, il che limitava la generalizzabilità dei risultati ottenuti in contesti residenziali più vecchi.

Un secondo studio [3], riguardava l'utilizzo dei dati dei contatori intelligenti per analizzare i modelli di consumo energetico in oltre 3000 abitazioni a Dubai.

I ricercatori coinvolti avevano l'obiettivo di comprendere come le caratteristiche degli edifici ed i comportamenti dei residenti influenzassero i profili di consumo.

Utilizzando tecniche di data mining, i ricercatori hanno classificato i profili di consumo in base ai dati raccolti dai contatori intelligenti installati in ciascuna

abitazione. L'analisi si è concentrata su intervalli di 15 minuti, raccogliendo informazioni su diversi periodi dell'anno.

I ricercatori coinvolti hanno riscontrato che le abitazioni con aria condizionata mostravano picchi di consumo notturni, mentre quelle senza raffreddamento evidenziavano picchi nelle ore serali. Lo studio ha dimostrato dunque che l'adozione di tecniche di gestione della domanda potrebbe ridurre i picchi di consumo di circa il 10-15%.

Le condizioni climatiche specifiche di Dubai, caratterizzate da temperature estremamente elevate e da una forte dipendenza dall'aria condizionata, limitano l'applicabilità di questi risultati in altre regioni.

Un terzo studio [4], ha classificato i profili di carico giornaliero di edifici non residenziali (ma l'analisi effettuata vale anche per edifici residenziali) situati su un campus universitario. L'obiettivo era di identificare i modelli di domanda energetica e le differenze tra i vari edifici per migliorare la gestione dell'energia.

Sono stati raccolti oltre 6500 profili di carico giornaliero da 14 edifici del campus. L'algoritmo k-means è stato utilizzato per identificare modelli ricorrenti di consumo energetico, analizzando diverse metodologie di clustering, tra cui la distanza euclidea e il Dynamic Time Warping (DTW).

Lo studio ha individuato due gruppi principali di edifici, uno comprendente edifici adibiti a ricerca ed insegnamento, con profili di carico ben definiti per i giorni lavorativi e non, e l'altro comprendente uffici, che presentavano una maggiore variabilità nei profili di consumo. È stato osservato anche un effetto stagionale, con una significativa differenza nella domanda energetica tra i mesi estivi ed invernali.

La variabilità interna ai gruppi di edifici, soprattutto quelli adibiti a uffici, ha mostrato che la sola tipologia di giorno non è sempre sufficiente per spiegare i modelli di consumo. Lo studio ha inoltre evidenziato la necessità di ulteriori variabili esplicative per una migliore previsione della domanda energetica.

Un quarto studio [5], esplorava la flessibilità della domanda negli edifici residenziali, concentrandosi sull'identificazione dei carichi flessibili come condizionatori e lavatrici, che possono essere regolati in risposta a segnali esterni.

I ricercatori coinvolti hanno utilizzato modelli matematici per simulare scenari di demand response, analizzando i dati di consumo energetico raccolti in vari edifici. L'analisi si è focalizzata sui carichi flessibili, che potrebbero essere modificati per ottimizzare l'utilizzo dell'energia durante i picchi di domanda.

La gestione intelligente dei carichi flessibili ha mostrato la capacità di ridurre i

picchi di consumo e migliorare l'efficienza energetica complessiva, con una potenziale riduzione del consumo energetico fino al 25%.

La principale difficoltà riscontrata è stata la mancanza di infrastrutture adeguate a gestire la domanda in tempo reale, ostacolando l'implementazione su larga scala di queste strategie.

Infine, un quinto studio [6], ha analizzato il potenziale di flessibilità dei carichi residenziali nell'ambito di programmi di demand response. Utilizzando modelli di segmentazione, sono stati esaminati i profili di consumo di diverse famiglie per determinare come i carichi possano essere ridotti in momenti di picco. I ricercatori coinvolti hanno raccolto dati da oltre 300 abitazioni, segmentando gli utenti in base ai loro modelli di consumo energetico. I profili di consumo sono stati analizzati per valutare la possibilità di ridurre i carichi durante eventi di picco energetico.

Lo studio ha dimostrato che il 20% dei carichi flessibili può essere ridotto con una significativa diminuzione dei consumi durante le ore di punta. Questo approccio potrebbe portare ad una riduzione complessiva del consumo energetico del 20%. La variabilità dei comportamenti degli utenti e la necessità di dati storici di alta qualità rappresentano però i principali ostacoli all'implementazione di strategie di demand response basate sulla segmentazione.

Gli studi descritti dimostrano chiaramente come l'analisi dei profili di consumo, l'adozione di tecniche di gestione intelligente della domanda e l'utilizzo di infrastrutture di monitoraggio avanzate possano portare a significativi risparmi energetici in ambito residenziale.

Tuttavia, la variabilità comportamentale degli utenti e la complessità delle infrastrutture rappresentano ancora delle sfide per l'implementazione su vasta scala di tali soluzioni.

2. Descrizione dei dataset

Come già anticipato nell'introduzione, l'analisi dei dataset relativi ad abitazioni in ambito residenziale, consente di esplorarne i comportamenti energetici sia in forma aggregata che disaggregata.

In questa sezione verranno presentati due dataset specifici, su cui saranno in seguito condotte le analisi sui consumi elettrici elencate nel paragrafo 1.1 riguardante gli obiettivi di questa tesi, mediante il software Matlab.

Si approfondiranno in particolare la provenienza, la struttura e le principali caratteristiche di ciascun dataset.

2.1 Il dataset REFIT

Il dataset REFIT rappresenta una delle risorse più significative nel panorama della ricerca sul monitoraggio energetico in ambito residenziale. Nato dall'iniziativa del progetto REFIT (Personalised Retrofit Decision Support Tools for UK Homes Using Smart Home Technology), questo dataset è stato sviluppato presso il Dipartimento di Ingegneria Elettronica ed Elettrica dell'Università di Strathclyde, nel Regno Unito [8]. Il progetto aveva l'obiettivo di esplorare e promuovere l'efficienza energetica nelle abitazioni, attraverso l'utilizzo di tecnologie intelligenti in grado di monitorare e gestire i consumi domestici. In particolare, il dataset è stato creato per favorire lo studio dei consumi energetici in tempo reale, supportando lo sviluppo di nuove tecnologie per le case intelligenti ed offrendo soluzioni per la riduzione dei consumi attraverso il monitoraggio e la gestione della domanda.

Il dataset si distingue per l'ampia copertura temporale, spaziale e per la granularità delle informazioni raccolte. Le misurazioni sono state effettuate in 20 abitazioni del Regno Unito nel corso di un periodo di circa due anni, fornendo una base di dati estremamente ricca e dettagliata.

Ogni abitazione è stata monitorata con un periodo di campionamento di 8 secondi, un intervallo sufficientemente breve per catturare le variazioni rapide nel consumo energetico, permettendo di tracciare anche i cicli di funzionamento più brevi degli elettrodomestici interni alla casa, come mostrato in Fig.1.

La struttura del dataset è stata progettata per includere sia il consumo energetico totale dell'abitazione (aggregate), sia il consumo specifico di 9 elettrodomestici principali per ogni casa monitorata (appliances con, a fianco, il numero del rispettivo elettrodomestico).

Questo approccio permette di esplorare non solo i comportamenti energetici globali di ciascuna abitazione, ma anche di analizzare in dettaglio il contributo dei

singoli apparecchi elettrici, come lavatrici, lavastoviglie, forni a microonde e televisori, che rappresentano spesso le fonti principali di consumo in ambito domestico. Questa capacità di disaggregare i dati energetici è fondamentale per comprendere come i vari elettrodomestici contribuiscano ai picchi di consumo e per identificare opportunità di ottimizzazione dei consumi.

Il processo di raccolta dei dati è stato reso possibile grazie all'installazione di 10 sensori di energia in ciascuna abitazione. Questi sensori erano collegati ad un sistema di comunicazione che trasmetteva i dati raccolti a un gateway, il quale, a sua volta, inviava le informazioni ad una piattaforma centrale online.

Grazie a questa infrastruttura, i dati erano accessibili in tempo reale, rendendo possibile un'analisi continua e dettagliata del consumo energetico. Inoltre, il sistema di monitoraggio non richiedeva un'interazione diretta da parte degli utenti, il che ha permesso di raccogliere dati autentici senza interferire con il comportamento quotidiano delle famiglie monitorate.

Uno degli aspetti più interessanti del dataset REFIT è il suo potenziale per studi di load disaggregation (disaggregazione dei carichi), una tecnica che consente di scomporre il consumo energetico totale di una casa nei contributi dei singoli elettrodomestici. Grazie alla raccolta di dati ad alta frequenza, è possibile applicare algoritmi avanzati per identificare il "profilo di firma" (signature) di ciascun apparecchio, isolando i loro contributi al consumo totale. Questo approccio ha implicazioni significative per la gestione intelligente della domanda energetica, poiché permette di ottimizzare l'utilizzo dell'energia e ridurre i picchi di carico, migliorando l'efficienza complessiva della rete elettrica.

La struttura dei dati fornita nel dataset è altamente accessibile, con file in formato CSV, che rendono i dati facilmente utilizzabili ed analizzabili con strumenti software come Matlab, Python o Excel. Ogni riga del dataset rappresenta una misurazione effettuata in un intervallo di 8 secondi, fornendo informazioni sul consumo totale dell'abitazione e sui consumi specifici degli elettrodomestici monitorati. Questa struttura dei dati consente agli utenti di eseguire analisi approfondite sul comportamento energetico delle abitazioni, esplorando come le variazioni stagionali, settimanali o persino orarie influenzino l'utilizzo dell'energia. Dal punto di vista della qualità dei dati, il dataset REFIT è stato sottoposto ad una accurata pulizia per rimuovere eventuali misurazioni errate o incomplete. Inoltre, i dati sono stati elaborati per colmare piccole lacune dovute a problemi tecnici nei sensori o nelle comunicazioni, garantendo che il dataset sia pronto per l'uso immediato senza necessità di ulteriori processi di preelaborazione. Questo aspetto lo rende particolarmente utile per studi accademici e applicazioni

pratiche, riducendo il tempo necessario per preparare i dati relativi all'analisi. In sintesi, il dataset REFIT rappresenta una risorsa fondamentale per lo studio dei consumi energetici in ambito residenziale. La sua granularità, la durata della raccolta e la capacità di disaggregare i consumi lo rendono uno strumento prezioso per la ricerca sull'efficienza energetica e la gestione della domanda. Esso permette non solo di osservare i comportamenti energetici aggregati delle abitazioni, ma anche di esaminare come i singoli elettrodomestici contribuiscano ai consumi complessivi, aprendo la strada a potenziali strategie di ottimizzazione energetica nelle case intelligenti del futuro.

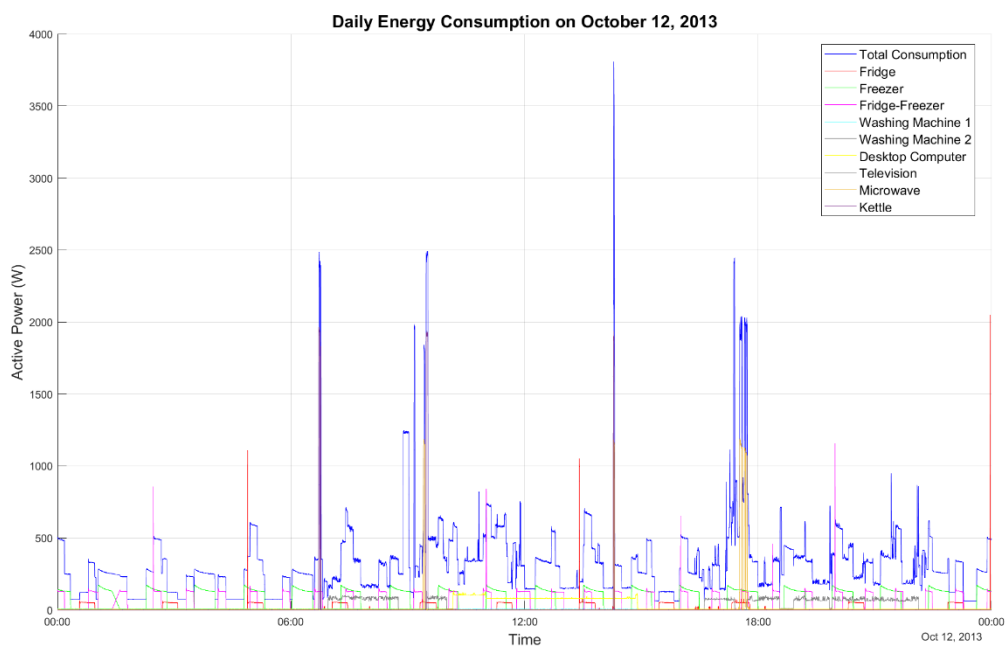


Fig.1: Andamento del consumo giornaliero aggregato e dei singoli carichi interni alla casa del dataset REFIT, nella giornata del 12 ottobre 2013

2.2 Il dataset MAC

Il dataset MAC rappresenta una risorsa significativa nel panorama dell'analisi dei consumi energetici residenziali in Italia. Questo dataset è stato creato per raccogliere dati dettagliati sui consumi elettrici delle abitazioni italiane, fornendo una base preziosa per studi di efficienza energetica, ottimizzazione dei consumi e gestione della domanda energetica. Similmente al dataset REFIT, che copre abitazioni nel Regno Unito, MAC si focalizza sulle case italiane, permettendo di esplorare le particolari dinamiche energetiche di un contesto mediterraneo, caratterizzato da abitudini di consumo e condizioni climatiche specifiche.

Il dataset MAC è stato sviluppato dall'azienda MAC-energia, attiva nel settore

delle tecnologie energetiche e della gestione intelligente dei consumi energetici. La raccolta dei dati è stata effettuata presso abitazioni italiane, con l'obiettivo di promuovere soluzioni avanzate per l'ottimizzazione energetica.

Questo dataset si inserisce in un contesto di crescente interesse per la sostenibilità energetica e per lo sviluppo di tecnologie di smart home e demand-side-management, che permettono agli utenti di monitorare ed ottimizzare i propri consumi in tempo reale.

Il dataset è pensato per fornire una panoramica completa sui consumi energetici, sia in termini di dati aggregati che disaggregati. La possibilità di monitorare i consumi degli elettrodomestici principali consente agli utenti ed ai ricercatori di identificare le aree in cui è possibile intervenire per ridurre gli sprechi e migliorare l'efficienza energetica.

Il dataset include informazioni dettagliate su diversi elettrodomestici presenti nelle abitazioni italiane monitorate, come frigoriferi, lavatrici, lavastoviglie, forni e climatizzatori. I dati sono raccolti ad intervalli regolari, permettendo di analizzare i profili di consumo su base oraria, giornaliera e settimanale. Questo tipo di monitoraggio ad alta frequenza è essenziale per comprendere come gli elettrodomestici vengano utilizzati durante il giorno e come contribuiscano al consumo complessivo dell'abitazione (Fig.2).

Ogni abitazione è dotata di sensori energetici installati in punti chiave dell'impianto elettrico, che permettono di misurare sia il consumo totale dell'abitazione che quello dei singoli apparecchi. La frequenza di campionamento è elevata, coincidente con quella del dataset REFIT, il che rende possibile l'identificazione di pattern di utilizzo energetico specifici e di eventuali picchi di consumo. Questi dati sono raccolti in formato CSV, rendendoli facilmente accessibili ed analizzabili con strumenti di calcolo come Matlab o Python.

Un aspetto distintivo del dataset MAC è il contesto geografico e climatico in cui i dati sono raccolti. Il consumo energetico in Italia è fortemente influenzato dalle condizioni climatiche mediterranee, con picchi stagionali dovuti all'utilizzo estensivo di condizionatori d'aria durante l'estate e di sistemi di riscaldamento elettrico in inverno. Questi fattori, uniti alle abitudini di consumo domestico tipiche italiane, rendono il dataset MAC particolarmente prezioso per chiunque voglia studiare i consumi energetici in contesti diversi da quelli nord-europei.

Inoltre, la struttura disaggregata del dataset consente di esaminare il consumo specifico di ogni apparecchio, offrendo informazioni dettagliate su come e quando i vari apparecchi contribuiscano al carico energetico complessivo.

Questo livello di dettaglio è essenziale per lo sviluppo di strategie di demand

response, in cui i consumatori possono essere incentivati a ridurre o posticipare l'utilizzo di determinati elettrodomestici durante i picchi di domanda.

Il dataset MAC è utilizzato per supportare studi volti a migliorare l'efficienza energetica nelle abitazioni italiane, contribuendo allo sviluppo di soluzioni smart per la gestione dei consumi domestici. Le tecnologie di demand-side-management, che permettono di ridurre il carico sulla rete durante i momenti di massima richiesta, trovano una delle loro principali applicazioni in questo dataset.

L'analisi dei dati disaggregati consente di ottimizzare l'utilizzo degli elettrodomestici, ridurre i costi energetici e promuovere comportamenti più sostenibili.

In conclusione, il dataset MAC rappresenta una risorsa fondamentale per lo studio dei consumi domestici in Italia, offrendo una prospettiva unica sui comportamenti energetici in un contesto mediterraneo. La sua struttura dettagliata è la frequenza di campionamento elevata lo rendono uno strumento ideale per chiunque desideri studiare l'ottimizzazione energetica e le soluzioni per le abitazioni intelligenti.

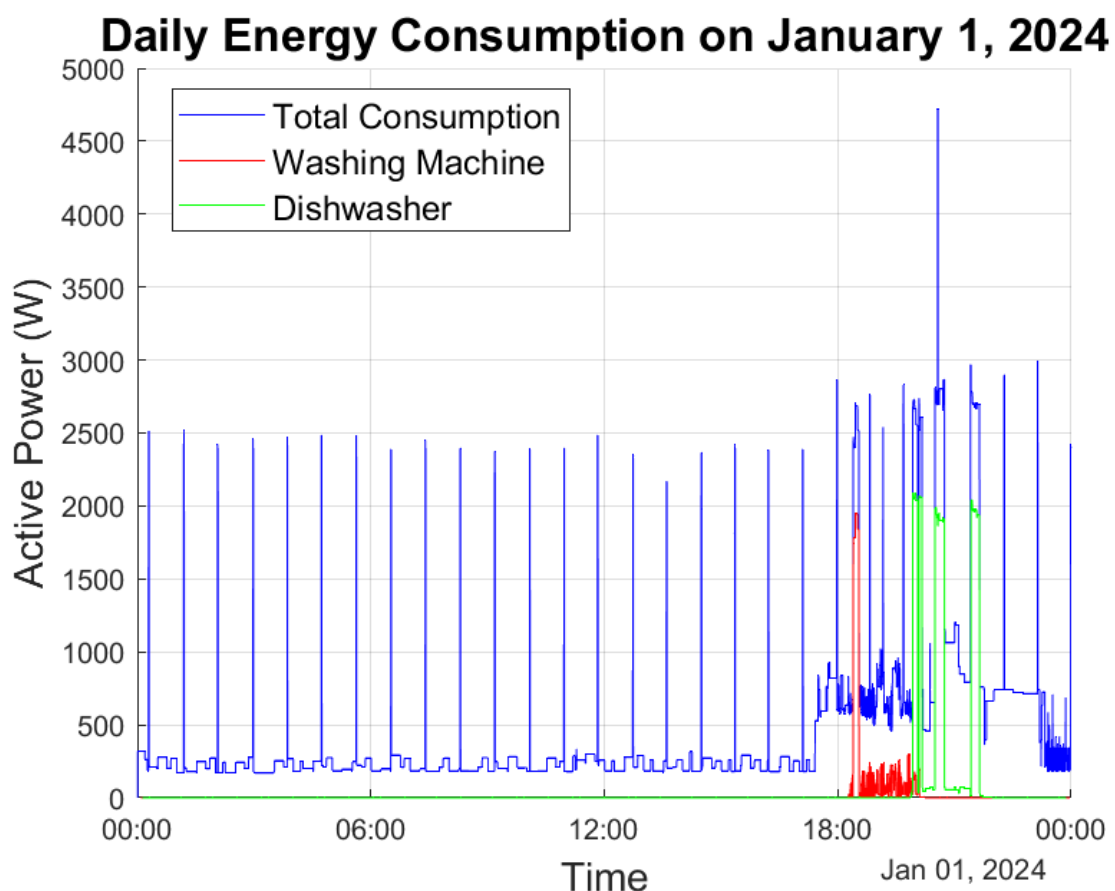


Fig.2: Andamento del consumo giornaliero aggregato e dei singoli carichi interni alla casa del dataset MAC, nella giornata del 12 ottobre 2013

2.3 Ricampionamento e pulizia dei dati pre-analisi

Prima di procedere con l'analisi vera e propria sui consumi energetici contenuti nei due dataset (REFIT e MAC) ampiamente descritti nei paragrafi precedenti (capitoli 3 e 4 di questa tesi), è stato necessario eseguire un processo di ricampionamento e pulizia per garantire la qualità e la consistenza delle informazioni. Questo passaggio è stato cruciale, specialmente per il dataset della casa quattro del progetto REFIT, che inizialmente presentava intervalli di campionamento irregolari e lacune nei dati. Il ricampionamento è stato effettuato per portare il dataset ad una frequenza regolare di 8 secondi, il che ha permesso di ottenere una visione più omogenea ed accurata del consumo energetico, sia a livello aggregato che dei singoli elettrodomestici.

Per gestire le discrepanze nei dati temporali, è stato implementato un codice Matlab che ha ricampionato i dati e gestito le lacune presenti nel dataset. Nello specifico, il codice Matlab ha individuato i periodi di tempo in cui i dati mancavano per più di due minuti, escludendo quei segmenti dall'analisi. Nei casi in cui le lacune erano inferiori a questo limite, i consumi sono stati interpolati linearmente. La prima fase del codice ha importato i dati dal file in formato CSV contenente i consumi energetici e le relative date, convertendo i timestamps in oggetti datetime per permettere una corretta manipolazione delle informazioni temporali. Successivamente, sono state calcolate le differenze tra i vari timestamp consecutivi per identificare eventuali lacune nei dati. In particolare, è stata definita una soglia di 120 secondi (due minuti) per individuare i "gap" temporali: ogni intervallo tra due misurazioni successive superiore a questo limite è stato considerato come un'assenza di dati significativa, quindi escluso dall'analisi.

Nel caso invece di intervalli temporali inferiori a due minuti, i dati mancanti sono stati gestiti mediante un processo di interpolazione lineare, che ha permesso di stimare il consumo mancante in base ai valori adiacenti. Questa operazione è stata applicata sia ai consumi aggregati che ai consumi dei singoli elettrodomestici, garantendo che i dati interpolati fossero coerenti con i valori reali misurati prima e dopo le lacune.

Una volta completata l'operazione di interpolazione e gestione delle lacune, il dataset è stato ricampionato per generare un intervallo temporale regolare di 8 secondi. Questo passaggio è stato fondamentale per consentire un'analisi

omogenea e precisa del consumo energetico su base temporale. Il nuovo set di timestamps generati è stato concatenato e riorganizzato per evitare duplicati, assicurando che ogni intervallo temporale fosse unico ed ordinato.

Infine, il codice ha salvato i dati ricampionati ed interpolati in un nuovo file CSV, pronto per essere utilizzato nelle successive analisi che verranno esaminate in seguito. Questo nuovo file conteneva le misurazioni aggiornate, non solo del consumo aggregato della casa, ma anche dei consumi dei singoli elettrodomestici, ora resi omogenei e privi di lacune significative.

È importante notare che, nel caso del dataset MAC, tale operazione (e quindi, tale codice) non è stata affatto necessaria, poiché i dati erano già stati forniti con una frequenza regolare di otto secondi e non presentavano lacune temporali rilevanti. Pertanto, l'attenzione si è concentrata principalmente sulla casa 4 del progetto REFIT, che richiedeva questo processo di pulizia e ricampionamento prima di poter essere analizzata in modo accurato.

Questa operazione di preparazione dei dati ha permesso di ottenere un dataset consistente e privo di anomalie, che ha facilitato le analisi successive volte a comprendere i pattern di consumo energetico e l'utilizzo degli elettrodomestici in ambito residenziale.

3. Analisi del consumo aggregato

In questa sezione si illustrerà l'analisi che verrà effettuata sui dati relativi al consumo aggregato, tramite il software Matlab. Verranno prese come riferimento due case, la prima britannica appartenente al progetto REFIT e la seconda italiana i cui dati sono forniti dall'azienda MAC-energia.

3.1 Discussione generale sul load variability index

Il load variability index (LVI) è una metrica che misura la variabilità temporale dei consumi elettrici di un'abitazione o di un'unità commerciale nel tempo. Questo indice è cruciale per determinare la capacità di una casa di partecipare a programmi di demand response (DR), in cui i consumatori regolano il loro consumo energetico in base a segnali esterni, come prezzi variabili o incentivi da parte della rete elettrica, al fine di ridurre i picchi di domanda [7].

Il calcolo del LVI si basa sulla variazione dei consumi orari e giornalieri di un'unità abitativa. Nello specifico, esso tiene conto delle fluttuazioni nella quantità di energia consumata in vari momenti della giornata, rilevando le differenze tra i periodi di picco e quelli di basso consumo. Questa variabilità fornisce un'indicazione della flessibilità potenziale del carico e, quindi, della possibilità di spostare o ridurre i consumi nei momenti di punta.

Un elevato LVI indica una grande variabilità dei consumi e, pertanto, una maggiore capacità, da parte di una generica abitazione o unità commerciale, di rispondere a programmi di demand response. Al contrario, un basso LVI suggerisce una minore flessibilità nei consumi, il che rende più difficile per un'abitazione o una struttura commerciale adattarsi rapidamente ai cambiamenti della domanda energetica o ai segnali di prezzo.

L'indice di variabilità del carico è strettamente correlato al successo dei programmi di critical peak pricing (CPP). I clienti con un'alta variabilità pre-enrollment, ossia che mostrano una maggiore fluttuazione nei loro consumi abituali, sono stati quelli che hanno fornito una maggiore risposta ai segnali di picco, contribuendo significativamente alla riduzione della domanda di energia durante i periodi di picco critico. Al contrario, i clienti con una bassa variabilità hanno mostrato risposte limitate o nulle. Questo suggerisce che l'utilizzo del LVI possa essere un indicatore predittivo efficace per determinare la capacità di una casa di partecipare attivamente a questi programmi di risparmio energetico.

Il LVI fornisce dunque una buona stima della flessibilità del carico, ma non è l'unico fattore determinante per il successo nei programmi di demand response.

Fattori come l'adozione di tecnologie abilitanti (ad esempio termostati intelligenti o smart plugs) ed il comportamento degli utenti giocano un ruolo fondamentale nel determinare l'effettiva partecipazione e l'entità della risposta. Inoltre, la variabilità stessa è influenzata da una serie di condizioni operative e comportamentali che possono limitare l'accuratezza dell'indice in contesti differenti.

In conclusione, il Load Variability Index rappresenta una misura utile per identificare abitazioni e clienti potenzialmente capaci di partecipare ai programmi di demand response.

Tuttavia, per ottimizzare la sua applicazione, è necessario integrarlo con ulteriori strumenti di analisi, come le tecnologie di monitoraggio avanzato e le indagini sul comportamento degli utenti, al fine di migliorare la previsione e l'implementazione di strategie di gestione della domanda.

Di seguito sono riportate le formule del LVI che rappresentano le variazioni dei consumi giornaliere ed orarie.

$$\text{Hourly load SCV} = \sum_{h=1}^{24} \left\{ \frac{\text{Standard deviation of hourly load}}{\text{Mean of hourly load}} \right\}_h \quad (1)$$

$$\begin{aligned} &\text{Hourly load share SCV} \\ &= \sum_{h=1}^{24} \left\{ \frac{\text{Standard deviation of hourly load share}}{\text{Mean of hourly load share}} \right\}_h \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} &\text{Hourly load share SSD} \\ &= \sum_{h=1}^{24} \text{Standard deviation of hourly load share} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{Daily load CV} = \frac{\text{Standard deviation of daily load}}{\text{Mean of daily load}} \quad (4)$$

3.2 Analisi del consumo medio e del picco di potenza su base giornaliera ed oraria

Il codice Matlab utilizzato per questa analisi ha elaborato i dati di consumo energetico aggregato della casa 4 del REFIT, con l'obiettivo di individuare il consumo medio ed i picchi di potenza per ogni ora del giorno, distinguendo tra i vari giorni della settimana presenti nei dati a disposizione. La prima operazione del codice consiste nell'importare il dataset contenente i consumi energetici aggregati, allineati con i timestamp precisi. Successivamente, i dati vengono filtrati per estrarre il giorno della settimana e l'ora di ciascuna misurazione. A questo punto, il codice prealloca delle celle per memorizzare i valori medi del consumo per ogni combinazione di giorno ed ora. Per ciascun giorno della settimana, il codice individua le misurazioni effettuate in quella giornata e le suddivide per ore. Per ogni ora del giorno (da 0 a 23), il consumo medio viene calcolato raccogliendo tutti i valori registrati durante quell'ora in tutti i giorni dello stesso tipo (ad esempio, tutti i lunedì). A questo punto, viene memorizzata una lista di questi valori per ciascuna combinazione di giorno ed ora nella cella preallocata inizialmente. Successivamente, il codice calcola la media delle medie: per ogni combinazione di giorno ed ora, la media finale viene ottenuta calcolando la media di tutti i valori registrati per quell'ora specifica in tutti i giorni della stessa categoria appartenenti al dataset. Questo processo garantisce che la media finale per ciascuna ora rappresenti accuratamente i consumi energetici medi per quella fascia oraria, tenendo conto delle variazioni nel corso della settimana.

In parallelo, il codice calcola anche i picchi di potenza per ogni ora del giorno. Il processo è simile a quello della media, ma invece di calcolare il consumo medio per ogni intervallo di tempo, viene identificato il valore massimo (picco) registrato in ciascun giorno ed ora. Anche in questo caso, i picchi vengono memorizzati in celle corrispondenti alle combinazioni di giorno ed ora. Una volta raccolti tutti i valori massimi per una determinata ora in ogni data, la media dei picchi viene calcolata nello stesso modo della media dei consumi.

Il codice ha inoltre calcolato la varianza (su cui poi verrà applicata la radice quadrata per ottenere la deviazione standard) sia per il consumo medio che per la media dei picchi di potenza, offrendo una visione più dettagliata della variabilità dei consumi durante la giornata e la settimana. Queste informazioni sono state utilizzate per produrre istogrammi delle osservazioni che visualizzano i consumi, i picchi medi ed i relativi valori media-deviazione standard e media + deviazione standard su base oraria, fornendo una rappresentazione grafica chiara delle differenze di consumo tra i giorni della settimana.

Per la casa italiana del dataset MAC, l'analisi è stata condotta in modo analogo (viene cambiato soltanto il file da caricare in Matlab), in modo tale da poter effettuare un confronto diretto tra i consumi energetici aggregati delle due abitazioni. Grazie a queste analisi, è stato possibile ottenere informazioni dettagliate sui modelli di utilizzo energetico, evidenziando le differenze nei comportamenti tra le abitazioni italiane e britanniche.

Queste analisi saranno utili per sviluppare strategie di gestione energetica e per ottimizzare l'utilizzo degli elettrodomestici, riducendo i picchi di domanda e migliorando l'efficienza energetica complessiva.

I risultati ottenuti saranno discussi nel paragrafo successivo, dove verranno presentati i grafici a barre che illustrano visivamente il consumo medio e la media dei picchi di potenza per ogni giorno della settimana, inclusa la visualizzazione della varianza tramite dei marker verdi e rossi che rappresentano rispettivamente i valori media - deviazione standard e media + deviazione standard.

3.3 Rappresentazione grafica: istogrammi delle osservazioni

I grafici riportati mostrano i consumi medi (Fig.3 e Fig.4) e i picchi di potenza (Fig.5 e Fig.6) per la casa britannica del dataset REFIT, analizzati su base giornaliera ed oraria.

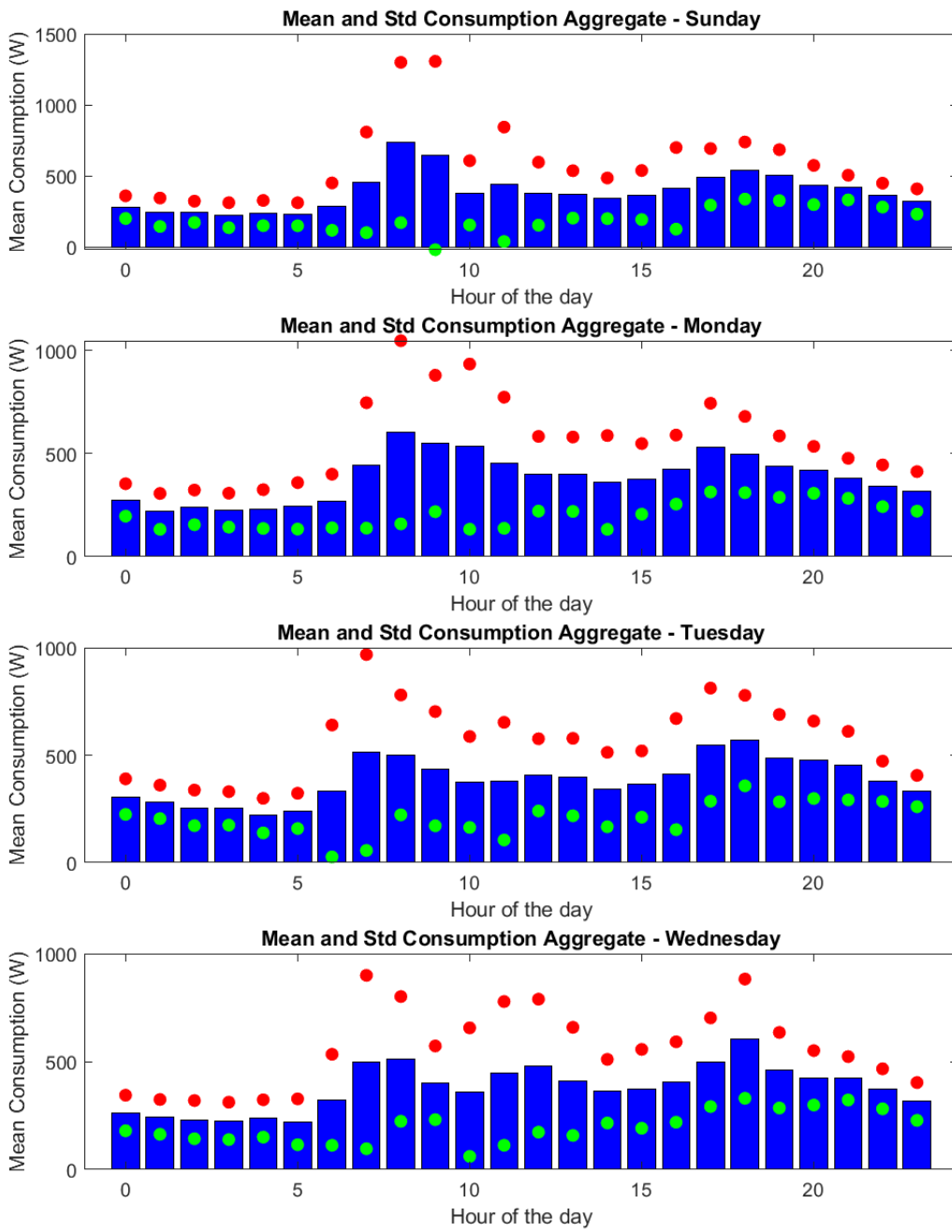


Fig.3: Consumi medi casa britannica (da domenica a mercoledì)

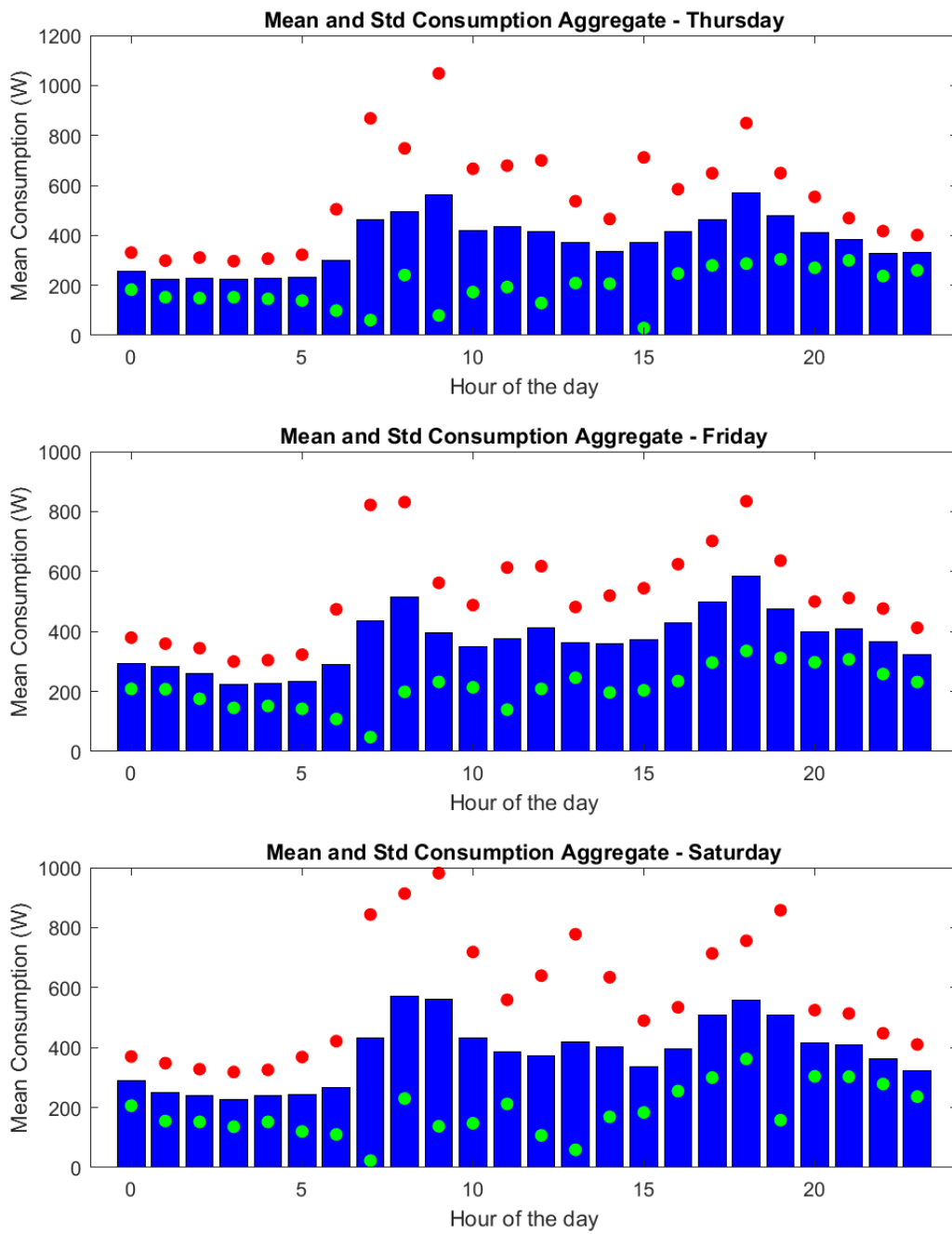


Fig.4: Consumi medi casa britannica (da giovedì a sabato)

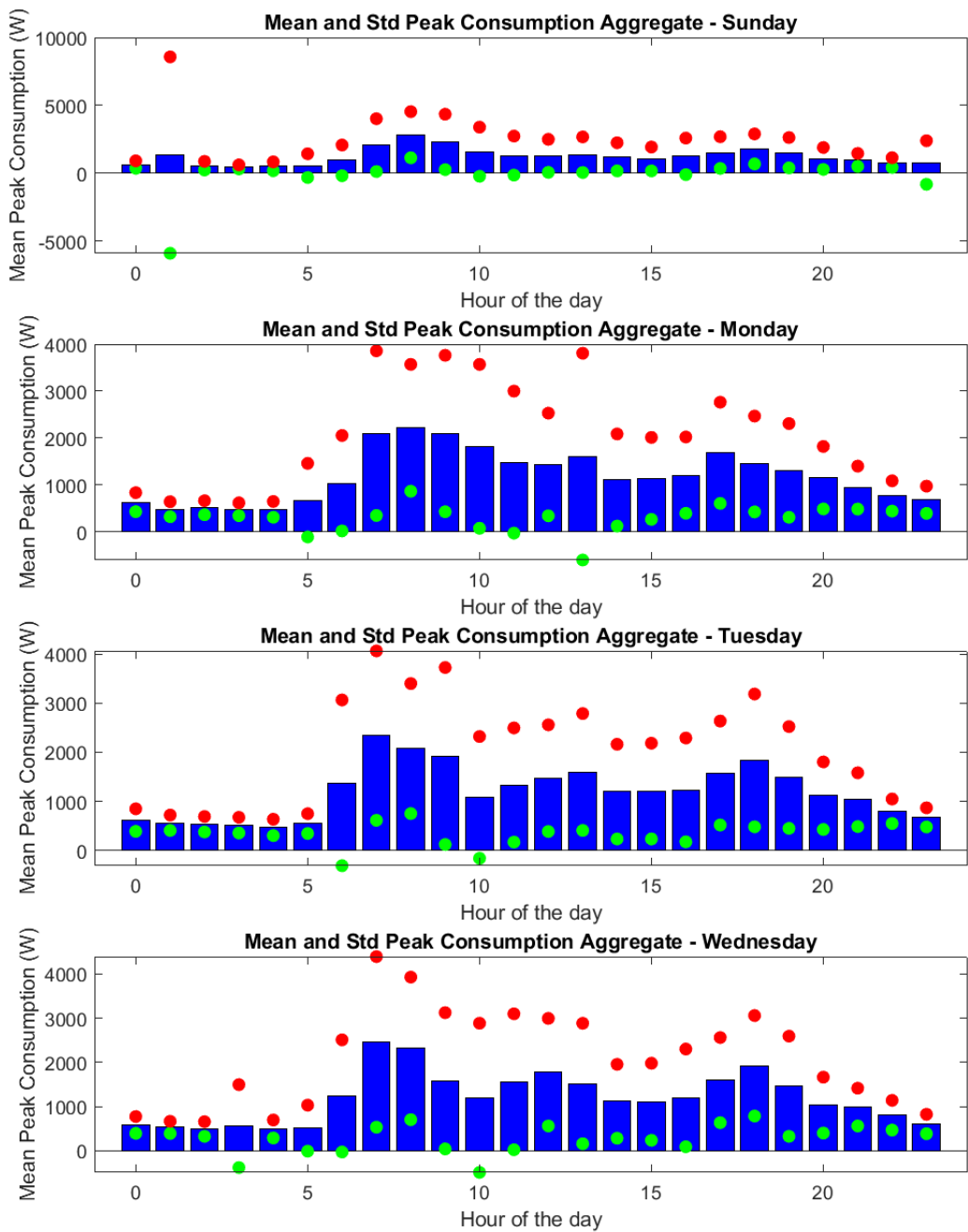


Fig.5: Media dei picchi di potenza casa britannica (da domenica a mercoledì)

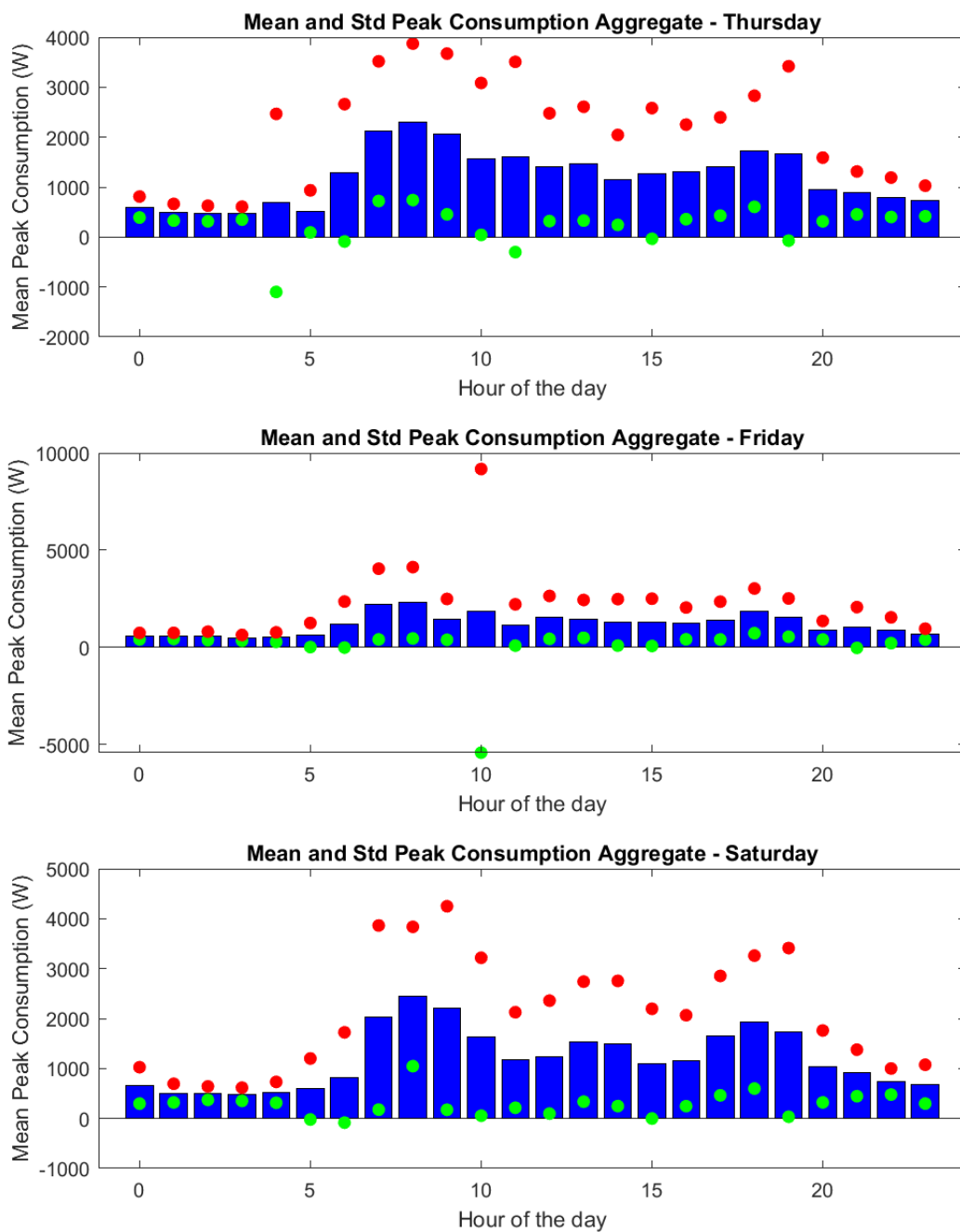


Fig.6: Media dei picchi di potenza casa britannica (da giovedì a sabato)

Nel primo set di grafici (consumi medi), possiamo osservare che il consumo energetico varia significativamente durante le diverse ore del giorno e tra i vari giorni della settimana. I giorni feriali, come lunedì e martedì, mostrano un aumento progressivo del consumo durante la mattina, con un picco a metà giornata, indicativo di una maggiore attività domestica in queste ore. In particolare, il lunedì presenta il picco più elevato intorno alle 8:00, che scende gradualmente nelle ore successive. Nei fine settimana, come sabato e domenica, il picco si sposta verso le ore pomeridiane, con un andamento più distribuito nel corso della giornata, riflettendo probabilmente un diverso utilizzo degli elettrodomestici da parte degli utenti, che tendono ad essere più presenti in casa rispetto ai giorni lavorativi.

I marker verdi e rossi (media-deviazione standard e media + deviazione standard rispettivamente) permettono di comprendere l'intervallo di variazione dei consumi durante ogni ora del giorno, evidenziando la variabilità del consumo energetico. In particolare, nei giorni feriali si osserva una maggiore variabilità durante le ore mattutine e serali, probabilmente a causa dell'accensione e dello spegnimento degli elettrodomestici principali.

Nel secondo set di grafici (media dei picchi di potenza), il pattern mostra una tendenza simile a quella osservata nei consumi medi, ma con picchi molto più marcati, soprattutto durante le ore centrali della giornata. Ad esempio, il lunedì ed il martedì mostrano picchi di potenza molto pronunciati tra le 10:00 e le 15:00, il che suggerisce l'uso di elettrodomestici ad alta intensità energetica in quelle ore. Nei giorni del fine settimana, i picchi di potenza tendono ad essere più distribuiti nelle ore pomeridiane, riflettendo un utilizzo più frequente degli elettrodomestici durante il tempo libero degli utenti.

I valori rappresentati dai marker verdi e rossi mostrano una maggiore variabilità nei picchi di potenza rispetto ai consumi medi, in particolare nelle ore di picco tra la mattina ed il pomeriggio, il che suggerisce come l'accensione di elettrodomestici ad alto consumo varia considerevolmente a seconda del giorno e dell'orario.

Dopo aver analizzato gli istogrammi relativi alla casa britannica del dataset REFIT, possiamo ora a commentare i grafici della casa italiana monitorata tramite il dataset MAC. Anche in questo caso, i grafici rappresentano i consumi medi (Fig.7-8) e la media dei picchi di potenza (Fig.9-10) su base giornaliera ed oraria.

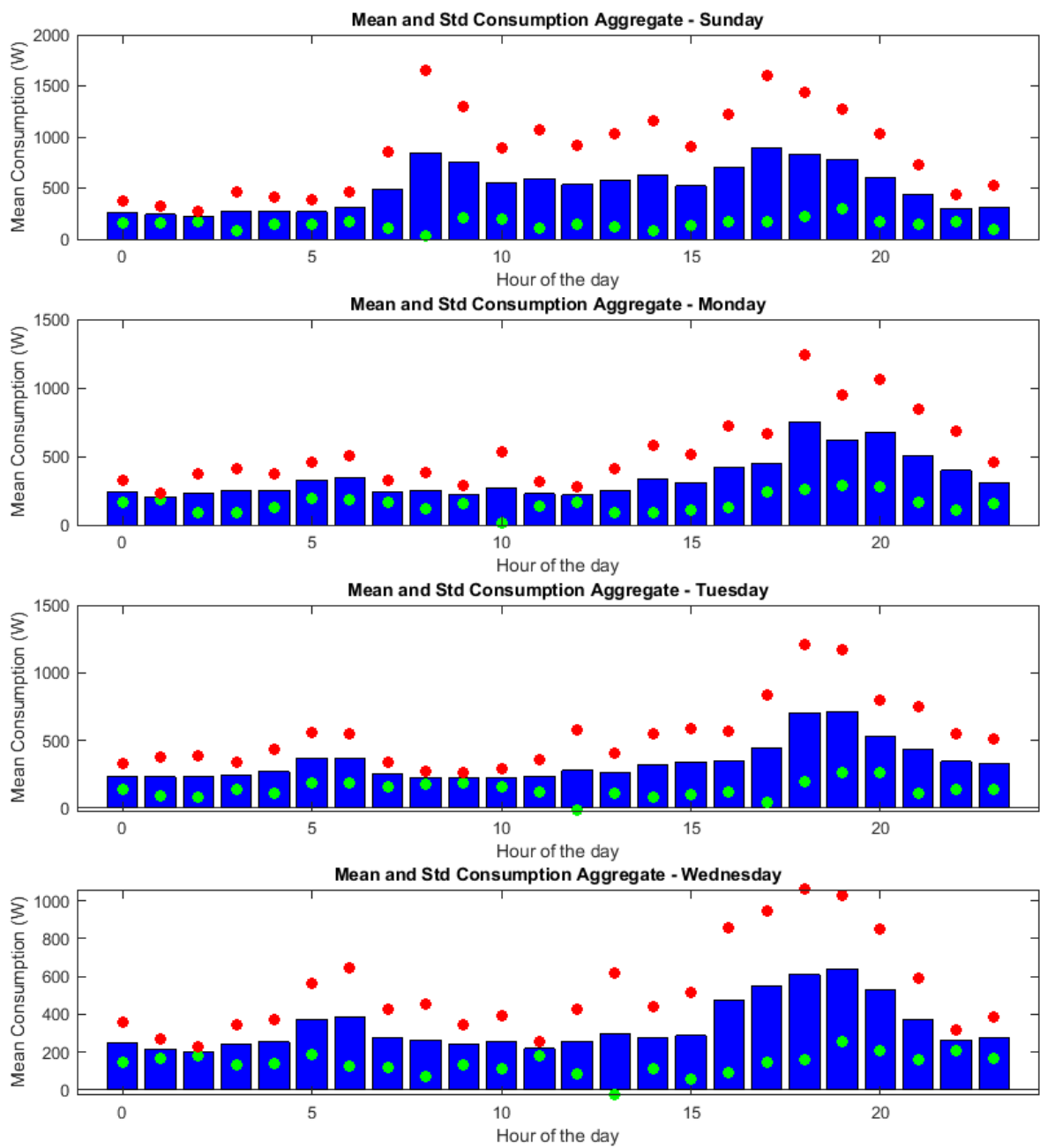


Fig.7: Consumo medio casa italiana (da domenica a mercoledì)

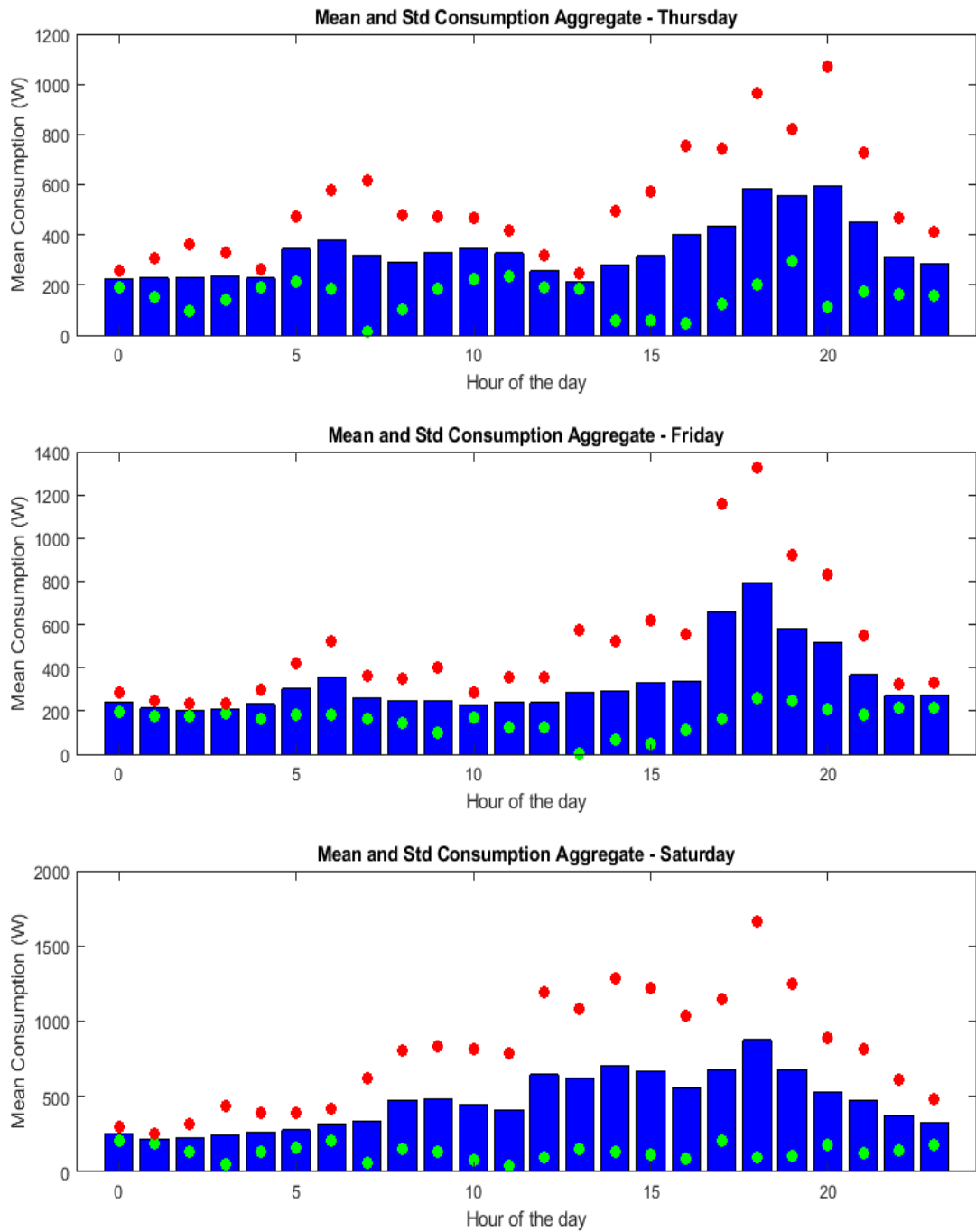


Fig.8: Consumo medio casa italiana (da giovedì a sabato)

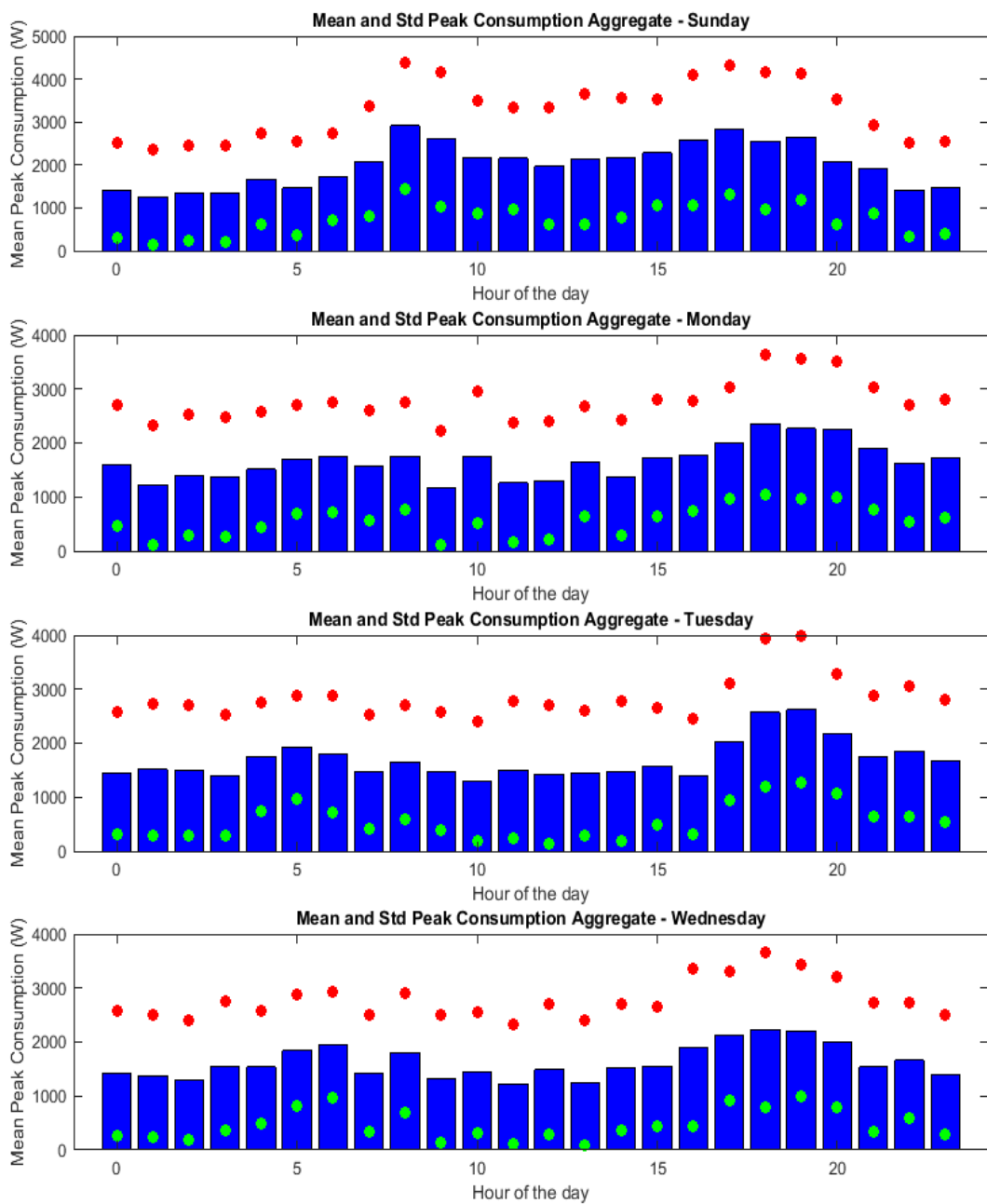


Fig.9: Media dei picchi di potenza casa italiana (da domenica a mercoledì)

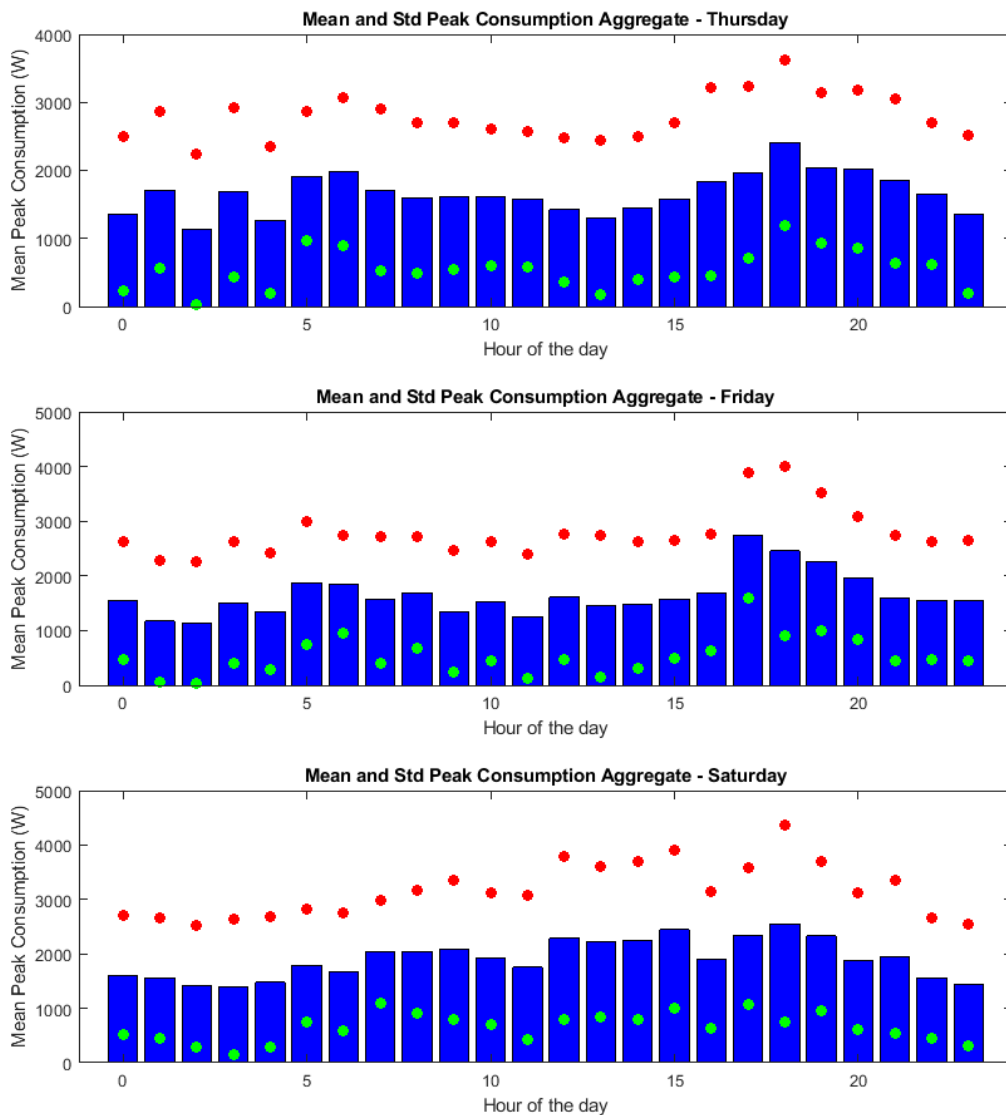


Fig.10: Media dei picchi di potenza (da giovedì a sabato)

Osservando i grafici dei consumi medi per la casa italiana, notiamo alcune differenze rispetto alla casa britannica. I consumi medi mostrati nelle Fig.5-6 tendono ad essere più distribuiti durante l'intera giornata, con una minore concentrazione di picchi specifici nelle ore del mattino rispetto ai giorni feriali britannici. Questo indica abitudini di utilizzo degli elettrodomestici diverse, con un uso più regolare durante il giorno, in particolare nei giorni del fine settimana come sabato, dove si osservano picchi pomeridiani intorno alle ore 16:00 e 18:00. Nei giorni feriali, il consumo medio presenta una tendenza simile, con un picco principale nelle ore pomeridiane, soprattutto tra le 15:00 e le 18:00. In confronto

alla casa britannica, la casa italiana sembra mostrare un utilizzo più omogeneo durante il giorno, con un minor numero di variazioni significative tra ore mattutine e pomeridiane, soprattutto nei giorni feriali. I marker mostrano una variabilità moderata dei consumi durante l'intera giornata.

I grafici relativi ai picchi di potenza nella casa italiana rivelano alcune peculiarità. Rispetto alla casa britannica, i picchi di potenza sono più distribuiti durante le ore serali, con un'evidente concentrazione tra le 16:00 e le 20:00, soprattutto il venerdì e il sabato. Questo potrebbe indicare l'utilizzo intensivo di elettrodomestici ad alto consumo energetico durante la fascia serale. Nei giorni feriali, come giovedì e venerdì, i picchi di potenza mostrano un andamento costante dalle prime ore del pomeriggio fino a sera, segnalando un consumo prolungato e regolare durante queste ore. I marker evidenziano una maggiore variabilità dei picchi di potenza rispetto ai consumi medi, soprattutto nelle ore serali. Anche se i picchi di potenza sono meno pronunciati rispetto alla casa britannica durante la mattina, la casa italiana presenta picchi significativi nelle ore centrali e serali della giornata.

Per concludere, confrontando i grafici relativi a ciascuna casa, si possono riassumere le differenze significative tra i modelli di consumo energetico della casa britannica e italiana:

- Distribuzione dei consumi medi: nella casa britannica, i consumi medi sono più concentrati nelle ore mattutine e pomeridiane dei giorni feriali, con un progressivo calo verso sera, mentre al contrario, per la casa italiana, sono distribuiti in modo più omogeneo durante tutta la giornata, con un picco leggermente posticipato nelle ore pomeridiane e serali, specialmente nel fine settimana.
- Variazione nei picchi di potenza: i picchi di potenza nella casa britannica tendono a concentrarsi principalmente nelle ore del mattino e del primo pomeriggio nei giorni feriali, mentre nella casa italiana si osservano picchi di potenza più elevati e distribuiti maggiormente nelle ore serali.
- Maggiore variabilità nei picchi della casa italiana: i grafici italiani mostrano una maggiore variabilità dei picchi di potenza durante le ore serali, indicata dalla più ampia dispersione dei marker, il che riflette un utilizzo più flessibile e meno prevedibile degli elettrodomestici ad alta intensità energetica nella casa italiana rispetto a quella britannica in quella fascia oraria.

3.4 Correlazione dei consumi tra giorni consecutivi e tra stessi giorni di settimane consecutive

In questo paragrafo andremo ad analizzare l'aspetto riguardante la prevedibilità dei pattern di consumo energetico relativi alle due case prese in esame. I due codici Matlab realizzati a tal fine, si concentrano sul concetto fondamentale di correlazione tra i consumi energetici, espressa dal coefficiente di Pearson. Quest'ultimo rappresenta un numero che varia tra -1 (correlazione negativa perfetta: quando una variabile aumenta l'altra diminuisce in modo proporzionale e costante) e 1 (correlazione positiva perfetta: quando una variabile aumenta, l'altra aumenta esattamente con la stessa legge):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

dove n rappresenta il numero di osservazioni, cioè le coppie x_i e y_i che vengono confrontate per calcolare la correlazione.

Il primo codice calcola la correlazione tra i consumi energetici relativi a giorni consecutivi all'interno del dataset. La procedura inizia, come di consueto, caricando i dati relativi al consumo energetico aggregato ed ai timestamp associati. Da questi ultimi, si estraggono le date e si identificano i giorni unici presenti nel dataset. Per ogni giorno, il codice raccoglie i dati di consumo corrispondenti, memorizzandoli in un vettore. Una volta creato l'insieme dei vettori di consumo giornaliero, il codice procede a calcolare la correlazione tra i dati di consumo di ogni coppia di giorni consecutivi.

Per garantire che i vettori di consumo dei giorni consecutivi abbiano la stessa lunghezza, viene utilizzata l'interpolazione lineare. Questo permette di ottenere due vettori di consumo interpolati per ogni coppia di giorni, che vengono quindi confrontati calcolando il coefficiente di correlazione o di Pearson. Il risultato è un vettore di correlazioni che indica il grado di somiglianza tra i consumi di giorni consecutivi. Infine, il codice genera un grafico scatter-plot per visualizzare le correlazioni ottenute e calcola la media dei valori assoluti delle correlazioni per fornire una misura complessiva della correlazione tra i giorni consecutivi.

Il secondo codice si concentra invece sulla correlazione tra i consumi relativi agli stessi giorni di due settimane consecutive. Anche in questo caso, i dati di consumo aggregato vengono caricati e il timestamp viene convertito in formato datetime. Successivamente, il codice identifica il giorno della settimana corrispondente a ciascun campionamento e raggruppa i consumi per giorno della settimana e settimana di appartenenza. Questo consente di creare un insieme di vettori che rappresentano il consumo energetico di ogni giorno della settimana in

ciascuna settimana. La correlazione viene calcolata tra i vettori di consumo dello stesso giorno della settimana (ad esempio, tra tutti i lunedì) appartenenti a settimane consecutive. Anche in questo caso, viene utilizzata l'interpolazione per garantire che i vettori abbiano la stessa lunghezza. Dopo aver interpolato i vettori, il codice calcola il coefficiente di Pearson per ogni coppia di giorni consecutivi della settimana. Alla fine, il codice visualizza i risultati tramite un grafico a dispersione per ciascun giorno della settimana e calcola la media dei valori assoluti nelle correlazioni, fornendo una misura complessiva della correlazione tra lo stesso giorno della settimana su settimane consecutive.

In entrambi i casi (giorni consecutivi e giorni di settimane consecutive), l'interpolazione lineare svolge un ruolo cruciale nell'assicurare che i vettori di consumo abbiano la stessa lunghezza, facilitando così il calcolo delle correlazioni tra periodi di tempo diversi.

3.5 Scatter plot relativi alle correlazioni

Per quanto riguarda la correlazione tra giorni consecutivi per la casa britannica e la casa italiana rispettivamente, i grafici da osservare sono quelli in Fig.11 e Fig.12.

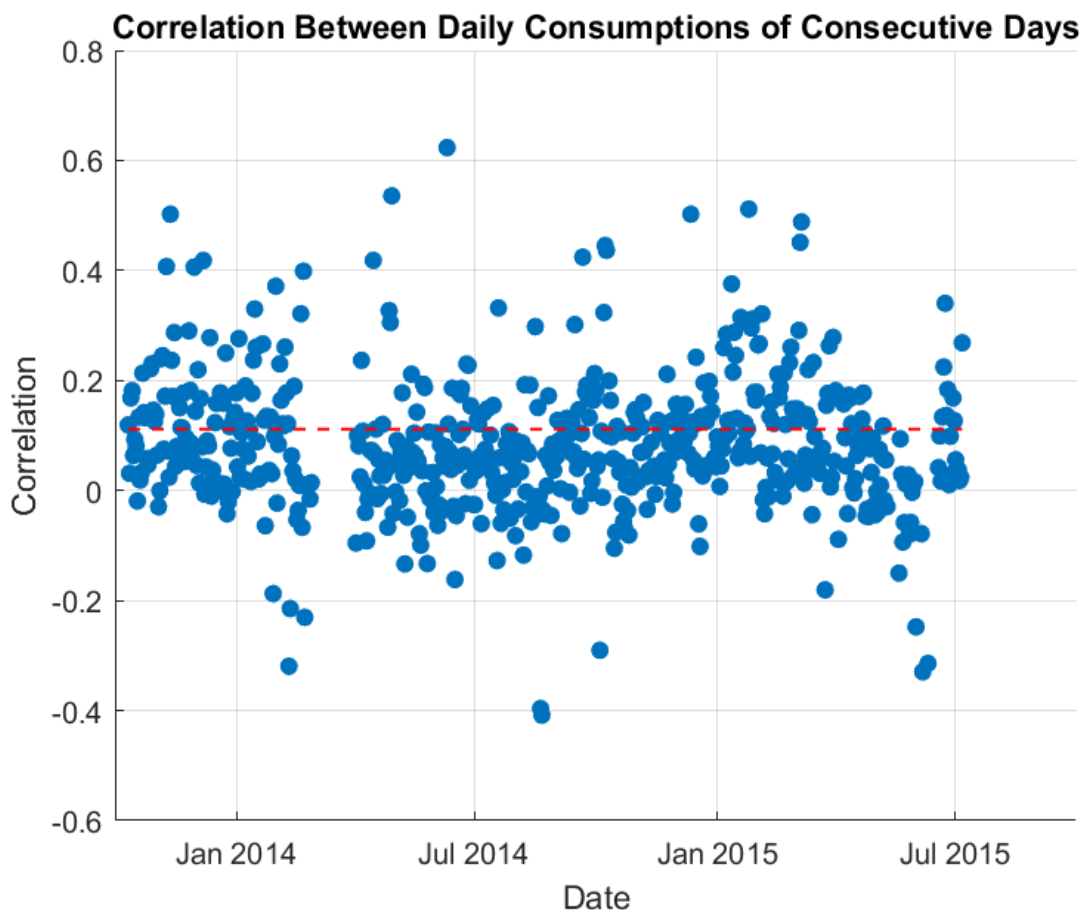


Fig.11: Correlazioni tra giorni consecutivi nella casa britannica

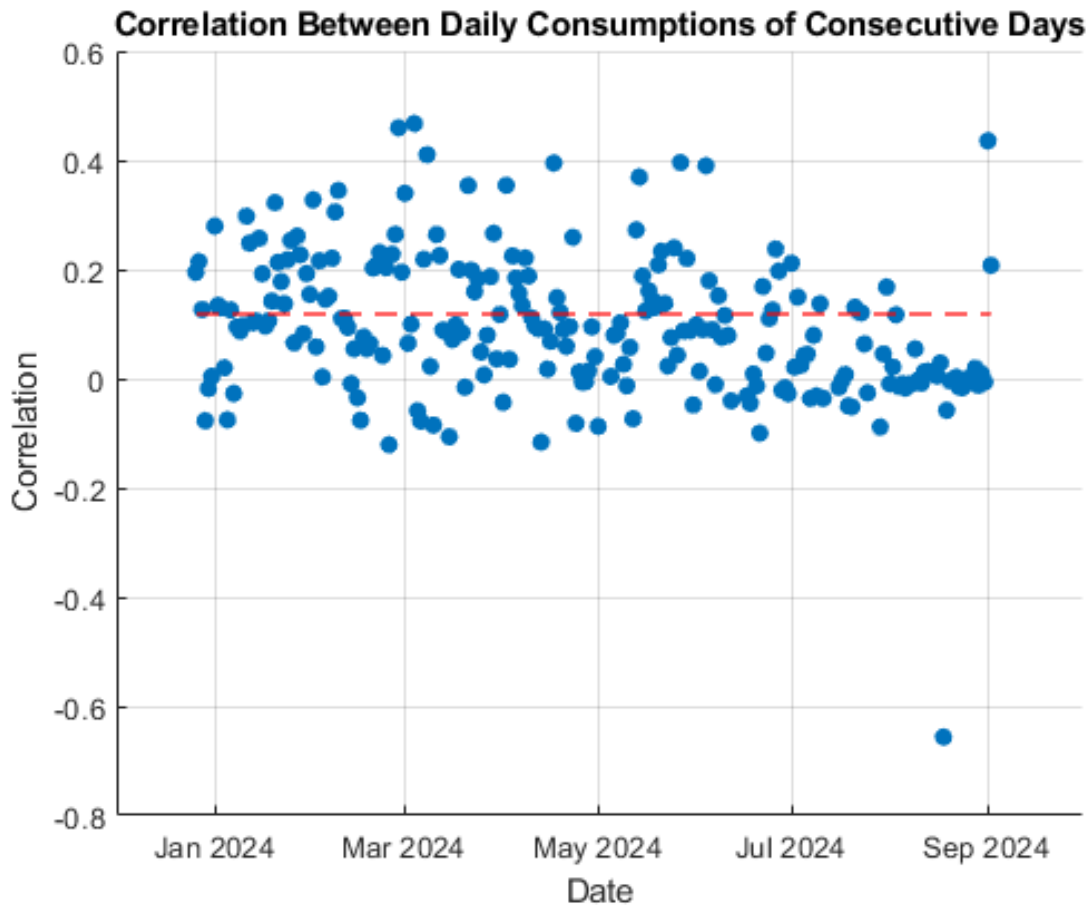


Fig.12: Correlazioni tra giorni consecutivi nella casa italiana

Il grafico a dispersione relativo alla casa britannica, mostra una correlazione per lo più moderata, con valori che si concentrano tra 0 e 0.4. La media delle correlazioni (linea tratteggiata rossa) si attesta intorno a 0.2, segnalando una relazione debole ma positiva tra i consumi energetici di giorni consecutivi. La dispersione è abbastanza regolare, senza valori estremi evidenti, sebbene alcuni punti presentino correlazioni negative (indicando differenze tra giorni consecutivi). Questo suggerisce che, mentre i consumi energetici tra giorni consecutivi presentano somiglianze, vi è una certa variabilità nel comportamento di consumo energetico, che potrebbe essere legata a cambiamenti nelle attività quotidiane o nell'utilizzo degli elettrodomestici.

Lo scatter plot relativo alla casa italiana, presenta una distribuzione simile a quella della casa britannica. Anche qui, la maggior parte delle correlazioni si concentra tra 0 e 0.4, con una media intorno a 0.2, molto simile al grafico precedente. Questo suggerisce una debole correlazione positiva tra i giorni

consecutivi, confermando che le abitazioni italiane, come quelle britanniche, mostrano comportamenti energetici piuttosto variabili da un giorno all'altro. Tuttavia, rispetto alla casa britannica, la casa italiana presenta alcune correlazioni negative più pronunciate (alcuni punti si trovano ben al di sotto di zero), il che potrebbe indicare cambiamenti più drastici nel comportamento di consumo in alcuni giorni (ma questi valori non sono molto numerosi).

I pattern di consumo energetico sono pertanto molto simili tra le due case. L'unica differenza che si può riscontrare è la presenza di più valori nel grafico della casa del Regno Unito, perché il periodo di monitoraggio è maggiore di quello nella casa italiana.

Passiamo ora all'analisi dei risultati ottenuti calcolando le correlazioni tra stessi giorni della settimana in settimane consecutive.

Nello scatter plot della casa britannica (Fig.13), le correlazioni variano principalmente tra 0 e 0.3, con alcune punte superiori a 0.4. La media delle correlazioni (linee tratteggiate colorate) per i vari giorni della settimana, si attesta intorno a 0.1-0.2. I valori di correlazione non mostrano differenze significative tra i vari giorni, suggerendo che il comportamento energetico tende a essere abbastanza coerente per lo stesso giorno della settimana, con una variabilità limitata da una settimana all'altra.

Lo scatter plot relativo alla casa italiana (Fig.14) mostra, in generale, un andamento molto simile. Le correlazioni si concentrano principalmente tra 0 e 0.3, con alcune punte sopra 0.4, e le medie si attestano anch'esse intorno a 0.1-0.2.

Anche in questo caso, la correlazione tra i consumi dello stesso giorno della settimana è positiva, ma relativamente debole, con una leggera variabilità tra settimane consecutive. Rispetto alla casa britannica, la casa italiana sembra mostrare una maggiore distribuzione dei valori verso il basso in alcuni giorni, con correlazioni negative più frequenti.

Le differenze tra tutti gli scatter plot visti in questo paragrafo sono minime, con una tendenza generale molto simile in entrambe le case. L'unica diversità risiede nel fatto che nella casa britannica c'è una maggiore densità di dati, ma questo non costituisce un aspetto rilevante per l'analisi, perché è dovuto soltanto ad un periodo di monitoraggio dell'abitazione maggiore.

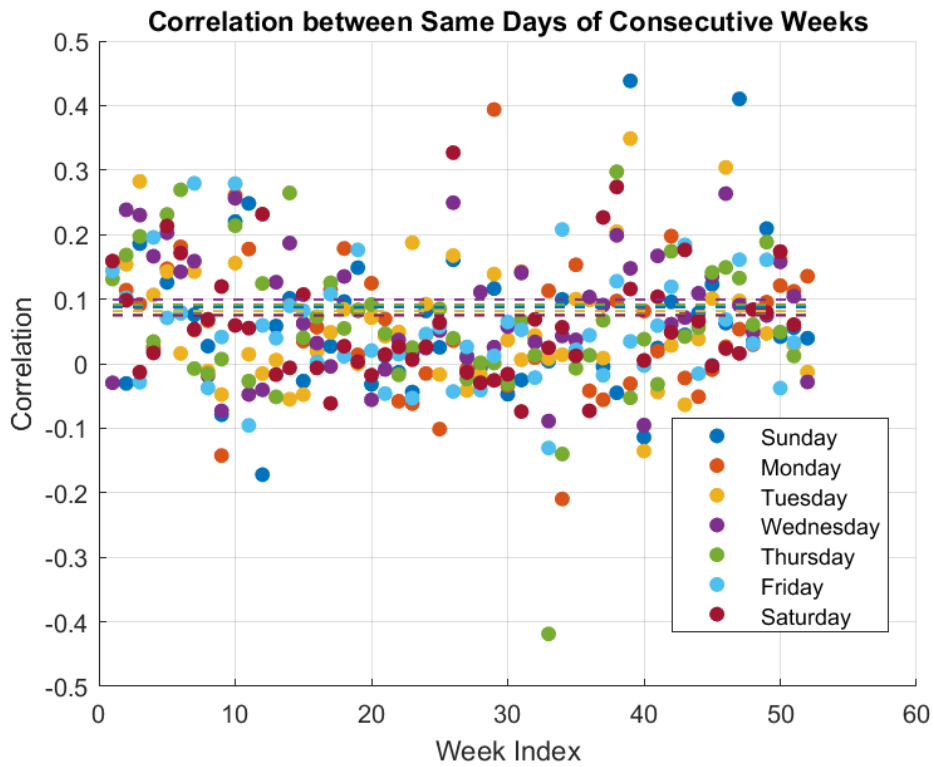


Fig.13: Correlazioni tra stessi giorni di settimane consecutive nella casa britannica

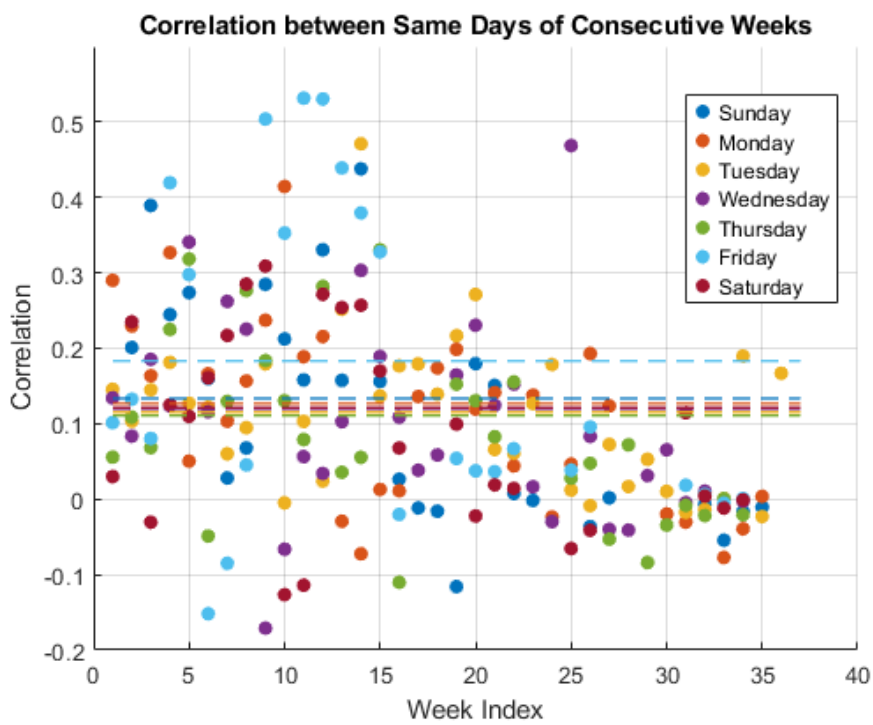


Fig.14: Correlazioni tra stessi giorni di settimane consecutive nella casa italiana

3.6 Load variability index su base giornaliera

Il load variability index (LVI) rappresenta un indicatore fondamentale per comprendere la variabilità dei consumi energetici all'interno di un'abitazione ed anche per valutare se una generica abitazione può essere inclusa in strategie di demand-response, come già spiegato nel paragrafo 1.5. La valutazione di questa quantità, che rappresenta il rapporto tra deviazione standard e media dei consumi energetici, è stata fatta su base giornaliera, sfruttando sempre il software Matlab, che consente di visualizzarne anche la rappresentazione grafica (come per le precedenti analisi).

Dopo il consueto caricamento del dataset e l'estrazione dei timestamp allineati con i consumi aggregati, viene eseguita una conversione dei timestamp in date giornaliere. Per ogni giorno unico nel dataset, il codice identifica i valori di consumo e calcola la loro media e deviazione standard. Il LVI viene calcolato per ciascun giorno come il rapporto tra queste due quantità. Il codice genera infine un grafico che rappresenta l'andamento del LVI nel tempo.

Quest'ultima fornisce una misura della dispersione dei consumi rispetto alla media giornaliera. Questo fa comprendere che, se la deviazione standard prevale sulla media allora il LVI avrà un valore maggiore di 1 e la curva che lo rappresenta mostrerà un andamento più variabile. Questa osservazione risulta significativa anche in termini di correlazione: un andamento dei consumi energetici poco prevedibile, è indicativo di una debole correlazione tra essi. Vale ovviamente l'opposto in caso contrario.

Questo grafico consente quindi di identificare i giorni con un'elevata variabilità nei consumi rispetto a quelli in cui il consumo è più stabile. Ad esempio, giorni in cui vengono utilizzati gli elettrodomestici ad alto consumo per periodi brevi, potrebbero mostrare un LVI elevato, mentre giorni caratterizzati da un consumo più costante, come quelli in cui prevale l'utilizzo di elettrodomestici con un assorbimento di potenza più regolare, potrebbero avere un LVI basso.

Riassumendo, il LVI consente di valutare la stabilità o la variabilità dei consumi energetici in un'abitazione. La sua analisi permette di ottenere indicazioni preziose per ottimizzare la gestione dell'energia, identificando i giorni in cui il consumo è più variabile e intervenendo con strategie di gestione energetica mirate per migliorare l'efficienza complessiva.

3.7 Rappresentazione grafica del LVI

I risultati ottenuti sono mostrati nelle Fig.15-16, e rappresentano l'andamento della variabilità dei consumi energetici giornalieri rispettivamente per il dataset REFIT e per il dataset MAC.

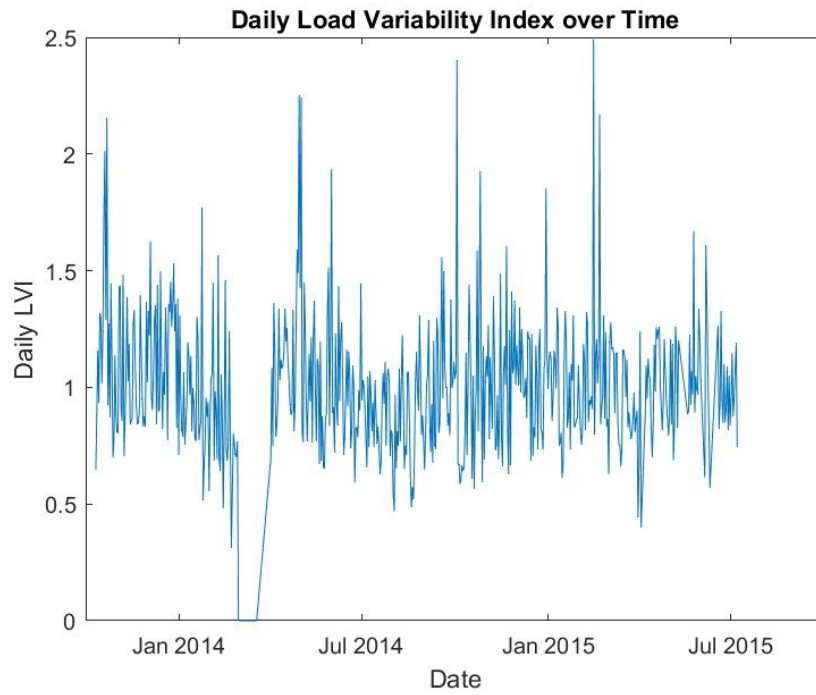


Fig.15: Load Variability Index casa britannica

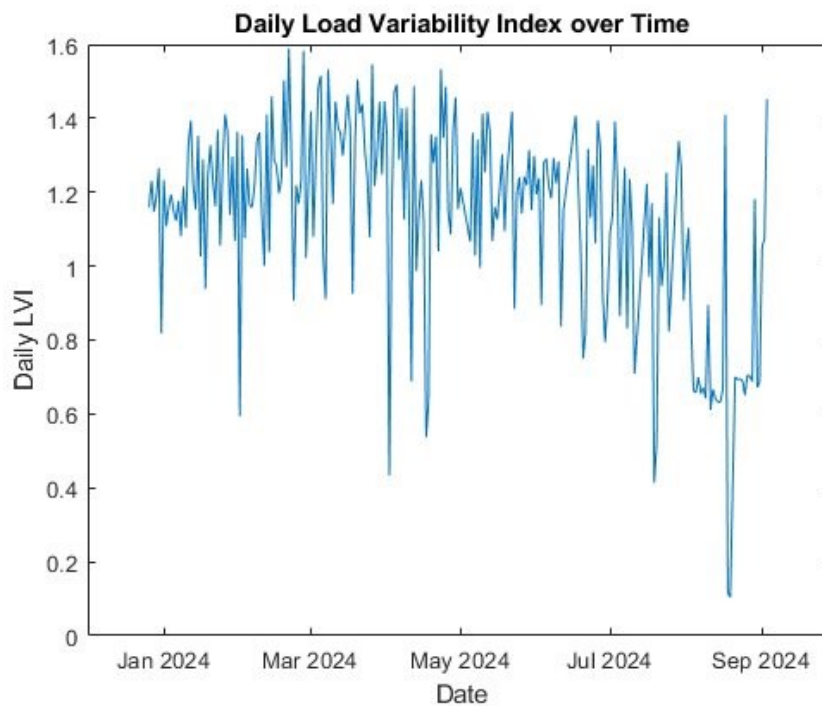


Fig.16: Load Variability Index casa italiana

Nella casa del Regno Unito, il LVI mostra una grande variabilità nel tempo, con picchi molto alti (con valori che arrivano anche fino a 2) e periodi di forte instabilità. Ciò è coerente con il grafico delle correlazioni, che mostrava valori molto deboli di correlazione positiva, indicando che in questa casa i consumi non seguivano un comportamento energetico uniforme. Questo suggerisce che il consumo è poco prevedibile e più soggetto a variazioni estreme tra un giorno e l'altro.

La casa italiana presenta un LVI che varia principalmente tra 0.6 e 1.4, con alcuni picchi superiori a 1.4. La maggior parte dei giorni presenta una certa variabilità, con periodi in cui il valore si mantiene elevato, indicando una maggiore dispersione tra i consumi giornalieri ed una differenza significativa tra le ore di massimo e minimo consumo. Verso la fine del periodo monitorato, si notano dei valori inferiori a 1, che segnalano una riduzione della variabilità dei consumi.

Comparando i due grafici, la casa britannica mostra una variabilità maggiore per quanto riguarda il Load Variability Index, mentre la casa italiana mantiene valori generalmente inferiori. Questo suggerisce che i consumi nella casa britannica sono più soggetti a variazioni durante la giornata, probabilmente a causa di una maggiore presenza di elettrodomestici ad alto consumo utilizzati per brevi periodi di tempo.

In entrambe le case, la variabilità del consumo energetico cambia durante l'intero periodo di monitoraggio, riflettendo potenziali differenze nelle abitudini di utilizzo degli elettrodomestici e nelle esigenze energetiche giornaliere, accentuando che i consumi aggregati delle due abitazioni sono, in genere, poco prevedibili tra una data e l'altra.

In conclusione, dal grafico generale del LVI sono stati estratti specifici periodi temporali (archi di tempo relativi a 2 settimane) al fine di mettere bene in evidenza la differenza tra gli andamenti della curva nel caso di settimane che sono caratterizzate da un'alta correlazione tra i consumi energetici e di quelle con valori bassi di correlazione.

Nel primo caso (Fig.17-18), si nota come la curva presenti in generale, per entrambe le case un andamento poco variabile, con valori circa pari ad 1 o inferiori: questo indica una minor dispersione dei valori di consumo giornaliero degli elettrodomestici.

Nel secondo caso (Fig.19-20), il LVI presenta un andamento molto irregolare, con valori superiori ad 1, il che significa che i dati sono più dispersi in quella fascia temporale, di conseguenza i pattern di consumo energetico risultano poco prevedibili.

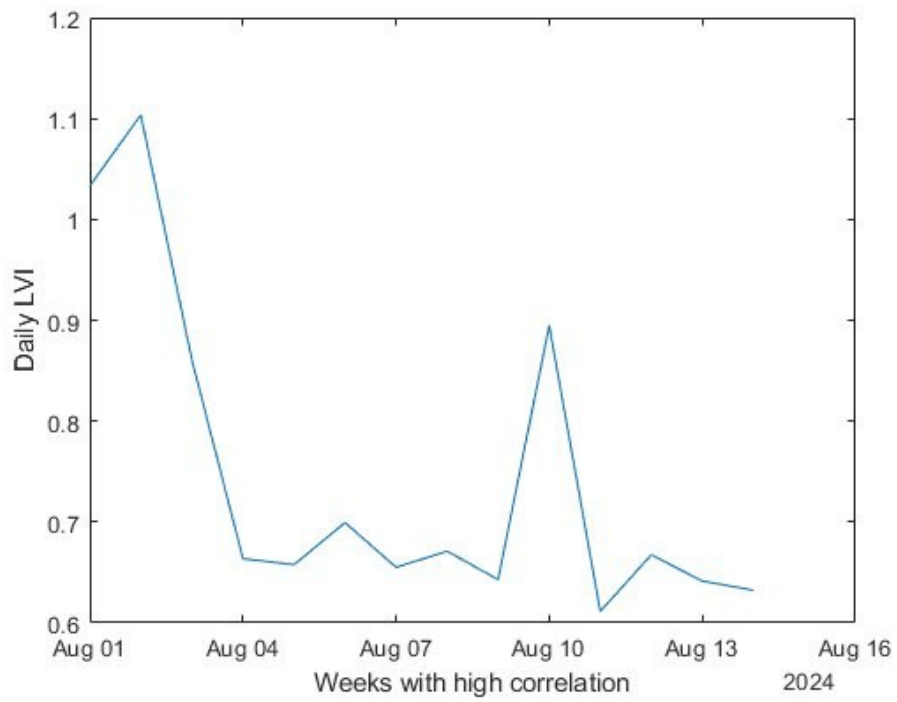
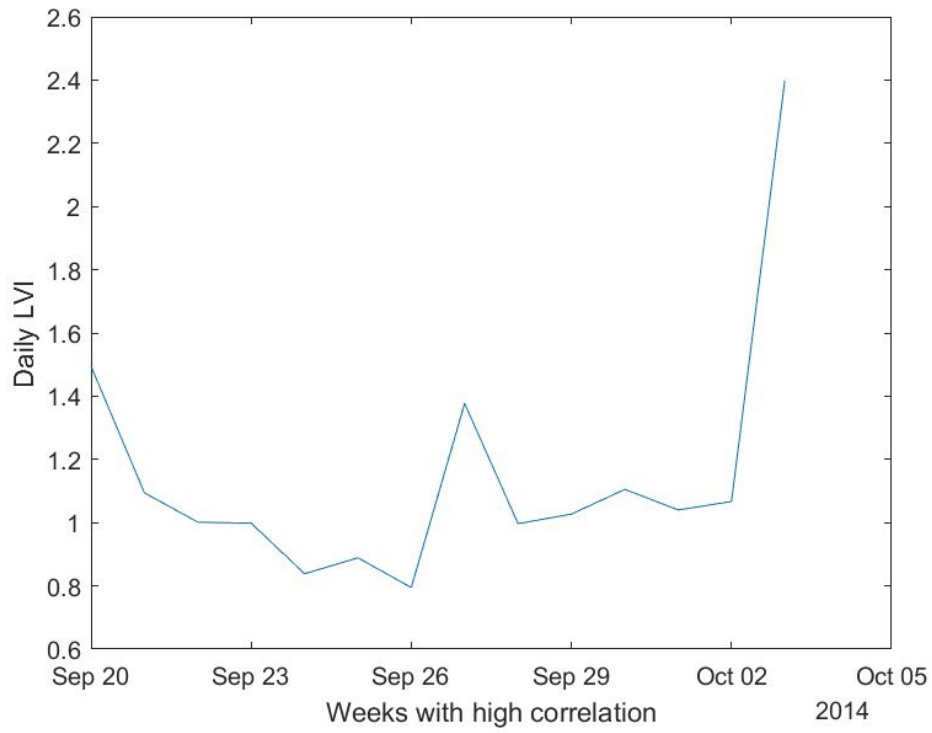


Fig.17-18: LVI per casa britannica ed italiana nel caso di alta correlazione

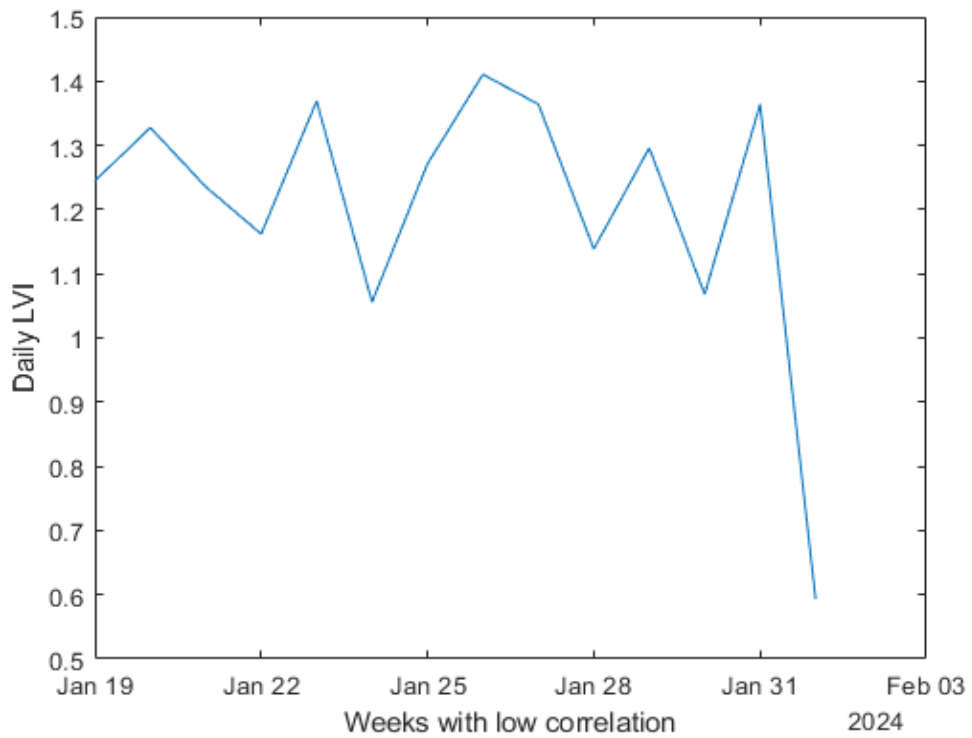
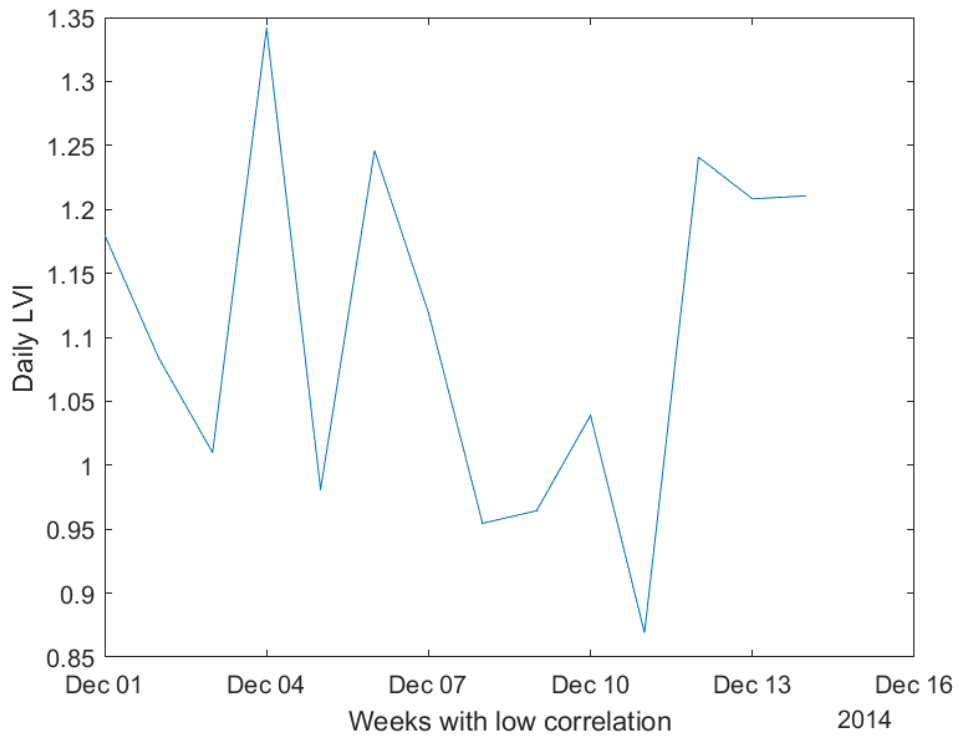


Fig.19-20: LVI casa britannica ed italiana nel caso di bassa correlazione

4. Analisi dei singoli elettrodomestici

La seconda parte dello studio affrontato in questa tesi riguarda il contributo dei singoli elettrodomestici, sempre confrontando i risultati ottenuti per i due dataset analizzati. In particolare, per la casa del Regno Unito si farà riferimento al microonde ed al bollitore, mentre per la casa italiana si considereranno invece la lavastoviglie e la lavatrice. L'analisi si sofferma sugli aspetti riguardanti il numero di accensioni ora per ora per ogni giorno della settimana di ogni elettrodomestico analizzato, il loro consumo medio di potenza, picco ed energia.

Come per il consumo aggregato, per ogni aspetto dell'analisi verrà illustrato prima il codice Matlab, che fa comprendere al meglio la metodologia utilizzata per risolvere il problema affrontato nel rispettivo paragrafo, in seguito se ne illustreranno i risultati ottenuti e la loro rappresentazione grafica.

4.1 Numero di accensioni ora per ora per ogni giorno della settimana

Il codice Matlab realizzato per questa analisi ha lo scopo di calcolare il numero di accensioni medie di due elettrodomestici per abitazione, in ciascun giorno della settimana. La procedura inizia con il caricamento del dataset e l'estrazione da esso dei timestamp e dei vettori di consumo relativi a microonde e bollitore per la casa britannica, ed a lavastoviglie e lavatrice per la casa italiana. Per ciascun elettrodomestico vengono impostate soglie e durate minime di accensione. Un elettrodomestico viene considerato acceso quando il suo consumo supera un determinato valore (scelto in base al tipo di elettrodomestico) per almeno un certo numero di campioni consecutivi. Questo viene fatto per non considerare i periodi in cui gli elettrodomestici sono in standby, che non corrispondono ad attivazioni vere e proprie. Si evita inoltre di conteggiare brevi fluttuazioni del consumo come attivazioni. Una volta che un'accensione è in corso, il codice monitora anche la durata di spegnimento, verificando se il consumo rimane sotto la soglia per un certo numero di campioni consecutivi al fine di registrare l'intero ciclo di attivazione/spegnimento dell'elettrodomestico analizzato. Il codice organizza le accensioni per ora e per giorno della settimana utilizzando delle funzioni che convertono i timestamp nei rispettivi giorni della settimana e ore del giorno. Le accensioni vengono così raccolte in una matrice 7x24, dove le righe rappresentano i giorni (dalla domenica al sabato) e le colonne le ore del rispettivo giorno.

Una volta conteggiate le accensioni come sopra spiegato, il codice calcola la loro media per ciascuna ora e giorno della settimana. Questo consente di avere una

panoramica sull'utilizzo tipico del singolo elettrodomestico in una singola giornata. I risultati vengono infine visualizzati con grafici a barre (istogrammi) per ogni giorno della settimana, da domenica a sabato.

Il codice realizzato è lo stesso sia per la casa britannica che per la casa italiana, per quanto riguarda la procedura di calcolo delle accensioni. La differenza principale (oltre al file di input caricato in Matlab) sta nella considerazione sulle soglie e durate minime per considerare un ciclo di attivazione completo degli elettrodomestici in esame, in particolare:

- per il microonde e il bollitore si fissano soglie di consumo maggiori o uguali rispettivamente a 100 e 1000 Watt che devono mantenersi per almeno 3 campioni consecutivi, che corrispondono a 24 secondi di accensione, poiché la frequenza di monitoraggio del consumo energetico è pari a 8 secondi nel dataset REFIT opportunamente ricampionato
- per la lavastoviglie e la lavatrice si fissano le soglie di consumo rispettivamente a 10 e 20 Watt che devono mantenersi per almeno 225 campioni consecutivi che corrispondono a 1800 secondi, cioè 30 minuti di accensione, dato che il periodo di campionamento risulta pari ad 8 secondi nel dataset MAC.

Il codice Matlab contiene due variabili rispettivamente per la soglia fissata e per la durata minima di mantenimento dei valori superiori o uguali ad essa; perciò, a seconda dei casi, i valori possono essere cambiati e si potrebbero ottenere i risultati per ogni elettrodomestico (di cui si possiedono i dati di consumo energetico) presente in un'abitazione, al fine di avere una panoramica su quali apparecchi sono accesi più o meno volte nel corso della giornata.

4.2 Rappresentazione grafica dell'andamento delle accensioni

I risultati dell'analisi condotta nel paragrafo precedente sono mostrati negli istogrammi di Fig. 21-22-23-24-25-26-27-28 (ordinata: numero medio di accensioni; ascissa: ora del rispettivo giorno della settimana esaminato), con titoli che fanno comprendere quale elettrodomestico si prende in considerazione. Analizzando il microonde, si osserva un utilizzo distribuito lungo tutta la giornata, con picchi significativi durante l'ora di pranzo (intorno alle 13:00) e verso sera, specialmente tra le 18:00 e le 20:00. Questo andamento riflette l'utilizzo tipico del microonde per la preparazione di pasti veloci o per riscaldare i cibi durante i pasti principali. Il numero medio di accensioni è maggiore durante la settimana rispetto

al fine settimana, suggerendo un utilizzo più costante e regolare nei giorni lavorativi piuttosto che in quelli feriali.

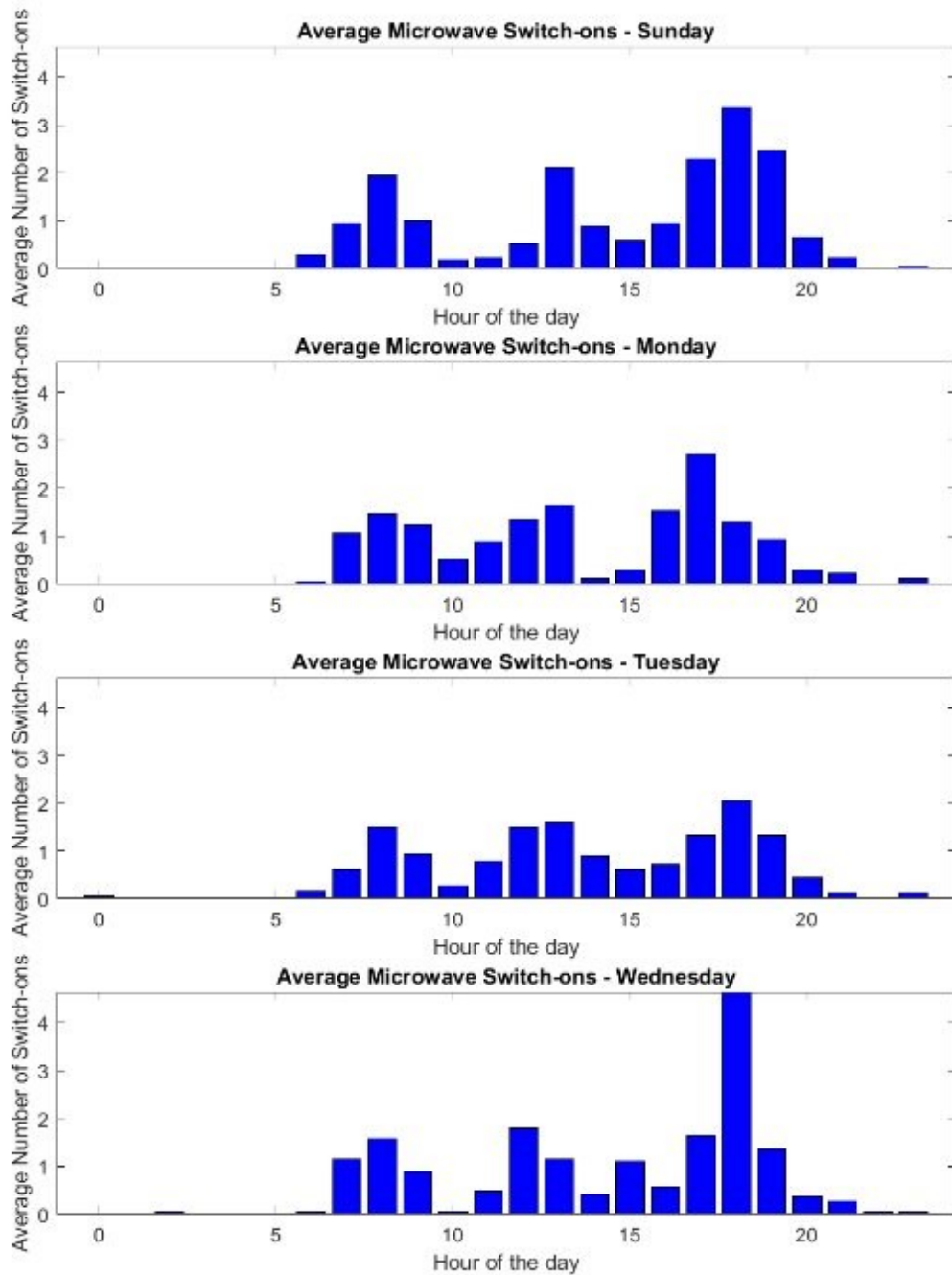


Fig.21: Accensioni microonde (da domenica a mercoledì)

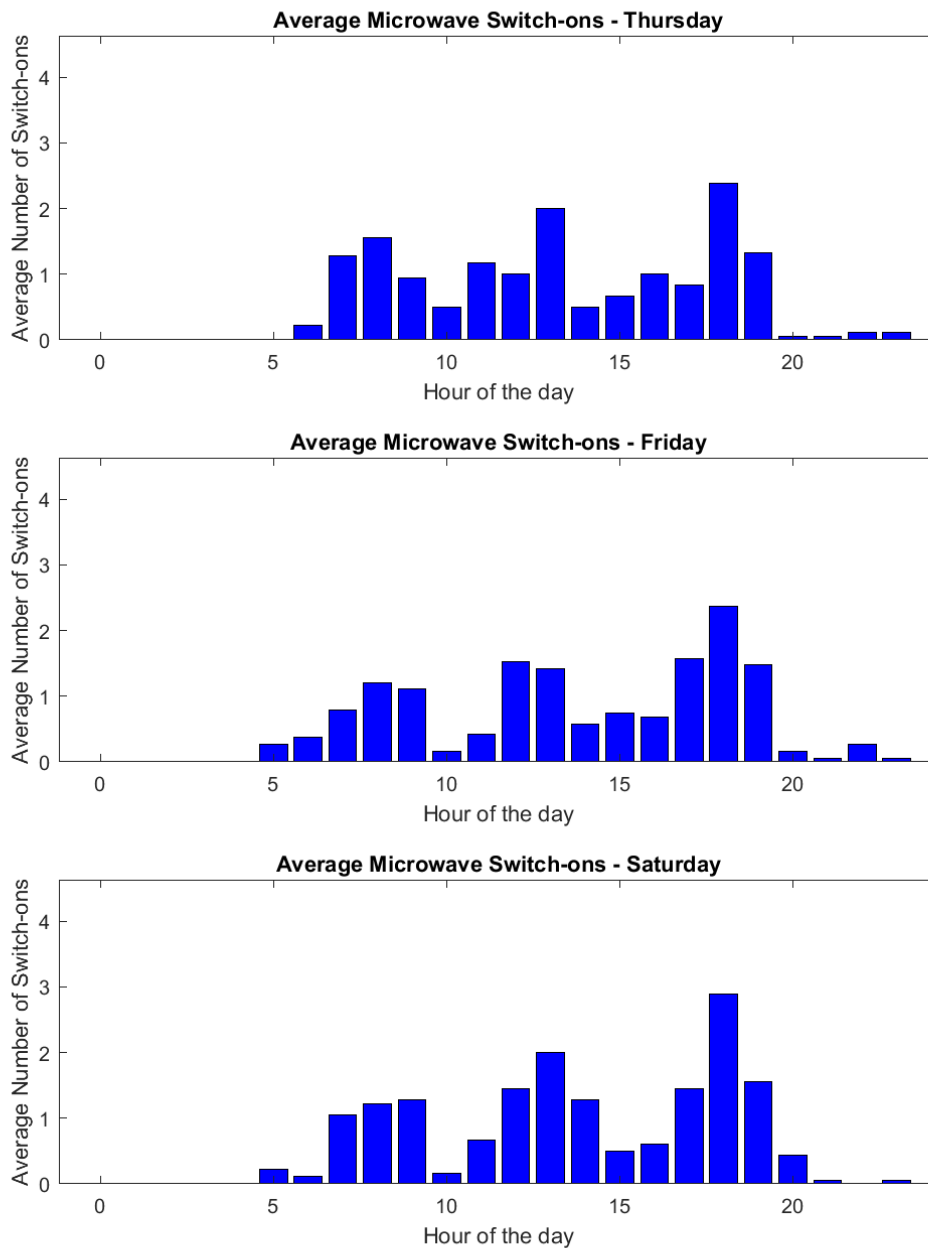


Fig.22: Accensioni microonde (da giovedì a sabato)

Il bollitore, invece, presenta un picco di utilizzo molto più marcato nelle prime ore della mattina, soprattutto tra le 7:00 e le 9:00, con un altro picco significativo verso le ore serali, intorno alle 17:00 e 18:00. Questo riflette chiaramente le

abitudini di consumo, in cui il bollitore è spesso utilizzato per preparare bevande calde, come tè o caffè, nelle prime ore della giornata e dopo il ritorno dal lavoro.

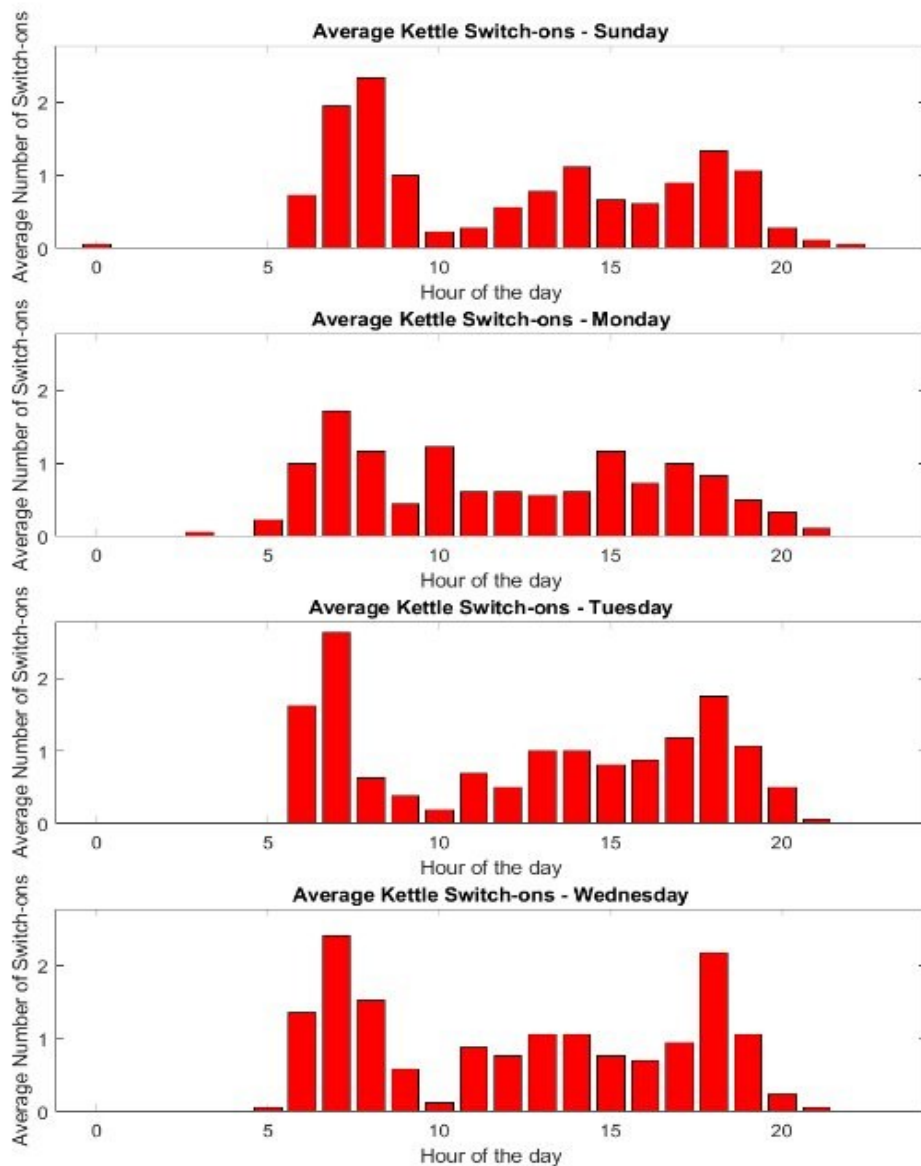


Fig.23: Accensioni bollitore (da domenica a mercoledì)

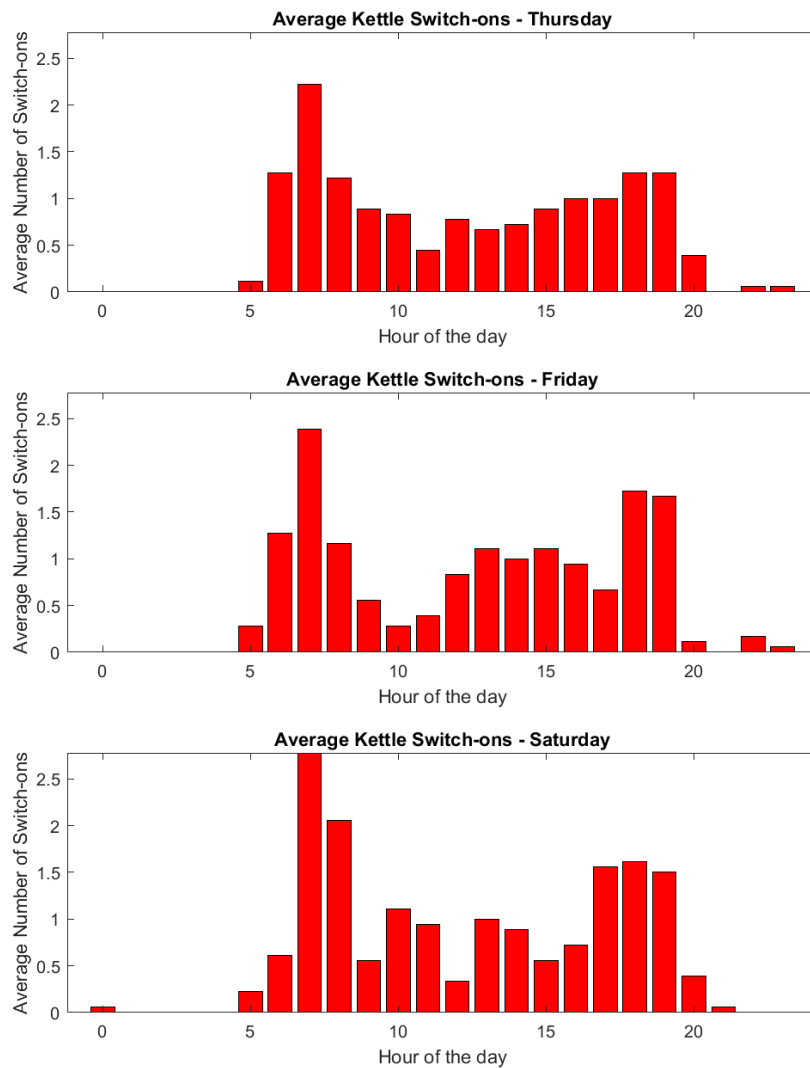


Fig.24: Accensioni bollitore (da giovedì a domenica)

Per quanto riguarda la lavatrice, l'utilizzo tende a concentrarsi nel pomeriggio, specialmente tra le 14:00 e le 17:00, con picchi variabili durante la settimana, spesso nei giorni feriali, in cui gli utenti possono dedicare tempo alle faccende domestiche. I giorni di maggiore utilizzo sembrano essere la domenica e il sabato (gli utenti sono presenti in casa e utilizzano maggiormente la lavatrice).

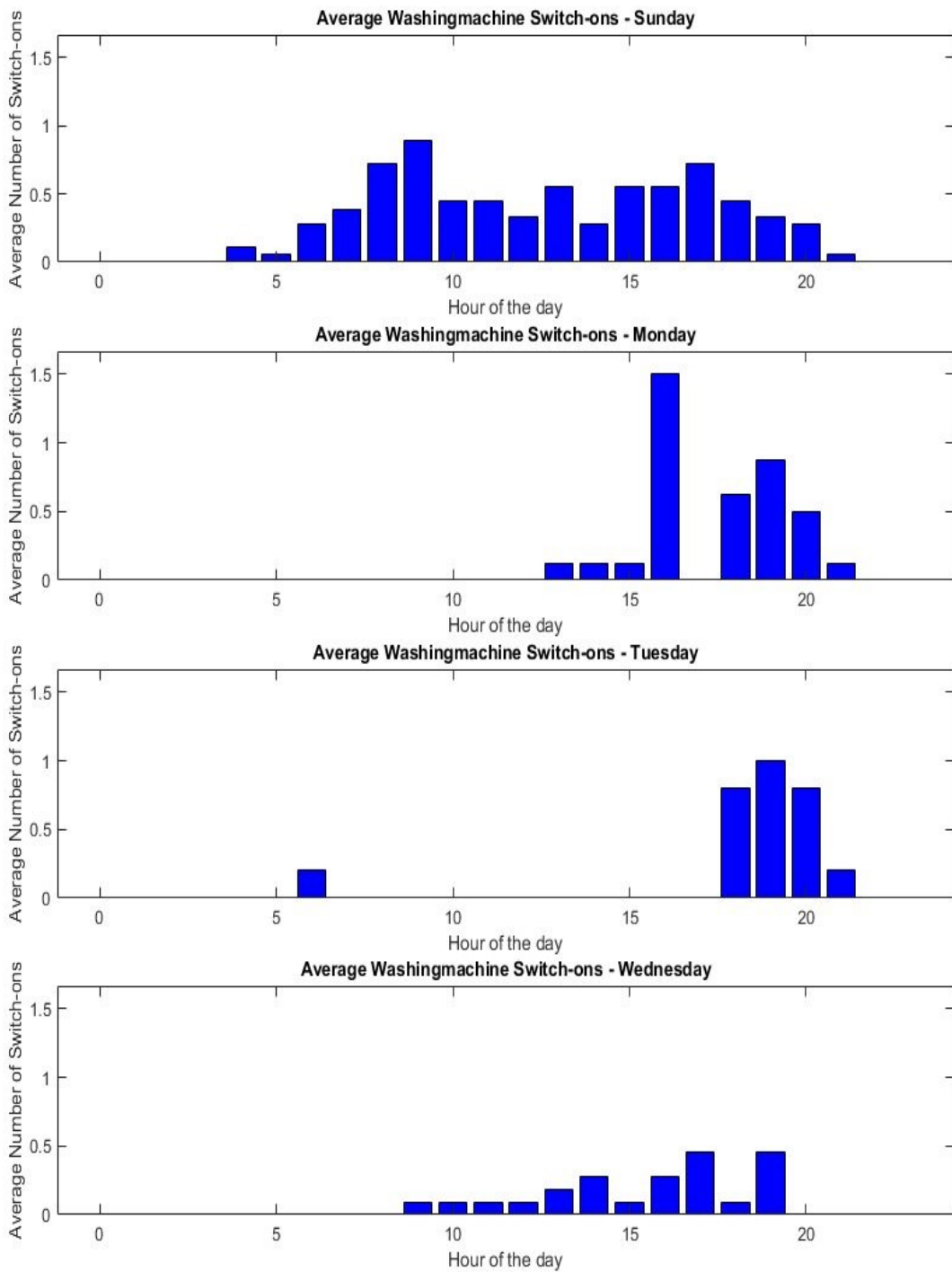


Fig.25: Accensioni lavatrice (da domenica a mercoledì)

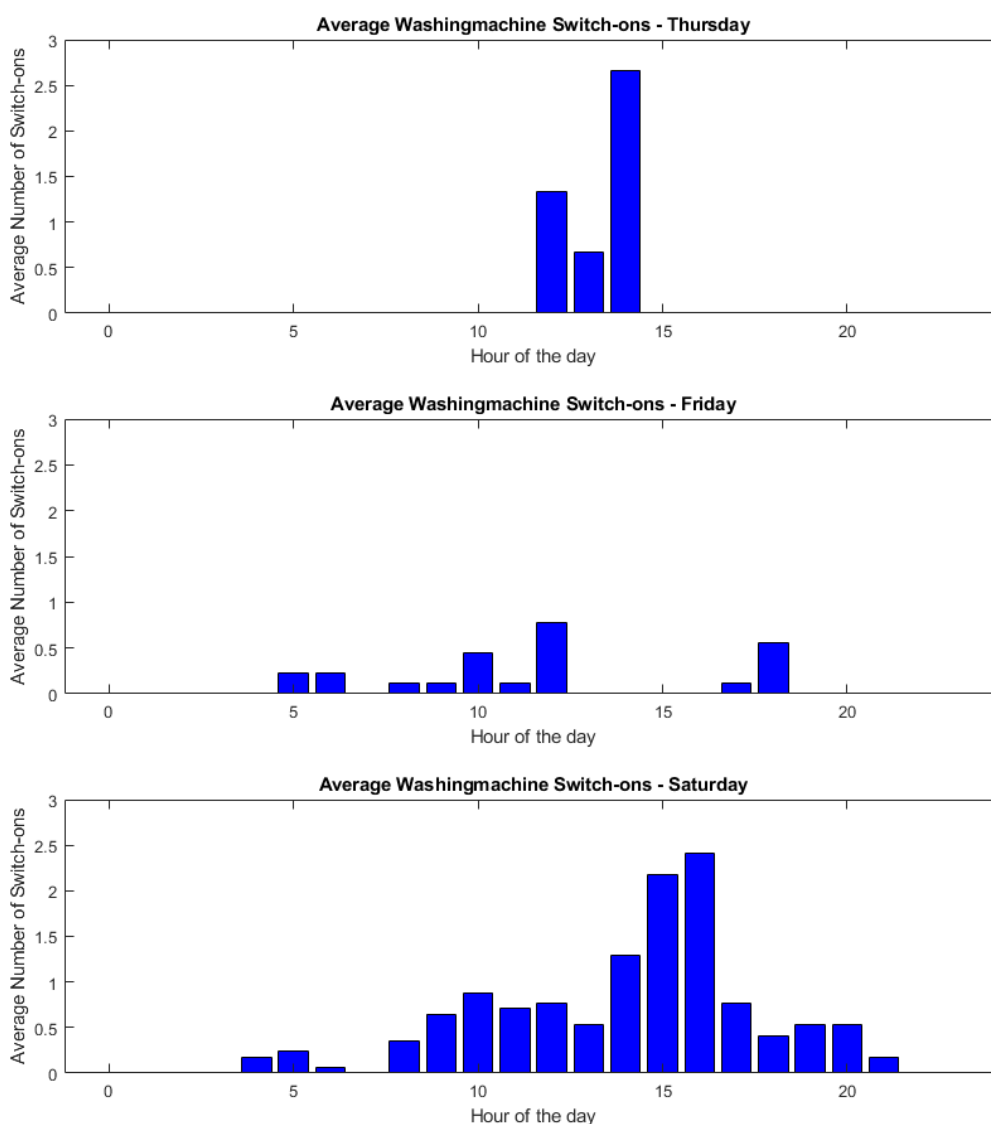


Fig.26: Accensioni lavatrice (da giovedì a sabato)

La lavastoviglie, invece, presenta un andamento caratteristico serale (picchi di accensione tra le 19:00 e le 21:00), e pomeridiano (picchi riscontrati tra le 13:00 e le 16:00). Questo pattern riflette l'abitudine di utilizzare la lavastoviglie subito dopo le ore di pranzo e cena, quando si accumulano maggiori entità di piatti e pentole da lavare. Ciò risulta coerente in tutti i giorni della settimana.

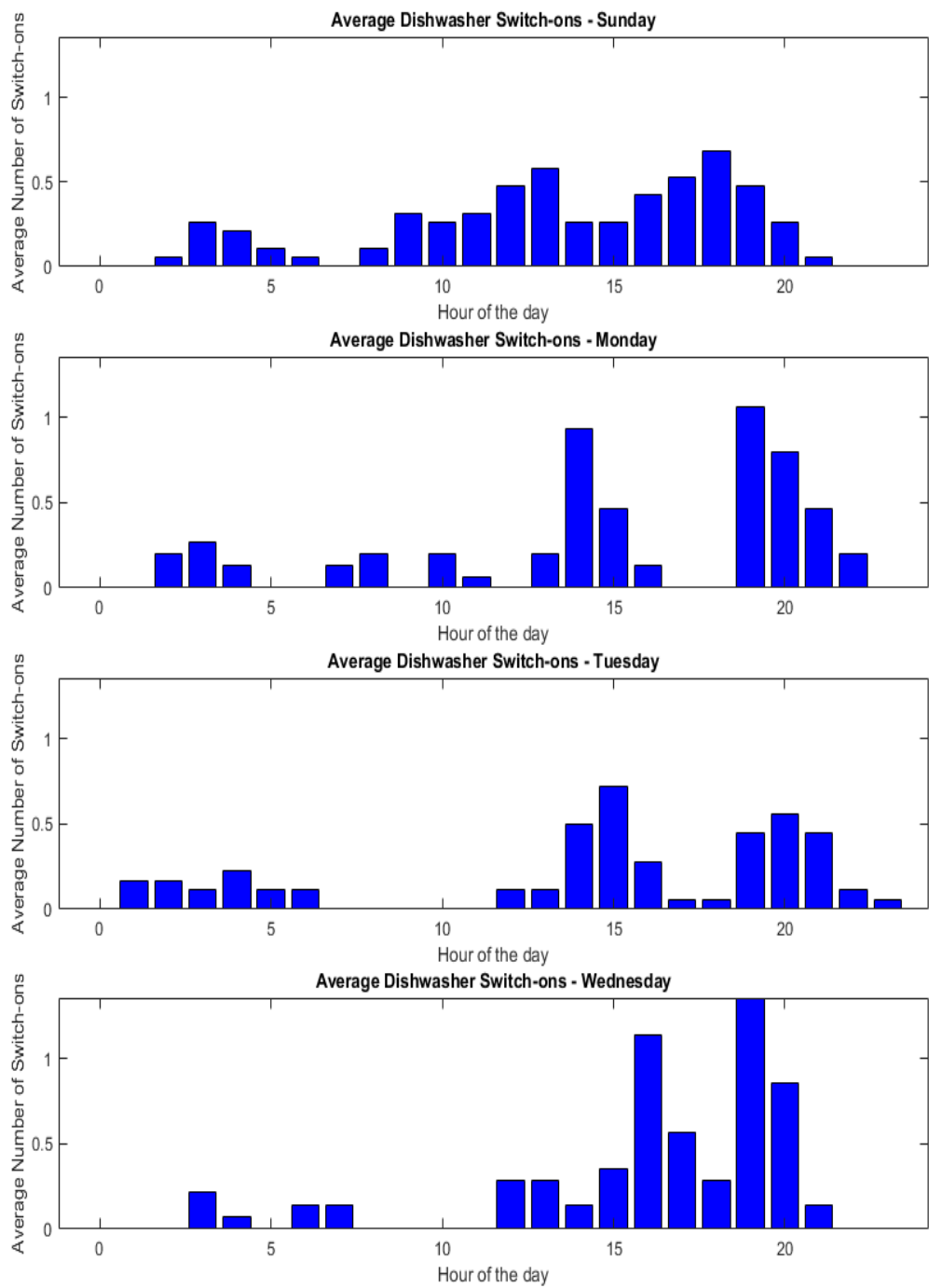


Fig.27: Accensioni lavastoviglie (da domenica a mercoledì)

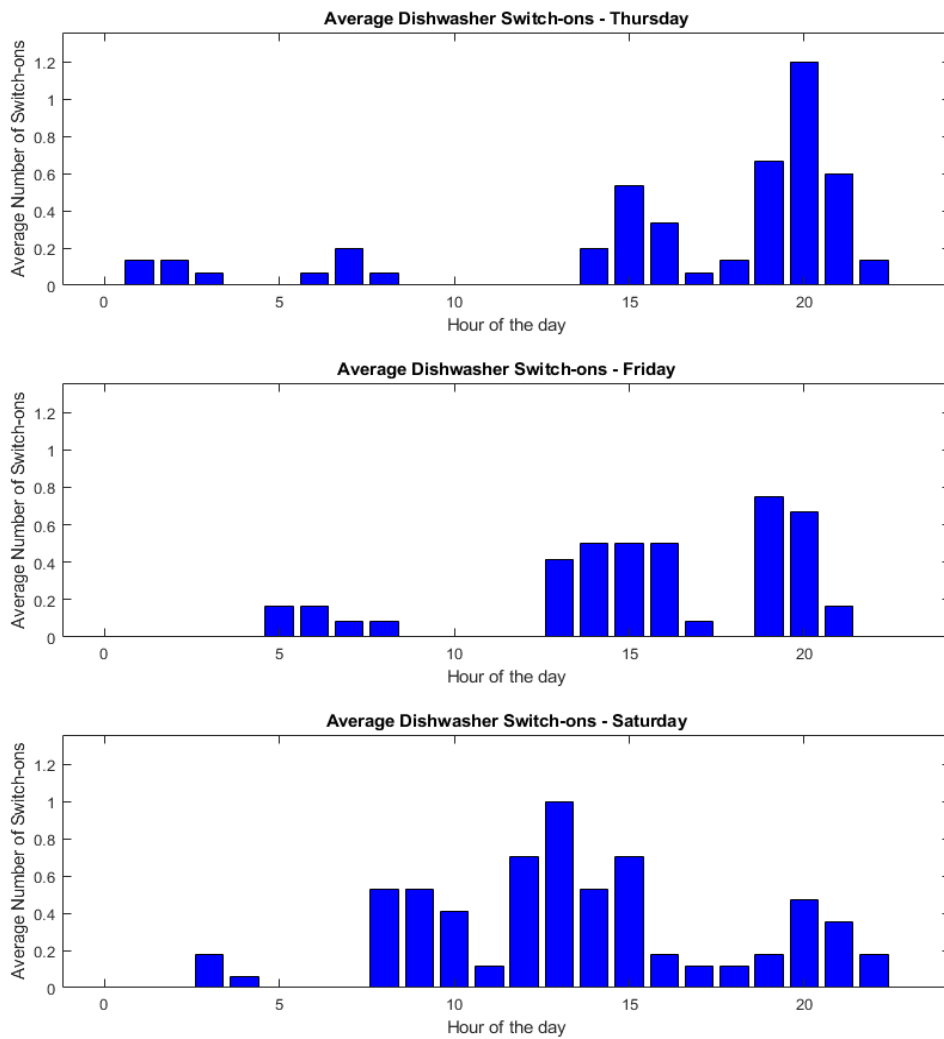


Fig.28: Accensioni lavastoviglie (da giovedì a sabato)

Confrontando l'uso degli elettrodomestici nei due dataset, si nota che gli apparecchi più utilizzati per le attività quotidiane, come il microonde e il bollitore, hanno accensioni più frequenti e distribuite lungo l'arco della giornata, mentre elettrodomestici che richiedono cicli più lunghi, come la lavatrice e la lavastoviglie, tendono ad essere utilizzati in specifici momenti della giornata, spesso concentrati nel pomeriggio o nella sera. Inoltre, l'uso del microonde e del bollitore riflette una maggiore flessibilità nel tempo di utilizzo, mentre la lavatrice e la lavastoviglie, a causa della natura del loro funzionamento, sono

maggiormente legate ad un numero inferiore di accensioni, con cicli più lunghi e intervalli di inattività più marcati tra una sessione e l'altra.

4.3 Consumo medio e picco di potenza

In questo paragrafo relativo al consumo medio ed al picco di potenza degli elettrodomestici, la procedura di analisi dei dati in Matlab è sostanzialmente identica a quella utilizzata per il consumo aggregato, già illustrata nel paragrafo 3.1. La differenza principale risiede nel fatto che, in questa sezione, vengono caricati e analizzati i vettori relativi ai consumi specifici dei singoli elettrodomestici della rispettiva abitazione, piuttosto che il consumo aggregato. In seguito, sulla base delle osservazioni su soglia e durata minima di accensione riportate alla fine del paragrafo 4.1, i vettori vengono filtrati per selezionare soltanto i consumi rilevanti, allineandoli con i rispettivi timestamp, in modo tale da eliminare valori che non rappresentano un effettivo utilizzo dell'elettrodomestico. Questo processo si realizza tramite la seguente logica:

- si crea un vettore che contiene valori “true” ogni volta che il consumo supera la soglia stabilita per il rispettivo elettrodomestico
- si individua il cambio di stato tra attivato e disattivato e si stabiliscono i limiti di ciascun gruppo di valori consecutivi
- se un gruppo di valori consecutivi di consumo supera la soglia e dura per almeno un certo numero di campioni consecutivi (stabilito a seconda dell'elettrodomestico analizzato), viene considerato come una regione di attivazione.
- i dati corrispondenti (consumo e timestamp) vengono quindi copiati in nuovi vettori filtrati che contengono soltanto i valori che corrispondono ai periodi di accensione effettivi dell'elettrodomestico, e che verranno considerati per il calcolo del consumo medio e del picco di potenza.

Dopo questa serie di operazioni, il metodo di calcolo, nonché la visualizzazione dei risultati attraverso istogrammi, segue esattamente lo stesso metodo impiegato per l'analisi del consumo aggregato. Le medie e i picchi vengono calcolati su base giornaliera e oraria, e visualizzati per ciascun giorno della settimana.

4.4 Rappresentazione grafica del consumo medio e del picco di potenza

Poiché gli elettrodomestici esaminati sono due per dataset, se si realizzano i grafici come per il consumo aggregato, rappresentando prima i giorni della settimana dalla domenica al mercoledì, e poi i restanti dal giovedì al sabato, otterremmo 16 istogrammi che mostrano media e picco di potenza per ciascuno di essi. Siccome questi grafici riflettono i consumi soltanto durante i periodi di effettiva attivazione (che soddisfano il superamento di soglie e durate minime di accensione), non verranno mostrati tutti quanti, ma soltanto per i primi 4 giorni della settimana, perché i valori in ordinata nei restanti 3 giorni non cambiano di molto.

Chiarito ciò, si possono descrivere i risultati ottenuti per ogni elettrodomestico.

Nel caso del microonde (Fig.29-30) la potenza media durante l'utilizzo varia da 1000 a 1500 Watt, mentre i picchi di potenza seguono un andamento simile. Per il bollitore (Fig.31-32), i valori medi e i picchi di consumo sono intorno ai 2000 Watt. Per la lavatrice e la lavastoviglie (Fig.33-34-35-36), vale lo stesso.

Questi valori elevati indicano il consumo energetico soltanto durante l'accensione degli apparecchi. I grafici, infatti, hanno l'obiettivo di valutare, in ogni ora, quanta potenza media si arriva a consumare quando gli elettrodomestici sono attivi, mentre le ore in cui vengono accesi maggiormente sono già state mostrate negli istogrammi sulle accensioni del paragrafo 4.2. Il dato sulla potenza media consumata è utile per stimare il consumo energetico totale in wattora, secondo la formula:

$$E = P \times t \quad (6)$$

dove P è la potenza media e t il tempo di utilizzo in ore dell'apparecchio.

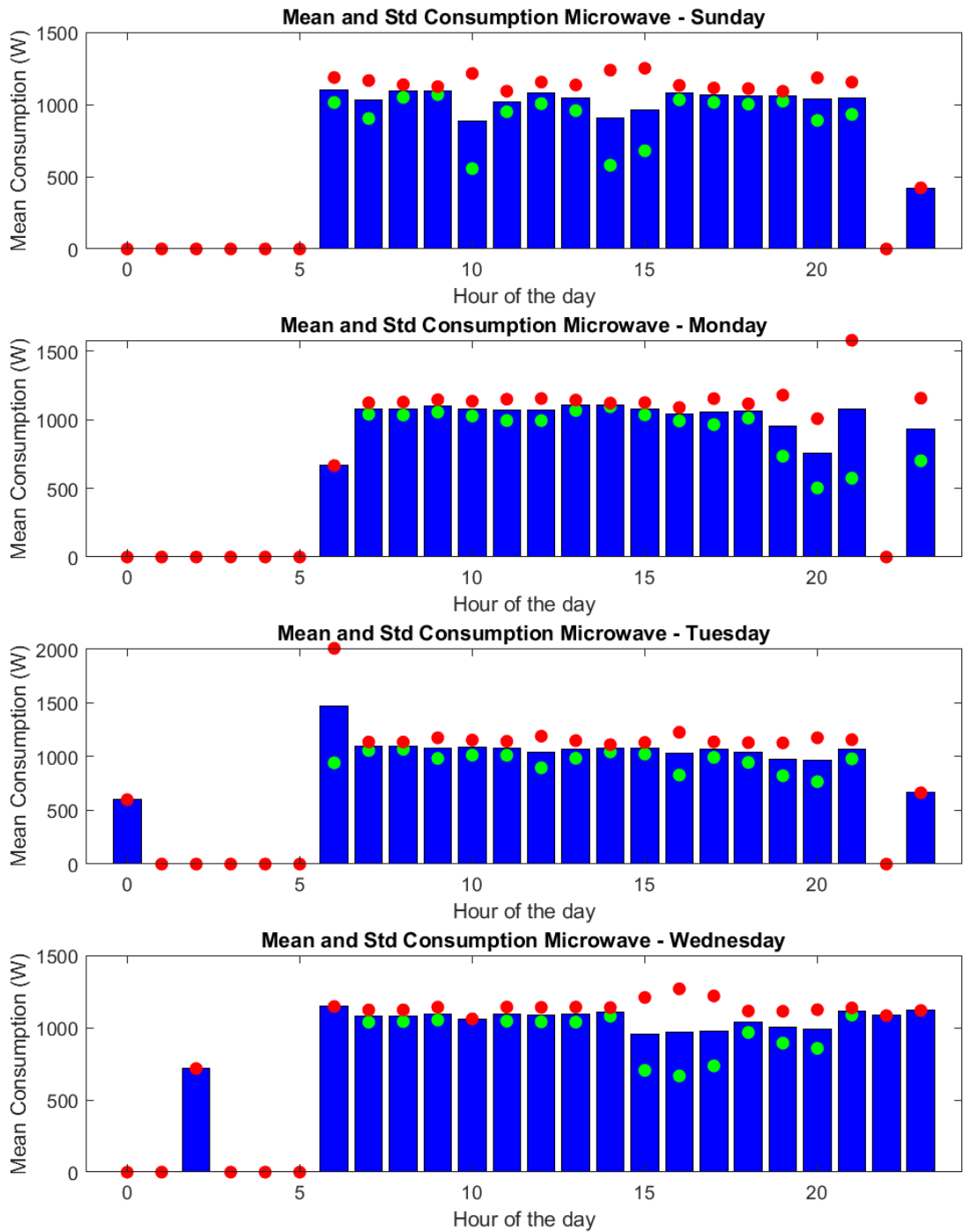


Fig.29: Consumo medio microonde (regioni di attivazione)

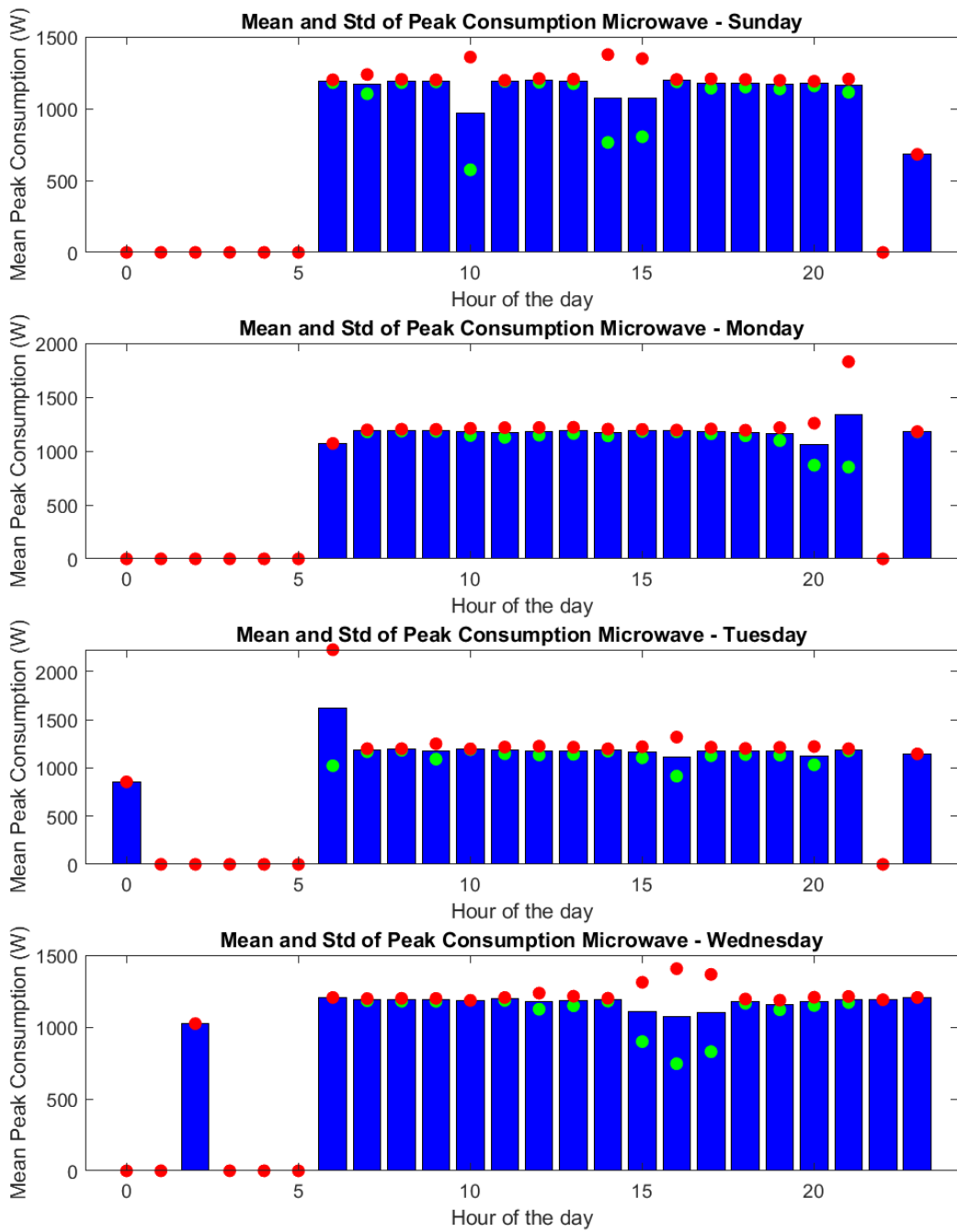


Fig.30: Media dei picchi microonde

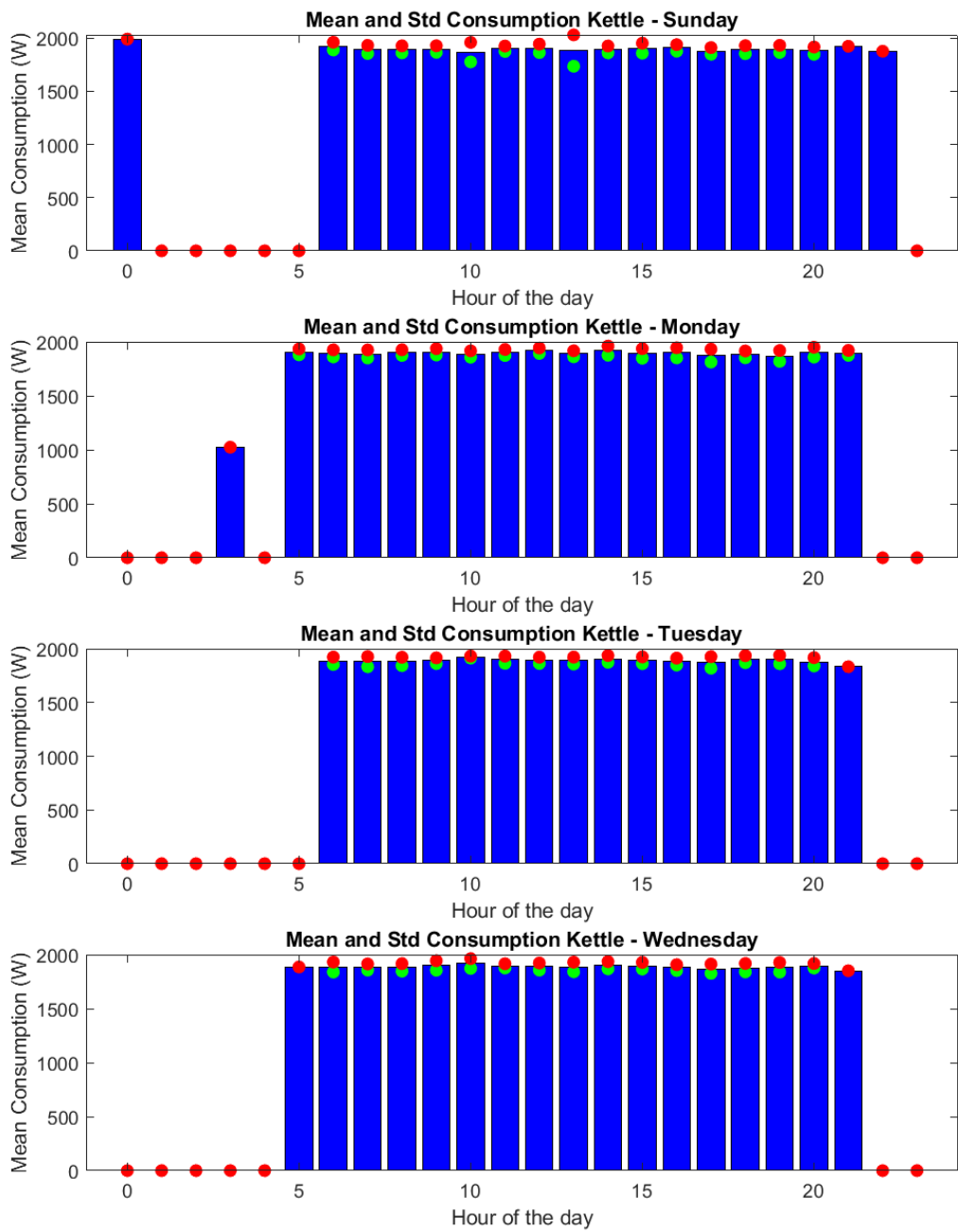


Fig.31: Consumo medio bollitore (regioni di attivazione)

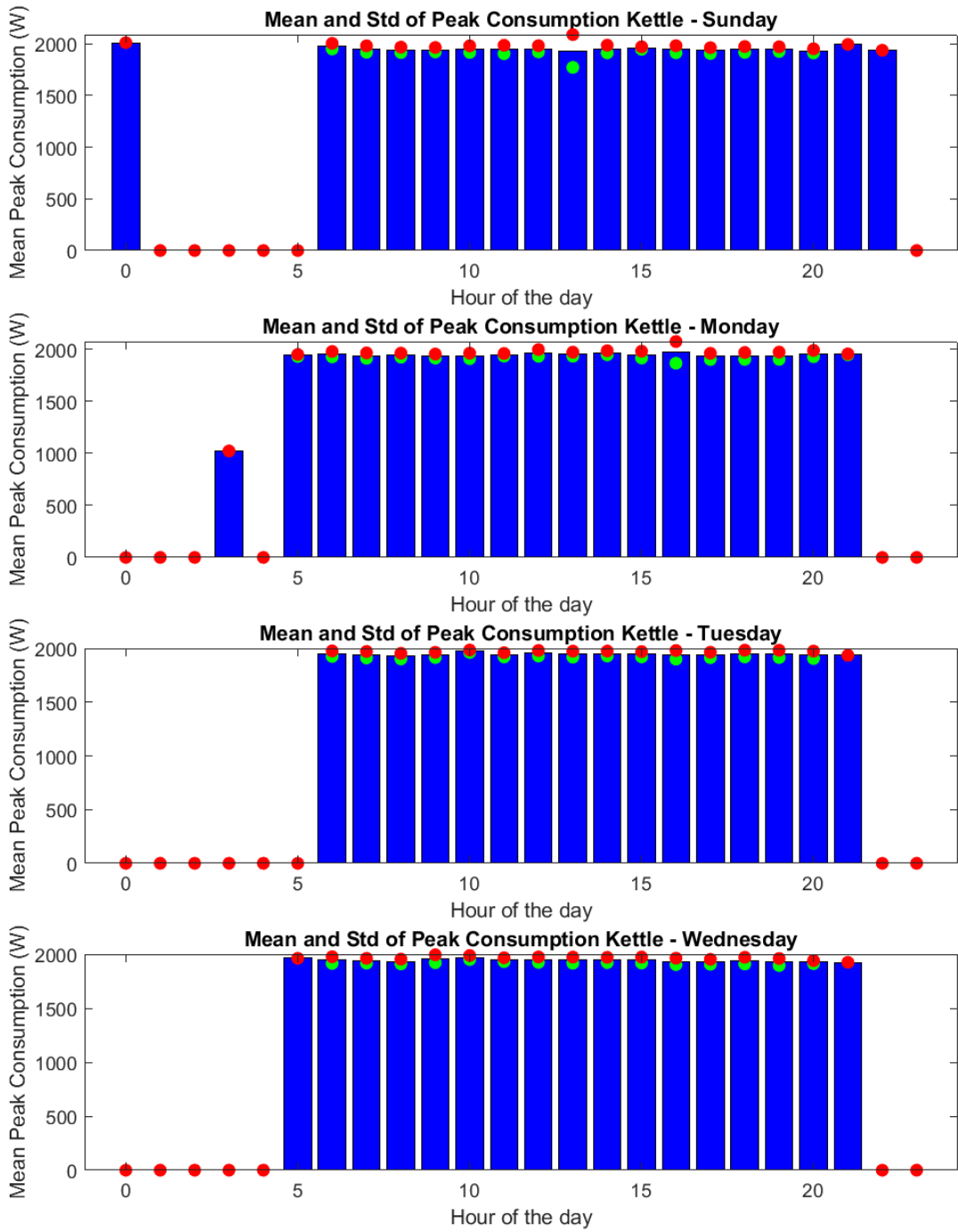


Fig.32: Media dei picchi bollitore

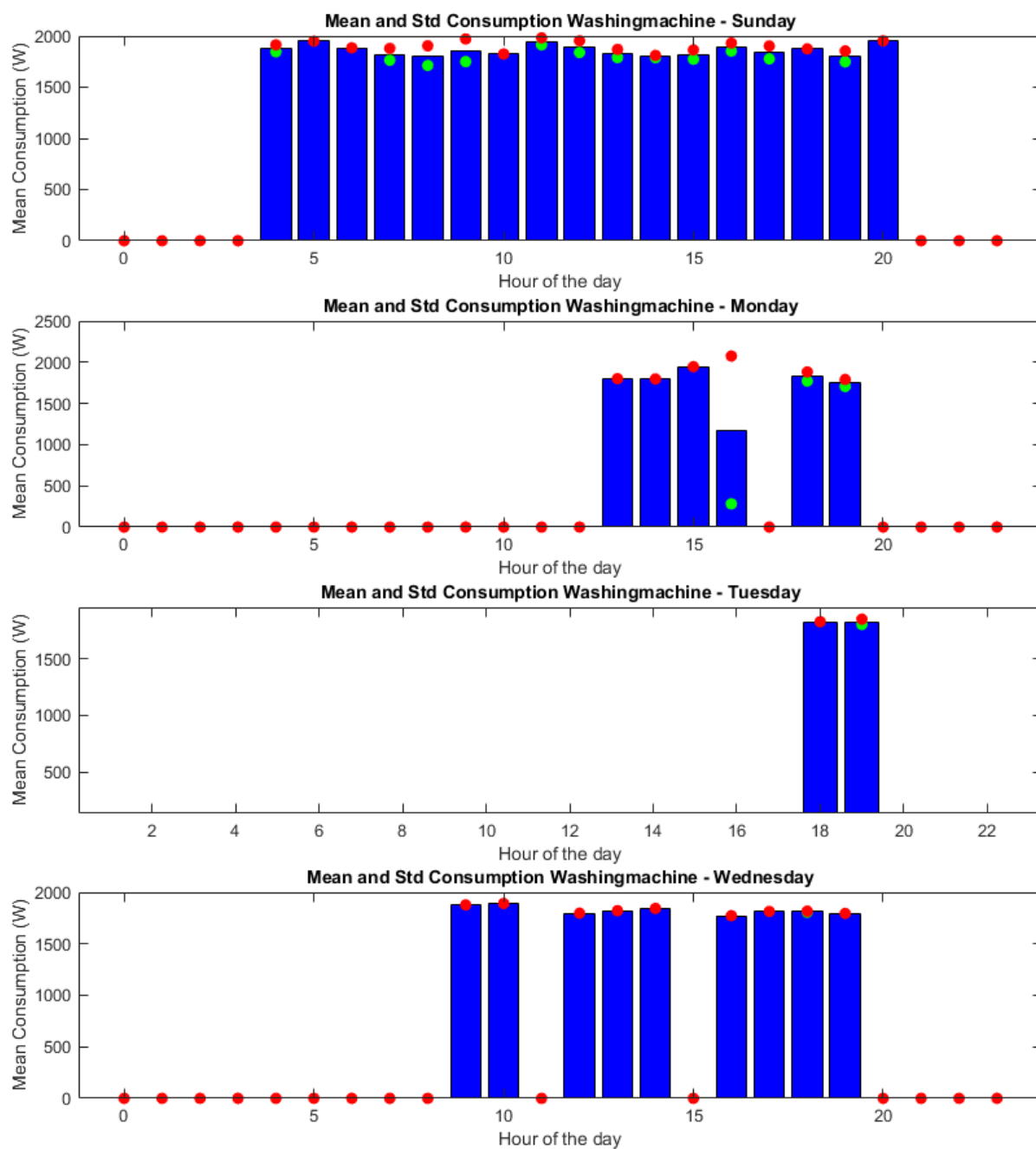


Fig.33: Consumo medio lavatrice (regioni di attivazione)

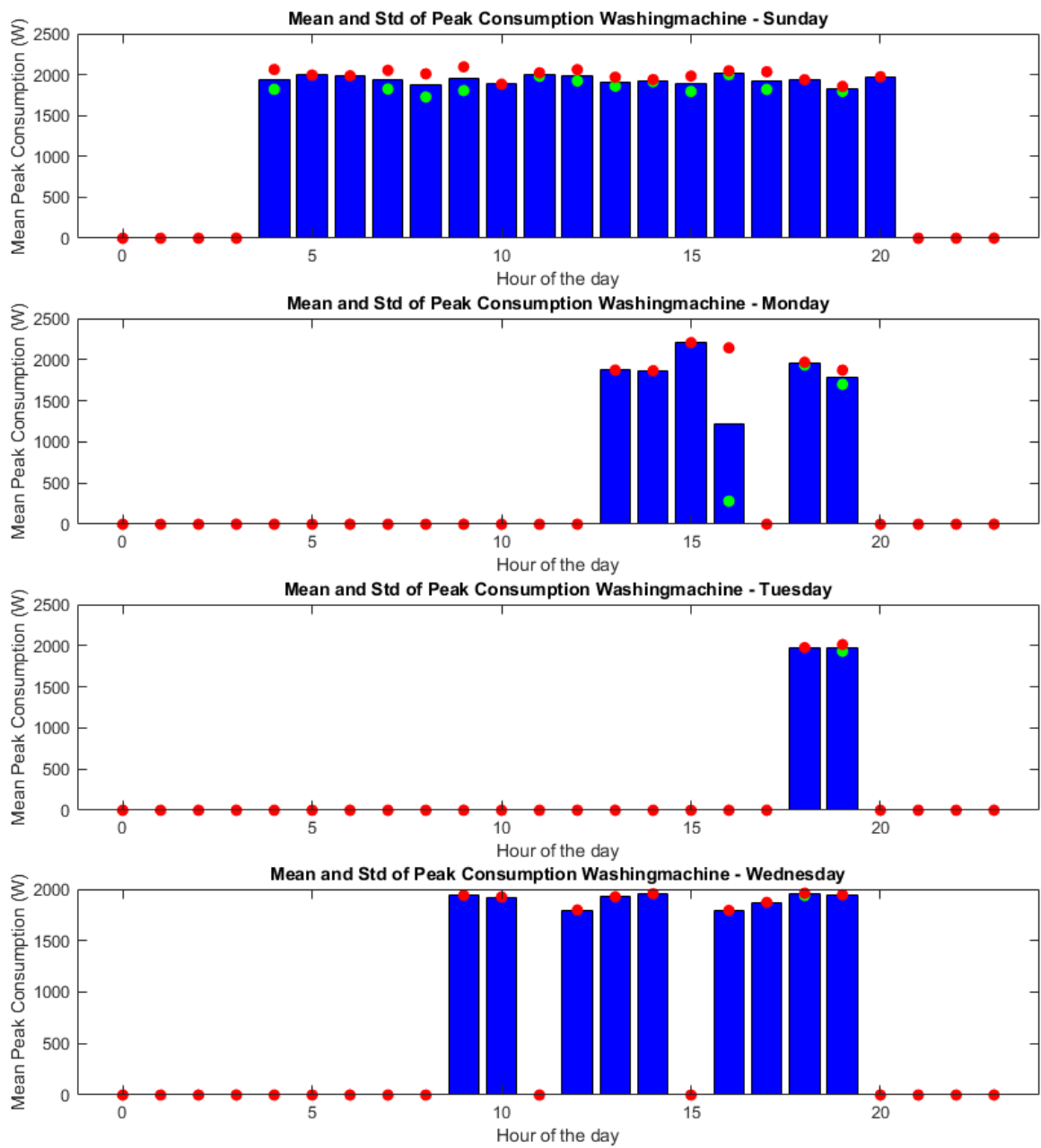


Fig.34: Media dei picchi lavatrice

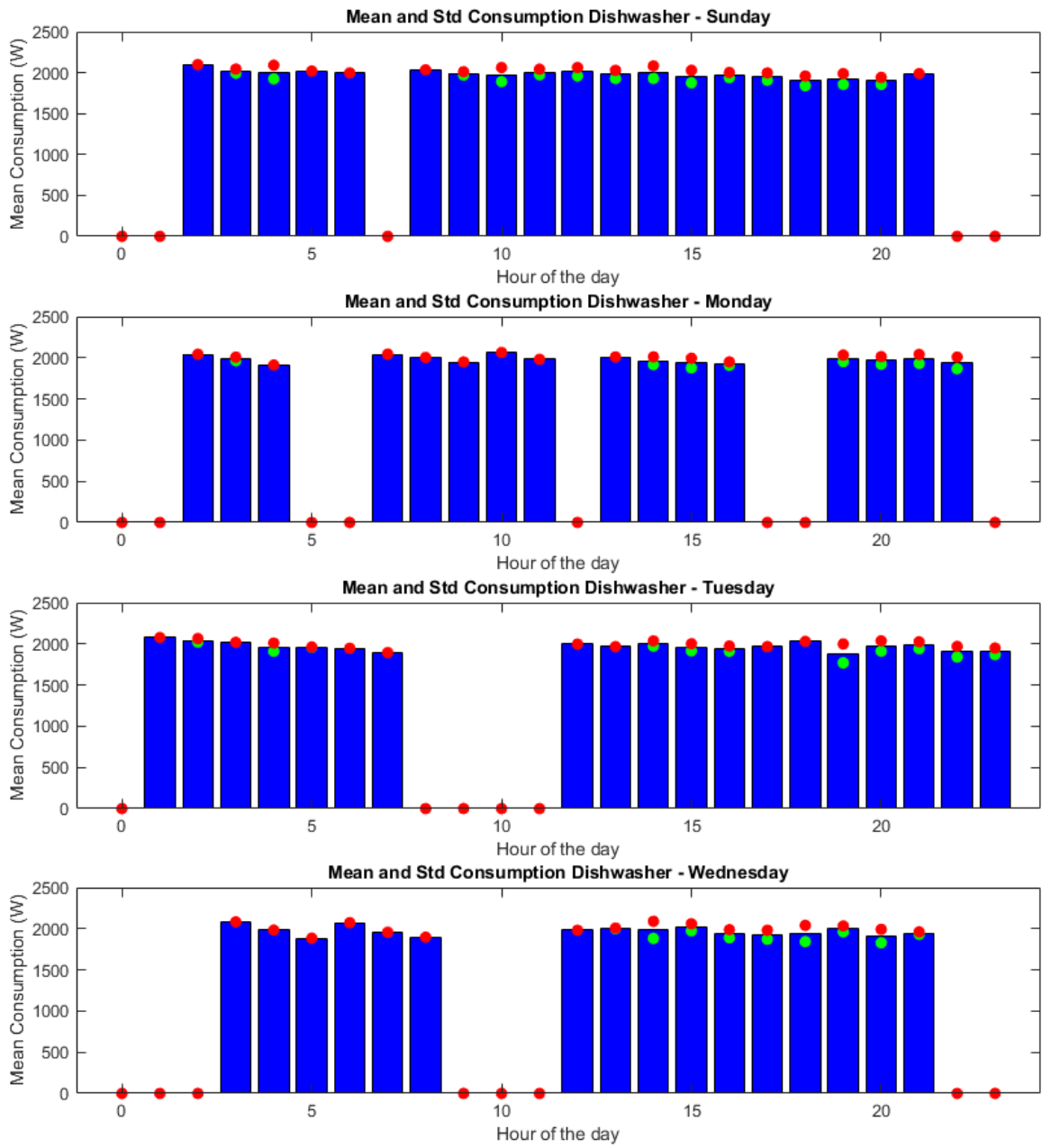


Fig.35: Consumo medio lavastoviglie (regioni di attivazione)

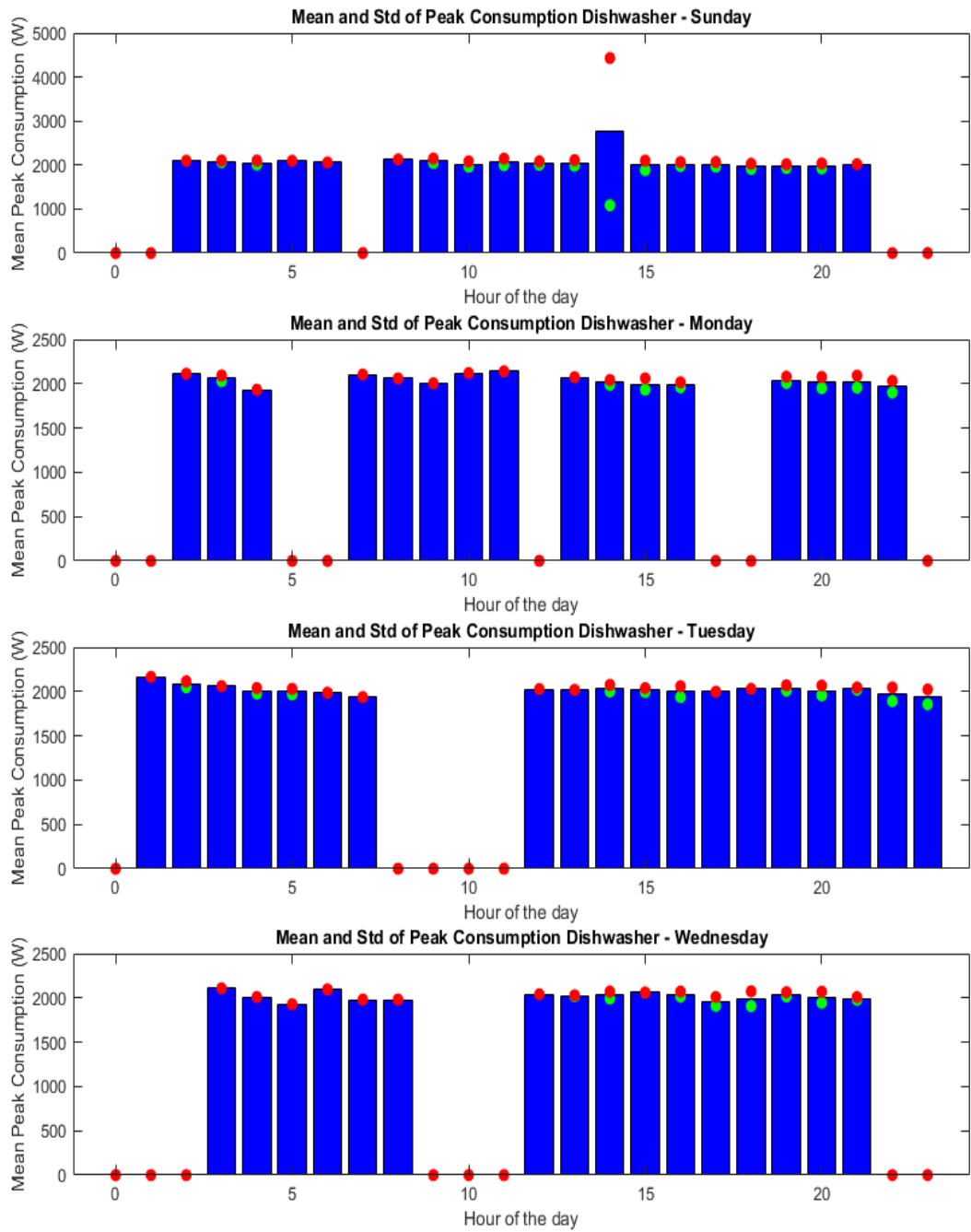


Fig.36: Media dei picchi lavastoviglie

4.5 Consumo energetico in wattora giornaliero

Come fatto nelle precedenti analisi, per completare questo paragrafo relativo al consumo energetico in Wattora giornaliero, dobbiamo spiegare alcuni aspetti chiave del codice Matlab che calcola l'energia media consumata dagli elettrodomestici durante i loro periodi di effettiva attivazione. In particolare, si pone l'accento su come viene calcolata l'energia partendo dai dati di potenza e su come viene aggregata l'energia consumata per ogni ora del giorno.

Il consumo in Wattora è ottenuto moltiplicando i valori di potenza in Watt per un intervallo di tempo in ore, come mostrato in (6). Poiché i dati del dataset sono campionati ogni 8 secondi, questo intervallo di tempo viene convertito in ore dividendo per 3600 secondi (equivalente di un'ora). Questa operazione consente di ottenere un vettore di consumi energetici, che rappresentano l'energia istantanea consumata in ogni intervallo di 8 secondi. Nel caso generale, quando si dispone di misurazioni continue, sarebbe necessario integrare la potenza istantanea nel tempo per ottenere l'energia consumata, ma in questo caso stiamo lavorando con dati discreti, quindi la semplice moltiplicazione per l'intervallo di campionamento è sufficiente. Una volta convertiti i dati di potenza in energia, il passo successivo è sommare l'energia consumata durante ciascuna ora del giorno per ogni giorno presente nei dati a disposizione (identificando anche su quale giorno della settimana si sta effettuando l'operazione). Questo viene fatto in corrispondenza delle regioni di attivazione dell'elettrodomestico, individuate filtrando i vettori di consumo di energia ottenuti con la stessa procedura descritta nel paragrafo 4.3. In questo modo, il codice crea un vettore in cui ogni cella rappresenta l'energia consumata in un'ora specifica per un giorno della settimana. Successivamente, viene calcolata la media e la deviazione standard dell'energia per ciascuna ora e giorno della settimana, il che permette di ottenere una panoramica del consumo giornaliero medio. Infine, la visualizzazione dei grafici mostra queste medie e deviazioni standard del consumo energetico per ogni ora del giorno, consentendo di identificare i pattern di consumo energetico in wattora per ciascun elettrodomestico.

4.6 Rappresentazione grafica dell'energia in wattora consumata

In questo paragrafo si analizzeranno i grafici che rappresentano il consumo energetico in Wattora (per ogni giorno della settimana) dei quattro elettrodomestici presi in esame, cioè microonde, bollitore, lavastoviglie e lavatrice. Gli istogrammi riportano in ordinata la media del consumo di energia durante l'arco della giornata, evidenziando con marker rossi e verdi i valori medi

più e meno la deviazione standard. L'obiettivo di questi grafici è fornire una rappresentazione chiara di quando ciascun elettrodomestico viene utilizzato maggiormente e per quanto tempo, valutando i consumi energetici in wattora, che si ottengono, come spiegato nel paragrafo 4.5, moltiplicando la potenza media in Watt per il tempo di utilizzo in ore come già visto nella (6), tenendo conto in questo caso del periodo di campionamento dei dati (8 secondi).

I picchi di consumo energetico per il microonde (Fig.37-38), si osservano soprattutto nelle fasce orarie relative ai pasti. Il consumo si aggira in generale intorno ai 100-150Wh, il che indica che il microonde viene utilizzato in modo rapido per intervalli di tempo brevi. Questo consumo relativamente basso nell'arco della giornata, dunque, corrisponde a sessioni brevi di utilizzo, confermando che il microonde è utilizzato principalmente per riscaldare o cuocere cibi per pochi minuti.

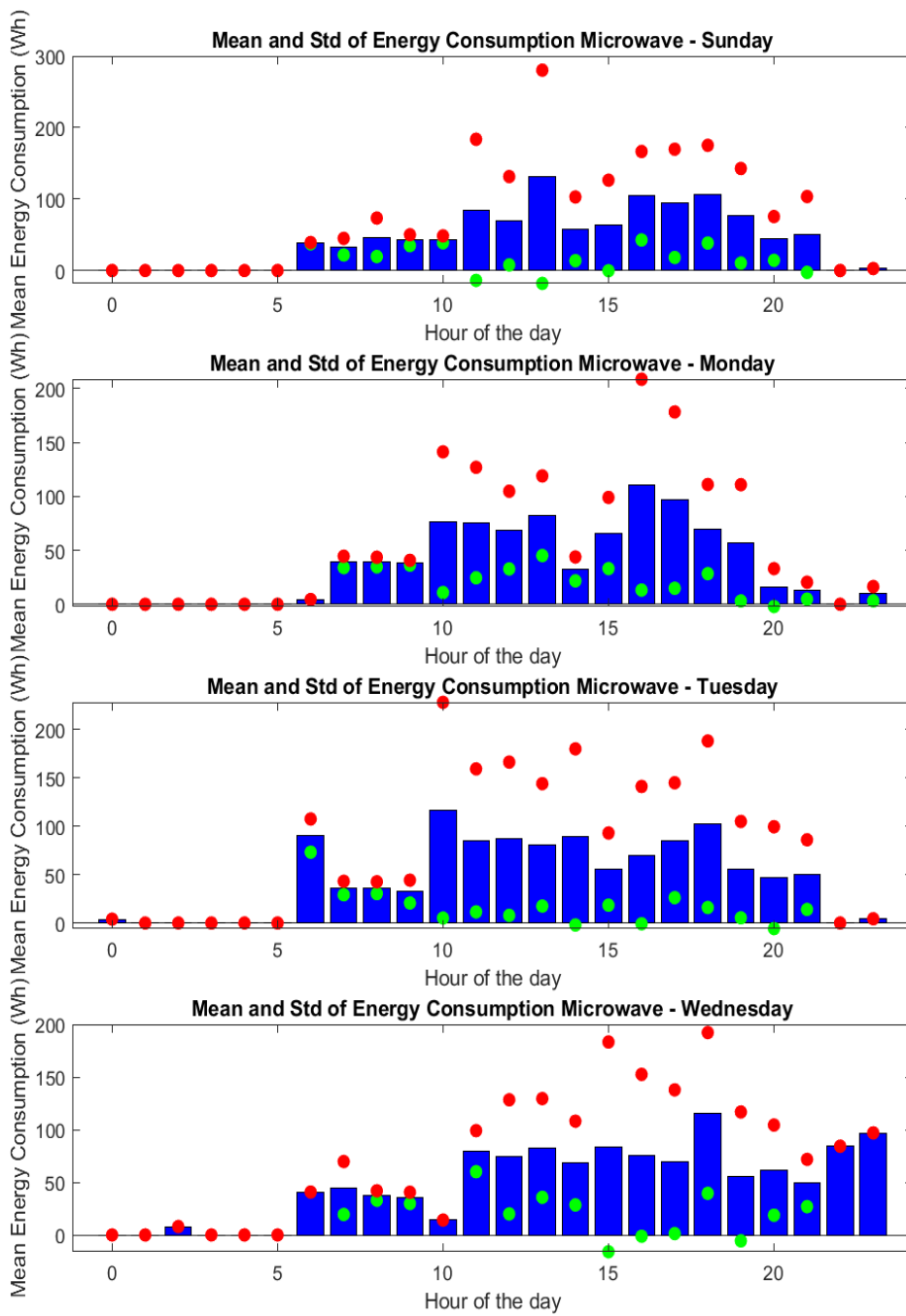


Fig.37: Consumo di energia microonde (da domenica a mercoledì)

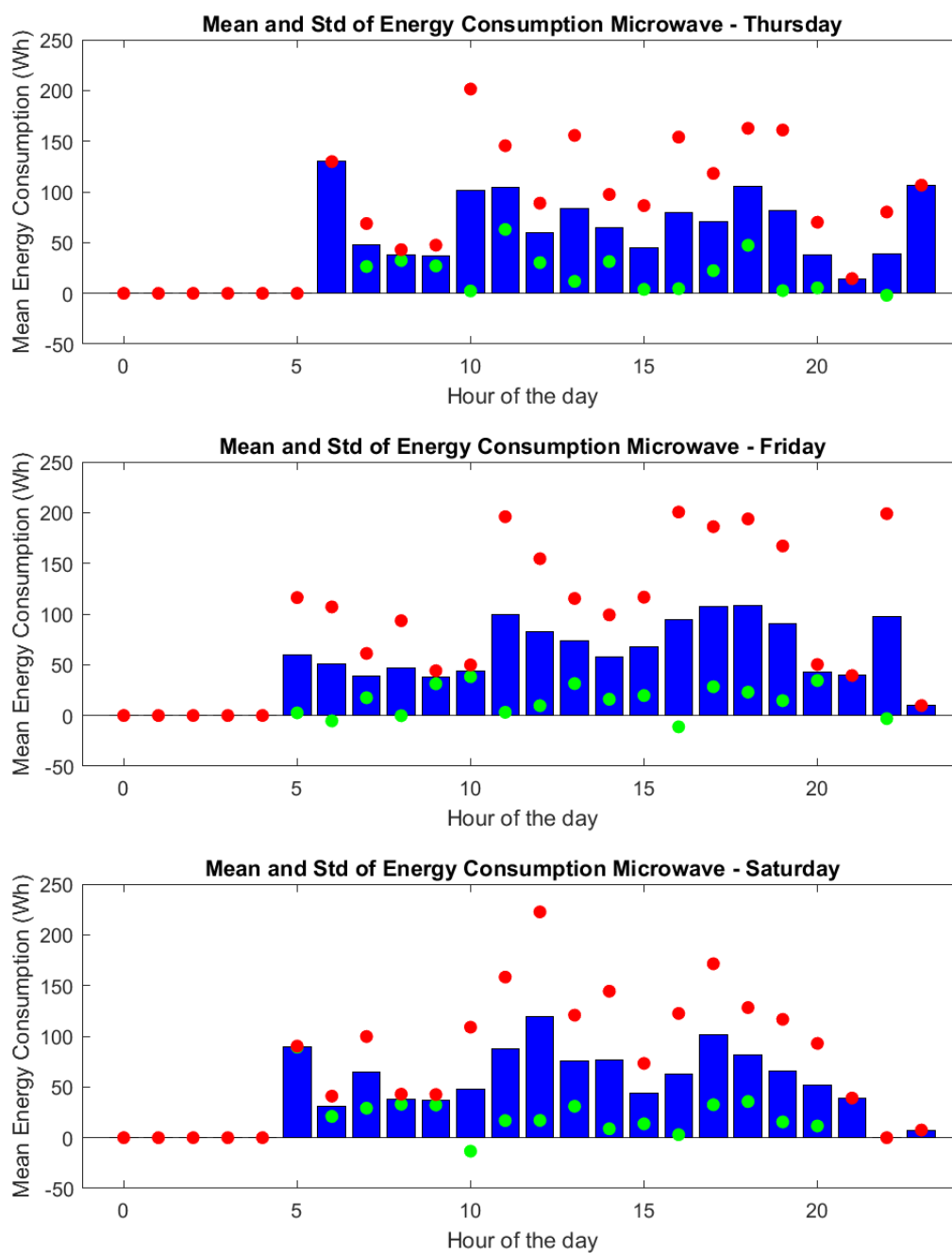


Fig.38: Consumo di energia microonde (da giovedì a sabato)

Il bollitore (Fig.39-40), viene utilizzato principalmente nelle prime ore della giornata, con picchi di consumo tra le 7 e le 9 del mattino, e nelle ore serali, tra le

17 e le 20. In queste ore si registrano picchi che vanno sempre dai 100 ai 150 Wh. Il consumo moderato, unito alla frequenza di utilizzo, riflette i brevi cicli di funzionamento di questo elettrodomestico, impiegato prevalentemente per riscaldare le bevande.

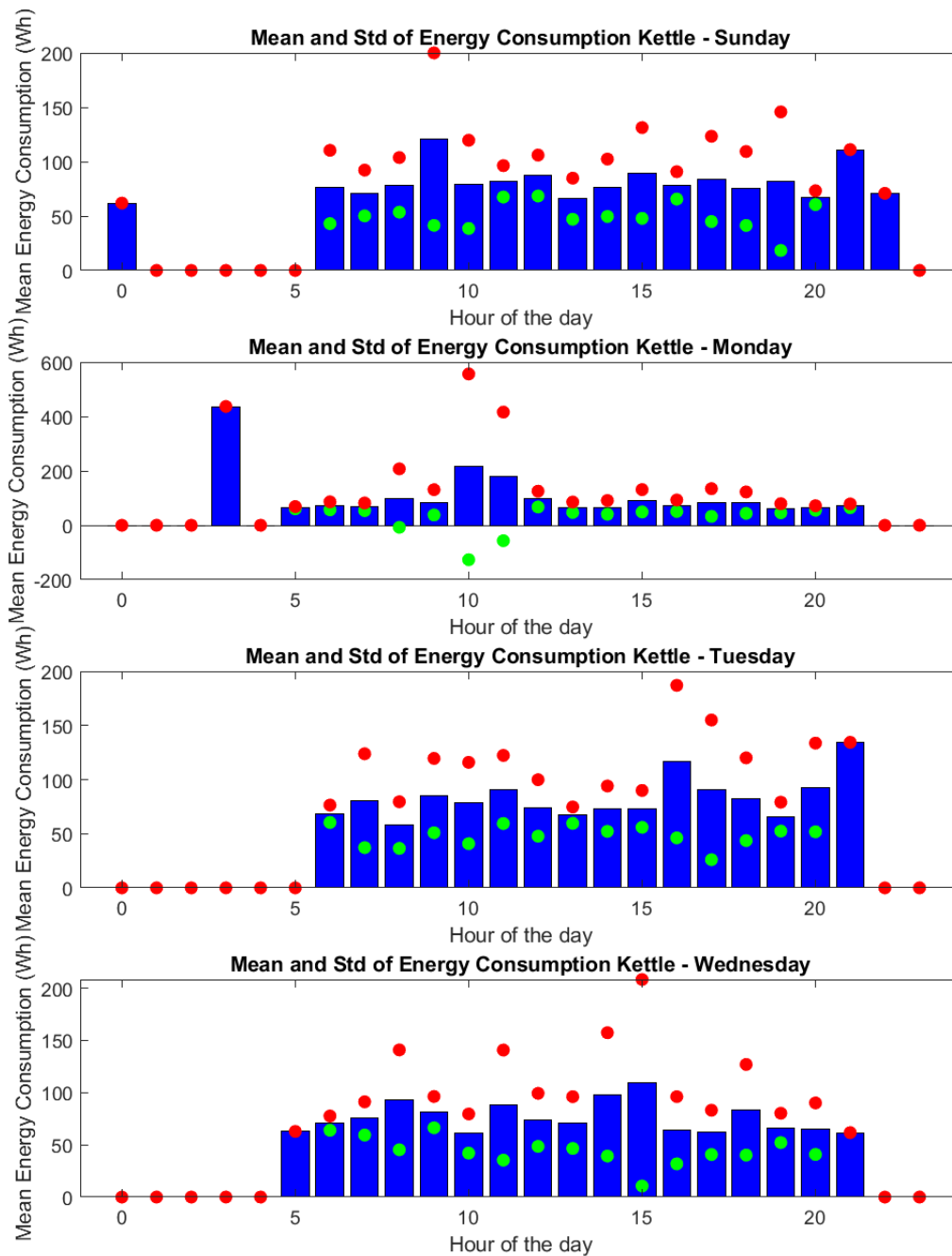


Fig.39: Consumo energetico bollitore (da domenica a mercoledì)

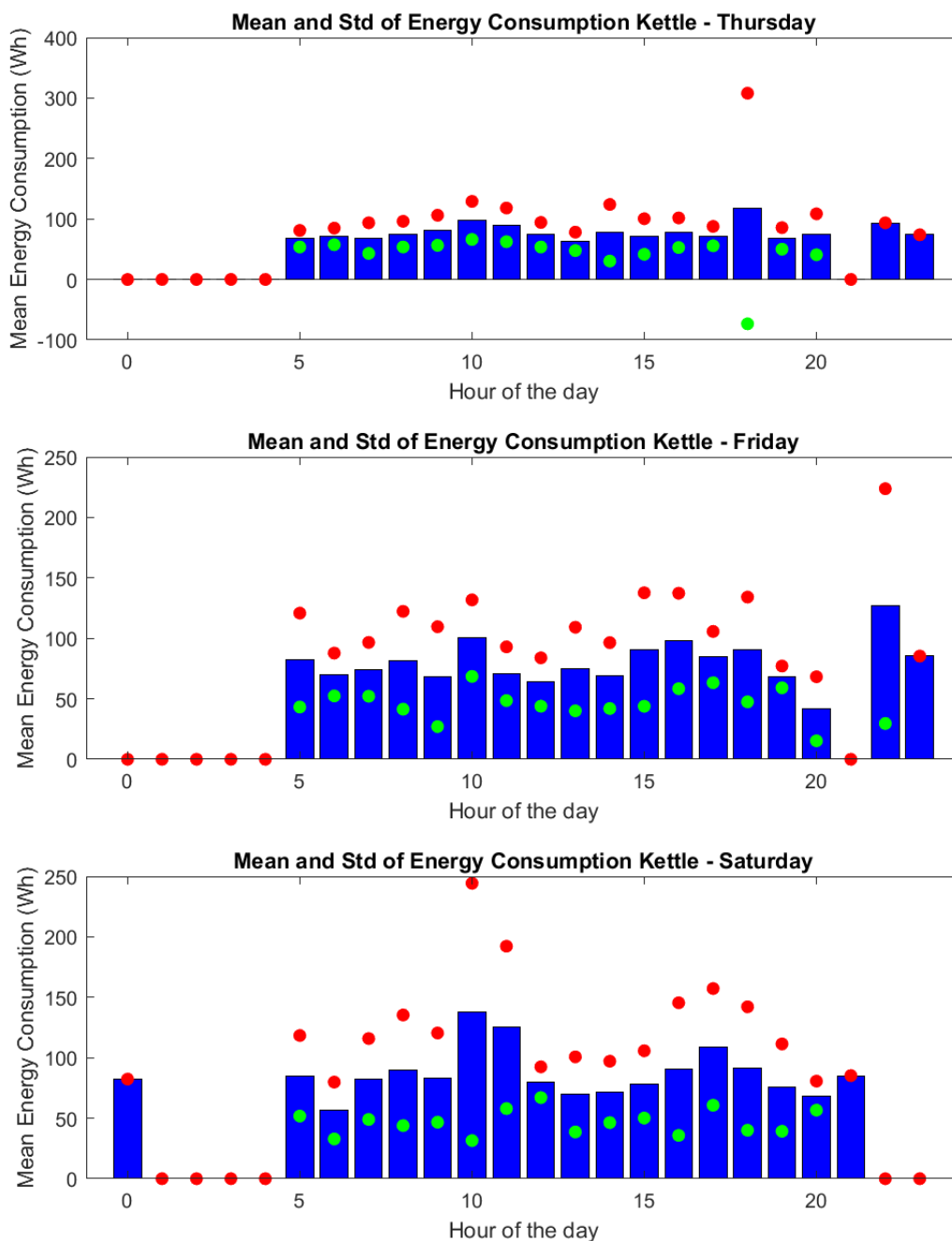


Fig.40: Consumo energetico bollitore (da giovedì a sabato)

Il consumo energetico della lavastoviglie (Fig.41-42) raggiunge i suoi picchi nelle ore serali, tipicamente tra le 15 e le 20, con valori che arrivano fino a circa 1000 Wh. Questi valori indicano cicli di lavaggio completi che durano diverse ore e consumano quantità considerevoli di energia. La lavastoviglie viene utilizzata

prevalentemente nelle ore serali, probabilmente dopo i pasti principali della giornata.

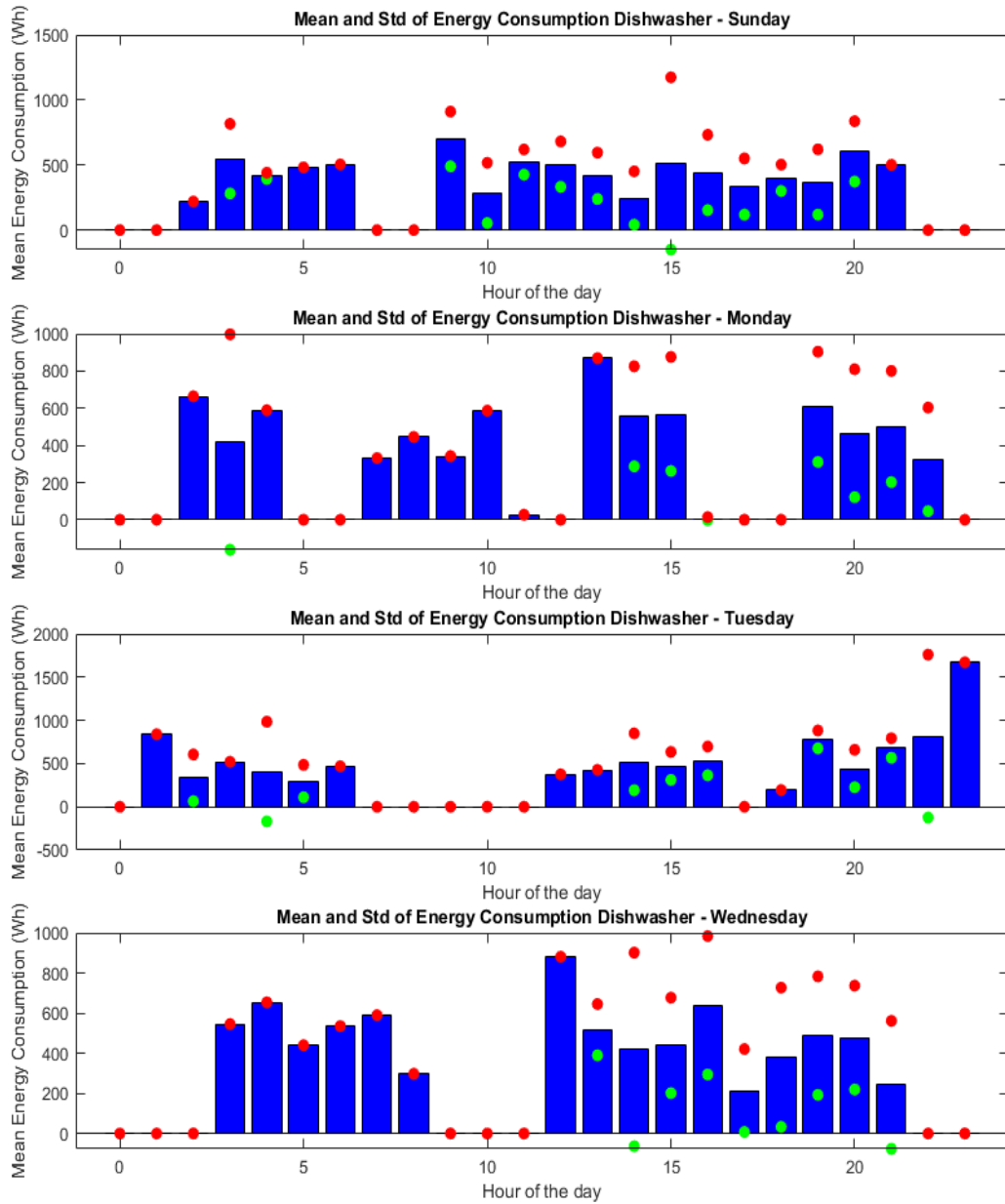


Fig.41: Consumo energetico lavastoviglie (da domenica a mercoledì)

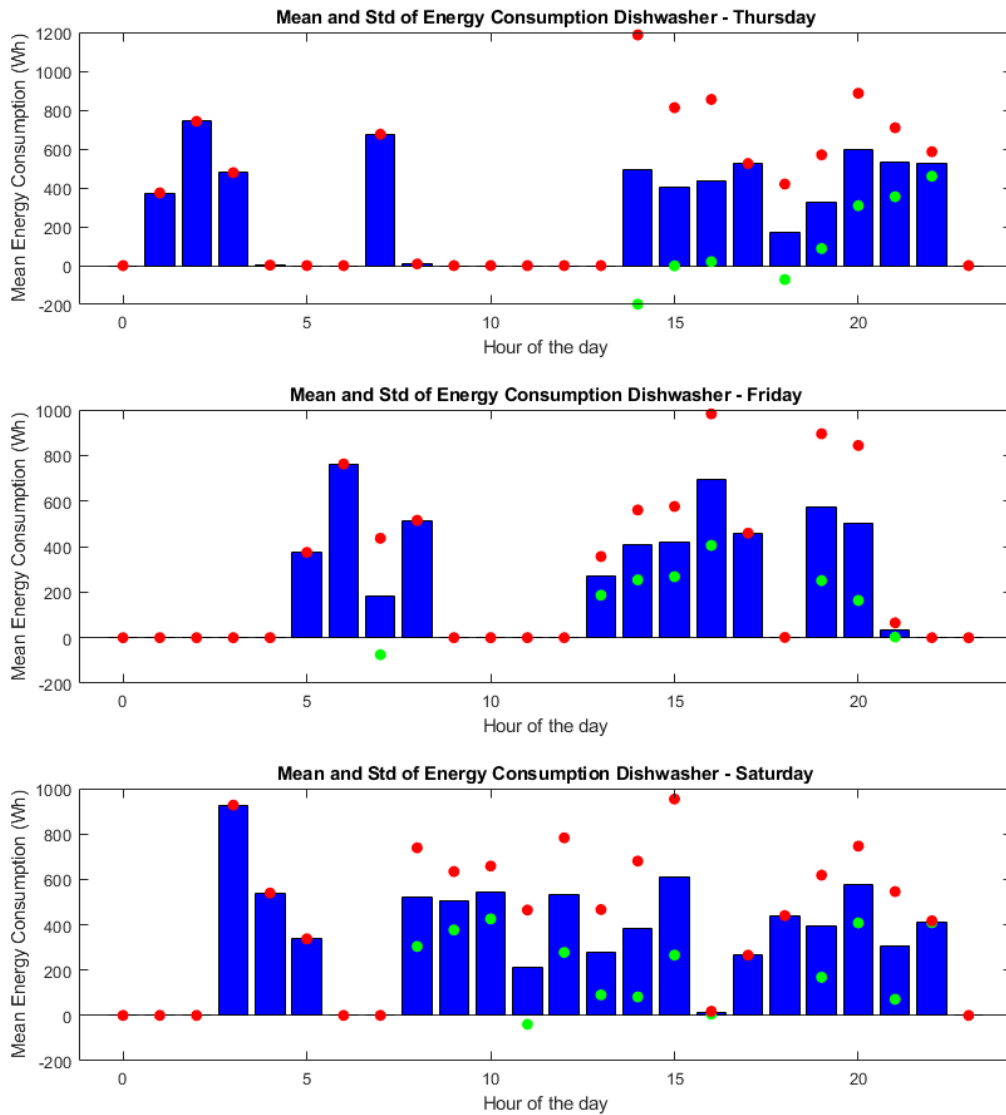


Fig.42: Consumo energetico lavastoviglie (da giovedì a sabato)

La lavatrice (Fig.43-44) mostra picchi di consumo che variano tra i 500 e i 1000 Wh, distribuiti prevalentemente durante la mattina ed il primo pomeriggio. Il consumo energetico elevato indica che i cicli di lavaggio sono lunghi e comportano un consumo significativo di energia. La lavatrice, essendo usata meno degli altri elettrodomestici analizzati, mostra un andamento di utilizzo concentrato in specifiche fasce orarie della giornata.

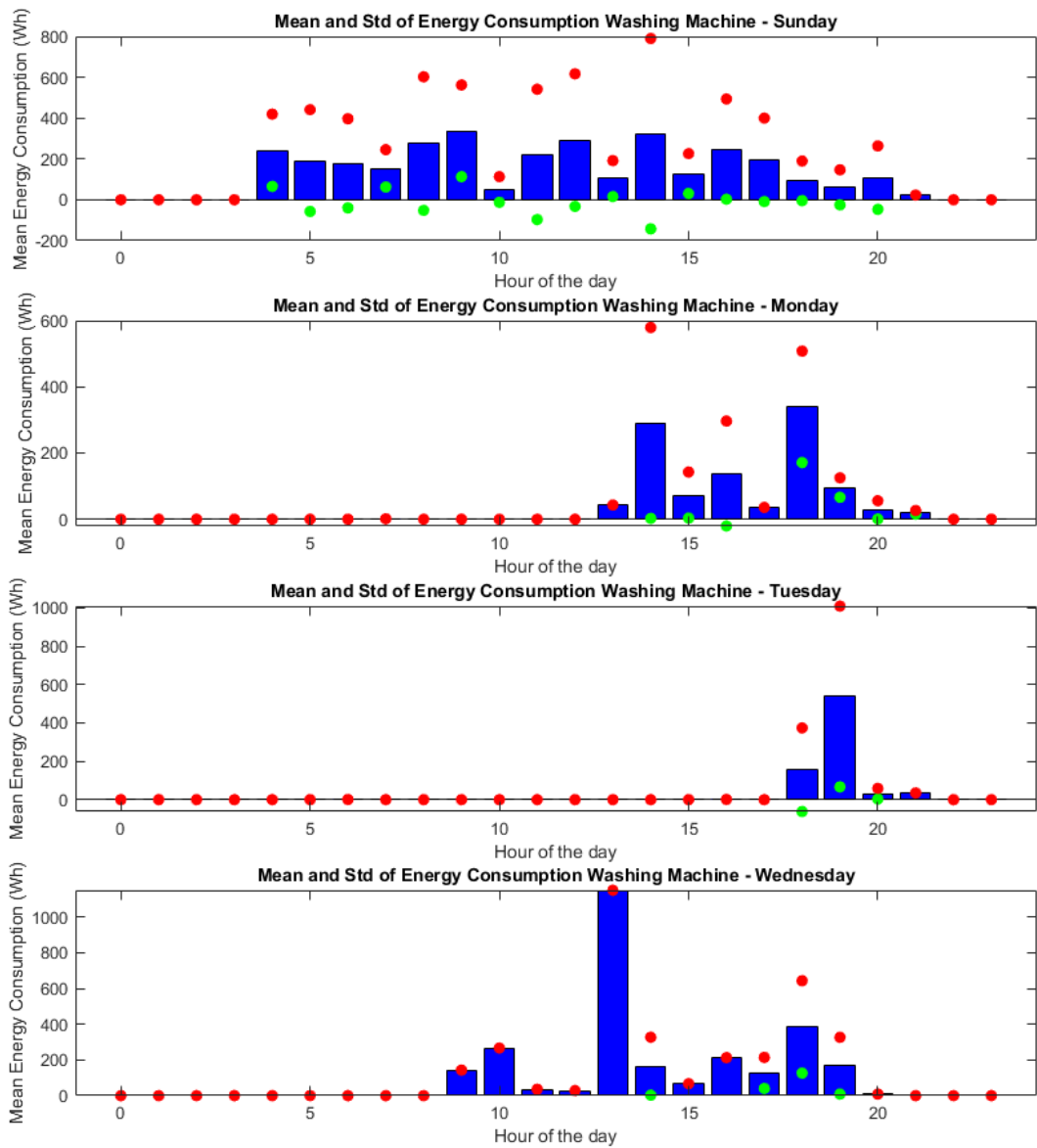


Fig.43: Consumo energetico lavatrice (da domenica a mercoledì)

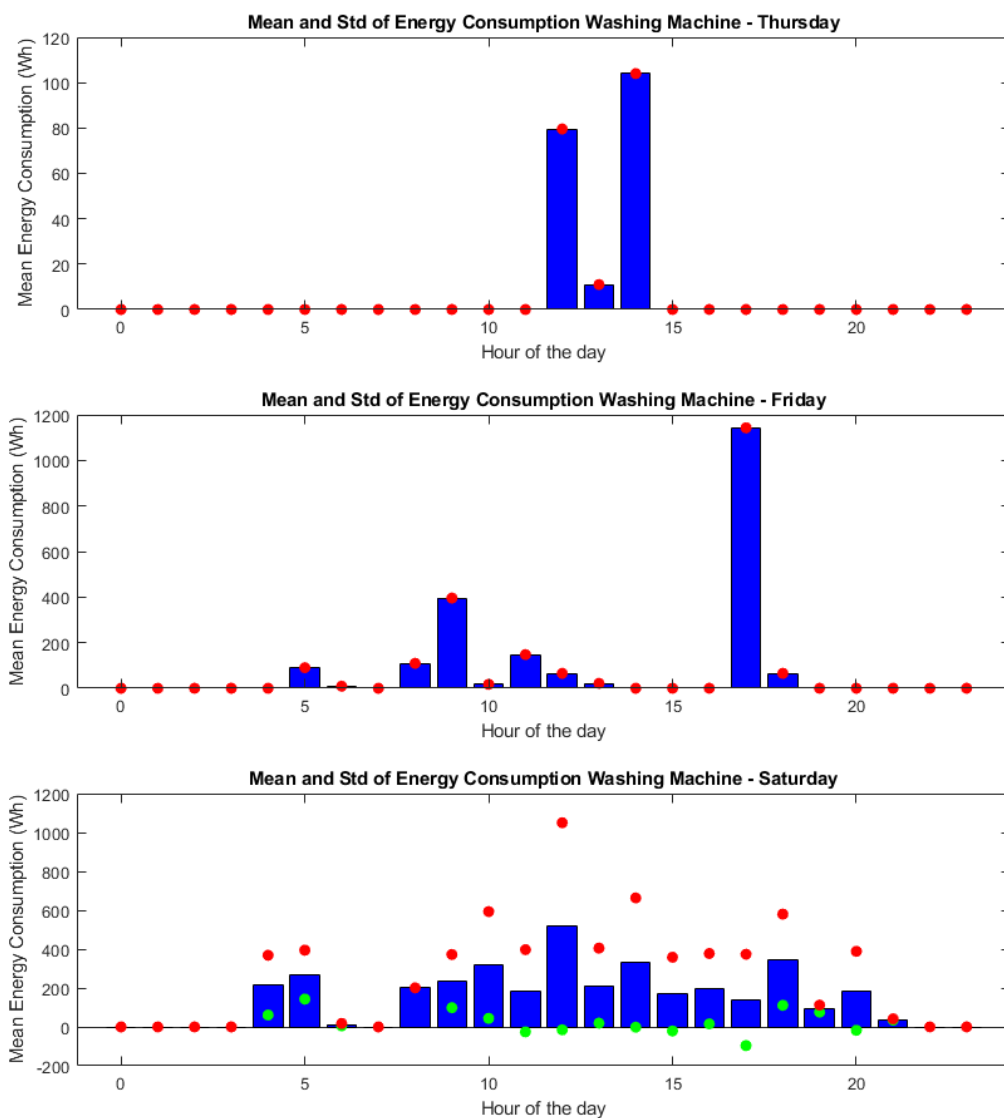


Fig.44: Consumo energetico lavatrice (da giovedì a sabato)

Questa analisi conferma che ciascun elettrodomestico ha pattern di utilizzo ben definiti, con consumi energetici che variano in funzione dell'ora del giorno, e, a volte, anche del tipo di giorno, lavorativo o feriale. Gli elettrodomestici come la lavatrice e la lavastoviglie, che richiedono cicli lunghi, mostrano valori considerevoli di energia in wattora, ma un numero di accensioni contenuto (al massimo pari a 1 nell'arco di una singola giornata). Al contrario, dispositivi come il microonde e il bollitore hanno cicli di utilizzo più brevi ma distribuiti in modo più regolare durante la giornata, il che significa che sono caratterizzati da un

consumo energetico contenuto e da un numero di attivazioni superiore rispetto agli elettrodomestici della casa italiana. Questi dati permettono di individuare le abitudini di consumo e valutare l'efficienza energetica di ciascun elettrodomestico.

5. Conclusioni

Il lavoro svolto in questa tesi ha analizzato il consumo energetico residenziale attraverso l'uso di due dataset, uno relativo ad una casa del Regno Unito (REFIT) e l'altro a una casa italiana (MAC). Dopo aver effettuato una pulizia e un ricampionamento dei dati, sono state condotte analisi sia sui consumi aggregati sia su elettrodomestici specifici.

L'analisi del consumo aggregato ha evidenziato differenze tra le due abitazioni dal punto di vista dei consumi medi giornalieri. Mentre la casa britannica ha un consumo medio più elevato nelle ore del mattino, suggerendo che le attività energetiche principali si svolgono in quella fascia oraria, nella casa italiana il picco di consumo medio è spostato più verso il tardo pomeriggio e la sera, il che suggerisce che l'uso di energia aumenta notevolmente nel pomeriggio rispetto alla mattina, forse a causa di un comportamento quotidiano diverso, come il ritorno a casa delle persone e l'utilizzo di elettrodomestici ad alto consumo di energia. Dal punto di vista delle correlazioni tra i consumi aggregati e dell'indice variabilità temporale (LVI) le due case presentano degli andamenti abbastanza simili, che indicano pattern di consumo poco prevedibili tra i diversi giorni dell'anno. Forse la casa britannica risulta soggetta a variazioni più estreme dei consumi energetici rispetto alla casa italiana (LVI superiore a 2 in alcuni archi temporali), ma in media il comportamento energetico non differisce di molto rispetto a quello della casa italiana.

Per quanto riguarda gli elettrodomestici, l'analisi ha dimostrato che gli apparecchi come il microonde e il bollitore, nella casa britannica, vengono utilizzati per brevi periodi, con consumi energetici contenuti. Al contrario, dispositivi come la lavatrice e la lavastoviglie nella casa italiana mostrano picchi di consumo elevati, ma distribuiti su cicli di utilizzo più lunghi. Questa differenza riflette le diverse abitudini di utilizzo nelle due abitazioni e la tipologia degli elettrodomestici analizzati.

Dall'analisi condotta sui consumi aggregati e sui singoli elettrodomestici emergono indicazioni che possono contribuire al risparmio energetico, in particolare attraverso le strategie future mirate elencate di seguito:

- integrazione nelle strategie di demand response: il load variability index (LVI) alto rilevato in entrambe le abitazioni indica che queste case potrebbero essere buone candidate per programmi di demand response. L'elevata variabilità nei consumi suggerisce che vi è la possibilità di spostare o ridurre i carichi energetici in risposta a segnali esterni, come variazioni di prezzo o incentivi forniti dalle utility elettriche. Un'adesione a

questi programmi permetterebbe di ridurre il consumo durante i picchi, ottenendo risparmi significativi sui costi e beneficiando di tariffe dinamiche.

- ottimizzazione degli elettrodomestici ad alto consumo: gli istogrammi relativi ai consumi medi ed ai picchi di potenza hanno evidenziato orari precisi di utilizzo degli elettrodomestici, come la lavatrice e la lavastoviglie nella casa italiana e il bollitore e il microonde nella casa britannica. Questi picchi di utilizzo potrebbero essere ridotti attraverso tecniche di gestione automatizzata (come smart appliances) che permettono di posticipare il funzionamento degli elettrodomestici in orari di minore carico della rete, riducendo sia il consumo complessivo sia i picchi di domanda.
- educazione degli utenti e monitoraggio continuo: lo studio dei consumi medi e dei picchi di energia evidenziato dagli istogrammi consente di sensibilizzare gli utenti sull'efficienza energetica. Informare i residenti sull'andamento dei loro consumi potrebbe portare a comportamenti più consapevoli, come l'ottimizzazione degli orari di utilizzo degli elettrodomestici o l'adozione di dispositivi a basso consumo energetico.

In conclusione, lo studio ha dimostrato che una comprensione dettagliata dei pattern di consumo energetico sia a livello aggregato che per i singoli elettrodomestici è fondamentale per individuare opportunità di risparmio energetico e migliorare l'efficienza complessiva. Attraverso il monitoraggio e la disaggregazione dei dati, è possibile sviluppare strategie di gestione energetica ottimali, che non solo consentano di ridurre i costi, ma contribuiscano anche a una maggiore sostenibilità ambientale. Le future implementazioni dovranno concentrarsi su tecniche avanzate di monitoraggio e disaggregazione del carico, per aumentare la consapevolezza dei consumi da parte degli utenti e incentivare l'adozione di pratiche di risparmio energetico nelle abitazioni.

6. Bibliografia

- [1] [Matteo-9844/Matlab-scripts: Questa cartella contiene i codici per l'analisi dei consumi aggregati e disaggregati per il dataset REFIT e MAC. \(github.com\)](#)
- [2] K.S. Cetin, P.C. Tabares-Velasco, A. Novoselac, Appliance daily energy use in new residential buildings: Use profiles and variation in time-of-use, *Energy and Buildings*, Volume 84, 2014, Pages 716-726, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.045>
- [3] Hasan Rafiq, Prajowal Manandhar, Edwin Rodriguez-Ubinas, Juan David Barbosa, Omer Ahmed Qureshi, Analysis of residential electricity consumption patterns utilizing smart-meter data: Dubai as a case study, *Energy and Buildings*, Volume 291, 2023, 113103, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113103>
- [4] Mathieu Bourdeau, Philippe Basset, Solène Beauchêne, David Da Silva, Thierry Guiot, David Werner, Elyes Nefzaoui, Classification of daily electric load profiles of non-residential buildings, *Energy and Buildings*, Volume 233, 2021, 110670, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110670>
- [5] Zhengyi Luo, Jinqing Peng, Jingyu Cao, Rongxin Yin, Bin Zou, Yutong Tan, Jinyue Yan, Demand Flexibility of Residential Buildings: Definitions, Flexible Loads, and Quantification Methods, *Engineering*, Volume 16, 2022, Pages 123-140, ISSN 2095-8099, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.01.010>
- [6] Milad Afzalan, Farrokh Jazizadeh, Residential loads flexibility potential for demand response using energy consumption patterns and user segments, *Applied Energy*, Volume 254, 2019, 113693, ISSN 0306 2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113693>
- [7] Dongsik Jang, Jiyong Eom, Min Jae Park, Jae Jeung Rho, Variability of electricity load patterns and its effect on demand response: A critical peak pricing experiment on Korean commercial and industrial customers, *Energy Policy*, Volume 88, 2016, Pages 11-26, ISSN 0301-4215, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.09.029>
- [8] Murray, D., Stankovic, L. & Stankovic, V. An electrical load measurements dataset of United Kingdom households from a two-year longitudinal study. *Sci Data* 4, 160122 (2017). <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.122>