

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in

Ingegneria Elettronica e delle Tecnologie Digitali

Insegnamento di

Elettronica

Analisi e profilazione delle abitudini di consumo elettrico di utenti residenziali

RELATORE:

Prof. Stefano Squartini

CANDIDATO:

Luca Macchia

CORRELATORI:

Prof. Emanuele Principi
Dott.ssa Giulia Tanoni

Anno Accademico

2025/2026

INDICE

1 Introduzione **2**
1.1 Contesto e motivazione 2
1.2 Obiettivo e metodo proposto 2

2 Stato dell'arte **4**
2.1 Monitoraggio dei consumi energetici nel settore residenziale 4
2.2 Tecniche di monitoraggio dei consumi elettrici 5
2.3 Collocazione del presente lavoro 6

3 Metodo sviluppato **7**
3.1 Struttura generale della metodologia 7
3.2 Preparazione e organizzazione dei dati 8
3.3 Individuazione dello stato di funzionamento e degli eventi 11
3.4 Analisi delle abitudini di consumo 15
3.5 Caratterizzazione degli eventi e modalità operative 20
3.6 Disponibilità del codice 21

4 Risultati ottenuti e discussione **22**
4.1 Profilazione del primo utente 22
4.2 Applicazione della metodologia a un secondo utente 64
4.3 Confronto tra i due utenti 65
4.4 Discussione complessiva e limiti dell'analisi 66
4.5 Sviluppi futuri 68

5 Conclusioni **70**

1 Introduzione

1.1 Contesto e motivazione

Negli ultimi anni il tema dell'efficienza energetica ha assunto un ruolo sempre più centrale sia in ambito industriale sia nel settore residenziale. La crescente diffusione di sistemi di monitoraggio dei consumi e di dispositivi di misura sempre più economici e accurati ha reso possibile la raccolta continua di grandi quantità di dati relativi ai consumi elettrici delle abitazioni.

La disponibilità di tali informazioni permette non soltanto di quantificare l'energia assorbita, ma anche di approfondire il modo in cui essa viene utilizzata nel corso della giornata. La conoscenza delle abitudini di consumo può infatti risultare utile per individuare comportamenti ricorrenti, riconoscere eventuali sprechi, valutare opportunità di ottimizzazione dei consumi e supportare strategie di gestione più efficiente dell'energia domestica [1]. Una caratterizzazione dettagliata dell'utente può inoltre fornire informazioni utili per sistemi intelligenti di gestione dei carichi, nei quali la conoscenza degli orari e delle modalità di utilizzo dei diversi dispositivi può contribuire a una gestione più consapevole della domanda energetica.

La sola misura della potenza complessiva dell'abitazione fornisce tuttavia una descrizione limitata di tali comportamenti. Sebbene il consumo aggregato consenta di conoscere l'andamento complessivo della potenza richiesta dall'edificio, esso non permette direttamente di stabilire quali elettrodomestici siano responsabili dei consumi osservati, quando vengano utilizzati, per quanto tempo rimangano in funzione e quali relazioni temporali possano esistere tra l'utilizzo di dispositivi differenti.

Questo costituisce il principale limite che motiva il presente lavoro. L'integrazione dell'informazione relativa al consumo aggregato con le misure dei singoli elettrodomestici permette infatti di approfondire il comportamento energetico dell'utenza, passando dalla semplice osservazione della potenza complessiva alla caratterizzazione delle abitudini di utilizzo dei diversi dispositivi.

L'analisi degli istanti di attivazione e spegnimento, della durata degli eventi di funzionamento, dei consumi energetici e delle relazioni temporali tra differenti elettrodomestici consente quindi di costruire un profilo più articolato dell'utente residenziale. A partire da questo contesto e dalle limitazioni evidenziate, il presente lavoro si propone di sviluppare una procedura automatizzata per l'estrazione di tali informazioni dai dati di potenza disponibili.

1.2 Obiettivo e metodo proposto

Alla luce delle considerazioni esposte nei paragrafi precedenti, l'obiettivo del presente lavoro è sviluppare una procedura automatica per la profilazione delle abitudini di consumo energetico di due utenti residenziali, a partire dai dati di potenza attiva misurati sia a livello dell'intera abitazione sia dei principali elettrodomestici presenti al suo interno.

L'idea alla base del lavoro consiste nel trasformare una semplice serie temporale di misure elettriche in un insieme di informazioni in grado di descrivere il comportamento dell'utente e le modalità di utilizzo dei diversi dispositivi. A tal fine è stata sviluppata una metodologia di analisi articolata in più fasi successive, ciascuna dedicata all'estrazione di specifiche informazioni dai dati disponibili.

La prima parte del lavoro è dedicata al pre-processing dei dati, necessario per uniformare le misure provenienti dai diversi elettrodomestici e garantire la confrontabilità delle analisi successive. Successivamente vengono individuati gli eventi di funzionamento di ciascun dispositivo, ottenendo per ogni ciclo di utilizzo informazioni quali l'istante di inizio, l'istante di fine e la durata.

Una volta individuati gli eventi, vengono sviluppate differenti analisi finalizzate alla profilazione delle abitudini dell'utente. In particolare, il metodo proposto consente di:

- analizzare la distribuzione degli orari di utilizzo dei singoli elettrodomestici;
- individuare quali dispositivi vengono utilizzati contemporaneamente e con quale frequenza;
- identificare eventuali sequenze di utilizzo tra differenti elettrodomestici;
- stimare la quota di potenza non monitorata confrontando la potenza aggregata dell'abitazione con la somma delle potenze dei dispositivi monitorati;
- caratterizzare il profilo di utilizzo dei singoli elettrodomestici attraverso l'analisi delle loro modalità operative.

L'obiettivo finale non è solamente descrivere i consumi energetici dell'abitazione, ma ricavare informazioni utili a comprendere le abitudini quotidiane dell'utente e il comportamento dei diversi elettrodomestici. Le informazioni ottenute possono infatti costituire una base per future applicazioni nel campo dell'efficienza energetica, della gestione intelligente dei carichi elettrici e dei sistemi di monitoraggio domestico.

Il presente report descrive l'intero processo sviluppato, illustrando dapprima le metodologie adottate per l'elaborazione dei dati e successivamente i risultati ottenuti, accompagnati da una discussione delle principali evidenze emerse durante l'analisi.

2 Stato dell'arte

2.1 Monitoraggio dei consumi energetici nel settore residenziale

L'evoluzione delle reti elettriche e la progressiva digitalizzazione del settore energetico hanno profondamente modificato le modalità con cui vengono monitorati i consumi di energia elettrica delle utenze domestiche. Negli ultimi anni, infatti, la diffusione dei sistemi di smart metering ha reso possibile la raccolta automatica e continuativa delle misure di consumo, consentendo una gestione più efficiente della rete elettrica e offrendo agli utenti strumenti sempre più avanzati per la consultazione delle proprie informazioni energetiche [2].

In Italia il monitoraggio dei consumi elettrici è affidato principalmente ai contatori elettronici installati presso le utenze domestiche. Tali dispositivi registrano automaticamente l'energia prelevata dalla rete e trasmettono periodicamente le misure ai distributori di energia elettrica attraverso sistemi di telelettura. Rispetto ai tradizionali contatori elettromeccanici, gli smart meter consentono una maggiore frequenza di acquisizione dei dati, una riduzione degli interventi manuali e una migliore disponibilità delle informazioni sia per gli operatori del settore sia per gli utenti finali.

Le misure raccolte dai distributori confluiscono nel Sistema Informativo Integrato (SII), il data hub nazionale del settore energetico italiano, che rappresenta il punto di raccolta e gestione delle informazioni relative alle forniture di energia elettrica e gas naturale [3]. Su tali dati vengono realizzate elaborazioni statistiche e attività di monitoraggio da parte di ARERA (Autorità di Regolazione per Energia, Reti e Ambiente), che pubblica periodicamente analisi relative ai consumi delle utenze italiane. Le elaborazioni basate sui dati di misura validati costituiscono quindi un'importante fonte informativa per lo studio dell'evoluzione dei consumi energetici.

Parallelamente all'utilizzo istituzionale dei dati, negli ultimi anni è cresciuta anche la quantità di informazioni rese disponibili direttamente ai clienti finali. Le società di vendita dell'energia mettono generalmente a disposizione portali web e applicazioni attraverso i quali è possibile consultare l'andamento storico dei consumi, analizzare differenti periodi temporali e, quando disponibile, visualizzare la distribuzione dei consumi nelle diverse fasce orarie.

Oltre alle piattaforme offerte dai singoli fornitori, in Italia è disponibile anche il Portale Consumi, istituito da ARERA e realizzato da Acquirente Unico, attraverso il quale i clienti finali possono accedere ai dati storici delle proprie forniture di energia elettrica e gas naturale. La piattaforma consente di consultare le informazioni relative ai consumi e alle letture disponibili, fornendo all'utente uno strumento centralizzato per conoscere l'andamento della propria fornitura [4].

I dati di consumo rivestono un ruolo importante anche per le società di vendita dell'energia e, più in generale, per gli operatori del sistema elettrico. L'analisi dei profili temporali permette infatti di caratterizzare la domanda, supportare le attività di previsione e pianificazione e sviluppare offerte commerciali maggiormente coerenti con le differenti modalità di utilizzo dell'energia.

Un esempio è rappresentato dalle tariffe differenziate per fasce orarie, nelle quali le condizioni economiche dell'offerta possono variare in funzione del periodo in cui avviene il consumo. Le offerte biorarie o multiorarie possono quindi rendere economicamente conveniente concentrare parte dei consumi in determinate fasce della giornata. La conoscenza della distribuzione temporale dei consumi assume pertanto interesse sia per gli operatori del settore sia per l'utente finale, che può valutare in maniera più consapevole le proprie abitudini energetiche e la loro compatibilità con la struttura tariffaria adottata.

Nonostante l'elevata disponibilità di informazioni, gli strumenti comunemente accessibili all'utente descrivono prevalentemente il consumo complessivo dell'abitazione. È quindi possibile conoscere l'energia consumata in un determinato intervallo temporale, ma generalmente non stabilire direttamente quali elettrodomestici abbiano contribuito a tale consumo, con quale frequenza siano stati utilizzati o quali abitudini caratterizzino il comportamento energetico dell'utente.

Per ottenere un livello di dettaglio maggiore è necessario disporre di informazioni relative ai singoli carichi oppure ricorrere a tecniche in grado di ricostruirne il comportamento a partire dalle misure disponibili. In questo modo, le misure elettriche possono essere utilizzate non soltanto per quantificare il consumo energetico, ma anche per estrarre informazioni relative alle modalità e agli orari di utilizzo dei diversi dispositivi.

Nel presente lavoro tale analisi è resa possibile dalla disponibilità di un dataset fornito da MAC di Castelfidardo, contenente sia la misura della potenza attiva complessivamente assorbita dall'abitazione sia le misure relative ai principali elettrodomestici monitorati. La disponibilità simultanea del segnale aggregato e dei segnali associati ai singoli carichi costituisce la base informativa sulla quale è stata sviluppata la successiva procedura di analisi e profilazione.

A partire da tali dati, il presente lavoro si propone quindi di andare oltre la semplice quantificazione dell'energia consumata, ricavando informazioni sulle abitudini di utilizzo degli elettrodomestici attraverso l'analisi delle attivazioni, della loro distribuzione temporale, delle caratteristiche degli eventi di funzionamento e delle relazioni osservabili tra i diversi dispositivi.

2.2 Tecniche di monitoraggio dei consumi elettrici

L'analisi dei consumi energetici può essere effettuata mediante differenti tecniche di monitoraggio, le quali si distinguono principalmente per il livello di dettaglio delle informazioni raccolte e per la modalità con cui vengono acquisite le misure dei singoli carichi elettrici.

L'approccio più semplice consiste nel monitoraggio aggregato, nel quale viene misurata esclusivamente la potenza complessiva assorbita dall'intera abitazione. Questa soluzione è comunemente adottata dai contatori intelligenti installati presso le utenze domestiche e rappresenta una modalità di monitoraggio particolarmente semplice, in quanto non richiede l'installazione di sensori dedicati sui singoli dispositivi. Tuttavia, come evidenziato nel paragrafo precedente, la sola misura aggregata non consente di distinguere direttamente il contributo dei diversi elettrodomestici né di analizzarne separatamente il comportamento.

Per ottenere un maggiore livello di dettaglio è possibile adottare un approccio di tipo intrusivo, nel quale i singoli elettrodomestici vengono monitorati mediante sensori dedicati. In questo modo è disponibile una misura di potenza associata a ciascun dispositivo, attraverso la quale è possibile osservarne direttamente i cicli di funzionamento, le potenze assorbite e le modalità di utilizzo.

Il principale vantaggio del monitoraggio intrusivo consiste quindi nell'elevato livello di dettaglio delle informazioni ottenute. Poiché ogni misura è direttamente associata a uno specifico elettrodomestico, non è necessario ricostruirne il contributo a partire dal consumo complessivo. Ciò facilita l'identificazione degli eventi di funzionamento e la successiva analisi delle abitudini di utilizzo.

Di contro, tale approccio presenta alcuni limiti pratici. L'impiego di un sensore per ciascun dispositivo comporta infatti un aumento dei costi, della complessità del sistema di misura e delle operazioni necessarie per l'installazione e la manutenzione. Inoltre, l'aggiunta o la sostituzione di un elettrodomestico può richiedere un aggiornamento del sistema di monitoraggio.

Un approccio differente è rappresentato dalle tecniche di monitoraggio non intrusivo, comunemente indicate con l'acronimo NILM (Non-Intrusive Load Monitoring). L'obiettivo del NILM consiste nell'individuare il funzionamento dei singoli elettrodomestici utilizzando come informazione principale la misura del consumo elettrico aggregato dell'abitazione [5]. Attraverso opportuni algoritmi di elaborazione dei dati, riconoscimento di pattern e apprendimento automatico, si cerca quindi di disaggregare il consumo complessivo nelle componenti attribuibili ai diversi dispositivi.

Nel corso degli anni sono stati sviluppati diversi approcci per affrontare il problema della disaggregazione. Tra questi rientrano tecniche basate sul rilevamento degli eventi (event detection), metodi probabilistici, modelli di Markov nascosti (Hidden Markov Models, HMM), tecniche di clustering e approcci basati su reti neurali profonde (Deep Learning) [6].

In particolare, i modelli di Markov nascosti rappresentano il funzionamento degli elettrodomestici mediante una successione di stati non direttamente osservabili, associabili, ad esempio, alle condizioni di accensione, spegnimento o a differenti modalità operative. A partire dalle grandezze elettriche osservate, il modello cerca di stimare la successione degli stati più probabile e, di conseguenza, di ricostruire il comportamento dei dispositivi.

Le tecniche di clustering, invece, consentono di raggruppare automaticamente eventi o profili di consumo caratterizzati da proprietà simili. Gli approcci basati sul Deep Learning sfruttano reti neurali profonde per apprendere dai dati relazioni complesse tra il consumo aggregato e quello attribuibile ai singoli elettrodomestici. La scelta della metodologia dipende da diversi fattori, tra cui la frequenza di campionamento disponibile, il livello di accuratezza richiesto e la complessità dei carichi da analizzare.

Nel presente lavoro non viene affrontato direttamente il problema della disaggregazione dei consumi tipico del NILM. Il dataset utilizzato fornisce infatti sia la misura della potenza aggregata dell'abitazione sia le misure di potenza associate ai principali elettrodomestici monitorati. La disponibilità di tali informazioni permette quindi di concentrare l'analisi non sul riconoscimento dei dispositivi a partire dal segnale aggregato, ma sulla profilazione delle abitudini di consumo dell'utente.

L'analisi sviluppata si basa pertanto sull'identificazione degli eventi di funzionamento dei singoli elettrodomestici e sulla successiva estrazione di informazioni temporali ed energetiche. A partire da tali informazioni è possibile studiare la distribuzione temporale degli utilizzi, la durata degli eventi, le modalità operative, le relazioni sequenziali tra differenti dispositivi e, più in generale, caratterizzare le

abitudini di consumo dell'utente.

2.3 Collocazione del presente lavoro

Alla luce delle metodologie descritte nei paragrafi precedenti, il presente lavoro si colloca nell'ambito della profilazione delle abitudini di consumo energetico in ambiente residenziale, con l'obiettivo di ricavare informazioni sul comportamento dell'utente a partire dall'analisi temporale ed energetica dei principali carichi domestici.

A differenza degli approcci di tipo NILM, nei quali il problema principale consiste nel disaggregare la potenza complessiva dell'abitazione per identificare il contributo dei singoli dispositivi, nel caso analizzato sono disponibili direttamente sia la misura della potenza attiva aggregata dell'edificio, sia le misure relative a diversi elettrodomestici monitorati individualmente. Non è quindi necessario sviluppare un algoritmo per riconoscere quale dispositivo abbia generato una determinata variazione della potenza complessiva. L'attenzione può essere rivolta direttamente all'analisi delle modalità con cui i dispositivi vengono utilizzati.

Il punto di partenza della metodologia sviluppata è costituito dalle serie temporali di potenza. A partire da queste vengono individuati gli intervalli nei quali ciascun elettrodomestico può essere considerato effettivamente attivo. L'identificazione dello stato di funzionamento permette successivamente di estrarre i singoli eventi di utilizzo, caratterizzati attraverso informazioni quali istante di inizio, istante di fine e durata.

Gli eventi così ottenuti costituiscono la base per la successiva fase di profilazione. L'analisi viene sviluppata sia considerando individualmente i diversi elettrodomestici, sia mettendo in relazione il comportamento di più dispositivi. Nel primo caso è possibile studiare, ad esempio, gli orari di utilizzo, la durata e le caratteristiche energetiche dei cicli di funzionamento; nel secondo è invece possibile ricercare eventuali utilizzi contemporanei o relazioni sequenziali tra differenti attività domestiche.

Particolare attenzione viene riservata alla dimensione temporale dei consumi. L'orario di attivazione di un dispositivo, infatti, può fornire informazioni più significative sulle abitudini dell'utente rispetto alla sola quantità di energia consumata. L'analisi della distribuzione delle attivazioni durante la giornata permette di individuare eventuali fasce orarie preferenziali, mentre lo studio della contemporaneità consente di determinare quali carichi tendano ad essere utilizzati nello stesso intervallo temporale.

Analogamente, l'analisi delle sequenzialità viene utilizzata per verificare l'esistenza di relazioni temporali significative tra dispositivi il cui utilizzo può essere logicamente collegato. Tale analisi non viene applicata indiscriminatamente a tutte le possibili coppie di elettrodomestici, poiché una semplice successione temporale non implica necessariamente una relazione tra due attività. Vengono invece considerate le sequenze per le quali esiste una possibile interpretazione legata alle abitudini domestiche, evitando di attribuire significato a coincidenze puramente casuali.

La disponibilità contemporanea della misura aggregata e delle misure individuali permette inoltre di affrontare un ulteriore aspetto: la stima della potenza non monitorata. Confrontando la potenza complessivamente assorbita dall'abitazione con la somma delle potenze associate ai dispositivi monitorati è possibile stimare il contributo dei carichi non direttamente misurati. In questo modo viene considerata anche la parte del consumo domestico che non può essere attribuita agli elettrodomestici presenti nel sistema di acquisizione.

Infine, per gli elettrodomestici caratterizzati dalla selezione di differenti programmi di funzionamento, l'analisi viene estesa alla ricerca di modalità operative ricorrenti. Gli eventi vengono caratterizzati mediante grandezze quali durata, potenza ed energia e confrontati tra loro allo scopo di individuare gruppi con caratteristiche simili. Le modalità così ottenute non devono essere interpretate necessariamente come i programmi nominali definiti dal costruttore, poiché questi ultimi non sono direttamente disponibili nel dataset, ma come modalità operative stimate sulla base del comportamento energetico osservato.

Nel complesso, il metodo adottato segue quindi una struttura progressiva: dalle misure di potenza si passa all'identificazione dello stato di funzionamento, da questo all'estrazione degli eventi e, infine, dall'analisi degli eventi alla profilazione delle abitudini dell'utente. Il contributo del lavoro non consiste pertanto nella semplice rappresentazione dei consumi energetici, ma nella definizione di una procedura in grado di trasformare le misure disponibili in informazioni interpretabili sul comportamento dell'utenza residenziale.

3 Metodo sviluppato

Il metodo sviluppato ha l'obiettivo di trasformare le serie temporali di potenza disponibili nel dataset in informazioni utili alla caratterizzazione delle abitudini di consumo dell'utente residenziale.

La procedura è stata organizzata secondo una successione di elaborazioni tra loro consequenziali. A partire dall'importazione e dall'organizzazione dei dati, vengono progressivamente individuati gli intervalli temporali confrontabili, lo stato di funzionamento dei dispositivi e i relativi eventi operativi. Tali informazioni costituiscono quindi la base per le successive analisi delle abitudini di consumo e per la caratterizzazione delle modalità operative dei dispositivi.

Nel presente capitolo vengono descritte le diverse fasi che compongono la metodologia, illustrando le operazioni effettuate, i criteri adottati e le principali scelte metodologiche. Prima di analizzare nel dettaglio i singoli passaggi, viene presentata una visione complessiva della procedura sviluppata.

3.1 Struttura generale della metodologia

Il dataset utilizzato contiene sia la misura della potenza attiva aggregata dell'abitazione sia le misure relative ai singoli dispositivi monitorati: lavatrice, lavastoviglie, asciugatrice, frigorifero e due sistemi HVAC. Per ciascun segnale è disponibile una serie temporale nella quale a ogni valore di potenza attiva è associato il corrispondente istante di acquisizione.

La disponibilità congiunta del segnale aggregato e dei segnali individuali consente di sviluppare l'analisi su più livelli. Da un lato è possibile caratterizzare il comportamento dei singoli dispositivi; dall'altro è possibile studiare le relazioni temporali tra essi e valutare la quota di consumo non direttamente attribuibile ai carichi monitorati.

La metodologia sviluppata è organizzata secondo la struttura generale rappresentata in Figura 1. A partire dalle serie temporali di potenza, i dati vengono inizialmente importati e organizzati, gestendo le informazioni temporali e individuando gli intervalli nei quali i diversi segnali risultano confrontabili. Successivamente viene determinato lo stato di funzionamento dei dispositivi mediante soglie di potenza e vengono estratti gli eventi operativi, applicando opportuni criteri di affinamento per limitare la frammentazione artificiale degli intervalli di funzionamento.

Gli eventi così ottenuti costituiscono la base per le analisi successive. La distribuzione temporale delle attivazioni permette di individuare eventuali fasce orarie caratteristiche; l'analisi della contemporaneità consente di valutare la sovrapposizione nell'utilizzo dei dispositivi; l'analisi della sequenzialità permette di ricercare relazioni temporali ricorrenti tra dispositivi differenti; infine, il confronto tra il segnale aggregato e le misure individuali consente di stimare la quota di potenza non direttamente attribuibile ai carichi monitorati.

Gli eventi vengono inoltre caratterizzati attraverso grandezze temporali ed energetiche, quali durata, potenza media ed energia associata. Tali caratteristiche vengono successivamente utilizzate per individuare, mediante tecniche di clustering, differenti modalità o regimi operativi stimati. L'insieme delle informazioni ottenute consente infine di costruire una profilazione complessiva delle abitudini di consumo dell'utente.

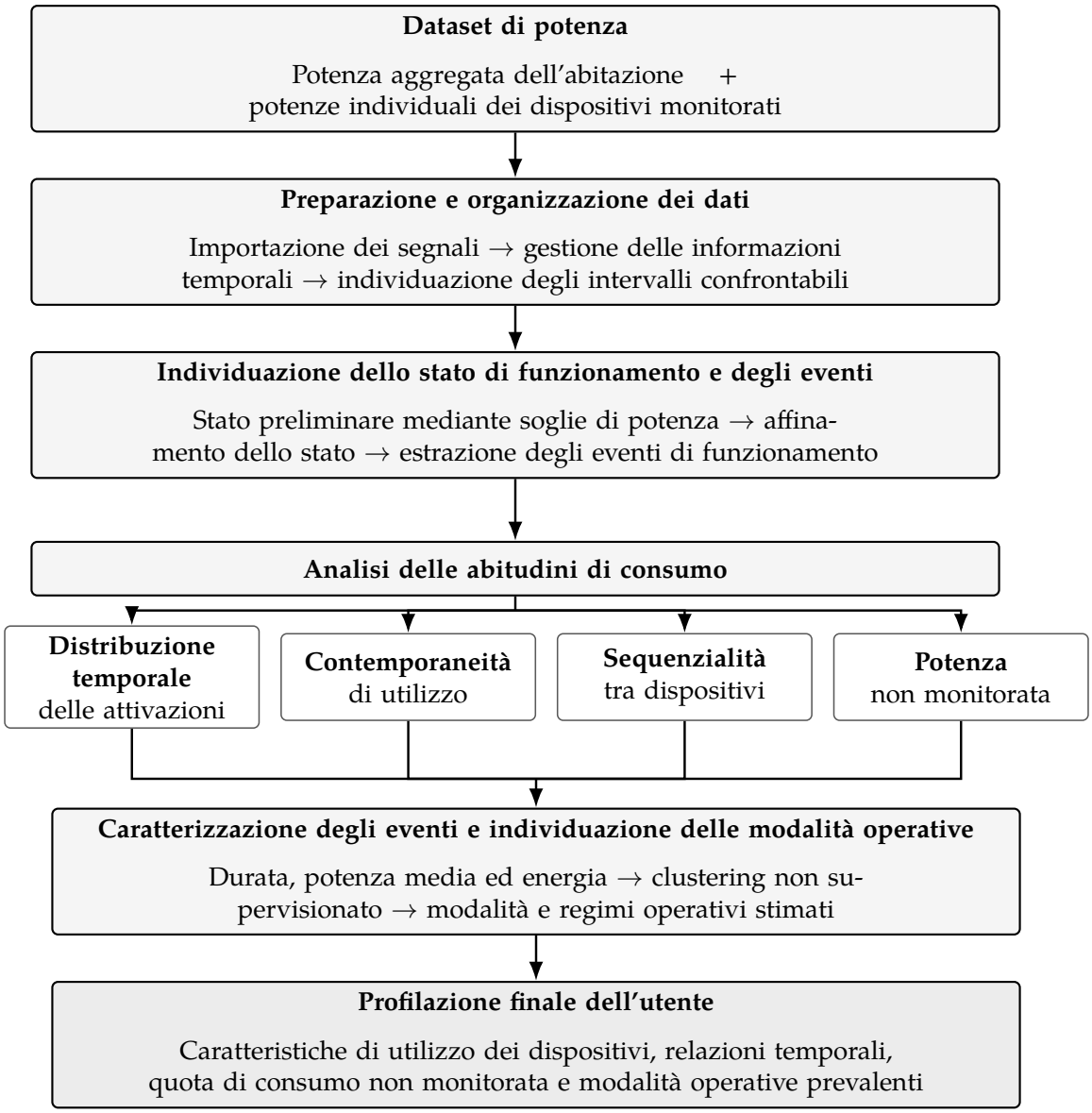


Figure 1: *Schema generale della metodologia sviluppata per la profilazione delle abitudini di consumo.*

Le sezioni successive approfondiscono i diversi blocchi della procedura, descrivendo per ciascuno le operazioni eseguite, i parametri utilizzati e le relative scelte metodologiche.

3.2 Preparazione e organizzazione dei dati

3.2.1 Importazione e organizzazione dei dati

La prima fase del lavoro ha riguardato l'importazione e l'organizzazione delle misure contenute nel dataset. I dati erano originariamente suddivisi in cartelle distinte, ciascuna associata a uno specifico segnale: lavatrice, lavastoviglie, asciugatrice, frigorifero, HVAC1, HVAC2 e potenza aggregata dell'abitazione.

All'interno di ciascuna cartella erano presenti diversi file CSV, relativi a differenti giornate di acquisizione e contenenti, per ogni misura, il timestamp e il corrispondente valore di potenza attiva.

L'importazione è stata automatizzata in MATLAB mediante una procedura applicata a tutti i segnali disponibili. I file appartenenti allo stesso dispositivo sono stati progressivamente riuniti in un'unica tabella, in modo da ricostruire la relativa serie temporale sull'intero periodo di acquisizione.

Per rendere uniforme e facilmente accessibile l'insieme dei dati è stata quindi definita una struttura MATLAB denominata `dati`, nella quale ciascun campo è associato a uno dei segnali analizzati:

```
dati.lavatrice
```

```
dati.lavastoviglie
dati.asciugatrice
dati.frigo
dati.hvac1
dati.hvac2
dati.aggregato
```

Questa organizzazione consente di gestire in maniera omogenea le differenti serie temporali, evitando la creazione di variabili indipendenti per ciascun dispositivo e semplificando l'applicazione delle successive procedure di elaborazione.

La struttura così ottenuta costituisce il punto di partenza per tutte le fasi successive del metodo, dedicate alla gestione dell'informazione temporale, alla verifica della copertura dei segnali, all'identificazione dello stato di funzionamento e alla successiva estrazione e caratterizzazione degli eventi.

3.2.2 Gestione delle informazioni temporali

Una volta completata l'importazione dei dati, è stata dedicata particolare attenzione alla gestione dell'informazione temporale associata alle misure. Questo aspetto risulta fondamentale per l'intera procedura sviluppata, poiché molte delle analisi successive si basano non soltanto sui valori di potenza, ma anche sull'istante in cui essi vengono registrati e sulle relazioni temporali tra gli utilizzi dei diversi dispositivi.

Nei file originali il timestamp era memorizzato in formato testuale. Per consentire l'esecuzione diretta di operazioni temporali in MATLAB, tale informazione è stata convertita nel formato `datetime`, mantenendo per ogni campione l'istante completo di acquisizione.

A partire dal timestamp sono state inoltre ricavate due informazioni aggiuntive: la data e l'orario della misura. Ogni tabella associata a un dispositivo è stata quindi organizzata mediante le variabili

```
Timestamp     Data     Ora     P
```

dove `Timestamp` contiene l'istante completo di acquisizione, `Data` identifica il giorno della misura, `Ora` il relativo orario e `P` il valore di potenza attiva associato.

La disponibilità separata di queste informazioni consente di utilizzare la rappresentazione temporale più adatta alle diverse elaborazioni. Il timestamp completo viene impiegato, ad esempio, per il calcolo delle durate e delle distanze temporali tra eventi, mentre la variabile `Data` viene utilizzata per individuare i giorni disponibili nei diversi segnali. La variabile `Ora` permette invece di analizzare la distribuzione giornaliera delle attivazioni e di individuare eventuali fasce orarie ricorrenti di utilizzo.

Infine, le osservazioni relative a ciascun segnale sono state ordinate cronologicamente sulla base del relativo timestamp, così da garantire la corretta successione temporale dei campioni nelle successive fasi di identificazione dello stato di funzionamento, estrazione degli eventi e confronto tra dispositivi.

3.2.3 Caratterizzazione della risoluzione temporale

Dopo aver organizzato correttamente le informazioni temporali, è stata analizzata la risoluzione temporale dei segnali disponibili. Tale verifica risulta necessaria poiché le successive elaborazioni, in particolare il calcolo delle durate, l'individuazione degli eventi e il confronto tra dispositivi differenti, dipendono direttamente dalla distribuzione temporale delle misure.

In questa fase i segnali sono stati mantenuti nella loro forma originale, senza effettuare un ricampionamento su una griglia temporale uniforme. Per ciascuna serie sono state quindi analizzate le differenze tra timestamp consecutivi, così da caratterizzare l'effettiva distanza temporale tra le osservazioni.

L'analisi ha evidenziato che i segnali non presentano un passo temporale costante e che la densità delle misure varia sensibilmente tra i diversi dispositivi. Non è pertanto possibile associare alle serie una singola frequenza di campionamento costante nel senso tradizionale.

Per ottenere comunque un'indicazione quantitativa della risoluzione temporale tipica di ciascun segnale è stato calcolato il valore mediano dell'intervallo tra campioni consecutivi. La mediana è stata preferita alla media in quanto meno sensibile alla presenza di intervalli temporali particolarmente estesi, dovuti ad esempio a discontinuità o periodi di assenza delle acquisizioni.

Indicando con $T_{s,\mathrm{med}}$ il passo temporale mediano, è stata inoltre definita una frequenza equivalente secondo la relazione

$$f_{\mathrm{eq}} = \frac{1}{T_{s,\mathrm{med}}} \tag{1}$$

Tale grandezza non rappresenta una frequenza di campionamento effettivamente costante, ma costituisce esclusivamente un indicatore sintetico della densità temporale tipica delle misure.

I risultati ottenuti sono riportati nella Tabella 1.

Table 1: *Risoluzione temporale dei segnali analizzati.*

Segnale	Passo mediano [s]	Frequenza equivalente [Hz]
Lavatrice	50	0,02000
Lavastoviglie	168	0,00595
Frigorifero	45	0,02222
Asciugatrice	55	0,01818
HVAC1	25	0,04000
HVAC2	25	0,04000
Segnale aggregato	2	0,50000

Come si osserva, la risoluzione temporale risulta differente per i diversi segnali. I due sistemi HVAC presentano, tra i dispositivi monitorati singolarmente, il passo temporale mediano più breve, pari a 25 s. Il frigorifero, la lavatrice e l'asciugatrice presentano valori rispettivamente pari a 45 s, 50 s e 55 s, mentre la lavastoviglie è caratterizzata dal passo temporale mediano maggiore, pari a 168 s. Il segnale aggregato presenta invece una densità temporale notevolmente superiore, con un intervallo mediano tra campioni consecutivi pari a 2 s.

Il solo valore mediano non è tuttavia sufficiente a descrivere completamente la distribuzione temporale delle osservazioni. L'analisi degli intervalli tra campioni consecutivi ha infatti evidenziato una dispersione significativa. Ad esempio, per la lavatrice il 25º percentile è pari a 15 s e il 75º percentile a 140 s, a fronte di una mediana di 50 s. Per la lavastoviglie gli stessi percentili risultano rispettivamente pari a 30 s e 524 s, con una mediana di 168 s. Anche il segnale aggregato, pur presentando una maggiore densità di acquisizione, mostra una certa variabilità, con un 25º percentile pari a 1 s e un 75º percentile pari a 5 s.

Tali risultati confermano che i segnali non possono essere considerati uniformemente campionati. Di conseguenza, nelle elaborazioni successive le grandezze temporali vengono determinate utilizzando direttamente i timestamp delle osservazioni, senza assumere una distanza costante tra campioni consecutivi.

Questo aspetto assume particolare importanza nell'identificazione e nell'affinamento degli intervalli di funzionamento e nel calcolo delle relative durate. Un intervallo temporale elevato tra due campioni consecutivi non può infatti essere interpretato automaticamente come continuità del funzionamento del dispositivo, ma deve essere valutato tenendo conto dell'effettiva disponibilità temporale delle misure.

La diversa risoluzione dei segnali deve inoltre essere considerata nelle analisi che richiedono il confronto tra dispositivi differenti. La presenza di misure acquisite in istanti non coincidenti impedisce infatti una corrispondenza diretta campione per campione tra le diverse serie. Per questo motivo, le successive elaborazioni comparative prevedono specifiche procedure di selezione e, quando necessario, di allineamento temporale dei dati.

3.2.4 Individuazione degli intervalli temporali confrontabili

Un ulteriore passaggio preliminare ha riguardato la verifica della copertura temporale dei diversi segnali. I dati relativi ai singoli elettrodomestici non possono infatti essere considerati automaticamente confrontabili sull'intero periodo di acquisizione, poiché possono essere presenti giorni o intervalli temporali nei quali le misure di uno o più dispositivi non sono disponibili.

Utilizzando la variabile `Data` ricavata nella precedente fase di organizzazione temporale, sono stati quindi individuati, per ciascun segnale, i giorni effettivamente presenti nel dataset. La procedura parte dall'insieme dei giorni disponibili per un primo dispositivo e ne calcola progressivamente l'intersezione con quelli presenti negli altri segnali. Al termine dell'operazione vengono mantenute esclusivamente le giornate per le quali risultano disponibili misure relative a tutti i dispositivi considerati.

L'applicazione di questa procedura ha permesso di individuare complessivamente 195 giorni comuni tra i diversi segnali. Tali giornate costituiscono il riferimento temporale per le analisi che richiedono il confronto simultaneo tra più dispositivi.

Per preservare integralmente le informazioni originali, la selezione dei giorni comuni non è stata applicata direttamente alla struttura `dati`. È stata invece creata una struttura separata, denominata `Comuni`,

contenente l'elenco delle giornate condivise e, per ciascun dispositivo, esclusivamente le osservazioni appartenenti a tali giorni.

La struttura può essere schematizzata nel seguente modo:

```
Comuni.giorni

Comuni.dati.lavatrice
Comuni.dati.lavastoviglie
Comuni.dati.asciugatrice
Comuni.dati.frigo
Comuni.dati.hvac1
Comuni.dati.hvac2
Comuni.dati.aggregato
```

In questo modo vengono mantenuti due insiemi di dati distinti ma complementari. La struttura `dati` conserva l'intero intervallo temporale disponibile per ciascun segnale ed è utilizzata nelle analisi relative al comportamento del singolo dispositivo. La struttura `Comuni` viene invece impiegata nelle elaborazioni che richiedono la disponibilità simultanea di più segnali.

Questo passaggio assume particolare importanza, ad esempio, nello studio della contemporaneità di utilizzo degli elettrodomestici e nelle analisi che coinvolgono il confronto con il segnale aggregato. L'assenza di una misura relativa a un dispositivo non deve infatti essere interpretata come uno stato di inattività dello stesso, poiché potrebbe derivare semplicemente dalla mancata disponibilità dei dati in quel determinato periodo.

La selezione dei giorni comuni consente quindi di evitare interpretazioni errate e di effettuare i confronti esclusivamente nelle giornate in cui tutti i segnali necessari risultano effettivamente disponibili.

Quando l'analisi riguarda invece esclusivamente il comportamento di un singolo dispositivo, tale restrizione non viene applicata e viene utilizzato l'intero periodo di acquisizione disponibile per il relativo segnale, evitando così di escludere osservazioni valide non necessarie al confronto.

È infine importante sottolineare che l'individuazione dei giorni comuni garantisce la disponibilità dei diversi segnali all'interno delle stesse giornate, ma non implica che i relativi campioni siano stati acquisiti negli stessi istanti temporali. Come evidenziato nella precedente analisi della risoluzione temporale, i segnali presentano infatti passi di acquisizione differenti e non uniformi. Le eventuali procedure necessarie per rendere confrontabili i singoli campioni vengono pertanto applicate successivamente, in funzione della specifica analisi considerata.

3.3 Individuazione dello stato di funzionamento e degli eventi

Una volta completate l'organizzazione dei dati e la caratterizzazione delle relative informazioni temporali, la fase successiva della metodologia è finalizzata alla trasformazione delle serie temporali di potenza in intervalli operativi associati ai singoli dispositivi.

La procedura prevede dapprima una classificazione preliminare dello stato di funzionamento mediante soglie di potenza specifiche per ciascun dispositivo. Lo stato così ottenuto viene successivamente affinato per ridurre la frammentazione dovuta a brevi variazioni dell'assorbimento o a discontinuità temporali dei segnali. A partire dallo stato definitivo vengono infine estratti gli eventi di funzionamento, che costituiscono la rappresentazione utilizzata nelle successive analisi di profilazione.

3.3.1 Individuazione preliminare dello stato di funzionamento

Una volta organizzati i dati e analizzate le relative caratteristiche temporali, è stato necessario determinare, per ciascun dispositivo, gli intervalli nei quali il relativo assorbimento potesse essere associato a uno stato di funzionamento.

A questo scopo, alla serie temporale della potenza è stata affiancata una rappresentazione binaria dello stato del dispositivo. Per ciascun campione, il valore 0 identifica una condizione classificata come inattiva, mentre il valore 1 identifica una condizione preliminarmente classificata come attiva.

La classificazione viene effettuata confrontando la potenza attiva misurata con una soglia definita per il dispositivo considerato. L'utilizzo di soglie specifiche è necessario poiché gli elettrodomestici analizzati presentano livelli di assorbimento e caratteristiche operative differenti e non potrebbero quindi essere descritti adeguatamente mediante un unico valore di riferimento.

Il segnale aggregato dell'abitazione non è stato sottoposto a tale classificazione. Esso rappresenta infatti la potenza complessivamente assorbita dall'utenza e non il comportamento di uno specifico dispositivo; l'attribuzione di uno stato binario attivo/inattivo mediante una singola soglia non avrebbe pertanto lo stesso significato fisico assunto per i carichi monitorati individualmente.

Una considerazione specifica riguarda inoltre il frigorifero. In questo caso lo stato attivo non deve essere interpretato come accensione dell'intero apparecchio, che rimane normalmente alimentato, ma principalmente come individuazione degli intervalli caratterizzati dall'attività del sistema di refrigerazione e, in particolare, del compressore.

La rappresentazione binaria ottenuta costituisce una prima classificazione dello stato di funzionamento e rappresenta il punto di partenza per la successiva individuazione degli intervalli operativi. Prima di procedere all'affinamento dello stato è stato tuttavia necessario definire e verificare i valori di soglia da utilizzare per ciascun dispositivo.

3.3.2 Definizione e verifica delle soglie

La scelta delle soglie di attivazione è stata effettuata empiricamente mediante l'analisi dei profili di potenza dei singoli dispositivi e l'osservazione dei livelli di assorbimento associati alle condizioni di inattività e di funzionamento. L'obiettivo non è stato quello di individuare una soglia teorica o ottimale, ma di definire, per ciascun segnale, un valore operativo che permettesse di distinguere in maniera sufficientemente chiara gli intervalli caratterizzati da un assorbimento significativo dalle condizioni di inattività o di basso assorbimento.

Sulla base dell'osservazione dei segnali sono stati quindi individuati empiricamente i valori di soglia riportati nella Tabella 2. Poiché i diversi elettrodomestici presentano livelli di assorbimento e caratteristiche operative differenti, sono stati adottati valori specifici in funzione del dispositivo considerato.

Table 2: *Soglie di attivazione adottate per i dispositivi monitorati.*

Dispositivo	**Soglia [W]**
Lavatrice	30
Lavastoviglie	30
Asciugatrice	30
Frigorifero	30
HVAC1	120
HVAC2	120

Per lavatrice, lavastoviglie, asciugatrice e frigorifero è stata adottata una soglia pari a 30 W, mentre per i due sistemi HVAC è stato utilizzato un valore pari a 120 W. I valori sono stati memorizzati in MATLAB all'interno della struttura `Soglie`, associando a ciascun dispositivo il corrispondente valore di riferimento.

Indicando con $P(t)$ la potenza attiva misurata e con P_{soglia} la soglia associata al dispositivo considerato, lo stato preliminare è stato determinato secondo la relazione

$$s_{\text{prel}}(t) = \begin{cases} 1, & P(t) > P_{\text{soglia}}, \\ 0, & P(t) \leq P_{\text{soglia}}. \end{cases} \tag{2}$$

Il risultato del confronto è stato memorizzato, per ciascun dispositivo, in una variabile logica denominata `Attivo`, aggiunta alla relativa tabella dei dati. In questo modo, a ogni misura di potenza viene associata la corrispondente classificazione preliminare dello stato.

La scelta delle soglie è stata successivamente verificata mediante l'analisi grafica dei segnali. Per ciascun dispositivo è stato confrontato l'andamento temporale della potenza con la soglia adottata e con lo stato binario risultante, verificando che il valore scelto permettesse di distinguere adeguatamente gli intervalli caratterizzati da un assorbimento significativo dalle condizioni di inattività o di basso assorbimento.

La verifica effettuata sui diversi segnali ha confermato l'adeguatezza dei valori individuati, che sono stati pertanto mantenuti nelle successive elaborazioni.

La classificazione basata esclusivamente sul superamento della soglia non può tuttavia essere considerata definitiva. Oscillazioni della potenza, brevi superamenti della soglia o temporanee riduzioni

dell'assorbimento possono infatti determinare rapide transizioni tra gli stati 0 e 1, producendo una frammentazione degli intervalli di funzionamento rilevati. Per tale motivo, lo stato preliminare viene successivamente sottoposto a una procedura di affinamento.

3.3.3 Affinamento dello stato di funzionamento

La classificazione preliminare ottenuta mediante il confronto con le soglie di potenza fornisce, per ciascun dispositivo, una prima rappresentazione binaria dello stato di funzionamento. Tale rappresentazione non può tuttavia essere utilizzata direttamente per l'individuazione degli eventi operativi, poiché le variazioni della potenza durante il funzionamento possono determinare frequenti transizioni tra stato attivo e inattivo.

In particolare, durante uno stesso intervallo operativo la potenza assorbita può temporaneamente scendere al di sotto della soglia di attivazione. L'applicazione diretta del criterio di soglia determina in questi casi una breve transizione dello stato da 1 a 0 e una successiva riattivazione. Un singolo intervallo di funzionamento può quindi risultare artificialmente suddiviso in più segmenti temporalmente ravvicinati.

Un esempio rappresentativo di tale fenomeno è riportato in Figura 2, relativa a un intervallo temporale del segnale della lavatrice. La classificazione preliminare, ottenuta utilizzando una soglia di attivazione pari a 30 W, presenta diverse transizioni tra stato attivo e inattivo in corrispondenza delle variazioni della potenza assorbita.

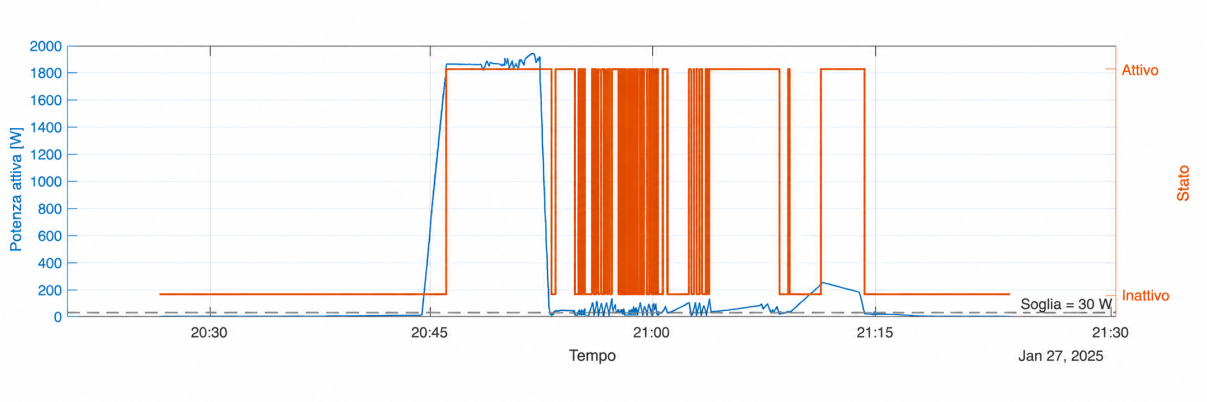


Figure 2: *Esempio di classificazione preliminare dello stato di funzionamento della lavatrice. Le variazioni della potenza rispetto alla soglia determinano la frammentazione dell'intervallo di funzionamento in più segmenti consecutivi.*

Per ridurre tale frammentazione è stata introdotta una procedura di affinamento dello stato preliminare. Il criterio adottato consiste nel ricongiungere due segmenti attivi consecutivi quando l'intervallo di inattività che li separa risulta sufficientemente breve da poter essere considerato una pausa interna allo stesso intervallo operativo.

La durata massima della pausa ammessa è stata definita empiricamente e separatamente per ciascun dispositivo. A tale scopo sono stati effettuati diversi tentativi di ricomposizione degli intervalli di funzionamento, considerando differenti valori della durata massima della pausa e verificando il risultato ottenuto sui relativi profili di potenza. Per ciascun dispositivo è stato quindi mantenuto il valore che forniva una ricostruzione più attendibile degli intervalli operativi, limitando la frammentazione dovuta a brevi discese della potenza al di sotto della soglia senza ricongiungere eccessivamente intervalli di funzionamento distinti. I valori così individuati sono riportati nella Tabella 3.

Table 3: *Durata massima della pausa utilizzata per l'affinamento dello stato di funzionamento.*

Dispositivo	Pausa massima
Lavatrice	5 min
Lavastoviglie	5 min
Asciugatrice	5 min
Frigorifero	2 min
HVAC1	5 min
HVAC2	5 min

Anche in questo caso, le durate adottate costituiscono parametri operativi ricavati empiricamente dall'analisi dei segnali disponibili e non valori di validità generale per le rispettive tipologie di dispositivo.

L'operazione di ricongiungimento non viene tuttavia effettuata considerando esclusivamente la durata della pausa. Poiché i segnali presentano una risoluzione temporale irregolare e possono contenere intervalli privi di osservazioni, è necessario verificare anche la continuità temporale dei dati disponibili. In questo modo si evita che due segmenti vengano uniti semplicemente perché separati da una porzione del segnale nella quale non sono presenti misure sufficienti a stabilire lo stato effettivo del dispositivo.

Il criterio temporale consente quindi di distinguere una breve interruzione dello stato attivo, compatibile con l'evoluzione interna di un intervallo operativo, da una discontinuità dovuta all'assenza delle acquisizioni. Solo nel primo caso lo stato compreso tra i due segmenti viene riclassificato come attivo, ottenendo un unico intervallo continuo.

Nel caso della lavatrice, ad esempio, è stata adottata una pausa massima pari a 5 min. L'effetto dell'applicazione della procedura sul medesimo intervallo precedentemente mostrato è riportato in Figura 3.

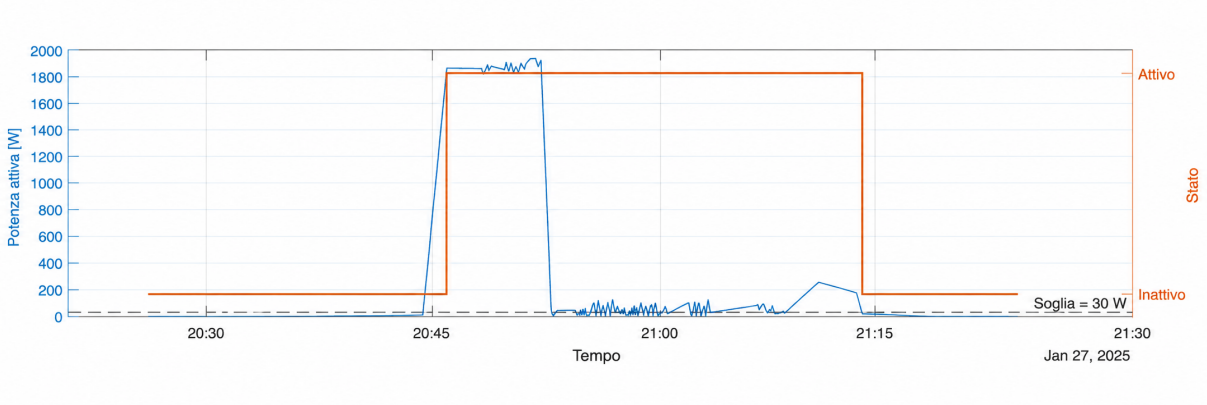


Figure 3: *Stato di funzionamento della lavatrice dopo la procedura di affinamento. Le brevi interruzioni comprese tra segmenti temporalmente ravvicinati vengono ricongiunte, riducendo la frammentazione prodotta dalla classificazione preliminare.*

Dal confronto tra le due rappresentazioni è possibile osservare come l'affinamento riduca il numero di transizioni determinate dalle variazioni temporanee della potenza rispetto alla soglia, producendo una descrizione più continua degli intervalli operativi rilevati.

La procedura viene applicata separatamente a ciascun dispositivo e il risultato viene memorizzato come stato definitivo di funzionamento. È quest'ultimo, e non la classificazione ottenuta direttamente dal semplice confronto con la soglia, a essere utilizzato nelle successive fasi di elaborazione per l'individuazione e la caratterizzazione degli eventi operativi.

3.3.4 Estrazione degli eventi di funzionamento

A partire dallo stato definitivo ottenuto al termine della procedura di affinamento, sono stati individuati gli intervalli di funzionamento dei singoli dispositivi, ciascuno caratterizzato da un istante di inizio e da un istante di fine. Nel seguito del lavoro, per semplicità espositiva e per rendere più immediata la descrizione delle successive elaborazioni, tali intervalli vengono indicati con il termine evento. Questa denominazione assume pertanto un significato esclusivamente operativo: un evento rappresenta un intervallo temporale nel quale il dispositivo viene identificato come attivo dalla metodologia sviluppata e non deve essere necessariamente interpretato come un ciclo completo di funzionamento o come uno specifico programma fisico dell'elettrodomestico. Tale distinzione risulta particolarmente rilevante per i dispositivi caratterizzati da funzionamenti articolati in più fasi o da attivazioni automatiche, come il frigorifero e i sistemi HVAC.

L'individuazione di tali intervalli consente quindi di passare da una rappresentazione campione per campione dello stato binario a una descrizione temporale sintetica, utilizzabile nelle successive analisi di profilazione.

L'individuazione degli eventi viene effettuata analizzando le transizioni dello stato definitivo. In particolare, una transizione da 0 a 1 identifica l'inizio di un nuovo evento, mentre il successivo ritorno da 1 a 0 ne determina la conclusione. In questo modo, una sequenza di campioni consecutivi appartenenti allo stato attivo viene rappresentata mediante un unico intervallo di funzionamento.

Per ciascun dispositivo gli eventi individuati vengono raccolti in una tabella dedicata, nella quale ogni riga rappresenta un singolo evento operativo rilevato. Le principali informazioni memorizzate sono:

- `NumeroEvento`, identificativo progressivo dell'evento;
- `Data`, giorno nel quale ha inizio l'evento;
- `TimestampInizio`, istante temporale di inizio;
- `TimestampFine`, istante temporale di fine;
- `OraInizio`, orario di inizio;
- `OraFine`, orario di fine;
- `Durata`, durata complessiva dell'evento.

La durata viene determinata direttamente a partire dagli istanti temporali che delimitano l'evento:

$$T_{\text{evento}} = t_{\text{fine}} - t_{\text{inizio}}. \tag{3}$$

L'utilizzo diretto dei timestamp risulta particolarmente importante alla luce della risoluzione temporale irregolare dei segnali descritta in precedenza, poiché evita di stimare la durata degli eventi sulla base di un numero di campioni e di un ipotetico periodo di campionamento costante.

Gli eventi così individuati vengono organizzati separatamente per ciascun dispositivo, ottenendo una struttura del tipo

```
EventiDefinitivi.lavatrice
EventiDefinitivi.lavastoviglie
EventiDefinitivi.asciugatrice
EventiDefinitivi.frigo
EventiDefinitivi.hvac1
EventiDefinitivi.hvac2
```

La trasformazione delle serie temporali in eventi costituisce un passaggio fondamentale per le successive analisi di profilazione. Il numero di righe presenti nella tabella di ciascun dispositivo permette infatti di ricavare direttamente il numero di eventi rilevati, mentre gli istanti di inizio e fine consentono di analizzarne la distribuzione nel corso della giornata, la durata e le relazioni temporali con gli eventi degli altri dispositivi.

A partire dagli stessi intervalli temporali è inoltre possibile associare successivamente a ciascun evento le corrispondenti misure di potenza e ricavare ulteriori grandezze caratteristiche, quali potenza media, potenza massima ed energia assorbita. Tali informazioni vengono utilizzate nelle successive fasi di caratterizzazione del comportamento dei singoli dispositivi.

Gli stati definitivi e gli eventi di funzionamento ottenuti nelle precedenti fasi costituiscono la base per le successive analisi di profilazione dell'utenza residenziale. A partire da tali informazioni vengono analizzati differenti aspetti del comportamento energetico, considerando sia le modalità di utilizzo dei singoli dispositivi sia le relazioni temporali tra essi.

Le analisi sviluppate riguardano la distribuzione temporale delle attivazioni, la contemporaneità di utilizzo, la sequenzialità tra dispositivi, la stima della potenza non direttamente attribuibile ai carichi monitorati e la caratterizzazione delle principali modalità operative osservate. Le procedure adottate per ciascuna di tali analisi sono descritte nelle sezioni successive.

3.4 Analisi delle abitudini di consumo

Gli stati definitivi e gli eventi di funzionamento ottenuti nelle precedenti fasi costituiscono la base per le successive analisi finalizzate alla caratterizzazione delle abitudini di consumo dell'utenza residenziale. A partire da tali informazioni vengono analizzati differenti aspetti del comportamento energetico, considerando sia le modalità di utilizzo dei singoli dispositivi sia le relazioni temporali tra essi.

Le analisi sviluppate riguardano la distribuzione temporale delle attivazioni, la contemporaneità di utilizzo, la sequenzialità tra dispositivi e la stima della potenza non direttamente attribuibile ai carichi monitorati. Ciascuna elaborazione utilizza le informazioni precedentemente ricavate secondo modalità differenti: le analisi relative al singolo dispositivo possono sfruttare l'intero periodo di acquisizione

disponibile, mentre quelle che richiedono il confronto tra più segnali vengono effettuate sugli intervalli temporali per i quali è garantita la disponibilità congiunta dei dati.

Le procedure adottate per ciascuna analisi sono descritte nelle sezioni successive.

3.4.1 Distribuzione temporale delle attivazioni

La prima analisi di profilazione riguarda la distribuzione temporale delle attivazioni dei singoli dispositivi nel corso della giornata. L'obiettivo è individuare eventuali fasce orarie nelle quali gli eventi di funzionamento si verificano con maggiore frequenza, così da evidenziare possibili regolarità nelle abitudini di utilizzo dell'utenza.

L'analisi viene effettuata a partire dagli eventi di funzionamento precedentemente estratti. Per ciascun evento viene considerato il relativo istante di inizio, memorizzato nella variabile `TimestampInizio`, dal quale viene ricavata l'ora di attivazione del dispositivo.

La giornata viene suddivisa in 24 intervalli orari, ciascuno della durata di un'ora. Ogni evento viene quindi assegnato alla fascia corrispondente all'ora nella quale ha avuto inizio. Indicando con N_h il numero di eventi il cui istante iniziale appartiene alla fascia oraria h, si ottiene

$$N_h = \sum_{i=1}^{N} \mathbb{I}\left[h \leq \text{ora}(t_i) < h+1\right], \qquad h = 0, \ldots, 23 \tag{4}$$

dove N rappresenta il numero complessivo di eventi del dispositivo, t_i l'istante di inizio dell'i-esimo evento e $\mathbb{I}[\cdot]$ la funzione indicatrice.

Il conteggio viene effettuato separatamente per ciascun dispositivo, ottenendo una distribuzione delle attivazioni sulle 24 ore della giornata. In questo modo è possibile confrontare la frequenza con cui gli eventi iniziano nelle differenti fasce orarie e individuare eventuali concentrazioni temporali ricorrenti.

È importante sottolineare che l'analisi considera l'istante di inizio dell'evento e non l'intera durata dello stesso. Un evento che inizia in una determinata fascia oraria e prosegue in quella successiva viene quindi attribuito esclusivamente all'ora nella quale ha avuto inizio. La distribuzione ottenuta descrive pertanto gli orari di attivazione dei dispositivi e non il tempo complessivo durante il quale essi risultano attivi nelle diverse ore della giornata.

Per ciascun dispositivo i risultati vengono rappresentati mediante un istogramma, nel quale sull'asse delle ascisse sono riportate le ore della giornata e sull'asse delle ordinate il numero di eventi rilevati. Tale rappresentazione consente di individuare visivamente le fasce orarie caratterizzate da una maggiore frequenza di attivazione.

L'analisi viene condotta sull'intero periodo temporale disponibile per ciascun dispositivo. In questo caso non è infatti necessario limitarsi ai 195 giorni comuni individuati precedentemente, poiché la distribuzione oraria viene determinata separatamente per ogni elettrodomestico e non richiede un confronto simultaneo tra segnali differenti.

La distribuzione temporale così ottenuta costituisce un primo indicatore delle abitudini dell'utenza. Eventuali concentrazioni delle attivazioni in specifiche fasce orarie possono infatti evidenziare comportamenti ricorrenti nell'utilizzo dei dispositivi. La loro interpretazione viene tuttavia effettuata considerando la natura del carico analizzato: mentre per elettrodomestici quali lavatrice, lavastoviglie e asciugatrice l'inizio di un evento può essere maggiormente collegato alle abitudini dell'utente, per dispositivi caratterizzati da funzionamento automatico, come il frigorifero, la distribuzione degli eventi descrive principalmente il comportamento operativo dell'apparecchio e non una sua attivazione diretta da parte dell'utente.

3.4.2 Contemporaneità di utilizzo

La seconda analisi di profilazione riguarda la contemporaneità di utilizzo dei dispositivi monitorati. L'obiettivo è determinare quanti e quali dispositivi risultano attivi simultaneamente, così da individuare eventuali combinazioni ricorrenti di utilizzo e caratterizzare il livello di sovrapposizione temporale tra i differenti carichi.

A differenza dell'analisi della distribuzione delle attivazioni, lo studio della contemporaneità richiede il confronto diretto tra più segnali. Per questo motivo vengono considerate esclusivamente le 195 giornate comuni precedentemente individuate, nelle quali risultano disponibili le misure relative a tutti i dispositivi coinvolti. In questo modo l'eventuale assenza di un segnale non viene erroneamente interpretata come uno stato di inattività.

Il confronto non può tuttavia essere effettuato direttamente campione per campione. Come evidenziato nell'analisi della risoluzione temporale, i diversi segnali presentano infatti intervalli di acquisizione differenti e non uniformi e i relativi timestamp non risultano generalmente coincidenti.

Per rendere confrontabili gli stati dei diversi dispositivi è stata quindi costruita una base temporale comune.

Poiché i segnali presentano risoluzioni temporali differenti, il passo della base temporale comune è stato determinato a partire dalle caratteristiche temporali dei dati. Per ciascun dispositivo è stato calcolato l'intervallo mediano tra timestamp consecutivi nei giorni comuni e, tra i valori così ottenuti, è stato assunto come passo della griglia il valore massimo. Tale criterio consente di adottare una risoluzione temporale compatibile anche con il segnale caratterizzato dalla minore densità temporale, evitando di introdurre una griglia eccessivamente fitta rispetto alle informazioni effettivamente disponibili. Nel caso analizzato, l'applicazione di tale procedura ha determinato un passo temporale della griglia comune pari a 174 s.

Su tale riferimento temporale viene ricostruito, per ciascun dispositivo, lo stato di funzionamento a partire dagli eventi definitivi precedentemente estratti.

Per ogni istante della base temporale comune viene verificato se esso appartenga a uno degli intervalli delimitati da `TimestampInizio` e `TimestampFine` degli eventi del dispositivo considerato. Lo stato viene quindi posto pari a 1 quando l'istante appartiene a un evento di funzionamento e pari a 0 in caso contrario.

Indicando con $s_j(t)$ lo stato del dispositivo j all'istante t, si ha pertanto

$$s_j(t) = \begin{cases} 1, & t \in [t_{\text{inizio}}, t_{\text{fine}}], \\ 0, & \text{altrimenti.} \end{cases} \tag{5}$$

Ripetendo l'operazione per tutti i dispositivi viene costruita una matrice binaria nella quale le righe rappresentano gli istanti della base temporale comune e le colonne rappresentano i dispositivi monitorati. Ogni elemento della matrice indica quindi lo stato del corrispondente dispositivo nell'istante considerato.

A partire da tale rappresentazione è possibile determinare, per ogni istante, il numero complessivo di dispositivi contemporaneamente attivi mediante la somma degli stati:

$$N_{\text{attivi}}(t) = \sum_{j=1}^{M} s_j(t), \tag{6}$$

dove M rappresenta il numero di dispositivi considerati nell'analisi.

Oltre al numero di carichi contemporaneamente attivi, la matrice binaria permette di identificare la specifica combinazione di dispositivi in funzione nello stesso intervallo temporale. È quindi possibile distinguere, ad esempio, una condizione nella quale risultano attive contemporaneamente lavatrice e asciugatrice da una nella quale siano attivi lavastoviglie e uno dei sistemi HVAC, anche qualora il numero complessivo di dispositivi attivi sia lo stesso.

Per ciascuna configurazione possono essere successivamente determinate la frequenza di occorrenza e la relativa permanenza temporale, ottenendo una descrizione delle combinazioni di utilizzo che caratterizzano maggiormente l'utenza analizzata.

Il frigorifero viene incluso nell'analisi della contemporaneità, ma il relativo stato attivo mantiene il significato definito nelle precedenti fasi metodologiche, ossia identifica principalmente gli intervalli di attività del sistema di refrigerazione e non l'accensione dell'intero apparecchio.

L'analisi della contemporaneità permette quindi di passare dalla caratterizzazione indipendente dei singoli dispositivi allo studio delle loro relazioni temporali. Le combinazioni individuate descrivono effettive sovrapposizioni degli intervalli operativi rilevati; la loro eventuale interpretazione in termini di abitudini dell'utente viene invece effettuata successivamente sulla base della natura dei dispositivi coinvolti.

3.4.3 Sequenzialità tra dispositivi

L'analisi della sequenzialità è finalizzata a individuare eventuali relazioni temporali ricorrenti tra l'utilizzo di dispositivi differenti. A differenza dello studio della contemporaneità, in questo caso non viene ricercata la sovrapposizione degli intervalli di funzionamento, ma la presenza di utilizzi appartenenti a dispositivi diversi che si verificano secondo un determinato ordine temporale.

L'analisi è stata concentrata sulle coppie di dispositivi per le quali la successione temporale può assumere un significato funzionale plausibile. In particolare, è stata considerata la relazione tra lava-

trice e asciugatrice, poiché l'utilizzo dell'asciugatrice può ragionevolmente seguire quello della lavatrice nell'ambito della stessa attività domestica.

Prima di effettuare il confronto tra i due dispositivi è stato necessario considerare che più eventi operativi distinti, pur essendo stati correttamente identificati come tali nelle precedenti fasi di elaborazione, possono risultare temporalmente molto ravvicinati e risultare riconducibili a uno stesso utilizzo complessivo del dispositivo. Un confronto effettuato direttamente sui singoli eventi avrebbe quindi potuto generare più associazioni riferibili alla medesima attività domestica, sovrastimando il numero di sequenze individuate.

Per ridurre tale effetto, gli eventi temporalmente ravvicinati appartenenti allo stesso dispositivo sono stati raggruppati in sessioni operative. Due eventi consecutivi vengono assegnati alla stessa sessione quando la pausa temporale che li separa non supera un determinato intervallo. Prima di definire tale criterio di raggruppamento è stata analizzata la distribuzione delle pause temporali tra eventi consecutivi, separatamente per lavatrice e asciugatrice. In particolare, sono stati considerati la mediana, alcuni percentili della distribuzione e la percentuale di pause inferiori a differenti soglie temporali. Sulla base di tale analisi è stata adottata una pausa massima pari a 10 min per entrambi i dispositivi. Tale valore costituisce un criterio operativo per ricongiungere eventi fortemente ravvicinati e potenzialmente riconducibili allo stesso utilizzo complessivo, mantenendo invece separati gli eventi caratterizzati da intervalli temporali maggiori.

Ogni sessione viene descritta mediante l'istante di inizio del primo evento e l'istante di fine dell'ultimo evento che la compone. La sessione costituisce pertanto un livello di aggregazione successivo rispetto al singolo evento operativo e viene introdotta specificamente ai fini dell'analisi della sequenzialità. In questo modo, più eventi ravvicinati possono essere trattati come parti di uno stesso utilizzo complessivo, evitando che la loro presenza produca associazioni multiple con l'altro dispositivo.

A partire dalle sessioni così ottenute, per ciascuna sessione dell'asciugatrice viene ricercata la sessione della lavatrice terminata più recentemente nelle 24 ore precedenti. Una stessa sessione della lavatrice può essere associata a una sola sessione dell'asciugatrice, evitando così associazioni multiple riferite al medesimo utilizzo della lavatrice. La distanza temporale viene quindi determinata tra l'istante di fine della sessione della lavatrice e l'istante di inizio della sessione dell'asciugatrice. Indicando con $t_{\mathrm{fine,L}}$ l'istante di fine della sessione della lavatrice e con $t_{\mathrm{inizio,A}}$ l'istante di inizio della successiva sessione dell'asciugatrice, la distanza temporale tra i due utilizzi viene calcolata come

$$\Delta t = t_{\mathrm{inizio,A}} - t_{\mathrm{fine,L}}. \tag{7}$$

L'associazione viene considerata ai fini dell'analisi solamente quando l'asciugatrice viene utilizzata entro un intervallo massimo di 24 h dalla conclusione della sessione della lavatrice. L'introduzione di tale limite permette di evitare associazioni tra utilizzi eccessivamente distanti nel tempo e di concentrare l'analisi sulle successioni temporalmente compatibili con una possibile relazione tra i due dispositivi.

Le sequenze individuate vengono successivamente suddivise in tre categorie in funzione della distanza temporale Δt:

$$\begin{cases} \text{ravvicinata}, & \Delta t \leq 2\ \text{h}, \\ \text{differita}, & 2\ \text{h} < \Delta t \leq 8\ \text{h}, \\ \text{molto differita}, & 8\ \text{h} < \Delta t \leq 24\ \text{h}. \end{cases} \tag{8}$$

La classificazione consente di distinguere gli utilizzi dell'asciugatrice che seguono in tempi brevi la conclusione dell'utilizzo della lavatrice da quelli effettuati a distanza di alcune ore, mantenendo separati i casi caratterizzati da intervalli temporali più estesi. In questo modo, oltre a verificare la presenza di una successione tra i due dispositivi, è possibile caratterizzare anche la rapidità con cui essa si verifica.

Per descrivere quantitativamente la relazione vengono quindi valutati il numero complessivo di sequenze individuate, la loro distribuzione nelle tre categorie definite e le principali statistiche della distanza temporale Δt, quali valore medio, mediano, minimo e massimo.

È infine importante sottolineare che l'individuazione di una sequenza temporale non dimostra l'esistenza di un rapporto causale tra i due utilizzi. L'analisi permette esclusivamente di rilevare una relazione temporale compatibile con una determinata abitudine dell'utente. Nel caso lavatrice–asciugatrice, la natura funzionale dei due elettrodomestici rende plausibile interpretare la successione come parte della stessa attività domestica; tuttavia, i dati disponibili non consentono di stabilire direttamente che il carico trattato dall'asciugatrice provenga necessariamente dal precedente utilizzo della lavatrice.

3.4.4 Potenza non monitorata

La disponibilità congiunta della potenza attiva aggregata dell'abitazione e delle misure relative ai singoli dispositivi monitorati permette di stimare la quota di potenza associata ai carichi non acquisiti individualmente dal sistema di misura.

In linea teorica, indicando con $P_{\mathrm{agg}}(t)$ la potenza aggregata dell'abitazione e con $P_j(t)$ la potenza del generico dispositivo monitorato, la potenza complessivamente attribuibile ai dispositivi monitorati può essere espressa come

$$P_{\mathrm{mon}}(t) = \sum_{j=1}^{M} P_j(t), \tag{9}$$

dove M rappresenta il numero di dispositivi monitorati. Il residuo rispetto alla potenza aggregata è quindi definito come

$$P_{\mathrm{res}}(t) = P_{\mathrm{agg}}(t) - P_{\mathrm{mon}}(t). \tag{10}$$

Il calcolo non può tuttavia essere effettuato mediante una semplice sottrazione campione per campione. Come evidenziato nell'analisi della risoluzione temporale, il segnale aggregato e quelli dei singoli dispositivi presentano infatti frequenze equivalenti differenti, campionamento irregolare e timestamp generalmente non coincidenti. È stato pertanto necessario introdurre una procedura di allineamento temporale.

I timestamp del segnale aggregato sono stati utilizzati come riferimento. Per ciascun istante disponibile nel segnale aggregato viene ricercata, all'interno di ogni serie relativa ai dispositivi monitorati, la misura temporalmente più vicina. Per limitare l'errore introdotto dall'associazione tra misure acquisite in istanti differenti, è stata imposta una tolleranza temporale massima pari a 5 min.

Una misura viene considerata valida ai fini del confronto solamente quando, per lo stesso istante di riferimento, è disponibile un campione sufficientemente vicino per ciascuno dei sei dispositivi monitorati. Gli istanti nei quali tale condizione non risulta verificata vengono esclusi dal calcolo. In questo modo si evita di interpretare la mancata disponibilità di una misura come un assorbimento nullo del relativo dispositivo.

Una volta effettuato l'allineamento, la potenza monitorata viene determinata sommando i contributi di lavatrice, lavastoviglie, asciugatrice, frigorifero, HVAC1 e HVAC2:

$$P_{\mathrm{mon}}(t) = P_{\mathrm{lav}}(t) + P_{\mathrm{lavast}}(t) + P_{\mathrm{asc}}(t) + P_{\mathrm{frigo}}(t) + P_{\mathrm{HVAC1}}(t) + P_{\mathrm{HVAC2}}(t). \tag{11}$$

La differenza tra potenza aggregata e potenza monitorata fornisce quindi il residuo $P_{\mathrm{res}}(t)$. In condizioni ideali tale quantità dovrebbe essere non negativa, poiché il consumo dei dispositivi monitorati rappresenta una parte del consumo complessivo dell'abitazione. Nella pratica possono tuttavia comparire valori negativi, principalmente a causa del mancato sincronismo tra le acquisizioni, della diversa risoluzione temporale dei segnali e della conseguente approssimazione introdotta dalla procedura di allineamento.

Per ottenere una grandezza fisicamente interpretabile come stima della potenza associata ai carichi non monitorati, i valori negativi del residuo vengono pertanto posti pari a zero:

$$P_{\mathrm{non\,mon}}(t) = \max\left[P_{\mathrm{res}}(t), 0\right]. \tag{12}$$

In maniera complementare, la quota di potenza aggregata attribuibile ai dispositivi monitorati viene limitata al valore effettivamente misurato dal segnale aggregato:

$$P_{\mathrm{spiegata}}(t) = \min\left[P_{\mathrm{mon}}(t), P_{\mathrm{agg}}(t)\right]. \tag{13}$$

A partire dalle potenze così definite è possibile valutare non soltanto l'andamento temporale della componente non monitorata, ma anche il relativo contributo energetico. Poiché i timestamp del segnale aggregato non sono uniformemente distribuiti, l'energia non viene calcolata assumendo un periodo di campionamento costante, ma mediante integrazione numerica rispetto al tempo effettivamente trascorso tra le osservazioni.

L'integrazione viene effettuata separatamente per ciascuna giornata, utilizzando la regola trapezoidale. Indicando con P_k e P_{k+1} due valori consecutivi di potenza e con Δt_k il corrispondente intervallo temporale espresso in ore, l'energia può essere approssimata come

$$E \simeq \sum_{k} \frac{P_k + P_{k+1}}{2} \Delta t_k. \tag{14}$$

La stessa procedura viene applicata alla potenza aggregata, alla potenza spiegata dai dispositivi monitorati e alla componente non monitorata, consentendo di confrontarne i rispettivi contributi energetici.

La potenza non monitorata così ottenuta deve essere interpretata come una stima complessiva del consumo non attribuibile ai sei dispositivi acquisiti individualmente. Il residuo non consente infatti di identificare quali specifici carichi siano responsabili della potenza restante, ma permette di quantificare la parte del consumo dell'abitazione che non viene spiegata dalle misure disponibili.

È inoltre necessario considerare che la stima è influenzata dalla diversa risoluzione temporale dei segnali e dall'approssimazione introdotta dall'associazione al campione temporalmente più vicino. I risultati vengono pertanto utilizzati per caratterizzare il contributo complessivo dei carichi non monitorati, senza attribuire il residuo a specifici dispositivi non presenti nel dataset.

3.5 Caratterizzazione degli eventi e modalità operative

L'ultima fase della profilazione è dedicata alla caratterizzazione degli eventi di funzionamento dei singoli dispositivi e all'individuazione di eventuali modalità operative ricorrenti. L'obiettivo è verificare se gli eventi rilevati presentino caratteristiche simili e possano quindi essere raggruppati in differenti tipologie di utilizzo.

A partire dagli eventi definitivi precedentemente estratti, per ciascun intervallo di funzionamento vengono considerate le misure di potenza comprese tra il relativo istante di inizio e di fine. Su tali campioni vengono calcolate alcune grandezze rappresentative del comportamento energetico dell'evento.

In particolare, per ciascun evento vengono determinate:

- la durata dell'evento;
- la potenza media;
- la potenza massima;
- l'energia assorbita;
- il numero di campioni disponibili.

Indicando con N il numero di campioni appartenenti all'evento e con P_k il corrispondente valore di potenza, la potenza media viene calcolata come

$$P_{\text{media}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} P_k, \tag{15}$$

mentre la potenza massima è definita come

$$P_{\max} = \max_{k=1,\ldots,N} (P_k). \tag{16}$$

L'energia associata all'evento viene determinata utilizzando direttamente i timestamp delle osservazioni. Poiché i segnali non presentano un campionamento uniforme, non viene assunto un periodo di campionamento costante, ma viene applicata un'integrazione numerica mediante la regola trapezoidale:

$$E_{\text{evento}} \simeq \sum_{k=1}^{N-1} \frac{P_k + P_{k+1}}{2} \Delta t_k, \tag{17}$$

dove Δt_k rappresenta l'intervallo temporale, espresso in ore, tra due campioni consecutivi. L'energia risultante viene pertanto espressa in Wh.

Le caratteristiche calcolate vengono raccolte, separatamente per ciascun dispositivo, in una struttura dedicata agli eventi. In questo modo ogni evento operativo rilevato viene descritto mediante un insieme di grandezze temporali ed energetiche che ne consentono il confronto con gli altri eventi appartenenti allo stesso dispositivo.

A partire da tali caratteristiche è stata successivamente effettuata un'analisi finalizzata all'individuazione di gruppi di eventi simili. Per il raggruppamento sono state considerate tre variabili: durata dell'evento,

potenza media ed energia assorbita. La potenza massima viene mantenuta tra le caratteristiche descrittive dell'evento, ma non viene utilizzata come variabile per la procedura di raggruppamento.

Poiché le tre grandezze considerate presentano unità di misura e scale numeriche differenti, prima dell'applicazione dell'algoritmo è stata effettuata una normalizzazione robusta dei dati. Per ciascuna caratteristica, i valori sono stati centrati rispetto alla mediana e scalati mediante l'intervallo interquartile:

$$x_{\text{norm}} = \frac{x - \text{mediana}(x)}{\text{IQR}(x)}. \tag{18}$$

L'utilizzo della mediana e dell'intervallo interquartile consente di ridurre l'influenza di eventi caratterizzati da valori particolarmente elevati rispetto alla maggior parte delle osservazioni. Nei casi in cui l'intervallo interquartile risulti nullo, viene utilizzata una misura di dispersione alternativa per consentire comunque la normalizzazione della variabile.

Gli eventi normalizzati vengono successivamente raggruppati mediante l'algoritmo *k-means* [7]. Il numero di gruppi non viene imposto a priori, ma viene valutato considerando differenti valori di k, compresi tra 2 e 5. Per ciascun valore candidato vengono effettuate più inizializzazioni dell'algoritmo, così da ridurre la dipendenza del risultato dalla posizione iniziale dei centroidi.

La scelta del numero di gruppi viene effettuata mediante il coefficiente di silhouette [8], che valuta contemporaneamente la compattezza degli eventi appartenenti allo stesso gruppo e la separazione rispetto agli altri gruppi. Indicando con $a(i)$ la distanza media dell'evento i dagli altri elementi appartenenti allo stesso gruppo e con $b(i)$ la minima distanza media rispetto agli elementi degli altri gruppi, il coefficiente di silhouette è definito come

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}}. \tag{19}$$

Il valore di k associato alla migliore silhouette media viene selezionato per la classificazione finale degli eventi. Una volta individuato il numero di gruppi, il clustering viene ripetuto con un numero maggiore di inizializzazioni al fine di ottenere una soluzione maggiormente stabile.

Per facilitare l'interpretazione dei gruppi individuati, gli eventi vengono rappresentati graficamente nel piano durata–energia. La rappresentazione bidimensionale viene utilizzata esclusivamente a scopo descrittivo: il raggruppamento continua infatti a essere effettuato considerando congiuntamente durata, potenza media ed energia nello spazio normalizzato tridimensionale.

I gruppi ottenuti vengono quindi caratterizzati attraverso le proprietà degli eventi che li compongono e la relativa frequenza di occorrenza. Per ciascun dispositivo è così possibile individuare il gruppo prevalente e valutare se il comportamento osservato risulti concentrato principalmente in una tipologia di funzionamento oppure distribuito tra più modalità.

Nel caso di lavatrice, lavastoviglie e asciugatrice, i gruppi individuati vengono interpretati come *modalità operative stimate*. Per i sistemi HVAC viene invece utilizzato il termine *regimi operativi stimati*, maggiormente coerente con la natura del loro funzionamento.

Tali denominazioni non implicano una corrispondenza diretta con i programmi o con le impostazioni nominali definite dal costruttore. Il dataset non contiene infatti informazioni sul programma selezionato dall'utente, sul set-point impostato o su altre configurazioni interne dei dispositivi. I gruppi rappresentano pertanto esclusivamente insiemi di eventi che presentano caratteristiche temporali ed energetiche simili nei dati analizzati.

La caratterizzazione degli eventi e l'individuazione delle modalità operative completano quindi la procedura di profilazione, consentendo di integrare le informazioni relative agli orari e alle relazioni temporali tra dispositivi con una descrizione delle principali tipologie di funzionamento osservate per ciascun carico.

3.6 Disponibilità del codice

Il codice MATLAB sviluppato per l'implementazione delle procedure di elaborazione e analisi descritte nel presente capitolo è disponibile nel repository GitHub:

`https://github.com/lucafit00-art/residential-energy-consumption-profiling`

Il repository contiene gli script utilizzati per la preparazione dei dati, l'individuazione degli eventi di funzionamento e le successive analisi delle abitudini di consumo.

4 Risultati ottenuti e discussione

Nel seguito vengono presentati e discussi i principali risultati ottenuti dall'analisi dei segnali di potenza e degli eventi di funzionamento individuati per i diversi elettrodomestici. Prima di analizzare nel dettaglio gli aspetti temporali, energetici e comportamentali, è utile fornire una panoramica complessiva degli indicatori ricavati per ciascun dispositivo.

La Tabella 4 riporta una caratterizzazione preliminare e grezza degli eventi individuati a partire dalla classificazione dello stato di funzionamento ottenuta dai segnali di potenza. I valori riportati forniscono quindi una prima descrizione quantitativa del dataset, attraverso il numero di eventi rilevati, le principali informazioni relative alla loro durata e le caratteristiche di potenza ed energia associate.

Tali indicatori devono essere interpretati con cautela, poiché in questa fase gli eventi non rappresentano necessariamente utilizzi o cicli completi degli elettrodomestici. Le variazioni del profilo di potenza, gli attraversamenti della soglia e le eventuali discontinuità temporali presenti nei dati possono infatti determinare una frammentazione del funzionamento in più intervalli distinti. La tabella non deve pertanto essere considerata come una rappresentazione definitiva dei cicli operativi dei dispositivi, ma come una prima caratterizzazione dei dati estratti, utile per evidenziare ordini di grandezza, differenze tra i carichi e aspetti da approfondire nelle elaborazioni successive.

Nelle analisi successive viene utilizzata una procedura di affinamento degli eventi, finalizzata a ridurre la frammentazione e a ottenere una rappresentazione più robusta degli intervalli di funzionamento. Il confronto preliminare tra i diversi dispositivi permette comunque di osservare differenze significative nella numerosità degli eventi, nelle potenze assorbite e nei contributi energetici.

Table 4: *Indicatori generali del profilo di consumo degli elettrodomestici*

Elettrodomestico	N. eventi	Durata media	Durata min	Durata max	P media [W]	P max [W]	E media [Wh]	E minima [Wh]	E massima [Wh]	E totale [Wh]
Lavatrice	1311	00:09:08	00:00:31	01:38:49	431.5211	2225	63.2469	0.3186	1.0431×10^3	8.2917×10^4
Lavastoviglie	1805	00:11:34	00:00:34	01:24:05	1.0073×10^3	2095	180.8147	0.2708	990.1893	3.2637×10^5
Asciugatrice	1372	00:06:57	00:00:31	01:32:04	328.9113	803	40.7491	0.1944	563.9014	5.5908×10^4
HVAC1	1472	00:03:15	00:00:34	01:13:16	612.0358	2433	32.2160	1.3201	925.5049	4.7422×10^4
HVAC2	1075	00:02:58	00:00:34	00:30:04	626.9531	1630	29.7481	1.4535	358.9932	3.1979×10^4
Frigo	16911	00:04:10	00:00:31	01:36:41	49.3541	262	3.6659	0.2669	119.9675	6.1994×10^4

4.1 Profilazione del primo utente

A partire dagli eventi di funzionamento individuati mediante la metodologia descritta nel Capitolo 3, è stata effettuata la profilazione delle abitudini di consumo del primo utente. L'analisi è stata sviluppata considerando diversi aspetti complementari, con l'obiettivo di passare dalla semplice osservazione delle serie temporali di potenza a una descrizione strutturata delle modalità di utilizzo dei dispositivi monitorati.

In primo luogo sono state analizzate le caratteristiche temporali degli eventi, considerando la distribuzione delle attivazioni nel corso della giornata e la durata degli intervalli di funzionamento rilevati. Successivamente, l'analisi è stata estesa alle relazioni tra dispositivi, valutandone la contemporaneità di utilizzo e, nel caso della coppia lavatrice–asciugatrice, l'eventuale presenza di una sequenzialità temporale ricorrente.

Il confronto tra il segnale aggregato dell'abitazione e le potenze associate ai singoli dispositivi monitorati ha inoltre permesso di valutare la quota di consumo non direttamente spiegata dalle misure individuali disponibili. Infine, la caratterizzazione temporale ed energetica degli eventi è stata utilizzata per individuare, mediante clustering, differenti modalità o regimi operativi stimati e ottenere una sintesi delle principali caratteristiche di utilizzo di ciascun dispositivo.

Le analisi presentate nelle sezioni successive rappresentano pertanto differenti componenti della profilazione dello stesso utente e vengono considerate congiuntamente nella definizione del profilo finale delle sue abitudini di consumo.

4.1.1 Caratterizzazione preliminare dei dati analizzati

Prima di procedere con le analisi finalizzate alla profilazione delle abitudini di consumo, è stata effettuata una caratterizzazione preliminare dei dati disponibili. Questa fase ha lo scopo di fornire una visione generale del dataset e delle principali caratteristiche dei segnali acquisiti, così da definire il contesto nel quale devono essere interpretati i risultati delle elaborazioni successive.

Il dataset comprende la misura della potenza attiva aggregata dell'abitazione e le misure individuali relative a sei carichi monitorati: lavatrice, lavastoviglie, asciugatrice, frigorifero e due sistemi HVAC, indicati rispettivamente come HVAC1 e HVAC2.

Per ciascun segnale sono stati considerati il numero complessivo di campioni, il numero di giorni per i quali sono disponibili misure, il periodo temporale coperto dall'acquisizione e alcuni indicatori statistici elementari della potenza attiva, quali valore minimo, medio e massimo. È stato inoltre rappresentato l'andamento della potenza sull'intero intervallo temporale disponibile, così da ottenere una prima valutazione qualitativa del comportamento dei differenti carichi.

Lavatrice

Per il segnale relativo alla lavatrice sono disponibili complessivamente 192692 campioni, distribuiti su 375 giorni di acquisizione, nel periodo compreso tra il 12/06/2024 e il 29/09/2025.

Le principali statistiche descrittive della potenza attiva risultano:

- Numero di campioni: 192692
- Giorni disponibili: 375
- Periodo di osservazione: dal 12/06/2024 al 29/09/2025
- Potenza minima: 0 W
- Potenza media: 85.41 W
- Deviazione standard: 369.37 W
- Potenza massima: 2225 W
- Campioni a potenza nulla: 41345, pari al 21.46% del totale

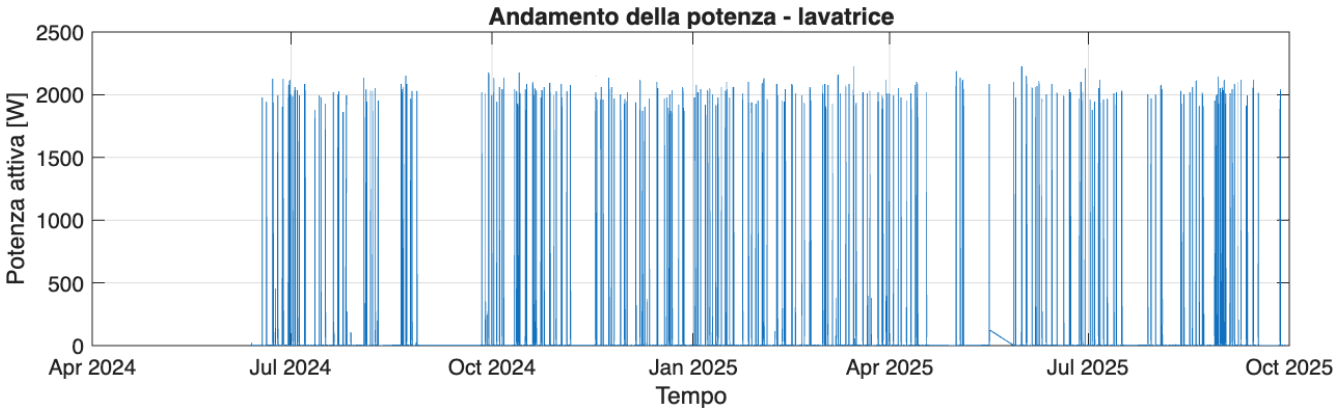


Figure 4: *Andamento temporale della potenza attiva della lavatrice sull'intero periodo di osservazione.*

Il profilo temporale della lavatrice evidenzia un comportamento fortemente discontinuo, caratterizzato dall'alternanza tra intervalli nei quali l'assorbimento risulta molto contenuto o nullo e intervalli nei quali vengono raggiunti livelli di potenza sensibilmente maggiori.

La rappresentazione dell'intero periodo consente di osservare la distribuzione generale delle attivazioni nel tempo, ma la notevole estensione temporale comprime i singoli intervalli di funzionamento, rendendo meno evidente l'andamento locale del segnale. Per questo motivo è stato considerato anche un intervallo temporale più ristretto, comune ai diversi dispositivi analizzati, relativo ai mesi di luglio e agosto 2024.

Il dettaglio temporale permette di distinguere più chiaramente la natura intermittente del funzionamento della lavatrice. Si osservano numerosi intervalli nei quali la potenza rimane prossima allo zero, alternati a brevi periodi caratterizzati da assorbimenti elevati, frequentemente prossimi ai 2 kW. All'interno degli stessi intervalli di funzionamento sono inoltre visibili livelli di potenza inferiori, coerenti con la presenza di differenti fasi operative dell'elettrodomestico.

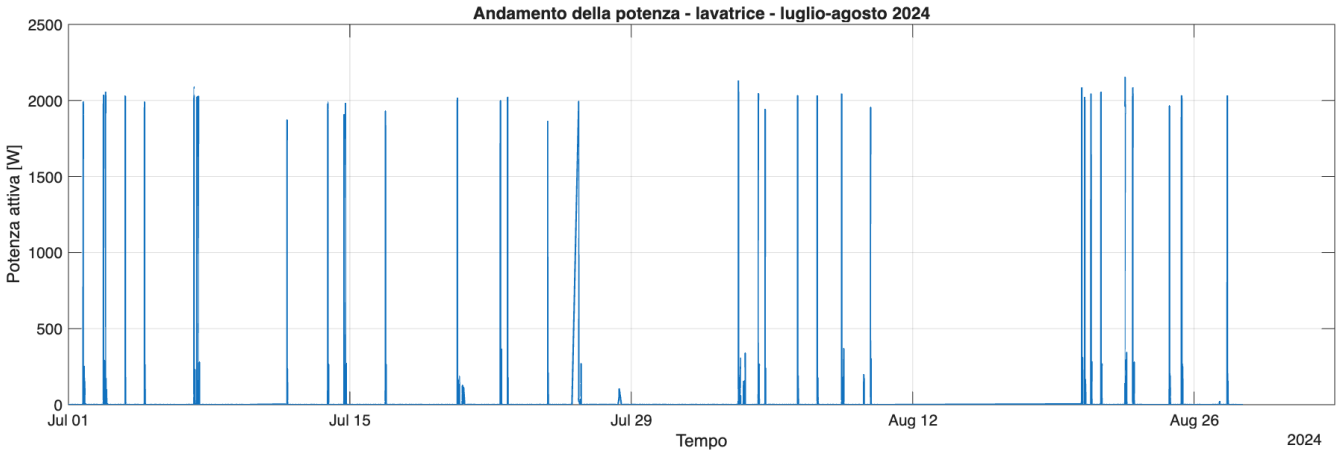


Figure 5: *Dettaglio dell'andamento temporale della potenza attiva della lavatrice nei mesi di luglio e agosto 2024.*

La scelta di rappresentare il medesimo intervallo luglio–agosto 2024 per tutti i dispositivi consente inoltre di effettuare un confronto visivo coerente tra i diversi profili di potenza, mantenendo invariata la scala temporale considerata.

La potenza media, pari a 85.41 W, risulta sensibilmente inferiore rispetto alla potenza massima di 2225 W. Tale differenza è coerente con la natura intermittente del funzionamento della lavatrice: considerando l'intero periodo di osservazione, gli intervalli di inattività o di basso assorbimento contribuiscono infatti a ridurre significativamente il valore medio.

La deviazione standard, pari a 369.37 W, risulta inoltre molto superiore alla potenza media e conferma l'elevata variabilità del segnale. Il profilo di potenza alterna infatti valori prossimi allo zero a intervalli caratterizzati da assorbimenti dell'ordine di alcune centinaia di watt e, in determinate fasi, prossimi ai 2 kW.

Un ulteriore elemento significativo è rappresentato dalla presenza di 41345 campioni a potenza esattamente nulla, corrispondenti al 21.46% del totale. Tale valore conferma quantitativamente la presenza di numerosi intervalli nei quali il dispositivo non assorbe potenza misurabile.



Figure 6: *Distribuzione dei valori di potenza attiva della lavatrice, comprensiva dei campioni a potenza nulla.*

La distribuzione completa dei valori di potenza presenta una forte concentrazione nelle classi prossime allo zero, coerentemente con l'elevato numero di campioni caratterizzati da assorbimento nullo o molto ridotto. Sono tuttavia visibili anche ulteriori concentrazioni a livelli di potenza superiori, in particolare nelle regioni associate alle diverse fasi di funzionamento dell'elettrodomestico.

La presenza contemporanea di un'elevata numerosità di campioni a basso assorbimento e di valori che raggiungono potenze superiori ai 2 kW spiega la forte dispersione osservata e la notevole differenza tra potenza media e potenza massima.

Per analizzare più chiaramente la distribuzione dei livelli di potenza effettivamente diversi da zero è stata inoltre considerata la distribuzione ottenuta eliminando esclusivamente i campioni caratterizzati da $P = 0$ W.

Anche eliminando i valori esattamente nulli, la distribuzione rimane fortemente concentrata nelle classi di potenza più basse. Ciò indica che una quota significativa dei campioni non nulli è comunque associata a livelli di assorbimento contenuti. Parallelamente, è osservabile una seconda regione di con-

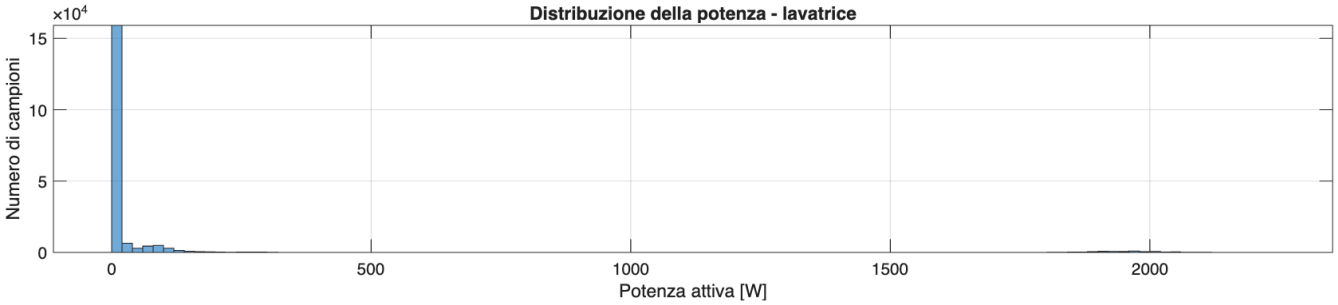


Figure 7: *Distribuzione dei valori di potenza attiva della lavatrice escludendo i campioni a potenza nulla.*

centrazione in corrispondenza di valori prossimi ai 2 kW, riconducibile alle fasi del funzionamento caratterizzate da maggiore richiesta di potenza.

Il confronto tra i due istogrammi permette quindi di distinguere l'effetto dei campioni esattamente nulli dalla più generale concentrazione del segnale nelle basse potenze. La distribuzione senza valori nulli conferma infatti che l'elevata frequenza delle basse potenze non è dovuta esclusivamente agli intervalli con $P = 0$ W, ma rappresenta una caratteristica effettiva del profilo di assorbimento della lavatrice.

Nel complesso, la caratterizzazione preliminare evidenzia un segnale fortemente variabile e intermittente, per il quale media, deviazione standard, andamento temporale e distribuzione dei valori forniscono informazioni complementari. La sola potenza media non sarebbe quindi sufficiente a descrivere adeguatamente il comportamento del dispositivo, rendendo necessarie le successive elaborazioni dedicate all'individuazione dello stato di funzionamento e degli eventi.

Lavastoviglie

Per il segnale relativo alla lavastoviglie sono disponibili complessivamente 102462 campioni, distribuiti su 431 giorni di acquisizione, nel periodo compreso tra il 12/06/2024 e il 09/10/2025.

Le principali statistiche descrittive della potenza attiva risultano:

- Numero di campioni: 102462
- Giorni disponibili: 431
- Periodo di osservazione: dal 12/06/2024 al 09/10/2025
- Potenza minima: 0 W
- Potenza media: 262.8649 W
- Deviazione standard: 643.5002 W
- Potenza massima: 2095 W
- Campioni a potenza nulla: 52488, pari al 51.23% del totale

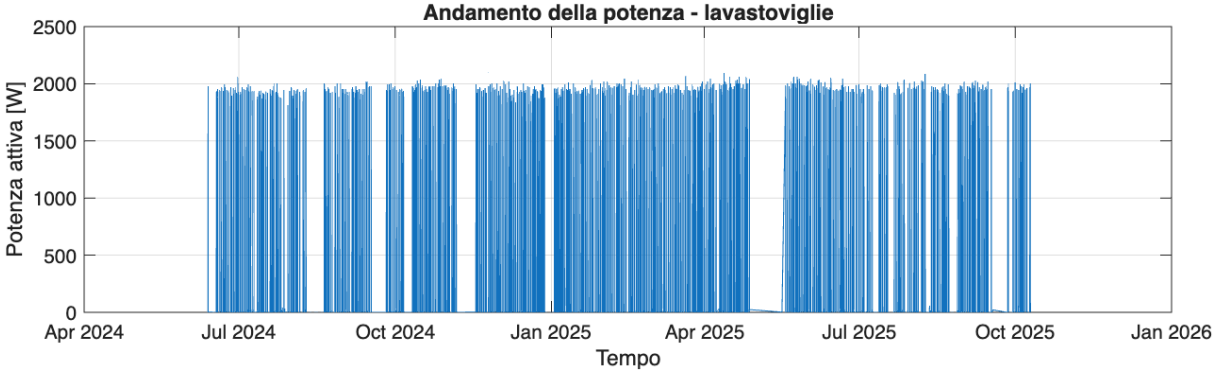


Figure 8: *Andamento temporale della potenza attiva della lavastoviglie sull'intero periodo di osservazione.*

Il profilo temporale della lavastoviglie evidenzia un comportamento fortemente discontinuo, caratterizzato dall'alternanza tra intervalli nei quali l'assorbimento risulta nullo o molto contenuto e periodi nei quali vengono raggiunti livelli di potenza sensibilmente superiori.

La rappresentazione sull'intero periodo consente di osservare la distribuzione generale delle attivazioni, ma la notevole estensione temporale comprime i singoli intervalli di funzionamento e rende difficile distinguere l'andamento locale del segnale. Per questo motivo è stato considerato anche un dettaglio relativo ai mesi di luglio e agosto 2024, utilizzando lo stesso intervallo temporale adottato per gli altri dispositivi.

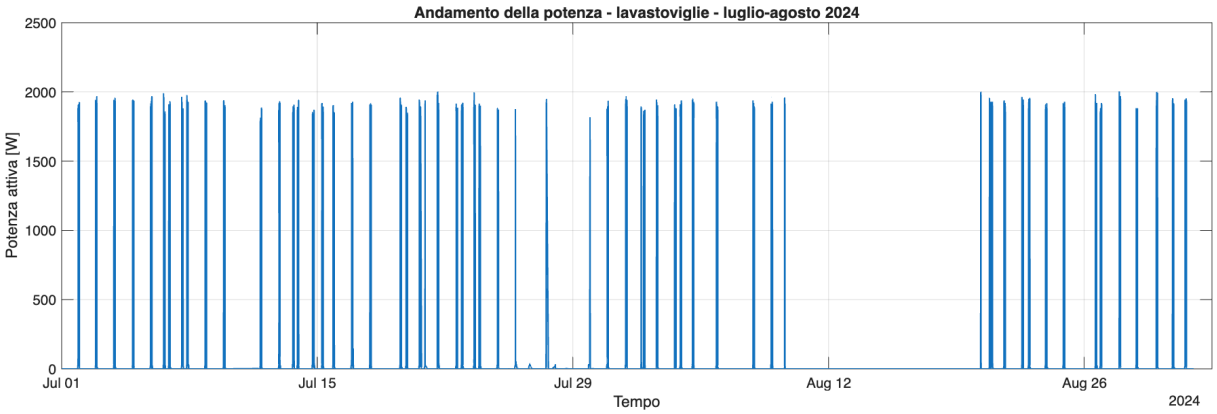


Figure 9: *Dettaglio dell'andamento temporale della potenza attiva della lavastoviglie nei mesi di luglio e agosto 2024.*

Il dettaglio temporale permette di osservare con maggiore chiarezza l'alternanza tra periodi di inattività e intervalli di funzionamento. Durante numerose attivazioni il livello di potenza raggiunge valori prossimi a 1.8–2 kW, mentre tra un'attivazione e la successiva il segnale si mantiene prevalentemente su valori molto bassi o nulli.

Sono inoltre osservabili variazioni dell'assorbimento all'interno degli stessi intervalli di attività, indicando che il funzionamento della lavastoviglie non può essere descritto mediante un unico livello costante di potenza, ma comprende differenti condizioni o fasi operative.

La potenza media, pari a 262.8649 W, risulta sensibilmente inferiore alla potenza massima di 2095 W. Tale differenza è coerente con il comportamento intermittente del dispositivo e con l'elevata presenza di campioni caratterizzati da assorbimento nullo o molto contenuto.

La deviazione standard, pari a 643.5002 W, risulta inoltre nettamente superiore alla potenza media e conferma l'elevata dispersione dei valori osservati. Nel segnale coesistono infatti numerosi campioni a bassa potenza e intervalli nei quali l'assorbimento raggiunge valori prossimi ai 2 kW.

Particolarmente rilevante è la presenza di 52488 campioni a potenza esattamente nulla, corrispondenti al 51.23% del totale. Oltre la metà dei campioni disponibili è quindi associata a una condizione di assorbimento nullo, elemento che influenza fortemente la distribuzione complessiva della potenza.

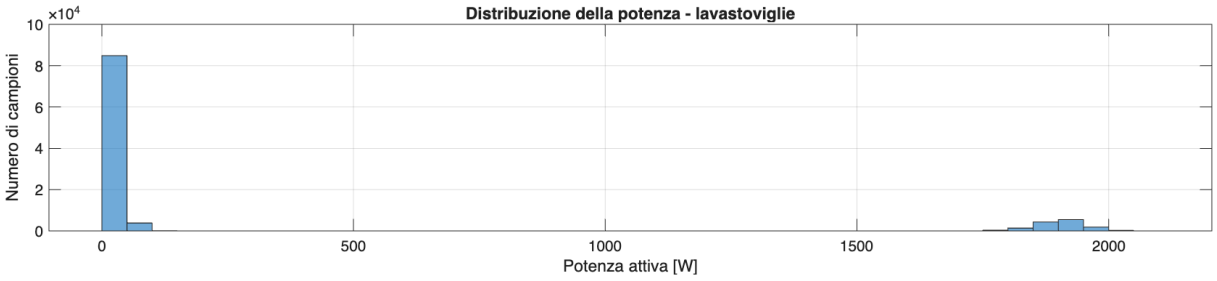


Figure 10: *Distribuzione dei valori di potenza attiva della lavastoviglie, comprensiva dei campioni a potenza nulla.*

Considerando l'intero insieme dei campioni, la distribuzione risulta fortemente dominata dai valori prossimi allo zero. Tale comportamento è coerente con l'elevata percentuale di campioni a potenza nulla appena evidenziata.

Nonostante la forte concentrazione iniziale, è comunque visibile una seconda regione della distribuzione in corrispondenza delle potenze più elevate, approssimativamente comprese tra 1.8 e 2 kW. La presenza

di questa regione conferma l'esistenza di condizioni di funzionamento caratterizzate da assorbimenti nettamente superiori rispetto agli intervalli di inattività o basso consumo.

La forte predominanza dei valori nulli tende tuttavia a ridurre visivamente il peso degli altri livelli di potenza. Per questo motivo la distribuzione è stata analizzata anche escludendo esclusivamente i campioni per i quali $P = 0$ W.



Figure 11: *Distribuzione dei valori di potenza attiva della lavastoviglie escludendo i campioni a potenza nulla.*

L'eliminazione dei campioni esattamente nulli modifica in maniera significativa la leggibilità della distribuzione. Rimane presente una forte concentrazione nelle classi di potenza più basse, mostrando che anche durante gli intervalli con assorbimento diverso da zero sono molto frequenti condizioni caratterizzate da potenze contenute.

Al tempo stesso, la regione associata alle potenze elevate acquista una rilevanza molto maggiore rispetto alla distribuzione completa. In particolare, risultano chiaramente distinguibili numerosi campioni concentrati nell'intervallo approssimativamente compreso tra 1.8 e 2 kW. La rimozione dei valori nulli non comporta naturalmente un aumento del numero effettivo di campioni ad alta potenza, ma ne rende molto più evidente il peso rispetto all'insieme dei campioni caratterizzati da potenza diversa da zero.

Il confronto tra le due rappresentazioni risulta quindi particolarmente informativo. L'istogramma completo mette in evidenza l'elevata incidenza dello stato a potenza nulla sull'intero dataset, mentre quello ottenuto escludendo tali campioni permette di caratterizzare più chiaramente i livelli di assorbimento osservati quando il segnale presenta una potenza effettivamente diversa da zero.

Nel complesso, la caratterizzazione preliminare della lavastoviglie evidenzia un segnale fortemente intermittente e caratterizzato da livelli di potenza molto differenti. La combinazione tra andamento temporale, deviazione standard e distribuzioni con e senza valori nulli fornisce quindi una descrizione significativamente più completa rispetto al solo valore medio e costituisce la base per le successive analisi dello stato di funzionamento e degli eventi.

Asciugatrice

Per il segnale relativo all'asciugatrice sono disponibili complessivamente 181878 campioni, distribuiti su 373 giorni di acquisizione, nel periodo compreso tra il 12/06/2024 e il 29/09/2025.

Le principali statistiche descrittive della potenza attiva risultano:

- Numero di campioni: 181878
- Giorni disponibili: 373
- Periodo di osservazione: dal 12/06/2024 al 29/09/2025
- Potenza minima: 0 W
- Potenza media: 48.9756 W
- Deviazione standard: 127.4625 W
- Potenza massima: 803 W
- Campioni a potenza nulla: 34870, pari al 19.17% del totale

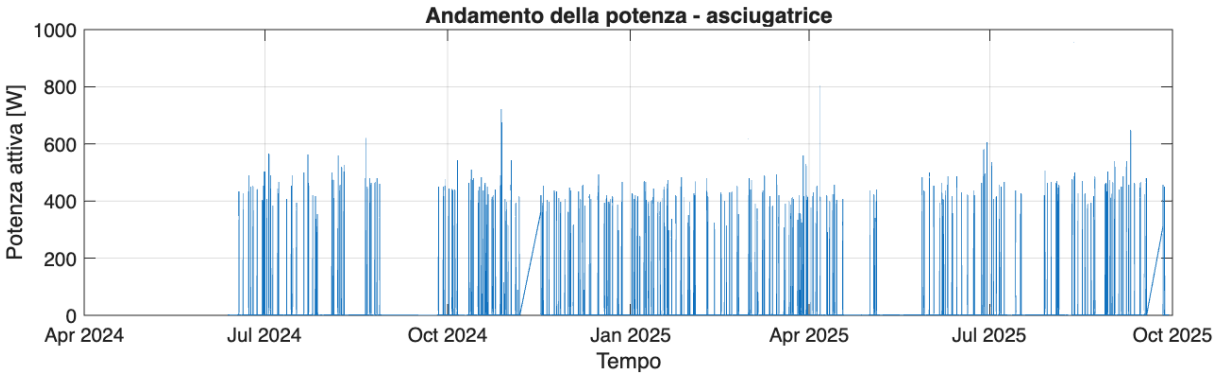


Figure 12: *Andamento temporale della potenza attiva dell'asciugatrice sull'intero periodo di osservazione.*

L'andamento temporale dell'asciugatrice evidenzia un comportamento fortemente discontinuo, caratterizzato dall'alternanza tra intervalli di basso o nullo assorbimento e periodi nei quali il dispositivo presenta livelli di potenza sensibilmente superiori. Tale andamento è coerente con la natura episodica del suo utilizzo.

La potenza media, pari a 48.9756 W, risulta sensibilmente inferiore alla potenza massima di 803 W. La differenza tra questi valori è riconducibile alla presenza, nell'intero periodo di osservazione, di numerosi intervalli caratterizzati da assorbimenti nulli o contenuti, alternati a intervalli di funzionamento a potenze maggiori.

La deviazione standard, pari a 127.4625 W, è inoltre nettamente superiore alla potenza media e conferma quantitativamente l'elevata variabilità del segnale. L'assorbimento dell'asciugatrice non può quindi essere adeguatamente descritto attraverso un singolo valore rappresentativo, ma richiede di considerare anche la distribuzione dei livelli di potenza e la loro evoluzione temporale.

I campioni caratterizzati da potenza esattamente nulla sono 34870, corrispondenti al 19.17% del totale. La loro presenza costituisce una componente significativa del dataset, pur non rappresentando la maggioranza dei campioni disponibili.

La rappresentazione sull'intero intervallo di acquisizione consente di individuare la natura intermittente del funzionamento, ma non permette di osservare chiaramente la struttura dei singoli intervalli di utilizzo. È stato pertanto considerato anche il periodo luglio–agosto 2024, coerentemente con quanto effettuato per gli altri dispositivi.

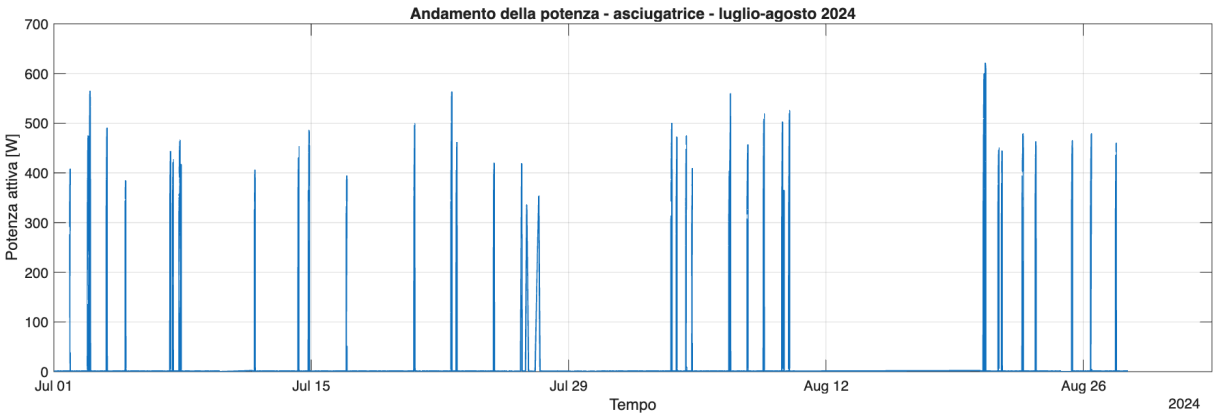


Figure 13: *Dettaglio dell'andamento temporale della potenza attiva dell'asciugatrice nei mesi di luglio e agosto 2024.*

Il dettaglio temporale rende maggiormente evidente la natura episodica del funzionamento. Gli intervalli caratterizzati da assorbimenti significativi risultano separati da periodi più o meno estesi nei quali la potenza assume valori molto bassi o nulli.

Durante gli intervalli di maggiore assorbimento si osservano frequentemente potenze dell'ordine di alcune centinaia di watt, con numerosi valori compresi approssimativamente tra 350 e 500 W. Sono inoltre presenti alcuni picchi di potenza superiori, che nel periodo rappresentato raggiungono valori dell'ordine di 600 W.

La visualizzazione su un intervallo temporale più ristretto permette quindi di distinguere con mag-

giore chiarezza i periodi di utilizzo rispetto alla rappresentazione complessiva. Essa evidenzia inoltre come il funzionamento non sia caratterizzato da un unico livello di potenza costante, ma presenti variazioni dell'assorbimento anche all'interno degli intervalli nei quali il dispositivo risulta utilizzato.



Figure 14: *Distribuzione dei valori di potenza attiva dell'asciugatrice, comprensiva dei campioni a potenza nulla.*

La distribuzione completa della potenza presenta una concentrazione nettamente dominante nelle classi di potenza più basse. Tale risultato è in parte riconducibile alla presenza dei campioni esattamente nulli, che costituiscono il 19.17% del totale, ma comprende anche numerosi campioni caratterizzati da assorbimenti ridotti ma diversi da zero.

Accanto alla regione dominante alle basse potenze è possibile osservare una seconda zona, quantitativamente molto meno rappresentata, associata a valori dell'ordine di alcune centinaia di watt. In particolare, la distribuzione mostra una concentrazione nell'intervallo approssimativamente compreso tra 350 e 450 W, coerente con i livelli di assorbimento osservabili durante gli intervalli di utilizzo nel profilo temporale.

Per distinguere l'effetto dei campioni esattamente nulli dalla presenza più generale di valori a basso assorbimento, è stata quindi analizzata anche la distribuzione ottenuta eliminando esclusivamente i campioni per i quali $P = 0$ W.

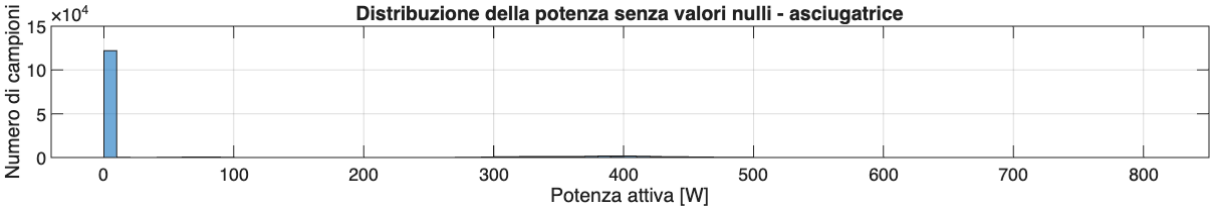


Figure 15: *Distribuzione dei valori di potenza attiva dell'asciugatrice escludendo i campioni a potenza nulla.*

L'eliminazione dei campioni esattamente nulli riduce la numerosità associata alla regione di minimo assorbimento, ma non elimina la forte concentrazione dei campioni nelle classi di potenza più basse. Ciò dimostra che tale concentrazione non è determinata esclusivamente dalla presenza di valori pari a zero: una parte rilevante delle misure non nulle è infatti caratterizzata da potenze comunque molto contenute.

Parallelamente, nella distribuzione senza valori nulli risulta ancora visibile la regione associata a potenze dell'ordine di alcune centinaia di watt, con una maggiore concentrazione intorno a 350–450 W. Il confronto tra le due rappresentazioni permette pertanto di distinguere gli intervalli di potenza nulla dai diversi livelli di assorbimento effettivamente assunti dal dispositivo.

Nel complesso, la caratterizzazione preliminare dell'asciugatrice evidenzia un comportamento intermittente e fortemente variabile, caratterizzato dalla presenza di numerosi campioni a basso assorbimento e da intervalli di funzionamento nei quali vengono raggiunte potenze sensibilmente superiori.

L'analisi preliminare non consente tuttavia di associare direttamente i differenti livelli di potenza a specifici programmi o modalità nominali dell'asciugatrice. Tale aspetto richiede infatti di passare dall'analisi dei singoli campioni alla caratterizzazione degli eventi di funzionamento, combinando successivamente informazioni temporali ed energetiche.

L'asciugatrice assume inoltre particolare interesse nelle successive analisi comportamentali, poiché il suo utilizzo può presentare una relazione temporale con quello della lavatrice. Tale eventuale relazione non viene dedotta dal solo andamento della potenza, ma viene analizzata separatamente mediante lo studio della sequenzialità tra gli eventi dei due dispositivi.

Frigorifero

Per il segnale relativo al frigorifero sono disponibili complessivamente 204670 campioni, distribuiti su 431 giorni di acquisizione, nel periodo compreso tra il 12/06/2024 e il 09/10/2025.

Le principali statistiche descrittive della potenza attiva risultano:

- Numero di campioni: 204670
- Giorni disponibili: 431
- Periodo di osservazione: dal 12/06/2024 al 09/10/2025
- Potenza minima: 0 W
- Potenza media: 45.1285 W
- Deviazione standard: 33.0828 W
- Potenza massima: 262 W
- Campioni a potenza nulla: 431, pari allo 0.21% del totale

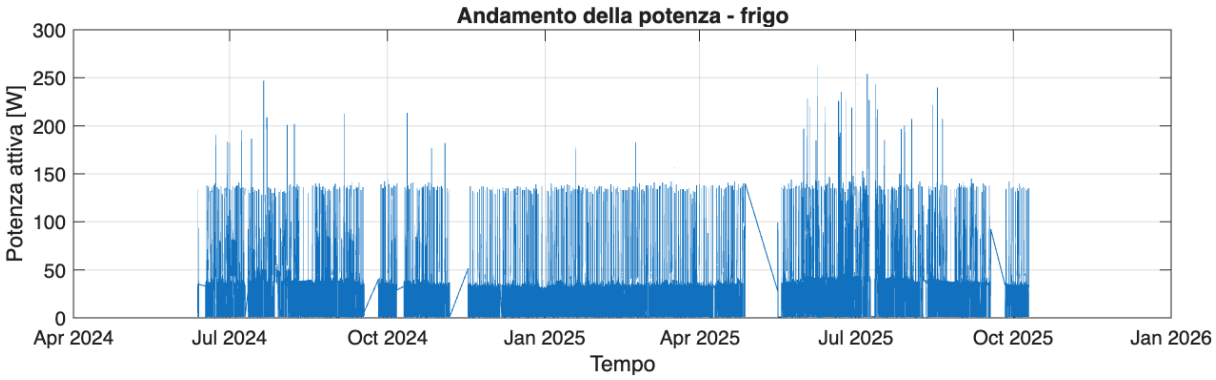


Figure 16: *Andamento temporale della potenza attiva del frigorifero sull'intero periodo di osservazione.*

Il comportamento del frigorifero differisce sostanzialmente da quello degli elettrodomestici analizzati in precedenza. Mentre lavatrice, lavastoviglie e asciugatrice sono caratterizzate da cicli di utilizzo generalmente avviati dall'utente, il frigorifero rimane normalmente alimentato in maniera continuativa e il suo assorbimento varia principalmente in funzione della regolazione automatica del sistema di refrigerazione.

La potenza media risulta pari a 45.1285 W, mentre la deviazione standard è pari a 33.0828 W. Quest'ultima assume quindi un valore significativo rispetto alla media, evidenziando una marcata variabilità dell'assorbimento anche durante il normale funzionamento del dispositivo. La potenza massima raggiunge invece 262 W, valore sensibilmente superiore alla potenza media e associato ai livelli di assorbimento più elevati osservati nel periodo di acquisizione.

Un elemento particolarmente significativo è rappresentato dalla ridotta presenza di campioni a potenza esattamente nulla. Sono stati infatti individuati solamente 431 campioni con $P = 0$ W, corrispondenti allo 0.21% del totale. A differenza degli elettrodomestici utilizzati in maniera intermittente, il frigorifero presenta quindi quasi sempre un assorbimento diverso da zero nel dataset analizzato.

La rappresentazione sull'intero periodo consente di osservare il comportamento generale del dispositivo, ma la notevole estensione temporale comprime le variazioni locali del segnale. Per evidenziare maggiormente la struttura temporale dell'assorbimento è stato quindi considerato anche il dettaglio relativo ai mesi di luglio e agosto 2024, utilizzando lo stesso intervallo temporale adottato per gli altri dispositivi.

Il dettaglio temporale permette di osservare con maggiore chiarezza l'elevata variabilità del segnale. Per una parte consistente del periodo analizzato la potenza si mantiene su livelli dell'ordine di alcune decine di watt, sui quali si sovrappongono numerosi incrementi dell'assorbimento. Sono frequentemente raggiunti valori nell'intervallo approssimativamente compreso tra 70 e 140 W, mentre più sporadicamente si osservano picchi superiori, che in alcuni casi superano i 200 W.

L'andamento osservato è coerente con la natura automatica del dispositivo: le variazioni di potenza non devono essere interpretate direttamente come azioni volontarie dell'utente, ma come differenti condizioni di funzionamento del frigorifero e del relativo sistema di regolazione. Il dettaglio mette inoltre in evidenza come la descrizione mediante il solo valore medio non sia sufficiente a rappresentare la dinamica temporale dell'assorbimento.

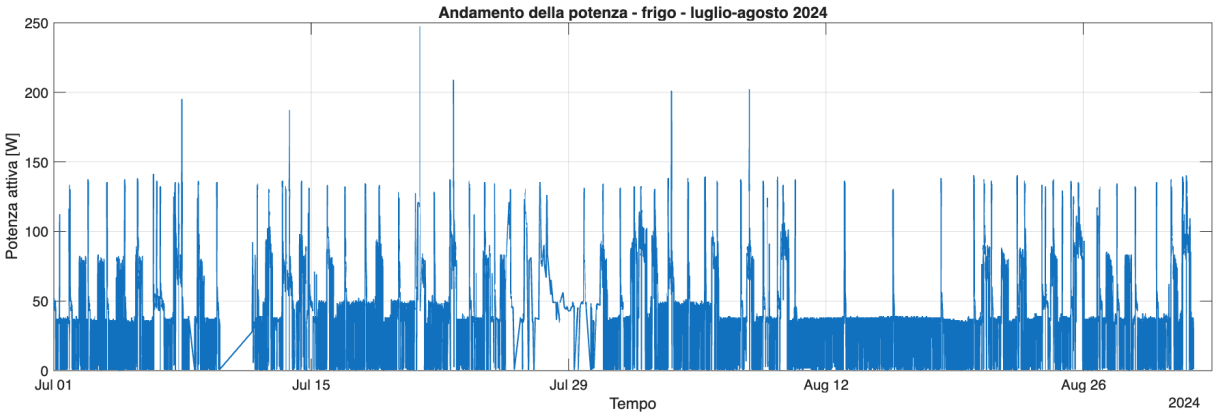


Figure 17: *Dettaglio dell'andamento temporale della potenza attiva del frigorifero nei mesi di luglio e agosto 2024.*

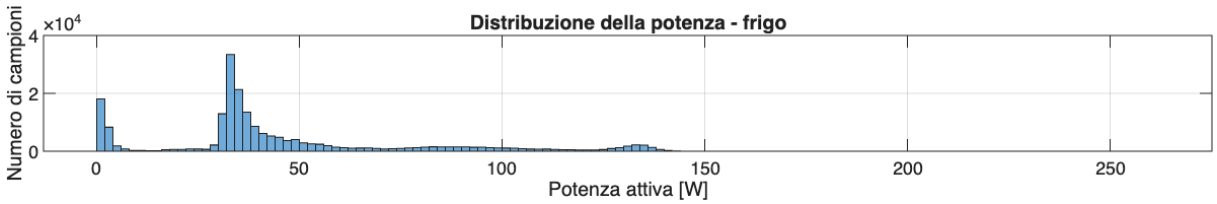


Figure 18: *Distribuzione dei valori di potenza attiva del frigorifero, comprensiva dei campioni a potenza nulla.*

La distribuzione completa della potenza presenta una struttura sensibilmente diversa rispetto a quella osservata per lavatrice e lavastoviglie. La concentrazione principale non si trova infatti in corrispondenza della potenza nulla, ma nella regione compresa approssimativamente tra 30 e 40 W.

È inoltre presente una concentrazione di campioni nelle classi più prossime allo zero, insieme a una distribuzione progressivamente più estesa verso potenze superiori. Ulteriori concentrazioni risultano osservabili intorno a 80–100 W e, in misura minore, intorno a 130–140 W. Nel complesso, l'istogramma evidenzia quindi la presenza di più livelli di assorbimento ricorrenti durante il funzionamento del dispositivo.

Per valutare separatamente l'influenza dei campioni esattamente nulli, la distribuzione è stata rappresentata anche eliminando esclusivamente i campioni per i quali $P = 0$ W.

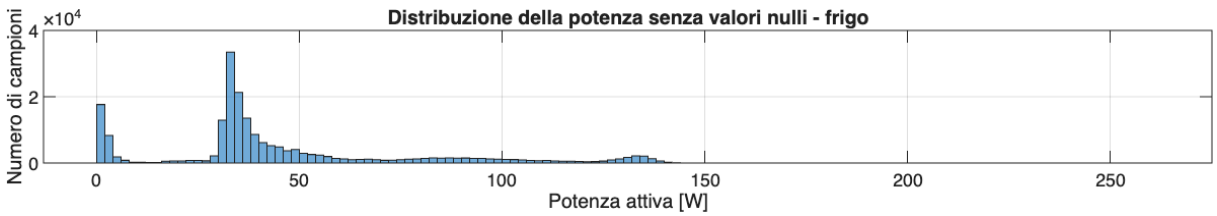


Figure 19: *Distribuzione dei valori di potenza attiva del frigorifero escludendo i campioni a potenza nulla.*

A differenza di quanto osservato per la lavastoviglie, l'eliminazione dei valori esattamente nulli produce modifiche molto limitate alla forma complessiva della distribuzione. Questo risultato è direttamente riconducibile alla ridottissima incidenza dei campioni con $P = 0$ W, che rappresentano solamente lo 0.21% dell'intero dataset.

La concentrazione principale rimane infatti localizzata nell'intervallo di circa 30–40 W e risultano ancora chiaramente visibili le ulteriori regioni associate a livelli di potenza superiori. Il confronto tra i due istogrammi mostra quindi che la struttura osservata non è determinata dalla presenza di campioni nulli, ma riflette effettivamente la distribuzione dei diversi livelli di assorbimento del frigorifero.

Questo risultato rappresenta una differenza significativa rispetto agli elettrodomestici caratterizzati da un utilizzo intermittente: nel caso del frigorifero, la distinzione tra distribuzione completa e distribuzione senza valori nulli fornisce risultati quasi equivalenti, proprio perché il dispositivo presenta quasi continuamente un assorbimento diverso da zero.

Nel complesso, la caratterizzazione preliminare conferma la natura continua, ciclica e automatica

del funzionamento del frigorifero. Le variazioni di assorbimento osservate devono pertanto essere interpretate principalmente come conseguenza delle differenti condizioni operative e della regolazione automatica del dispositivo, piuttosto che come diretta espressione delle abitudini temporali dell'utente.

Questa distinzione risulta particolarmente importante nelle successive analisi basate sugli eventi: le attivazioni individuate sul segnale del frigorifero non rappresentano infatti necessariamente azioni volontarie dell'utente, ma intervalli di funzionamento ricostruiti a partire dall'andamento della potenza.

HVAC1

Per il segnale relativo al primo sistema HVAC sono disponibili complessivamente 130395 campioni, distribuiti su 222 giorni di acquisizione, nel periodo compreso tra il 12/06/2024 e il 09/10/2025.

Le principali statistiche descrittive della potenza attiva risultano:

- Numero di campioni: 130395
- Giorni disponibili: 222
- Periodo di osservazione: dal 12/06/2024 al 09/10/2025
- Potenza minima: 0 W
- Potenza media: 93.0315 W
- Deviazione standard: 271.9855 W
- Potenza massima: 2433 W
- Campioni a potenza nulla: 7406, pari al 5.68% del totale

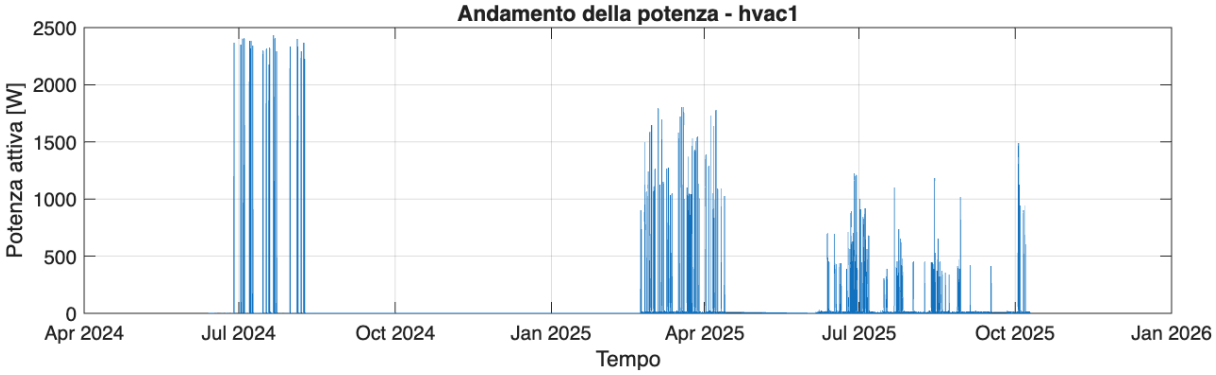


Figure 20: *Andamento temporale della potenza attiva di HVAC1 sull'intero periodo di osservazione.*

L'andamento temporale di HVAC1 mostra una distribuzione dell'assorbimento fortemente non uniforme nel periodo di osservazione. Sono infatti riconoscibili intervalli caratterizzati da un utilizzo significativo del sistema, alternati ad altri nei quali la potenza assorbita rimane su livelli molto contenuti.

In particolare, nel periodo estivo del 2024 sono presenti intervalli nei quali vengono raggiunti ripetutamente valori prossimi alla potenza massima osservata. In altri periodi, come nei primi mesi del 2025 e durante parte dell'estate successiva, il dispositivo presenta invece livelli di assorbimento differenti e maggiormente variabili.

La potenza media, pari a 93.0315 W, risulta notevolmente inferiore rispetto alla potenza massima di 2433 W. La deviazione standard, pari a 271.9855 W, è inoltre quasi tre volte superiore al valore medio, evidenziando quantitativamente l'elevata dispersione dei valori di potenza nel periodo analizzato.

I campioni caratterizzati da potenza esattamente nulla sono 7406, corrispondenti al 5.68% del totale. Tale percentuale risulta relativamente contenuta e indica che la forte presenza di valori a basso assorbimento non è riconducibile esclusivamente ai campioni per i quali la potenza misurata è esattamente nulla.

Poiché la rappresentazione sull'intero periodo non permette di distinguere chiaramente la struttura temporale dei singoli intervalli di utilizzo, è stato considerato anche un intervallo temporale più ristretto, relativo ai mesi di luglio e agosto 2024. Tale finestra è stata scelta anche per mantenere un riferimento temporale comune nella caratterizzazione preliminare dei diversi dispositivi monitorati.

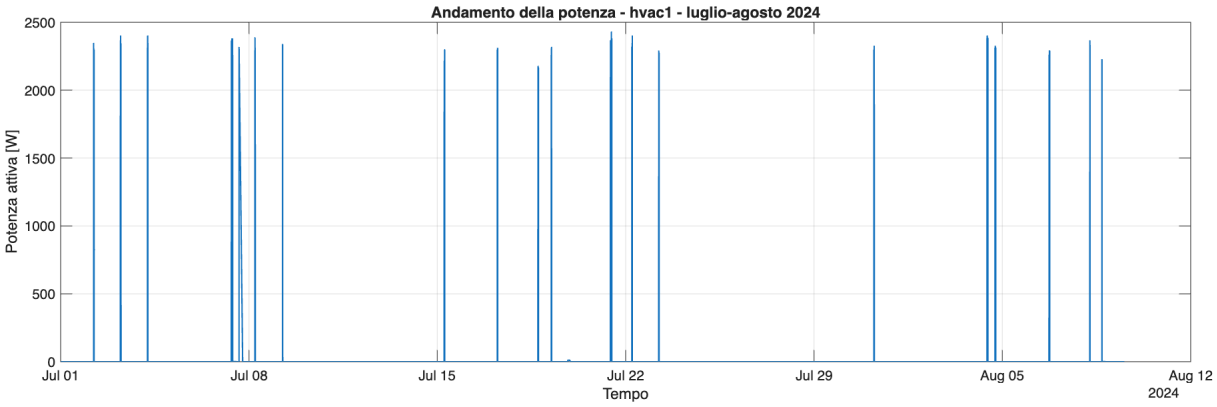


Figure 21: *Dettaglio dell'andamento temporale della potenza attiva di HVAC1 nei mesi di luglio e agosto 2024.*

Il dettaglio temporale evidenzia con maggiore chiarezza la natura intermittente dell'assorbimento di HVAC1. Nel periodo rappresentato sono presenti numerosi intervalli caratterizzati da potenze molto contenute, alternati ad attivazioni durante le quali vengono raggiunti rapidamente valori superiori ai 2 kW.

Le attivazioni non risultano distribuite uniformemente nel tempo: si osservano giorni caratterizzati dalla presenza di uno o più intervalli di elevato assorbimento e altri nei quali tali intervalli non sono presenti. La visualizzazione su scala temporale ridotta permette quindi di distinguere più chiaramente gli episodi di maggiore assorbimento, che nella rappresentazione dell'intero periodo risultano fortemente compressi.

È tuttavia importante non associare direttamente tali variazioni a specifiche azioni dell'utente. A differenza degli elettrodomestici caratterizzati da cicli avviati direttamente dall'utilizzatore, il comportamento di un sistema HVAC può dipendere sia dalle impostazioni selezionate sia dalla regolazione automatica del sistema e dalle condizioni ambientali.

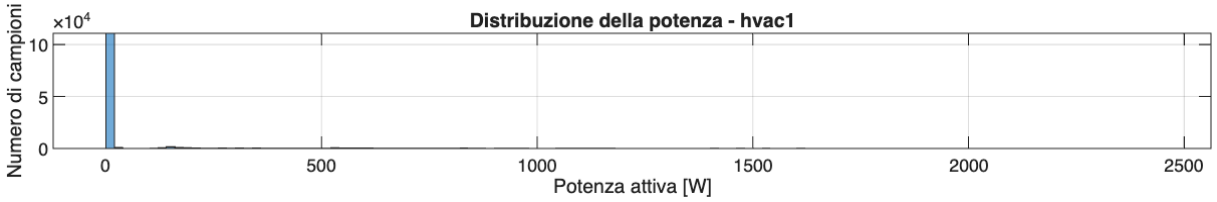


Figure 22: *Distribuzione dei valori di potenza attiva di HVAC1, comprensiva dei campioni a potenza nulla.*

La distribuzione completa della potenza è caratterizzata da una concentrazione nettamente dominante nelle classi prossime allo zero. Sono tuttavia presenti, con frequenze decisamente inferiori, campioni distribuiti su un intervallo di potenza molto ampio, che si estende fino a valori superiori ai 2 kW.

La forte differenza di numerosità tra le classi a basso assorbimento e quelle associate alle potenze maggiori rende queste ultime poco evidenti nella scala dell'istogramma. La loro presenza è tuttavia coerente con quanto osservato nell'andamento temporale, nel quale compaiono intervalli caratterizzati da assorbimenti elevati.

Per verificare quanto la concentrazione alle basse potenze dipenda dai campioni esattamente nulli, è stata considerata anche la distribuzione ottenuta eliminando esclusivamente i campioni per i quali $P = 0$ W.

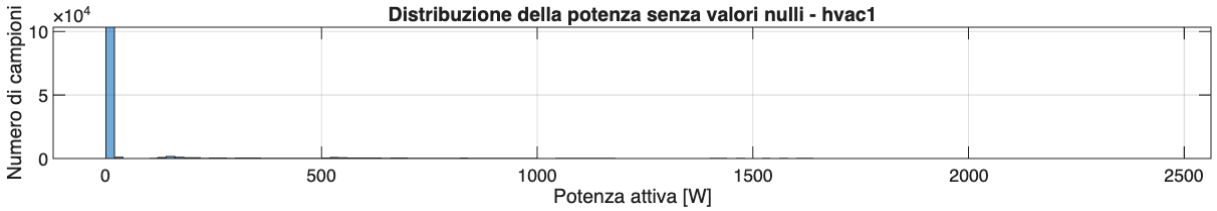


Figure 23: *Distribuzione dei valori di potenza attiva di HVAC1 escludendo i campioni a potenza nulla.*

L'eliminazione dei campioni a potenza esattamente nulla non modifica in maniera sostanziale la forma complessiva della distribuzione. La classe associata alle potenze più basse rimane infatti nettamente dominante anche dopo la rimozione dei 7406 campioni nulli.

Questo risultato è particolarmente significativo, poiché dimostra che la concentrazione osservata in prossimità dello zero non è dovuta semplicemente alla presenza di periodi nei quali $P = 0$ W. Una parte consistente delle misure è invece caratterizzata da valori di potenza positivi ma molto contenuti. Parallelamente rimangono presenti, sebbene con numerosità nettamente inferiore, diversi livelli di assorbimento distribuiti fino alle potenze più elevate.

Il confronto tra i due istogrammi permette quindi di distinguere la presenza dei valori esattamente nulli dalla più generale concentrazione del segnale nelle basse potenze. Quest'ultima costituisce una caratteristica effettiva del profilo misurato e non un semplice effetto della numerosità dei campioni nulli.

Nel complesso, la caratterizzazione preliminare di HVAC1 evidenzia un profilo fortemente variabile, nel quale lunghi intervalli caratterizzati da assorbimenti contenuti sono accompagnati da episodi di funzionamento a potenze sensibilmente superiori. La notevole differenza tra potenza media e massima, insieme all'elevata deviazione standard e alla forma delle distribuzioni, conferma che il comportamento del sistema non può essere adeguatamente descritto attraverso il solo valore medio.

L'interpretazione del segnale richiede inoltre particolare cautela: il funzionamento di HVAC1 può dipendere dalle condizioni climatiche, dalla temperatura desiderata, dalle impostazioni selezionate e dalla regolazione automatica del sistema. In assenza di informazioni relative a tali variabili, i diversi livelli di potenza osservati non possono essere associati con certezza a specifiche modalità operative o ad azioni volontarie dell'utente.

HVAC2

Per il segnale relativo al secondo sistema HVAC sono disponibili complessivamente 128309 campioni, distribuiti su 222 giorni di acquisizione, nel periodo compreso tra il 12/06/2024 e il 09/10/2025.

Le principali statistiche descrittive della potenza attiva risultano:

- Numero di campioni: 128309
- Giorni disponibili: 222
- Periodo di osservazione: dal 12/06/2024 al 09/10/2025
- Potenza minima: 0 W
- Potenza media: 67.6859 W
- Deviazione standard: 204.0621 W
- Potenza massima: 1640 W
- Campioni a potenza nulla: 7407, pari al 5.77% del totale

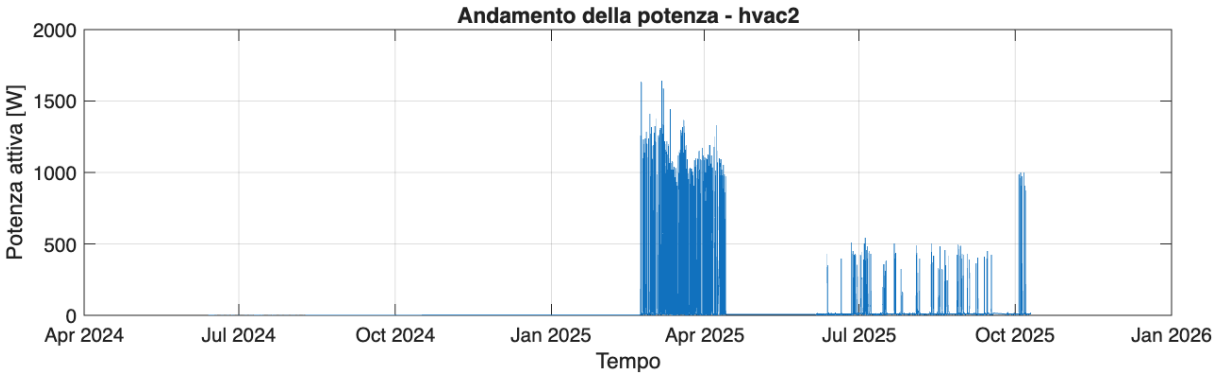


Figure 24: *Andamento temporale della potenza attiva di HVAC2 sull'intero periodo di osservazione.*

L'andamento temporale di HVAC2 evidenzia una distribuzione dell'assorbimento fortemente non uniforme nel periodo di osservazione. A lunghi intervalli caratterizzati da livelli di potenza molto contenuti si alternano periodi nei quali il sistema presenta un'attività significativamente maggiore.

In particolare, la regione di maggiore attività è osservabile nei primi mesi del 2025, approssimativamente tra febbraio e aprile, durante i quali il segnale raggiunge frequentemente valori dell'ordine di 1 kW e presenta picchi superiori. Successivamente, durante l'estate del 2025, sono osservabili ulteriori intervalli di funzionamento, generalmente caratterizzati da livelli di potenza inferiori. Un ulteriore intervallo di attività è infine visibile in prossimità di ottobre 2025.

La potenza media, pari a 67.6859 W, risulta notevolmente inferiore rispetto alla potenza massima di 1640 W. Anche la deviazione standard, pari a 204.0621 W, risulta circa tre volte superiore alla potenza media, confermando quantitativamente la forte variabilità del segnale nel periodo analizzato.

I campioni caratterizzati da potenza esattamente nulla sono 7407, corrispondenti al 5.77% del totale. Come già osservato per HVAC1, tale percentuale è relativamente contenuta rispetto alla forte concentrazione dei campioni nelle regioni di potenza più basse. La presenza di valori ridotti non può pertanto essere ricondotta esclusivamente agli intervalli nei quali la potenza misurata è esattamente nulla.

Per mantenere un riferimento temporale comune nella caratterizzazione preliminare dei dispositivi, è stato considerato anche per HVAC2 l'intervallo relativo ai mesi di luglio e agosto 2024.

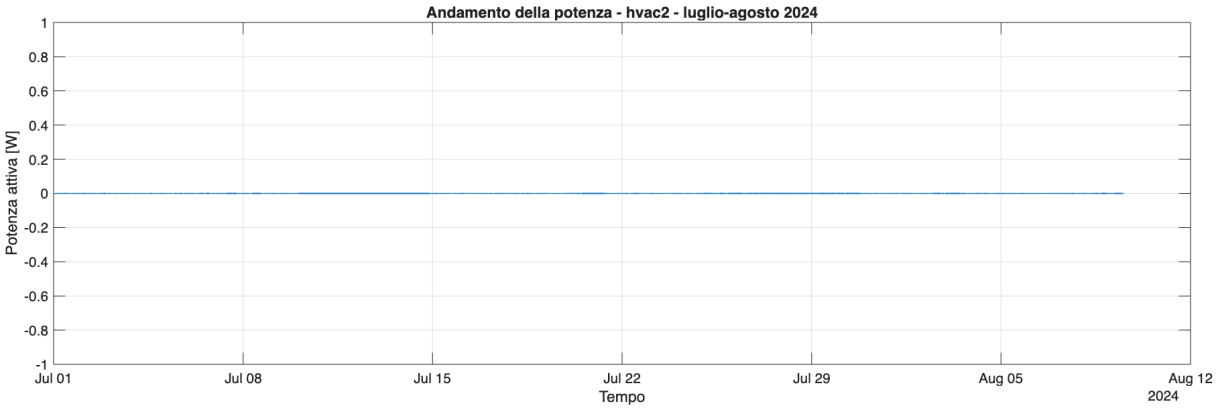


Figure 25: *Dettaglio dell'andamento temporale della potenza attiva di HVAC2 nei mesi di luglio e agosto 2024.*

A differenza di quanto osservato per HVAC1 nella medesima finestra temporale, durante luglio e agosto 2024 HVAC2 presenta un assorbimento praticamente nullo per l'intero intervallo rappresentato. Il dettaglio temporale non evidenzia quindi episodi significativi di funzionamento del sistema in questo periodo.

Tale risultato costituisce di per sé un'informazione rilevante nella caratterizzazione dei due sistemi HVAC. Pur essendo entrambi monitorati, HVAC1 e HVAC2 non presentano infatti lo stesso comportamento temporale: nel periodo estivo del 2024, caratterizzato da diverse attivazioni di HVAC1, il secondo sistema rimane sostanzialmente inattivo.

Non essendo disponibili informazioni relative alla collocazione dei due sistemi nell'abitazione, alle temperature impostate, ai set-point o alle modalità operative selezionate, non è tuttavia possibile stabilire la causa di tale differenza. Il confronto deve pertanto essere limitato alle caratteristiche direttamente osservabili nei segnali di potenza.



Figure 26: *Distribuzione dei valori di potenza attiva di HVAC2, comprensiva dei campioni a potenza nulla.*

La distribuzione completa dei valori di potenza mostra una concentrazione nettamente dominante nelle classi prossime allo zero. Al di fuori di questa regione sono presenti campioni distribuiti su un intervallo molto ampio di potenza, sebbene con frequenze nettamente inferiori rispetto alla classe dominante.

La scala dell'istogramma, determinata dall'elevata numerosità dei campioni a basso assorbimento, rende poco evidenti le classi associate alle potenze maggiori. L'andamento temporale mostra tuttavia

chiaramente che durante i periodi di maggiore attività il sistema raggiunge valori dell'ordine di diverse centinaia di watt e, in alcuni casi, superiori a 1 kW, fino alla potenza massima osservata di 1640 W.

Per valutare l'influenza dei campioni esattamente nulli sulla forma della distribuzione è stata quindi considerata anche la distribuzione ottenuta eliminando esclusivamente i campioni caratterizzati da $P = 0$ W.



Figure 27: *Distribuzione dei valori di potenza attiva di HVAC2 escludendo i campioni a potenza nulla.*

Anche dopo l'eliminazione dei campioni esattamente nulli, la distribuzione rimane fortemente concentrata nelle classi di potenza più basse. La rimozione dei 7407 campioni con $P = 0$ W non determina infatti una modifica sostanziale della forma complessiva dell'istogramma.

Questo comportamento mostra che l'elevata numerosità osservata in prossimità dello zero non è dovuta esclusivamente agli intervalli caratterizzati da assorbimento esattamente nullo. Una parte consistente dei campioni presenta invece una potenza positiva ma molto contenuta. Parallelamente, sono presenti livelli di assorbimento significativamente superiori, che risultano però numericamente molto meno frequenti e sono quindi difficilmente distinguibili nella scala adottata per l'istogramma.

Il confronto tra le distribuzioni con e senza valori nulli conferma quindi che la concentrazione nelle basse potenze costituisce una caratteristica effettiva del segnale misurato e non è semplicemente determinata dalla presenza dei campioni con $P = 0$ W.

Nel complesso, HVAC2 presenta un profilo caratterizzato da una marcata variabilità sia temporale sia in termini di potenza assorbita. La forte differenza tra potenza media e massima e il valore della deviazione standard confermano che il solo valore medio non è sufficiente a descriverne adeguatamente il comportamento.

Il confronto preliminare con HVAC1 evidenzia inoltre differenze rilevanti nella distribuzione temporale dell'attività dei due sistemi. Tali differenze possono essere descritte quantitativamente attraverso i segnali disponibili, ma non possono essere associate con certezza a specifiche modalità di utilizzo o condizioni ambientali in assenza di ulteriori informazioni relative al contesto di funzionamento.

Segnale aggregato

Per il segnale aggregato sono disponibili complessivamente 1246784 campioni, distribuiti su 507 giorni di acquisizione, nel periodo compreso tra il 17/06/2024 e il 05/04/2026.

Le principali statistiche descrittive della potenza attiva risultano:

- Numero di campioni: 1246784
- Giorni disponibili: 507
- Periodo di osservazione: dal 17/06/2024 al 05/04/2026
- Potenza minima: 129 W
- Potenza media: 1255.5276 W
- Deviazione standard: 961.1783 W
- Potenza massima: 7689 W
- Campioni a potenza nulla: 0, pari allo 0.00% del totale

Il segnale aggregato presenta una struttura sensibilmente più complessa rispetto ai profili dei singoli dispositivi, in quanto rappresenta la potenza complessivamente assorbita dall'abitazione. Le variazioni osservate derivano pertanto dalla sovrapposizione dei contributi dei diversi carichi attivi in ciascun istante, comprendendo sia gli elettrodomestici monitorati individualmente sia gli ulteriori carichi presenti nell'abitazione.

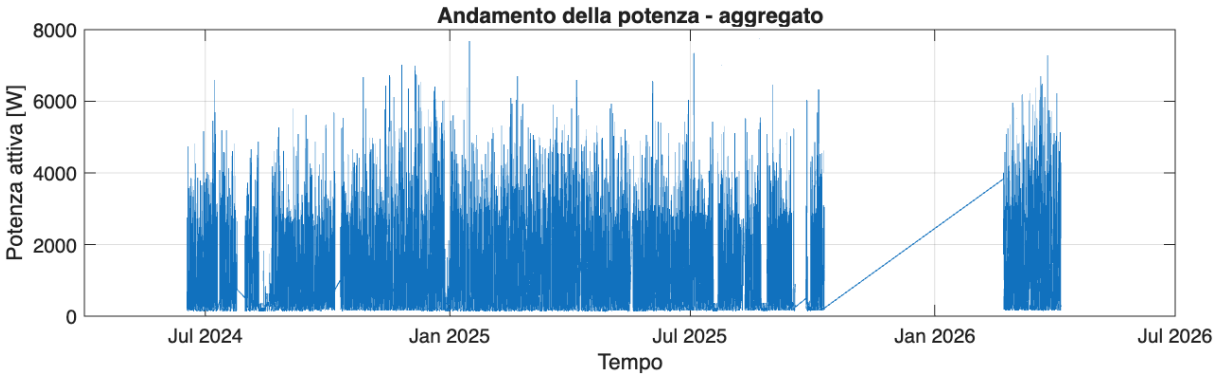


Figure 28: *Andamento temporale della potenza attiva del segnale aggregato sull'intero periodo di osservazione.*

La potenza media, pari a 1255.5276 W, è accompagnata da una deviazione standard di 961.1783 W, indicativa dell'elevata variabilità del consumo complessivo. Nel corso del periodo di osservazione vengono infatti raggiunti valori di potenza molto differenti, fino a un massimo di 7689 W.

Un aspetto che distingue nettamente il segnale aggregato dai segnali dei singoli dispositivi è l'assenza di campioni a potenza nulla. Il valore minimo osservato è infatti pari a 129 W e nessuno dei 1246784 campioni presenta $P = 0$ W. Ciò indica la presenza, nei periodi effettivamente monitorati, di un assorbimento elettrico complessivo sempre diverso da zero, coerentemente con la presenza nell'abitazione di carichi che possono rimanere continuamente alimentati o presentare consumi di base.

L'andamento sull'intero periodo consente di osservare la notevole variabilità del consumo, ma la densità dei campioni rende difficile distinguere la struttura temporale delle singole variazioni. Per questo motivo, analogamente a quanto effettuato per i singoli dispositivi, è stato considerato il dettaglio relativo ai mesi di luglio e agosto 2024.

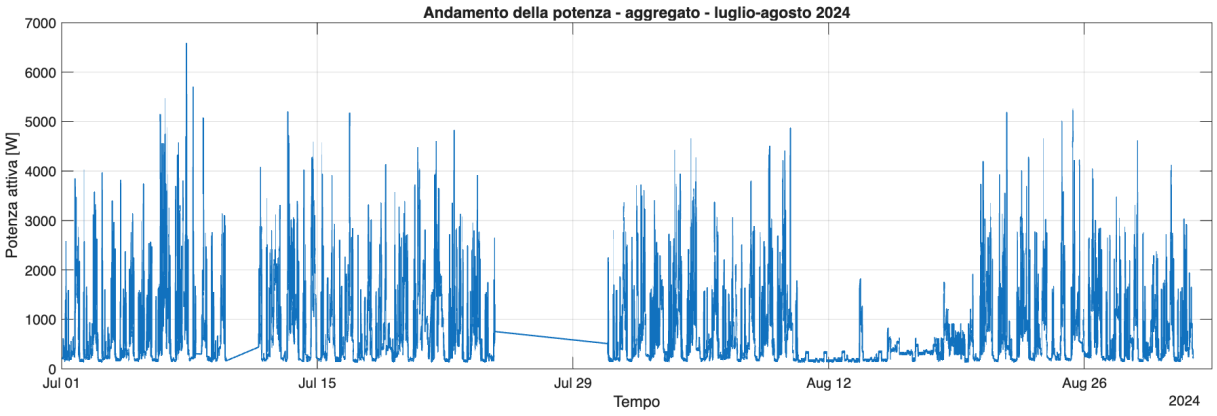


Figure 29: *Dettaglio dell'andamento temporale della potenza attiva del segnale aggregato nei mesi di luglio e agosto 2024.*

Il dettaglio temporale permette di osservare con maggiore chiarezza la continua variabilità della potenza complessivamente assorbita dall'abitazione. A un livello di consumo di base dell'ordine di alcune centinaia di watt si sovrappongono numerosi incrementi di potenza, con picchi che raggiungono diversi kilowatt.

Rispetto ai segnali dei singoli dispositivi, il profilo aggregato non presenta quindi una semplice successione di intervalli di attivazione e inattività riconducibili a un unico carico. La potenza misurata in ogni istante è invece il risultato della combinazione dei diversi dispositivi attivi contemporaneamente, ai quali si aggiungono i carichi non monitorati individualmente.

Nel dettaglio sono inoltre visibili alcuni intervalli nei quali il segnale presenta una differente continuità temporale. Tali regioni devono essere interpretate tenendo conto della disponibilità effettiva dei dati e non necessariamente come variazioni reali e continue del consumo dell'abitazione.

La distribuzione dei valori di potenza presenta una struttura marcatamente multimodale. Non si osserva infatti un'unica regione dominante, ma diverse concentrazioni distribuite su livelli crescenti di potenza. La maggiore numerosità si osserva nelle regioni di potenza più basse, mentre all'aumentare dell'assorbimento la frequenza dei campioni tende progressivamente a diminuire.

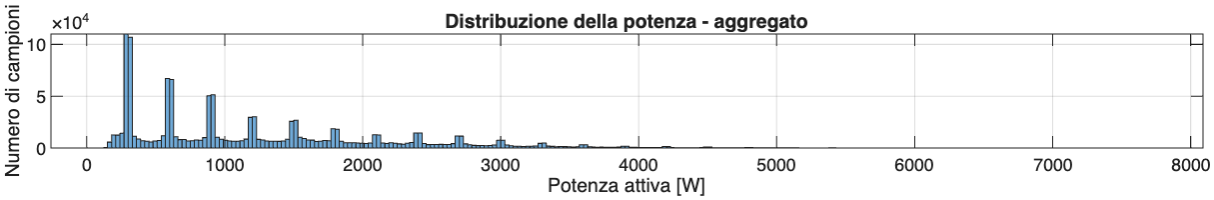


Figure 30: *Distribuzione dei valori di potenza attiva del segnale aggregato.*

Sono tuttavia chiaramente distinguibili più massimi locali, indicativi della frequente permanenza del consumo complessivo in differenti intervalli di potenza. Tali concentrazioni non devono essere associate direttamente a specifici elettrodomestici, poiché ciascun valore del segnale aggregato può derivare dalla combinazione simultanea di più carichi.

La distribuzione presenta inoltre una coda estesa verso le potenze più elevate. Sebbene tali valori risultino meno frequenti, il segnale raggiunge in alcuni istanti diversi kilowatt, fino al massimo osservato di 7689 W. Questa ampia dispersione è coerente con il valore elevato della deviazione standard e con la sovrapposizione di molteplici contributi di consumo.

Per uniformità con l'analisi condotta sui singoli dispositivi, è stata considerata anche la distribuzione ottenuta escludendo gli eventuali campioni caratterizzati da $P = 0$ W.

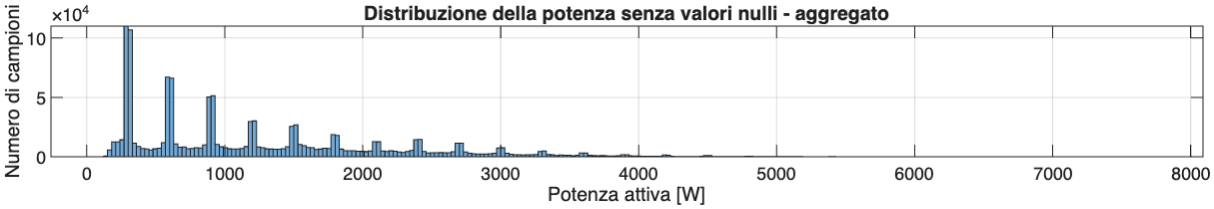


Figure 31: *Distribuzione dei valori di potenza attiva del segnale aggregato dopo l'esclusione degli eventuali campioni a potenza nulla.*

Nel caso del segnale aggregato, i due istogrammi risultano coincidenti. Questo risultato è una conseguenza diretta dell'assenza di campioni a potenza nulla: il valore minimo registrato è infatti pari a 129 W e l'operazione di esclusione dei campioni con $P = 0$ W non elimina alcun elemento dal dataset.

A differenza di quanto osservato per alcuni dei singoli elettrodomestici, il confronto tra le due distribuzioni non determina quindi alcuna variazione né nella numerosità delle classi né nella forma dell'istogramma. Questo conferma ulteriormente che, durante gli intervalli per i quali è disponibile la misura aggregata, l'abitazione presenta sempre un assorbimento complessivo diverso da zero.

La disponibilità simultanea del segnale aggregato e delle misure relative ai singoli carichi rappresenta un elemento particolarmente utile del dataset. Confrontando la potenza complessivamente assorbita con la somma delle potenze attribuite ai dispositivi monitorati è infatti possibile stimare, nelle successive elaborazioni, la componente di potenza non monitorata, ovvero la parte del consumo domestico non direttamente riconducibile agli elettrodomestici per i quali è disponibile una misura separata.

Nel complesso, la caratterizzazione preliminare del segnale aggregato evidenzia quindi un profilo di consumo fortemente variabile, caratterizzato da una distribuzione multimodale, da un'ampia escursione dei valori di potenza e dall'assenza di campioni nulli. Queste caratteristiche confermano che il solo valore medio non è sufficiente a descrivere il consumo complessivo dell'abitazione e costituiscono il punto di partenza per la successiva analisi della componente di potenza non monitorata.

4.1.2 Abitudini temporali di utilizzo

Al fine di caratterizzare le abitudini di utilizzo dell'utente, è stata analizzata la distribuzione delle attivazioni dei diversi elettrodomestici nelle 24 ore della giornata. Per ciascun evento individuato è stato considerato l'orario di inizio e le attivazioni sono state successivamente raggruppate in fasce orarie di un'ora.

Questa rappresentazione consente di evidenziare eventuali fasce della giornata nelle quali l'utilizzo di uno specifico elettrodomestico risulta più frequente, fornendo quindi una prima indicazione sulle abitudini giornaliere dell'utente.

Lavatrice

La distribuzione oraria delle attivazioni della lavatrice evidenzia un utilizzo prevalentemente concentrato nelle ore diurne e serali, mentre durante la notte il numero di eventi risulta molto ridotto.

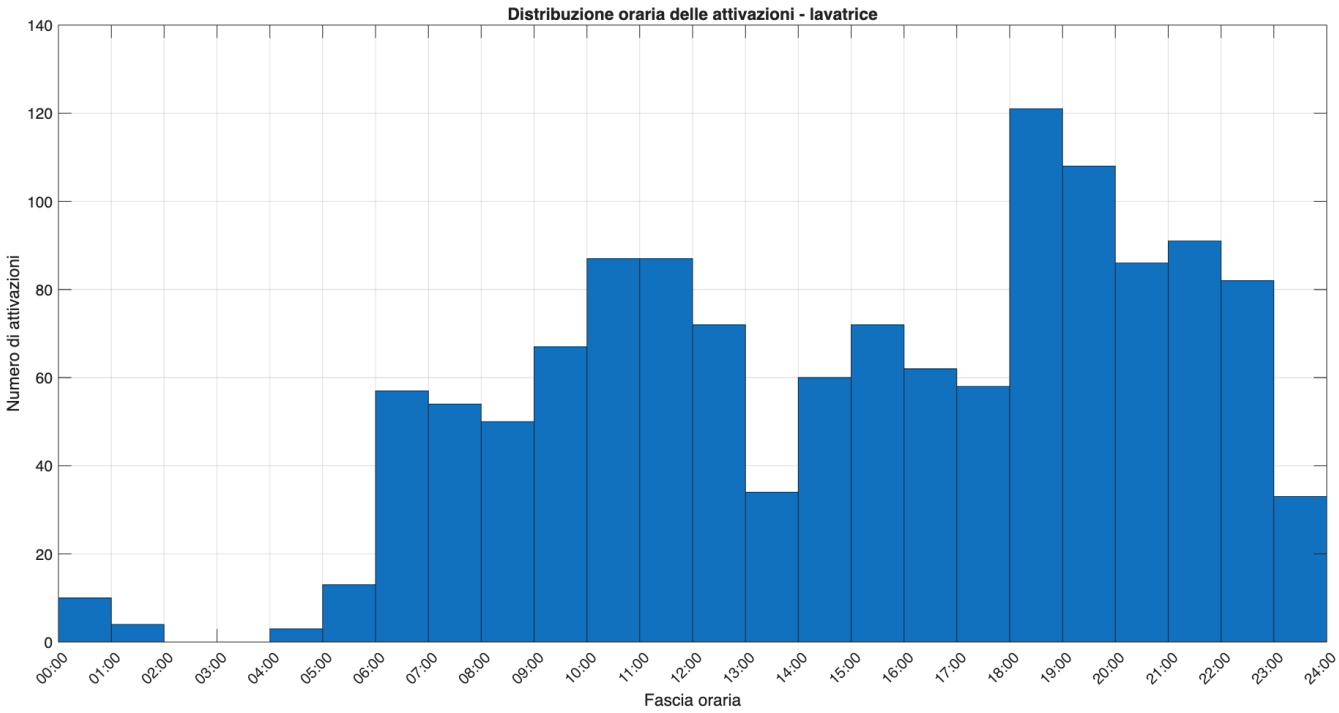


Figure 32: *Distribuzione oraria delle attivazioni della lavatrice.*

Nelle prime ore della giornata, in particolare tra le 00:00 e le 05:00, le attivazioni risultano poco frequenti o quasi assenti. A partire dalle ore mattutine il numero di eventi aumenta progressivamente, con una prima concentrazione significativa tra circa le 09:00 e le 13:00.

La fascia caratterizzata dalla maggiore frequenza di attivazione è tuttavia quella serale. Il valore massimo si osserva tra le 18:00 e le 19:00, seguito da un numero ancora elevato di attivazioni nelle ore immediatamente successive. Complessivamente, l'intervallo compreso tra le 18:00 e le 23:00 rappresenta una delle principali fasce di utilizzo della lavatrice.

Si osserva pertanto una distribuzione non uniforme delle attivazioni, caratterizzata da una ridotta attività nelle ore notturne e da una maggiore concentrazione durante la giornata e, soprattutto, nelle ore serali. Tale andamento suggerisce la presenza di abitudini temporali ricorrenti nell'utilizzo del dispositivo.

Lavastoviglie

La distribuzione oraria delle attivazioni della lavastoviglie evidenzia una marcata dipendenza dell'utilizzo dalla fascia oraria, con una forte concentrazione degli eventi nelle ore pomeridiane e soprattutto serali.

Durante le ore notturne e nella prima parte della mattinata il numero di attivazioni risulta generalmente molto contenuto. Una prima crescita significativa si osserva a partire dalle prime ore del pomeriggio, con una concentrazione degli eventi particolarmente evidente nelle fasce comprese tra le 14:00 e le 17:00.

La maggiore frequenza di attivazione si verifica tuttavia nelle ore serali. A partire dalle 20:00 il numero di eventi aumenta rapidamente, raggiungendo i valori massimi nelle fasce 21:00–22:00 e 22:00–23:00. Anche nell'intervallo 23:00–24:00 il numero di attivazioni rimane elevato, sebbene inferiore rispetto alle due fasce precedenti.

La distribuzione evidenzia quindi due principali periodi di maggiore attività, uno pomeridiano e uno serale, con quest'ultimo nettamente predominante. Tale andamento risulta compatibile con un utilizzo della lavastoviglie più frequente in prossimità o successivamente ai principali pasti della giornata, pur non essendo disponibili informazioni dirette sugli orari effettivi dei pasti o sulle abitudini specifiche degli occupanti.

È inoltre opportuno ricordare che le attivazioni considerate corrispondono agli eventi di funzionamento definitivi ricostruiti mediante la procedura di affinamento descritta precedentemente. Gli eventi non devono quindi essere necessariamente interpretati come singoli programmi completi di lavaggio, ma come intervalli di funzionamento individuati a partire dal profilo di potenza.

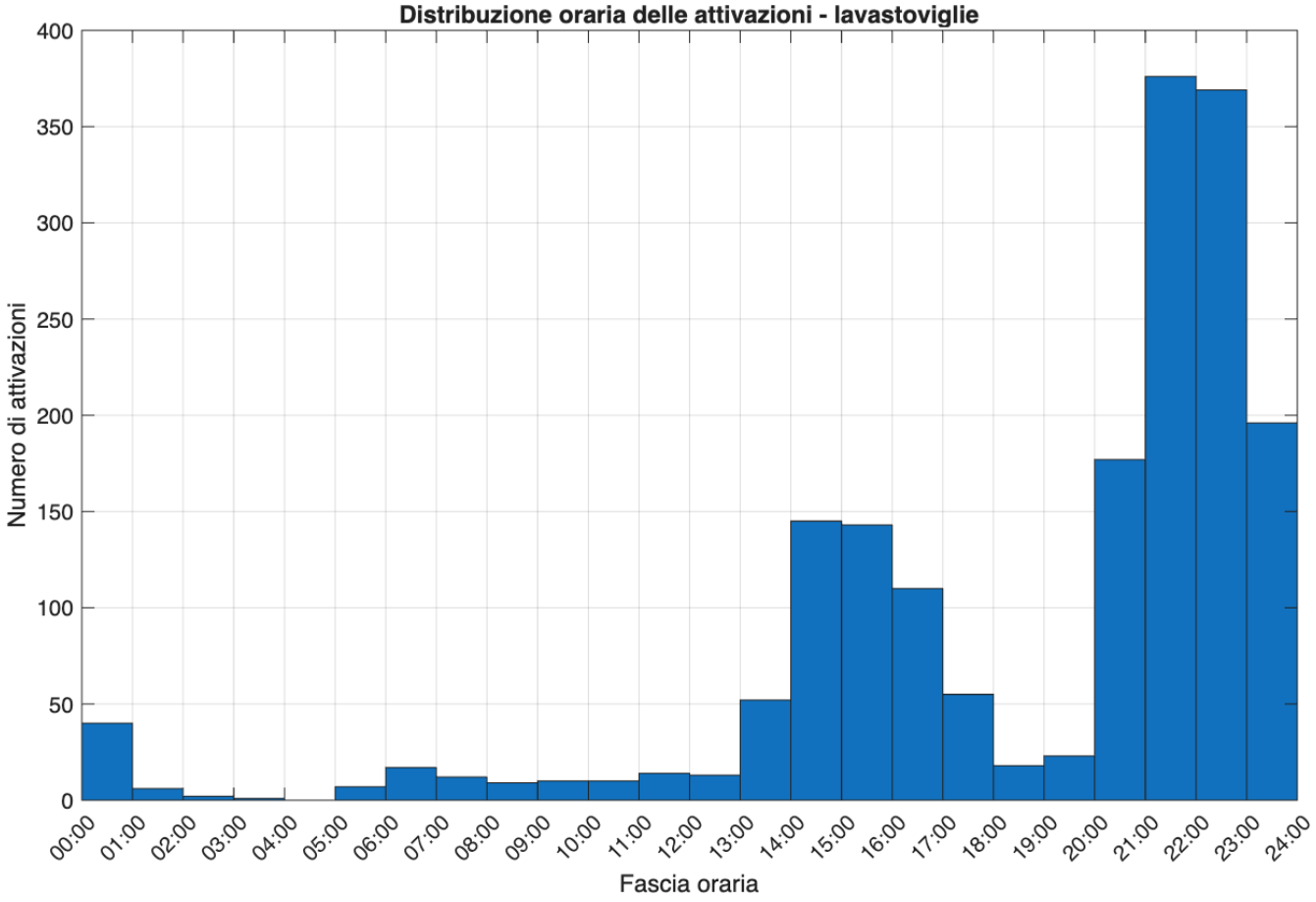


Figure 33: *Distribuzione oraria delle attivazioni della lavastoviglie.*

Asciugatrice

La distribuzione oraria delle attivazioni dell'asciugatrice mostra un utilizzo distribuito su buona parte della giornata, ma con una progressiva maggiore concentrazione degli eventi nelle ore pomeridiane e soprattutto serali.

Durante le ore notturne il numero di attivazioni risulta generalmente molto contenuto, raggiungendo valori minimi nelle fasce comprese tra le 02:00 e le 05:00. A partire dalle prime ore del mattino si osserva invece un aumento della frequenza di utilizzo, con una prima concentrazione di eventi intorno alle 06:00–08:00.

Nel corso della giornata le attivazioni risultano distribuite in maniera relativamente regolare, pur mostrando una tendenza alla crescita nelle ore pomeridiane. Tale andamento diventa più evidente a partire dalle 20:00, quando il numero di eventi aumenta progressivamente.

La maggiore concentrazione si osserva nelle ultime ore della giornata, con un massimo particolarmente evidente nella fascia 22:00–23:00. Anche nell'intervallo 23:00–24:00 il numero di attivazioni rimane elevato, sebbene inferiore rispetto alla fascia precedente.

Nel complesso, la distribuzione suggerisce quindi un utilizzo dell'asciugatrice possibile durante diverse fasce della giornata, ma con una chiara preferenza per le ore serali. Questo comportamento potrebbe essere compatibile con l'organizzazione delle attività domestiche e, in particolare, con l'utilizzo dell'asciugatrice successivamente ad attività di lavaggio svolte nel corso della giornata. Quest'ultima interpretazione deve tuttavia essere verificata mediante la successiva analisi delle sequenze temporali tra lavatrice e asciugatrice.

È inoltre opportuno ricordare che le attivazioni considerate corrispondono agli eventi di funzionamento definitivi ricostruiti mediante la procedura di affinamento descritta precedentemente. Gli eventi non devono quindi essere necessariamente interpretati come singoli programmi completi di asciugatura, ma come intervalli di funzionamento individuati a partire dal profilo di potenza.

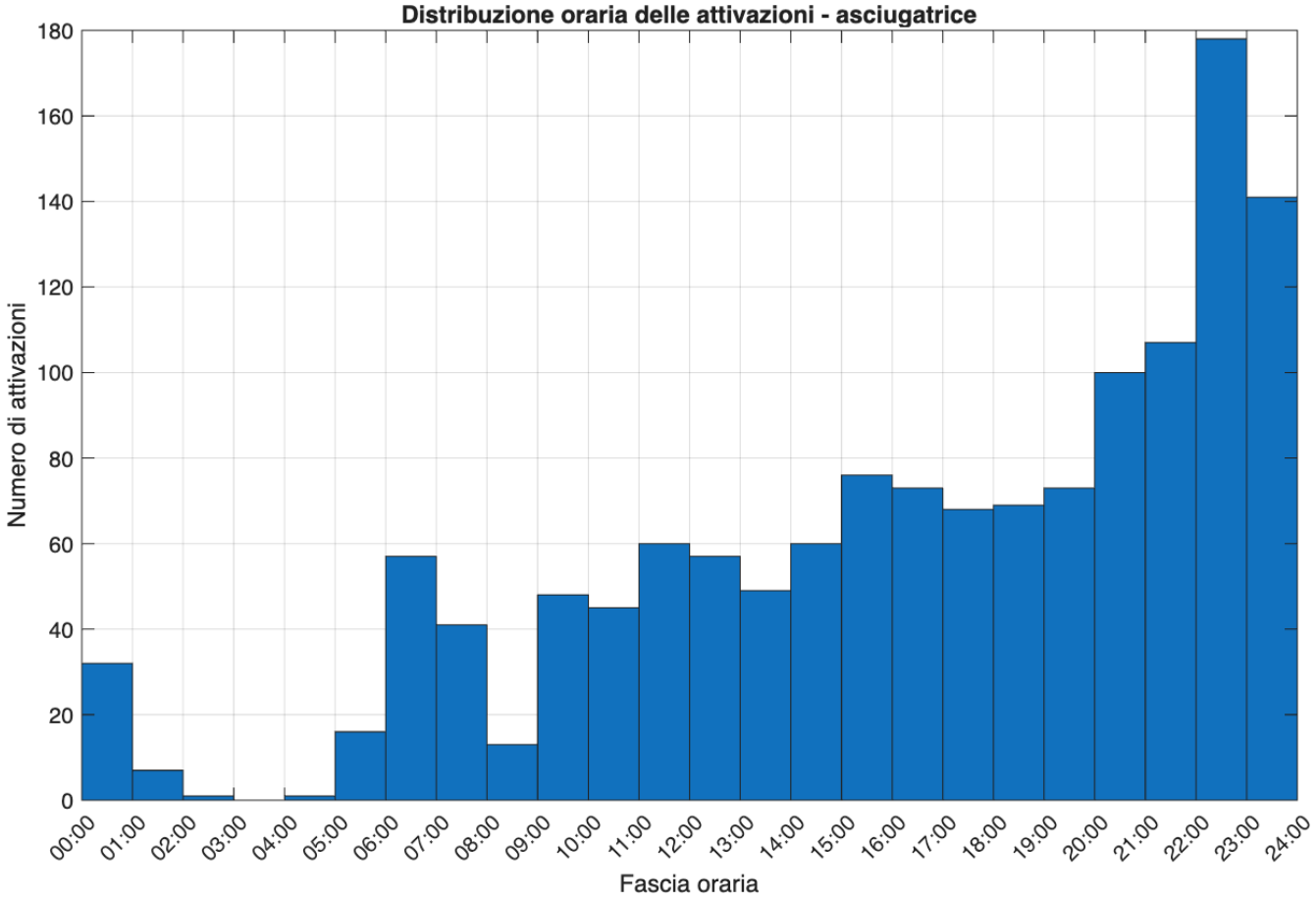


Figure 34: *Distribuzione oraria delle attivazioni dell'asciugatrice.*

Frigorifero

La distribuzione oraria delle attivazioni del frigorifero presenta caratteristiche differenti rispetto a quelle osservate per gli elettrodomestici il cui utilizzo è direttamente avviato dall'utente. Gli eventi risultano infatti distribuiti lungo l'intero arco della giornata, coerentemente con il funzionamento automatico e ciclico del dispositivo.

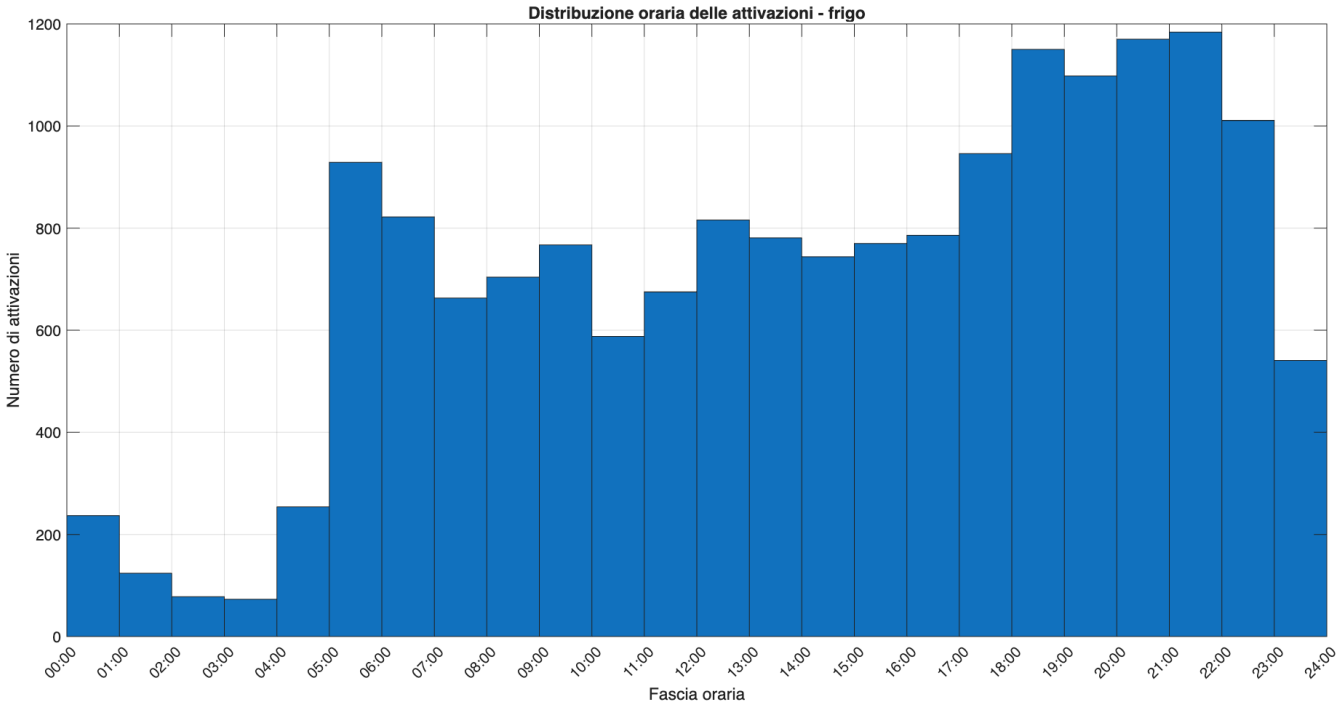


Figure 35: *Distribuzione oraria delle attivazioni del frigorifero.*

La frequenza degli eventi non risulta tuttavia uniforme nelle diverse fasce orarie. Nelle prime ore della notte si osserva una riduzione significativa del numero di attivazioni, con i valori più bassi concentrati approssimativamente tra le 02:00 e le 04:00. A partire dalle prime ore del mattino il numero di eventi aumenta sensibilmente e rimane relativamente elevato durante buona parte della giornata.

Un ulteriore incremento è osservabile a partire dal tardo pomeriggio. Le frequenze maggiori si concentrano infatti nelle ore serali, in particolare tra le 18:00 e le 22:00, con valori prossimi al massimo nelle fasce 20:00–21:00 e 21:00–22:00. Successivamente il numero di eventi tende nuovamente a diminuire.

A differenza di quanto osservato per lavatrice, lavastoviglie e asciugatrice, tale distribuzione non può essere interpretata direttamente come indicativa degli orari nei quali l'utente decide di utilizzare il dispositivo. Il frigorifero opera infatti automaticamente e le sue attivazioni dipendono dalla regolazione termostatica e dalle condizioni operative.

La maggiore frequenza osservata in determinate fasce orarie potrebbe essere compatibile con una variazione delle condizioni di utilizzo del frigorifero durante la giornata, ma i dati disponibili non consentono di attribuirla direttamente a specifiche azioni dell'utente o a determinate condizioni ambientali. Il risultato evidenzia quindi principalmente la presenza di una variabilità temporale nel regime di funzionamento automatico del dispositivo.

HVAC1

La distribuzione oraria delle attivazioni di HVAC1 evidenzia una marcata variabilità nel corso della giornata, con una maggiore concentrazione degli eventi nelle ore pomeridiane e soprattutto serali.

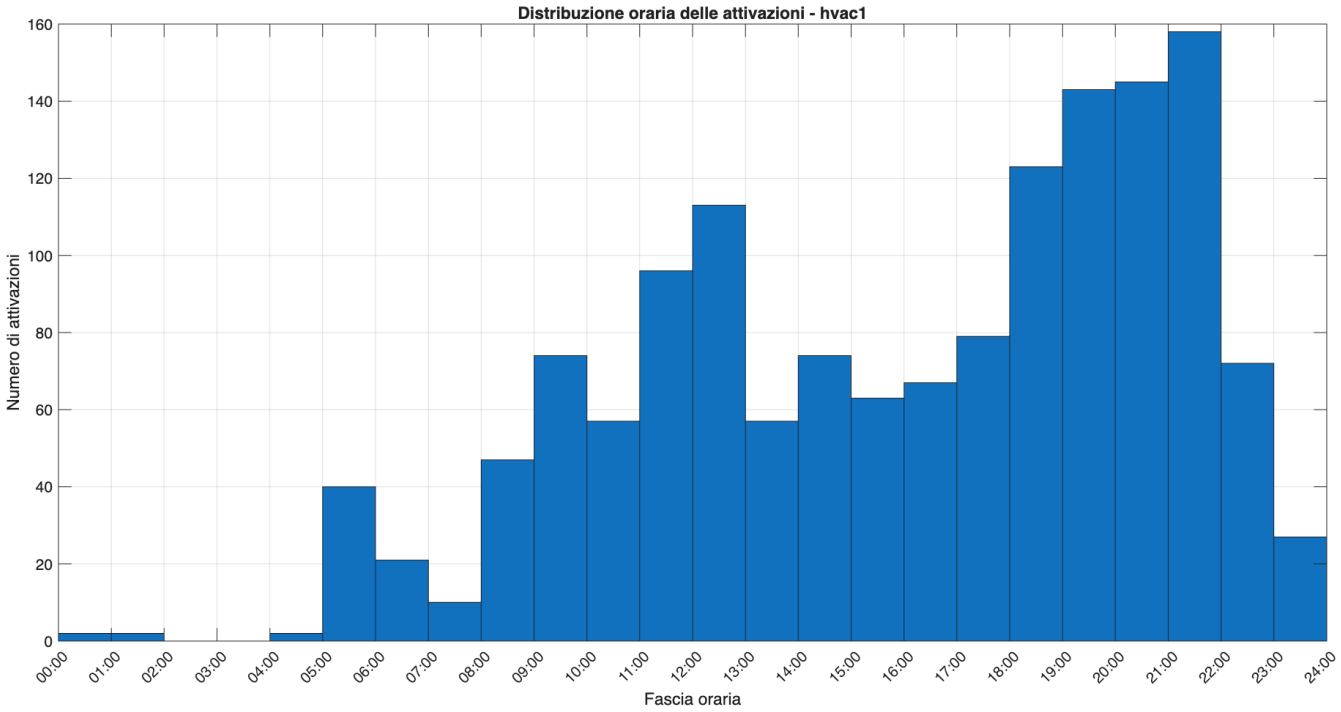


Figure 36: *Distribuzione oraria delle attivazioni di HVAC1.*

Durante le ore notturne il numero di attivazioni risulta estremamente ridotto, con eventi quasi assenti tra le 00:00 e le 05:00. A partire dalle prime ore del mattino si osserva un progressivo aumento dell'attività, seguito da una prima concentrazione significativa tra le 11:00 e le 13:00.

Nel pomeriggio il numero di eventi si mantiene su valori intermedi, per poi aumentare sensibilmente a partire dalle 17:00. La maggiore concentrazione si osserva nelle ore serali, in particolare tra le 18:00 e le 22:00. Il valore massimo viene raggiunto nella fascia 21:00–22:00, dopo la quale si osserva una netta diminuzione delle attivazioni.

La distribuzione evidenzia quindi una maggiore frequenza di funzionamento di HVAC1 nelle ore serali rispetto alle ore notturne e alla prima parte della giornata. Tale andamento suggerisce la presenza di una componente temporale significativa nel regime di funzionamento del sistema.

È tuttavia necessario considerare che gli eventi individuati non corrispondono necessariamente a singole accensioni volontarie da parte dell'utente. Un sistema HVAC può infatti modificare automaticamente il proprio assorbimento durante il funzionamento in relazione alla regolazione termica e alle modalità operative.

Non essendo disponibili informazioni relative alla temperatura impostata, alle condizioni ambientali o alla modalità di funzionamento selezionata, non è possibile stabilire se le differenze osservate nelle diverse fasce orarie siano associate, ad esempio, al riscaldamento, al raffrescamento o ad altre specifiche condizioni operative.

HVAC2

La distribuzione oraria delle attivazioni di HVAC2 presenta un andamento differente rispetto a quello osservato per HVAC1, caratterizzato dalla presenza di due principali fasce di maggiore attività.

La caratteristica più evidente è rappresentata dalla forte concentrazione di eventi nella fascia 05:00–06:00, nella quale viene raggiunto il massimo numero di attivazioni dell'intera giornata. Nella fascia immediatamente successiva, tra le 06:00 e le 07:00, il numero di eventi diminuisce sensibilmente, per poi assumere valori molto contenuti durante gran parte della mattinata.

A partire dalle prime ore del pomeriggio si osserva un progressivo aumento della frequenza degli eventi. Una prima crescita significativa è visibile tra le 16:00 e le 17:00, mentre la seconda principale concentrazione si verifica nelle ore serali. In particolare, tra le 20:00 e le 23:00 il numero di attivazioni risulta elevato, con un massimo locale nella fascia 21:00–22:00.

Il profilo temporale di HVAC2 risulta quindi caratterizzato da due differenti periodi di maggiore attività: uno concentrato nelle prime ore del mattino e uno nelle ore serali. Tale comportamento differisce

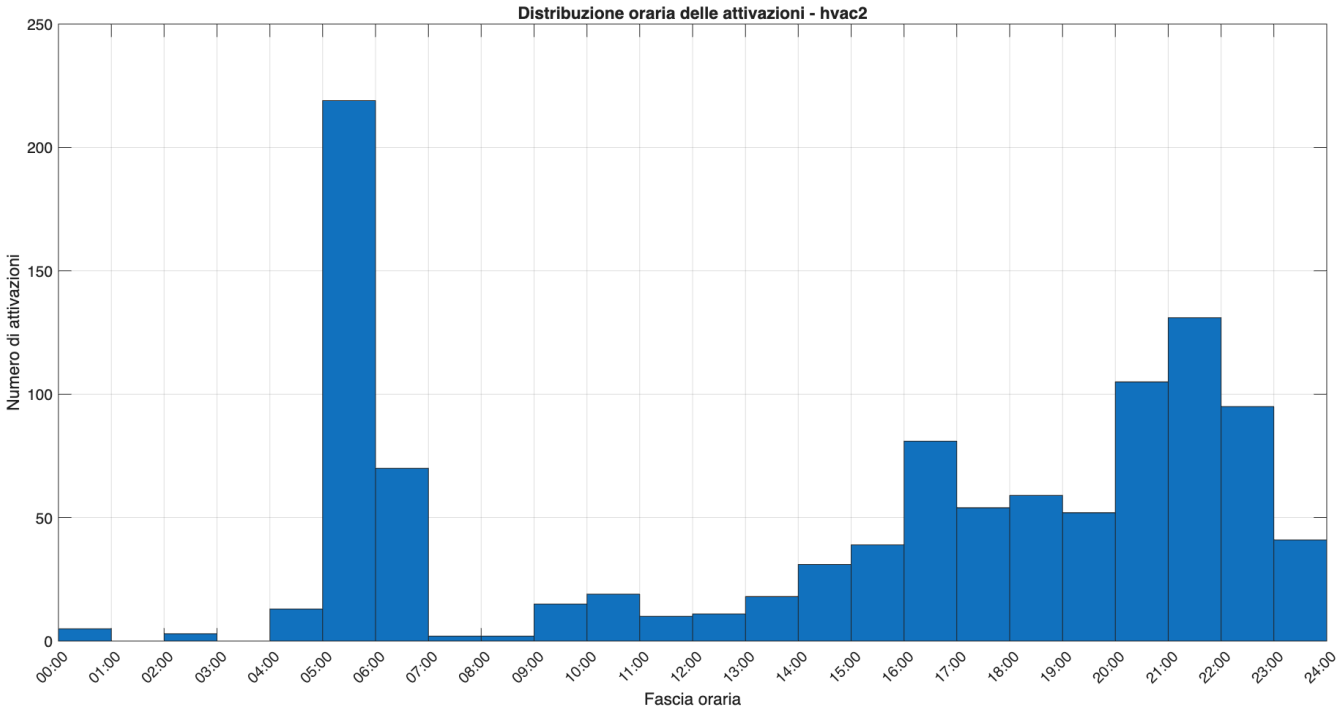


Figure 37: *Distribuzione oraria delle attivazioni di HVAC2.*

parzialmente da quello osservato per HVAC1, per il quale la concentrazione degli eventi risulta maggiormente orientata verso le ore serali.

Anche in questo caso, tuttavia, gli eventi individuati non devono essere interpretati necessariamente come singole accensioni volontarie da parte dell'utente. Il funzionamento di un sistema HVAC può essere influenzato dalla regolazione automatica della temperatura e dalle modalità operative del dispositivo.

Non essendo disponibili informazioni relative alla posizione dei due sistemi nell'abitazione, alla temperatura impostata, alle condizioni ambientali o alla modalità di funzionamento selezionata, non è possibile determinare la causa della marcata concentrazione osservata nelle prime ore del mattino né associare con certezza le differenze tra HVAC1 e HVAC2 a specifiche modalità di utilizzo.

Nel complesso, l'analisi delle distribuzioni orarie mette in evidenza la presenza di comportamenti temporali differenti a seconda del dispositivo considerato. Lavatrice, lavastoviglie e asciugatrice mostrano fasce di attivazione preferenziali ben identificabili, con una generale maggiore concentrazione degli eventi nelle ore pomeridiane e serali. Tale comportamento risulta particolarmente evidente per la lavastoviglie, caratterizzata da una forte concentrazione delle attivazioni nelle ultime ore della giornata.

Il frigorifero presenta invece una distribuzione più diffusa nell'arco delle 24 ore, coerentemente con la natura automatica e ciclica del suo funzionamento, pur mostrando una frequenza maggiore degli eventi nelle ore serali.

I sistemi HVAC evidenziano infine profili temporali distinti. HVAC1 presenta una maggiore concentrazione delle attivazioni nelle ore serali, mentre HVAC2 è caratterizzato da due principali periodi di maggiore attività: uno nelle prime ore del mattino, con un picco particolarmente marcato tra le 05:00 e le 06:00, e uno nelle ore serali.

I risultati ottenuti consentono quindi di individuare alcune delle principali fasce temporali associate al funzionamento dei dispositivi monitorati e forniscono una prima indicazione delle abitudini energetiche dell'utenza. Tali informazioni costituiscono inoltre la base per le successive analisi della contemporaneità e delle sequenze temporali tra i diversi elettrodomestici.

4.1.3 Distribuzione delle durate degli eventi

Dopo aver analizzato la distribuzione temporale delle attivazioni nell'arco delle 24 ore, è stata esaminata la durata degli eventi di funzionamento individuati per ciascun elettrodomestico. Tale analisi permette di caratterizzare ulteriormente il comportamento dei dispositivi, valutando non soltanto quando essi risultano attivi, ma anche per quanto tempo permane lo stato di funzionamento ricostruito a partire dal segnale di potenza.

È importante sottolineare che gli eventi considerati in questa analisi corrispondono agli eventi definitivi ricostruiti mediante la procedura di elaborazione dello stato di funzionamento.

A partire dallo stato binario ottenuto mediante sogliatura, le brevi interruzioni compatibili con la prosecuzione dello stesso funzionamento vengono ricongiunte, purché nell'intervallo considerato sia verificata la continuità temporale dei dati, mentre le attivazioni di durata non significativa vengono filtrate. Le durate analizzate rappresentano pertanto intervalli di funzionamento ricostruiti a partire dal segnale di potenza. Tali eventi non devono tuttavia essere necessariamente identificati con i programmi nominali degli elettrodomestici, poiché il dataset non fornisce direttamente informazioni sul programma o sulla modalità effettivamente selezionata dall'utente.

Per ogni dispositivo sono stati considerati il numero complessivo di eventi, la durata media, la durata mediana, la deviazione standard, il primo quartile e il terzo quartile. La distribuzione delle durate è stata inoltre rappresentata mediante un istogramma, così da evidenziare la presenza di eventuali concentrazioni, dispersioni e valori particolarmente elevati.

In questa analisi la mediana rappresenta un indicatore particolarmente utile, poiché risulta meno influenzata rispetto alla media dalla presenza di eventi anomali o da una distribuzione fortemente asimmetrica. Analogamente, il primo quartile (25%) e il terzo quartile (75%) permettono di individuare l'intervallo all'interno del quale ricade il 50% centrale degli eventi osservati.

Lavatrice

Per la lavatrice sono stati individuati complessivamente 1311 eventi definitivi. La distribuzione delle durate presenta una marcata asimmetria verso destra: la maggior parte degli eventi è concentrata nelle durate più brevi, mentre il numero di occorrenze diminuisce progressivamente all'aumentare della durata.

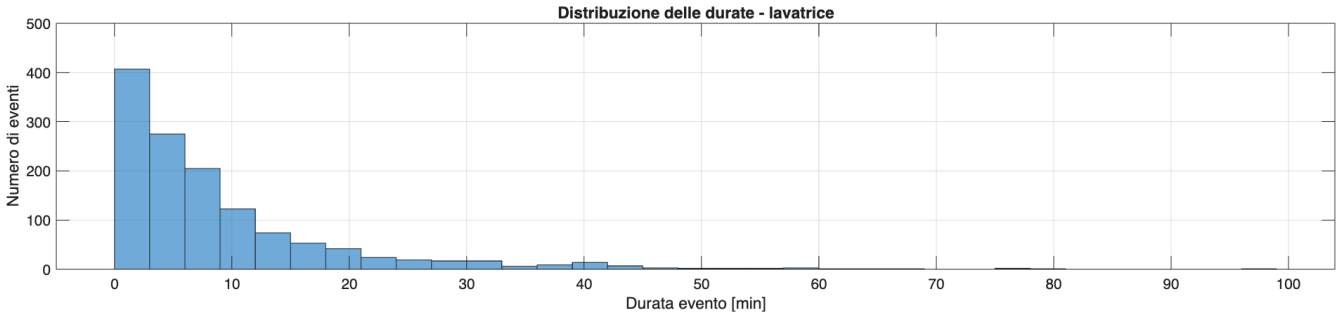


Figure 38: *Distribuzione della durata degli eventi di funzionamento della lavatrice.*

La durata media è pari a 9,14 minuti, mentre la mediana è di 5,65 minuti. La differenza tra questi due valori è coerente con la presenza di un numero limitato di eventi di durata elevata, visibili nella coda destra della distribuzione, che determinano un aumento della media. La deviazione standard, pari a 10,74 minuti, conferma inoltre una significativa variabilità delle durate osservate.

Il primo e il terzo quartile risultano rispettivamente pari a 2,40 minuti e 11,36 minuti; pertanto, il 50% centrale degli eventi presenta una durata compresa in questo intervallo. Sono comunque presenti alcuni eventi significativamente più lunghi, con durate che raggiungono valori prossimi ai 100 minuti.

È importante interpretare tali risultati alla luce della procedura di ricostruzione adottata. Gli eventi individuati rappresentano intervalli di funzionamento ricavati dal profilo di potenza e non necessariamente cicli completi o programmi nominali della lavatrice. La forte presenza di eventi relativamente brevi può quindi essere associata alle diverse fasi di assorbimento che caratterizzano il funzionamento dell'elettrodomestico e alla possibilità che uno stesso ciclo reale presenti intervalli durante i quali la potenza scende al di sotto della soglia di attivazione. Per questo motivo, la distribuzione ottenuta viene utilizzata principalmente per caratterizzare il comportamento osservato nel segnale, evitando di associare direttamente ciascun evento a un lavaggio completo.

Lavastoviglie

Per la lavastoviglie sono stati individuati complessivamente 1805 eventi di funzionamento. La durata media degli eventi è pari a 11,58 minuti, mentre la durata mediana risulta pari a 8,98 minuti. Il primo e il terzo quartile sono rispettivamente pari a 3,91 e 15,80 minuti, mentre la deviazione standard è pari a 10,57 minuti.

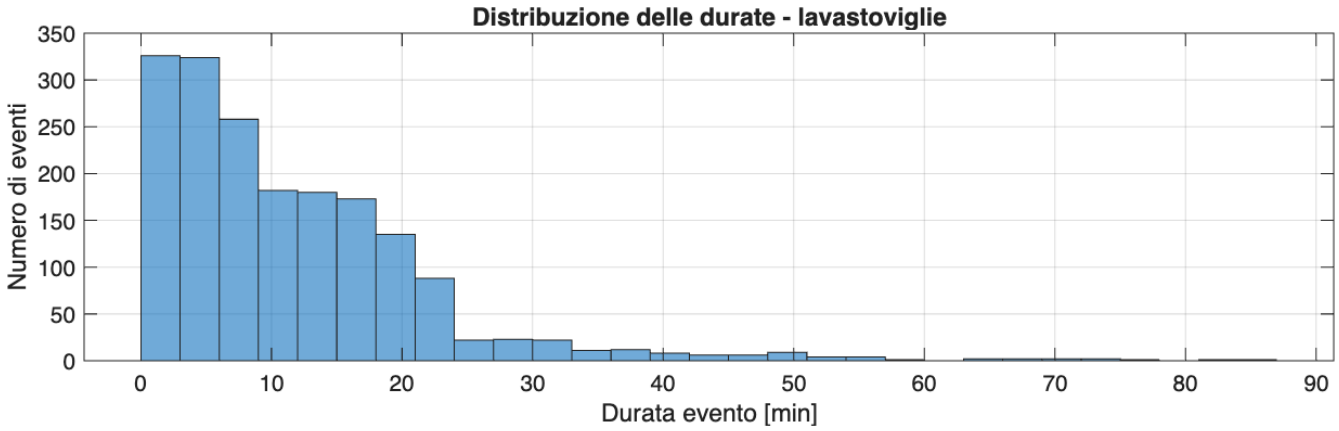


Figure 39: *Distribuzione delle durate degli eventi di funzionamento della lavastoviglie.*

La distribuzione delle durate presenta una marcata asimmetria verso destra. La maggior parte degli eventi risulta concentrata nelle classi di durata più breve, mentre la frequenza tende progressivamente a diminuire all'aumentare della durata. Il 50% centrale degli eventi presenta una durata compresa tra 3,91 e 15,80 minuti.

La durata media, pari a 11,58 minuti, risulta superiore alla mediana di 8,98 minuti. Tale differenza è coerente con la presenza di una coda della distribuzione verso durate maggiori: un numero relativamente limitato di eventi prolungati contribuisce infatti ad aumentare il valore medio. La presenza di eventi che raggiungono diverse decine di minuti evidenzia inoltre una significativa variabilità degli intervalli di funzionamento ricostruiti.

Anche in questo caso, le durate ottenute non devono essere interpretate direttamente come durate dei programmi nominali della lavastoviglie. Gli eventi rappresentano infatti gli intervalli di funzionamento ricostruiti a partire dal profilo di potenza mediante la procedura di identificazione e affinamento dello stato attivo. Le differenti durate osservate possono pertanto essere associate a differenti fasi operative o intervalli di assorbimento presenti durante il funzionamento dell'elettrodomestico.

Asciugatrice

Per l'asciugatrice sono stati individuati complessivamente 1372 eventi di funzionamento. La durata media degli eventi è pari a 6,95 minuti, mentre la durata mediana risulta pari a 3,83 minuti. Il primo e il terzo quartile sono rispettivamente pari a 2,00 e 8,65 minuti, mentre la deviazione standard è pari a 8,65 minuti.

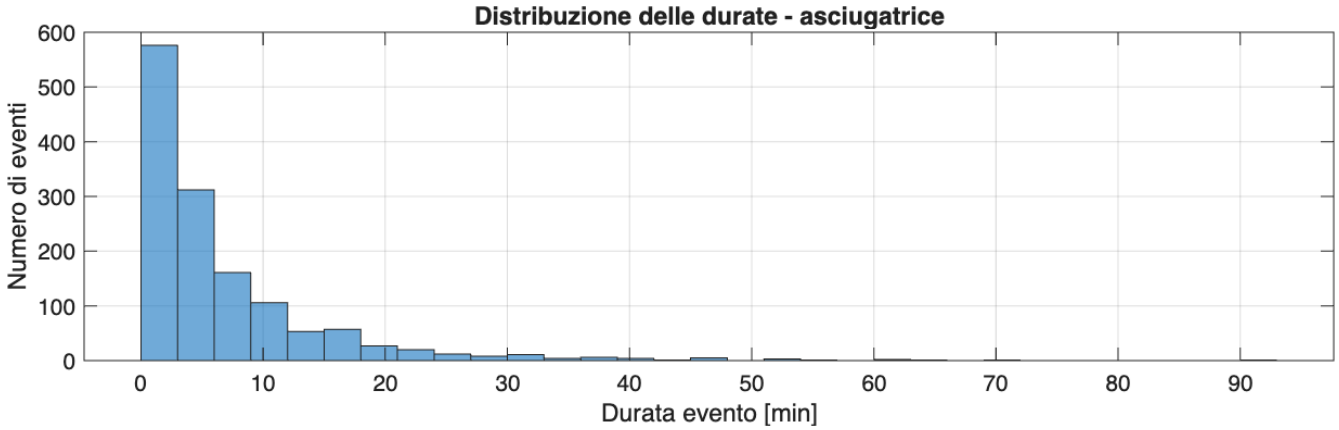


Figure 40: *Distribuzione delle durate degli eventi di funzionamento dell'asciugatrice.*

La distribuzione presenta una marcata asimmetria verso destra, con una forte concentrazione degli eventi nelle classi di durata più breve e una progressiva diminuzione della frequenza all'aumentare della durata. Il 50% centrale degli eventi presenta infatti una durata compresa tra 2,00 e 8,65 minuti.

La differenza tra la durata media, pari a 6,95 minuti, e la mediana, pari a 3,83 minuti, conferma

l'influenza esercitata da un numero relativamente ridotto di eventi di durata elevata. Questi ultimi determinano la lunga coda visibile nella distribuzione, che comprende anche alcuni eventi con durata di diverse decine di minuti.

La durata mediana risulta pertanto maggiormente rappresentativa dell'evento tipico rispetto alla media. Nel complesso, il comportamento osservato evidenzia una notevole variabilità nella durata degli intervalli di funzionamento ricostruiti.

È opportuno sottolineare che tali intervalli rappresentano gli eventi ottenuti mediante la procedura di ricostruzione dello stato di funzionamento e non devono essere necessariamente interpretati come programmi completi di asciugatura. La presenza di eventi brevi può infatti riflettere differenti fasi operative o intervalli di assorbimento individuati all'interno del profilo di potenza dell'elettrodomestico.

Frigorifero

Per il frigorifero sono stati individuati complessivamente 16911 eventi di funzionamento. La durata media degli eventi è pari a 4,18 minuti, mentre la durata mediana risulta pari a 2,58 minuti. Il primo e il terzo quartile sono rispettivamente pari a 1,50 e 5,03 minuti, mentre la deviazione standard è pari a 4,77 minuti.

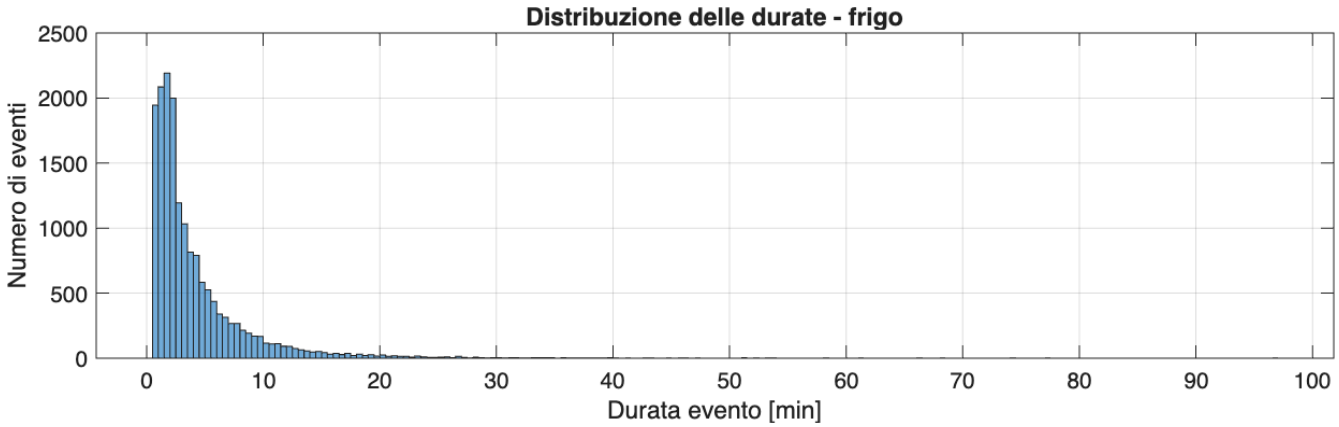


Figure 41: *Distribuzione delle durate degli eventi di funzionamento del frigorifero.*

La distribuzione presenta una marcata concentrazione degli eventi nelle classi di durata più breve, seguita da una progressiva riduzione della frequenza all'aumentare della durata. Il 50% centrale degli eventi presenta infatti una durata compresa tra 1,50 e 5,03 minuti.

La durata media, pari a 4,18 minuti, risulta superiore alla mediana di 2,58 minuti. Tale differenza è riconducibile alla marcata asimmetria della distribuzione verso destra e alla presenza di un numero limitato di eventi di durata significativamente superiore rispetto alla maggior parte delle osservazioni.

A differenza degli altri elettrodomestici analizzati, gli eventi individuati per il frigorifero non rappresentano cicli di utilizzo direttamente determinati dall'utente. Il dispositivo rimane infatti normalmente alimentato in maniera continuativa e gli intervalli identificati corrispondono principalmente alle fasi nelle quali il suo assorbimento supera la soglia utilizzata per la ricostruzione dello stato attivo.

La distribuzione delle durate descrive quindi principalmente la dinamica ciclica di funzionamento del frigorifero, associabile alle successive attivazioni e disattivazioni del sistema di refrigerazione, piuttosto che una vera e propria durata di utilizzo da parte dell'utente.

HVAC1

Per il sistema HVAC1 sono stati individuati complessivamente 1472 eventi di funzionamento. La durata media degli eventi è pari a 3,25 minuti, mentre la durata mediana risulta pari a 2,00 minuti. Il primo e il terzo quartile sono rispettivamente pari a 1,08 e 3,75 minuti, mentre la deviazione standard è pari a 4,22 minuti.

La distribuzione delle durate risulta fortemente concentrata nelle classi di durata più breve. Il 50% centrale degli eventi presenta infatti una durata compresa tra 1,08 e 3,75 minuti, evidenziando come una parte consistente degli intervalli di funzionamento individuati abbia una durata di pochi minuti.

La durata media, pari a 3,25 minuti, risulta superiore alla mediana di 2,00 minuti. Tale differenza è coerente con l'asimmetria verso destra osservabile nella distribuzione: la frequenza degli eventi diminuisce

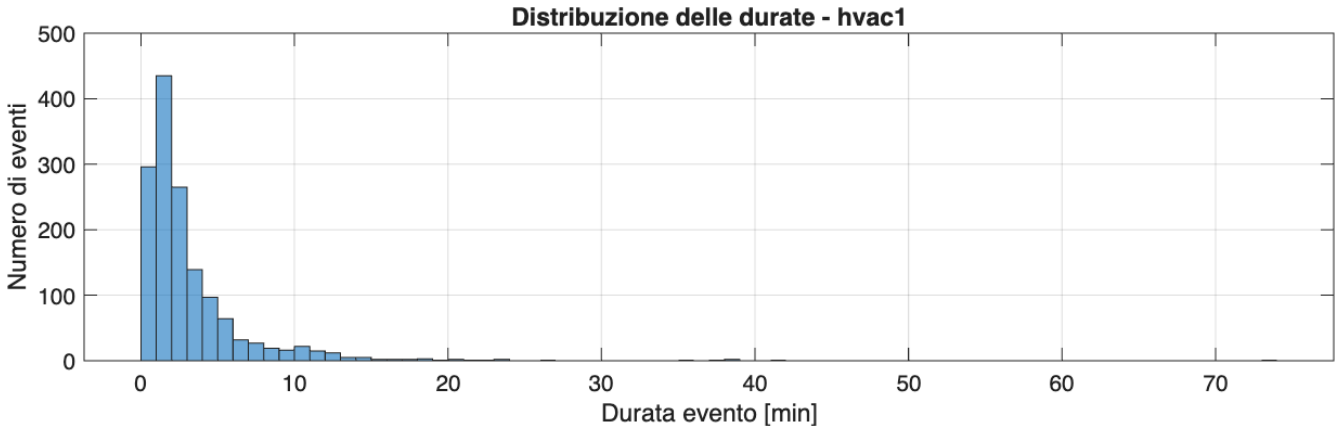


Figure 42: *Distribuzione delle durate degli eventi di funzionamento del sistema HVAC1.*

rapidamente all'aumentare della durata, mentre rimane una coda costituita da un numero limitato di intervalli significativamente più lunghi.

Nel complesso, il profilo evidenzia quindi una prevalenza di intervalli di funzionamento brevi, accompagnata dalla presenza occasionale di attivazioni più prolungate. Anche per HVAC1 le durate devono essere interpretate come intervalli di funzionamento ricostruiti a partire dal profilo di potenza e non necessariamente come durata complessiva di una singola sessione di utilizzo del sistema.

HVAC2

Per il sistema HVAC2 sono stati individuati complessivamente 1075 eventi di funzionamento. La durata media degli eventi è pari a 2,97 minuti, mentre la durata mediana risulta pari a 1,98 minuti. Il primo e il terzo quartile sono rispettivamente pari a 1,08 e 3,58 minuti, mentre la deviazione standard è pari a 3,15 minuti.

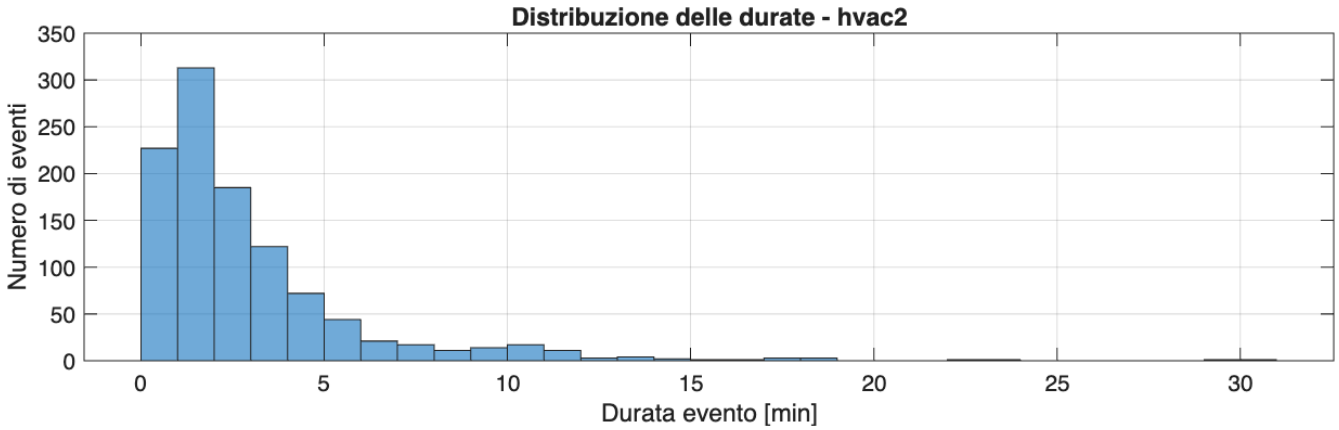


Figure 43: *Distribuzione delle durate degli eventi di funzionamento del sistema HVAC2.*

La distribuzione delle durate risulta fortemente concentrata nelle classi di durata più breve. Il 50% centrale degli eventi presenta infatti una durata compresa tra 1,08 e 3,58 minuti, evidenziando come una parte consistente degli intervalli di funzionamento individuati abbia una durata di pochi minuti.

La durata media, pari a 2,97 minuti, risulta superiore alla mediana di 1,98 minuti. Tale differenza è coerente con l'asimmetria verso destra osservabile nella distribuzione: la frequenza degli eventi diminuisce progressivamente all'aumentare della durata, mentre è presente una coda costituita da un numero limitato di intervalli di funzionamento più lunghi.

Nel complesso, il comportamento di HVAC2 risulta caratterizzato prevalentemente da intervalli di funzionamento brevi, accompagnati da attivazioni più prolungate con frequenza sensibilmente inferiore. Come per HVAC1, tali durate rappresentano gli intervalli di funzionamento ricostruiti a partire dal profilo di potenza e non devono necessariamente essere interpretate come la durata complessiva di una singola sessione di utilizzo del sistema.

Il confronto tra le distribuzioni delle durate mette in evidenza comportamenti differenti tra i dispositivi analizzati.

Lavatrice e lavastoviglie presentano entrambe una forte concentrazione degli eventi nelle durate più contenute e distribuzioni caratterizzate da una marcata asimmetria verso destra. Nel caso della lavatrice, la durata mediana risulta pari a 5,65 min, mentre per la lavastoviglie è pari a 8,98 min, indicando che gli intervalli di funzionamento individuati per la lavastoviglie tendono generalmente a essere più lunghi. In entrambi i casi la presenza di una coda verso durate maggiori determina valori medi superiori alle rispettive mediane, pari rispettivamente a 9,14 min e 11,58 min.

L'asciugatrice presenta anch'essa una distribuzione fortemente asimmetrica, con una prevalenza di eventi di breve durata e una coda che si estende verso valori sensibilmente maggiori. La durata mediana, pari a 3,83 min, risulta inferiore alla durata media di 6,95 min, confermando l'influenza esercitata da un numero limitato di eventi più prolungati.

Il frigorifero è caratterizzato da un numero di eventi nettamente superiore rispetto agli altri dispositivi e da una distribuzione fortemente concentrata nelle durate più brevi. La durata mediana risulta pari a 2,58 min, mentre il primo e il terzo quartile sono rispettivamente pari a 1,50 min e 5,03 min. Tale comportamento è coerente con la natura automatica e ciclica del dispositivo e conferma che gli eventi individuati non possono essere interpretati come azioni volontarie dell'utente.

Anche HVAC1 e HVAC2 mostrano distribuzioni asimmetriche verso destra, caratterizzate da numerosi eventi di breve durata e da un numero progressivamente inferiore di intervalli più lunghi. I due sistemi presentano durate mediane molto simili, pari rispettivamente a 2,00 min e 1,98 min. HVAC1 mostra tuttavia una dispersione leggermente maggiore, con una deviazione standard pari a 4,22 min rispetto ai 3,15 min di HVAC2, e una coda che si estende verso durate maggiori.

Nel complesso, l'analisi evidenzia come la sola durata media non sia sufficiente a caratterizzare correttamente gli eventi di funzionamento. L'utilizzo congiunto di media, mediana, quartili, deviazione standard e distribuzione completa delle durate permette di ottenere una descrizione più robusta dei differenti comportamenti osservati e di limitare l'influenza degli eventi meno frequenti caratterizzati da durate elevate.

È inoltre importante ricordare che le durate analizzate si riferiscono agli eventi definitivi ricostruiti mediante la procedura di affinamento dello stato di funzionamento. Il ricongiungimento delle brevi interruzioni compatibili con la prosecuzione dello stesso funzionamento, effettuato solamente in presenza di continuità temporale dei dati, e il filtraggio delle attivazioni di durata non significativa consentono di ottenere una rappresentazione più robusta rispetto alla semplice sogliatura del segnale. Gli eventi individuati non possono tuttavia essere associati con certezza ai programmi nominali o alle singole sessioni complete di utilizzo dei dispositivi, poiché il dataset non contiene informazioni dirette sulle impostazioni selezionate dall'utente.

Le differenze emerse costituiscono comunque una base utile per la successiva analisi delle modalità e dei regimi operativi, nella quale le informazioni temporali vengono combinate con caratteristiche di potenza ed energia allo scopo di individuare gruppi di funzionamento ricorrenti.

4.1.4 Contemporaneità di utilizzo

L'analisi della contemporaneità consente di valutare il grado di sovrapposizione temporale tra gli stati di funzionamento dei dispositivi monitorati. Applicando la procedura descritta nella Sezione 3.4.2 alle 195 giornate comuni, con un passo temporale della griglia pari a 174 s, è stata ottenuta la distribuzione del numero di dispositivi contemporaneamente attivi riportata in Figura 44.

Per la maggior parte del periodo analizzato non risulta attivo nessuno dei dispositivi monitorati: tale condizione rappresenta circa l'83.06% del tempo complessivo. Nel 12.11% del tempo risulta invece attivo un solo dispositivo. Complessivamente, le condizioni caratterizzate dalla presenza di zero oppure un solo dispositivo attivo rappresentano quindi circa il 95.17% del tempo analizzato, mentre nel restante 4.83% risultano contemporaneamente attivi almeno due dispositivi.

Considerando più nel dettaglio le condizioni di contemporaneità, due dispositivi risultano attivi simultaneamente per circa il 3.71% del tempo, mentre la presenza contemporanea di tre dispositivi si verifica per circa lo 0.95%. All'aumentare del numero di dispositivi attivi la percentuale si riduce ulteriormente: quattro dispositivi risultano contemporaneamente attivi per circa lo 0.145% del tempo, cinque per lo 0.019% e tutti i sei dispositivi monitorati per circa lo 0.002%. La maggior parte delle condizioni di contemporaneità riguarda pertanto la sovrapposizione di due dispositivi, mentre le configurazioni caratterizzate dalla presenza simultanea di un numero maggiore di carichi risultano progressivamente meno frequenti.

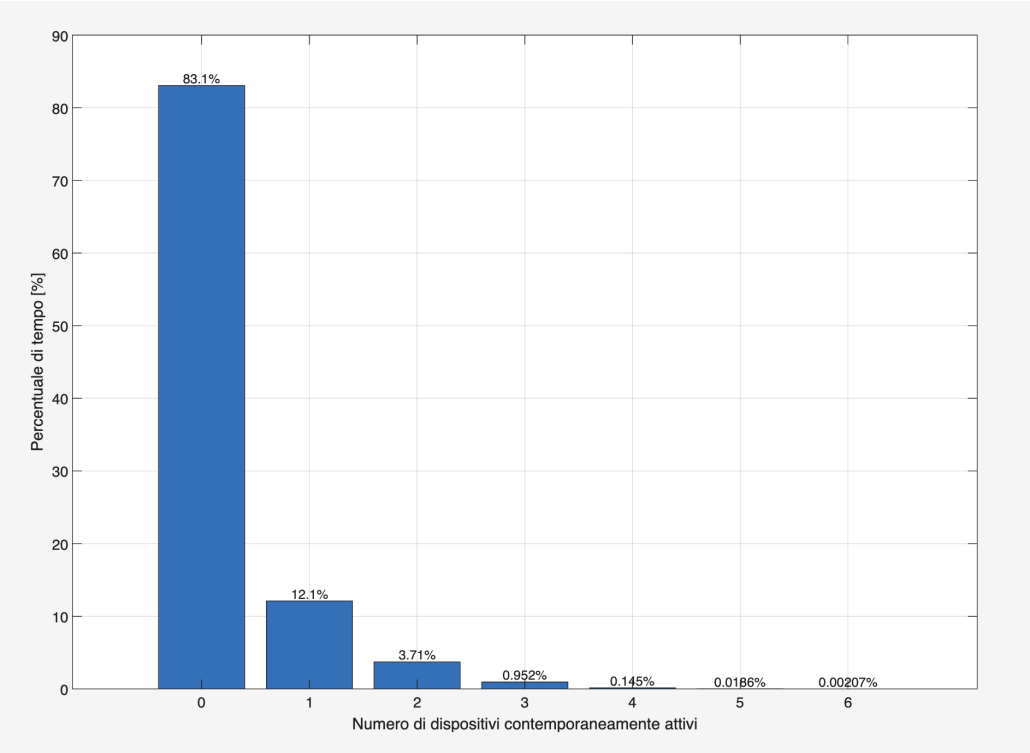


Figure 44: *Distribuzione percentuale del tempo in funzione del numero di dispositivi contemporaneamente attivi per il primo utente.*

Oltre al numero complessivo di dispositivi attivi, sono state analizzate anche le specifiche combinazioni che si verificano negli intervalli caratterizzati dalla presenza simultanea di almeno due dispositivi. Le configurazioni osservate con maggiore frequenza sono risultate lavatrice–frigorifero, presente in 958 intervalli della griglia temporale, e lavastoviglie–frigorifero, presente in 921 intervalli. Seguono le combinazioni HVAC1–frigorifero, asciugatrice–frigorifero e HVAC2–frigorifero, osservate rispettivamente in 545, 485 e 262 intervalli.

La presenza ricorrente del frigorifero nelle combinazioni più frequenti deve tuttavia essere interpretata tenendo conto delle caratteristiche del suo funzionamento. A differenza degli elettrodomestici la cui attivazione è principalmente associata a un'azione dell'utente, il frigorifero presenta un funzionamento automatico e ciclico, determinato in particolare dall'attivazione del sistema di refrigerazione. La sovrapposizione temporale con gli altri dispositivi non può quindi essere interpretata direttamente come una scelta dell'utente di utilizzare contemporaneamente i due apparecchi, ma può derivare dalla coincidenza tra il funzionamento automatico del frigorifero e l'attivazione degli altri carichi.

Nel complesso, l'analisi mostra quindi che la contemporaneità tra più dispositivi monitorati interessa il 4.83% del tempo considerato e che, all'interno di tali condizioni, le configurazioni più frequentemente osservate coinvolgono il frigorifero. Questi risultati forniscono un'ulteriore caratterizzazione delle abitudini di consumo del primo utente, distinguendo le condizioni di utilizzo individuale dei dispositivi da quelle in cui più carichi risultano simultaneamente in funzione.

4.1.5 Sequenzialità tra dispositivi

Dopo aver analizzato separatamente le caratteristiche temporali dei singoli elettrodomestici, è stata considerata anche la possibile presenza di relazioni sequenziali tra differenti dispositivi. In particolare, l'analisi è stata concentrata sulla coppia lavatrice–asciugatrice, per la quale è ragionevole ricercare una possibile successione temporale tra il completamento di un utilizzo della lavatrice e il successivo utilizzo dell'asciugatrice.

Prima di effettuare tale analisi è stato necessario tenere conto della struttura degli eventi precedentemente individuati. La procedura di estrazione basata sullo stato operativo può infatti suddividere uno stesso utilizzo fisico dell'elettrodomestico in più eventi consecutivi, separati da brevi intervalli di inattività. Effettuare direttamente l'associazione tra questi eventi elementari avrebbe quindi potuto generare

un numero eccessivo di sequenze e attribuire più associazioni a quello che, dal punto di vista dell'utente, rappresenta un unico utilizzo dell'elettrodomestico.

Per questo motivo, gli eventi temporalmente vicini sono stati preliminarmente raggruppati in *sessioni operative*. L'analisi delle pause tra eventi consecutivi ha mostrato, per entrambi i dispositivi, una forte concentrazione degli intervalli nelle prime decine di minuti: la mediana delle pause è risultata pari a 7.15 min per la lavatrice e 8.40 min per l'asciugatrice. È stata quindi utilizzata una soglia temporale di 10 min per riunire eventi sufficientemente vicini appartenenti alla stessa sessione di utilizzo.

A seguito di questa operazione, i 1311 eventi originariamente individuati per la lavatrice sono stati ricondotti a 514 sessioni operative, con una riduzione del 60.79%. Analogamente, i 1372 eventi dell'asciugatrice sono stati raggruppati in 625 sessioni, corrispondenti a una riduzione del 54.45%. La durata mediana delle sessioni ottenute è pari a 22.39 min per la lavatrice e 15.13 min per l'asciugatrice.

La relazione sequenziale è stata quindi ricercata tra le sessioni così ottenute. Per ciascuna sessione dell'asciugatrice è stata individuata la sessione della lavatrice terminata più recentemente nelle 24 ore precedenti, evitando di associare la stessa sessione della lavatrice a più utilizzi dell'asciugatrice. La distanza temporale è stata calcolata tra la fine della sessione della lavatrice e l'inizio della sessione dell'asciugatrice.

La relazione tra i due dispositivi non è stata limitata esclusivamente ai casi in cui l'asciugatrice viene avviata immediatamente dopo la lavatrice. Nelle normali abitudini domestiche, infatti, tra le due operazioni può intercorrere un intervallo temporale anche di alcune ore. Le sequenze individuate sono state pertanto suddivise in tre categorie:

- **ravvicinate**, con distanza temporale fino a 2 ore;
- **differite**, con distanza compresa tra 2 e 8 ore;
- **molto differite**, con distanza compresa tra 8 e 24 ore.

Complessivamente sono state individuate 206 sequenze lavatrice–asciugatrice. La Tabella 5 riporta la distribuzione nelle tre categorie considerate.

Table 5: *Distribuzione delle sequenze lavatrice–asciugatrice*

Categoria	N. sequenze	Percentuale [%]
Ravvicinata	100	48.54
Differita	75	36.41
Molto differita	31	15.05
Totale	**206**	**100.00**

La categoria maggiormente rappresentata è quella delle sequenze ravvicinate, con 100 casi, corrispondenti al 48.54% del totale. Quasi la metà delle associazioni individuate presenta quindi un intervallo non superiore a 2 ore tra la conclusione della sessione della lavatrice e l'inizio di quella dell'asciugatrice.

Le sequenze differite rappresentano il 36.41% del totale, con 75 casi, mentre le sequenze molto differite sono 31, pari al 15.05%. Complessivamente, l'84.95% delle associazioni presenta quindi una distanza temporale inferiore o uguale a 8 ore, evidenziando una frequente vicinanza temporale tra l'utilizzo dei due dispositivi.

Considerando tutte le sequenze individuate, gli indicatori temporali complessivi sono riportati nella Tabella 6.

Table 6: *Indicatori temporali delle sequenze lavatrice–asciugatrice*

Indicatore	Valore
Numero totale di sequenze	206
Distanza media	03:50:51
Distanza mediana	02:02:35
Distanza minima	00:03:57
Distanza massima	22:34:22

La distanza temporale media complessiva è pari a 3 h 50 min e 51 s, mentre la mediana è pari a 2 h 2 min e 35 s. La differenza tra i due valori è dovuta alla presenza delle sequenze maggiormente distanziate, che contribuiscono ad aumentare il valore medio. La mediana fornisce pertanto una rappresentazione più robusta della distanza temporale tipica osservata tra i due utilizzi.

La distanza minima osservata è pari a 3 min e 57 s, mentre quella massima è pari a 22 h 34 min e 22 s, coerentemente con il limite massimo di 24 ore imposto nella ricerca delle associazioni.

Nel complesso, la concentrazione di quasi metà delle sequenze entro le prime 2 ore e di circa l'85% entro le 8 ore evidenzia una relazione temporale ricorrente tra l'utilizzo della lavatrice e quello dell'asciugatrice. Il risultato è compatibile con un comportamento domestico nel quale l'asciugatrice viene frequentemente utilizzata dopo il lavaggio, anche quando le due operazioni non avvengono immediatamente una dopo l'altra.

È tuttavia importante sottolineare che la vicinanza temporale, da sola, non permette di dimostrare con certezza che una determinata sessione dell'asciugatrice sia causalmente associata alla specifica sessione della lavatrice che la precede. L'analisi deve quindi essere interpretata come una caratterizzazione delle abitudini temporali dell'utente e non come un'identificazione certa del legame fisico tra i singoli carichi di bucato.

4.1.6 Potenza non monitorata e criticità legate al disallineamento temporale

Un ulteriore aspetto analizzato riguarda la quota di potenza assorbita dall'abitazione che non risulta direttamente attribuibile agli elettrodomestici monitorati singolarmente.

La potenza non monitorata è stata ricavata confrontando la potenza attiva complessiva dell'abitazione con la somma delle potenze associate ai dispositivi per i quali era disponibile una misura individuale. In termini generali, essa può essere espressa come:

$$P_{\text{non monitorata}}(t) = P_{\text{aggregata}}(t) - \sum_{i=1}^{N} P_i(t) \tag{20}$$

dove $P_{\text{aggregata}}(t)$ rappresenta la potenza totale assorbita dall'abitazione e $P_i(t)$ la potenza relativa al generico elettrodomestico monitorato.

Tale grandezza consente quindi di stimare il contributo complessivo dei carichi che non vengono misurati singolarmente all'interno del dataset. Questa componente può comprendere, ad esempio, illuminazione, apparecchi elettronici, piccoli elettrodomestici e, più in generale, tutti i carichi domestici non associati ai sensori individuali considerati nell'analisi.

Andamento temporale della potenza non monitorata

La Figura 45 mostra l'andamento temporale della potenza non monitorata nel periodo per il quale è stato possibile effettuare il confronto tra il segnale di potenza aggregata dell'abitazione e i segnali relativi ai dispositivi monitorati.

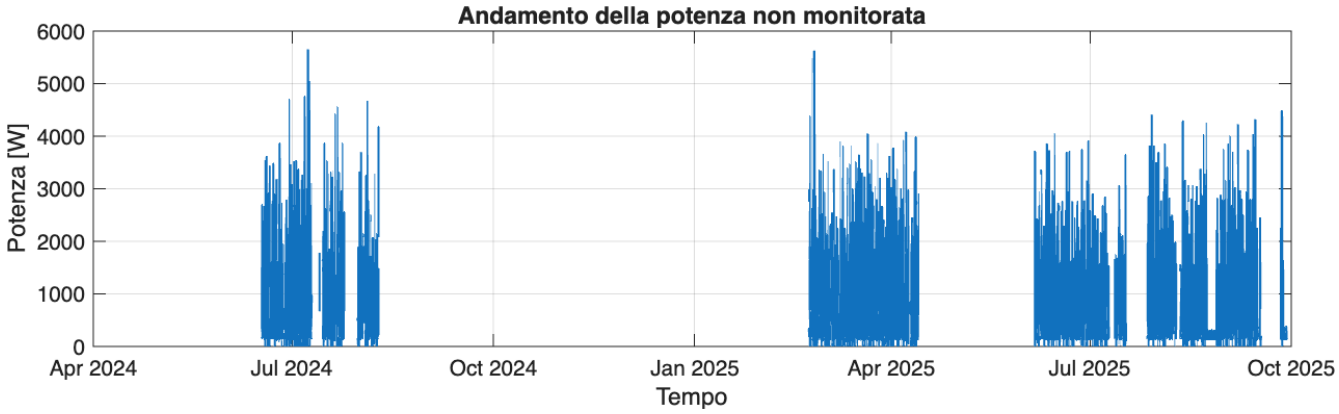


Figure 45: *Andamento temporale della potenza non monitorata.*

L'andamento evidenzia una notevole variabilità della potenza non monitorata nel corso del periodo analizzato. Accanto a intervalli caratterizzati da valori relativamente contenuti, sono presenti numerosi istanti nei quali la potenza residua raggiunge valori dell'ordine di alcuni kilowatt. I picchi più elevati osservati superano i 5 kW.

La presenza di valori di tale entità evidenzia come i dispositivi monitorati individualmente rappresentino soltanto una parte del carico elettrico complessivo dell'abitazione. In determinati intervalli

temporali risultano quindi presenti ulteriori carichi, non acquisiti singolarmente dal sistema di misura, il cui contributo può assumere un peso significativo sulla potenza aggregata.

Dal grafico emerge inoltre che la potenza non monitorata non è disponibile in maniera uniforme sull'intero intervallo temporale rappresentato, ma risulta maggiormente concentrata in alcuni periodi dell'anno. Tale andamento deve essere interpretato tenendo conto della disponibilità temporale dei dati: il calcolo della potenza non monitorata richiede infatti la disponibilità contemporanea del segnale aggregato e dei segnali relativi ai dispositivi monitorati. Poiché i diversi sistemi di misura non presentano una copertura temporale uniforme, il numero di campioni per i quali è possibile effettuare il confronto varia nel corso dell'anno.

Di conseguenza, i periodi privi di valori non devono essere interpretati come intervalli nei quali la potenza non monitorata è nulla, così come una maggiore presenza di valori in determinati mesi non può essere attribuita direttamente a un incremento stagionale dei consumi non monitorati. Tale comportamento può infatti dipendere, almeno in parte, dalla diversa quantità di dati confrontabili disponibile nei vari periodi. Un'eventuale dipendenza stagionale richiederebbe quindi un'analisi specifica che tenga conto della copertura temporale dei segnali nei diversi mesi.

Nel complesso, l'analisi temporale mostra quindi la presenza di una componente di consumo non direttamente attribuibile ai dispositivi monitorati, caratterizzata da un'elevata variabilità e, in alcuni intervalli, da valori di potenza significativi. La sola rappresentazione temporale non permette tuttavia di quantificare il peso complessivo di tale componente sul consumo dell'abitazione; a questo scopo è necessario considerare anche le successive grandezze energetiche.

Distribuzione della potenza non monitorata

Per caratterizzare maggiormente la componente residua è stata analizzata anche la distribuzione dei valori di potenza non monitorata, riportata nella Figura 46.

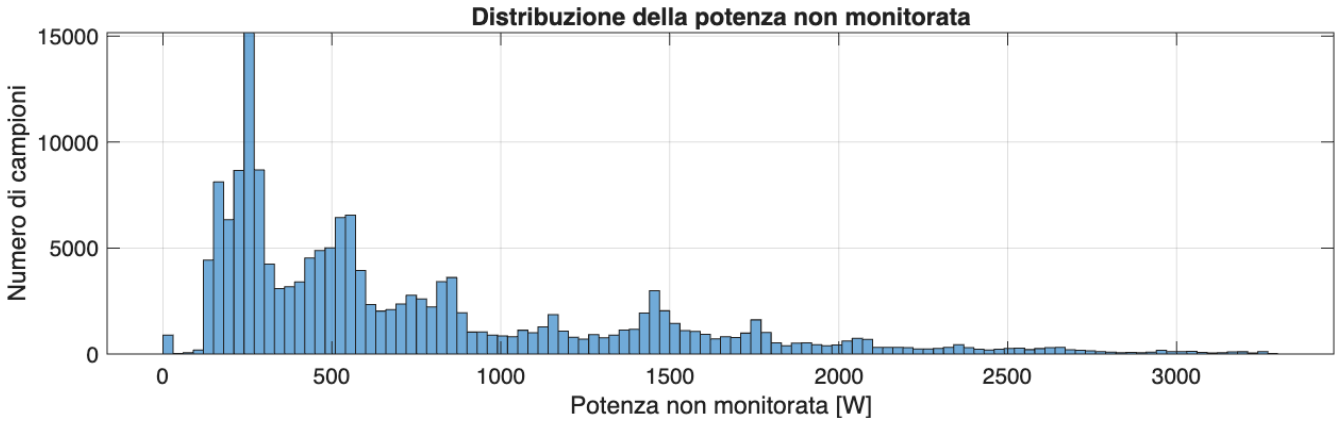


Figure 46: *Distribuzione della potenza non monitorata.*

L'istogramma mostra una distribuzione fortemente asimmetrica verso destra. La maggiore concentrazione dei campioni si osserva per valori di alcune centinaia di watt, con una concentrazione particolarmente marcata nell'intorno dei 250–300 W. La distribuzione non presenta tuttavia un unico intervallo dominante, ma mostra ulteriori concentrazioni a livelli di potenza superiori.

In particolare, oltre alla concentrazione principale, sono osservabili zone caratterizzate da un numero significativo di campioni nell'intorno dei 500–600 W e degli 800–900 W, oltre ad ulteriori concentrazioni meno pronunciate per valori dell'ordine di 1,5 kW e superiori. All'aumentare della potenza la frequenza tende complessivamente a diminuire, dando origine a una lunga coda che si estende oltre i 3 kW.

La presenza di più zone di concentrazione suggerisce che la componente non monitorata non sia riconducibile a un livello di potenza pressoché costante, ma possa essere associata a differenti condizioni di carico dell'abitazione. Tali concentrazioni possono essere compatibili con l'attivazione di differenti carichi non monitorati o con diverse combinazioni degli stessi. Non essendo tuttavia disponibili misure individuali relative a tali dispositivi, non è possibile associare direttamente i diversi livelli di potenza a specifiche apparecchiature.

Nel complesso, la distribuzione conferma quindi la presenza di una componente di consumo non direttamente attribuibile ai dispositivi monitorati individualmente, caratterizzata da un'elevata variabilità.

La componente residua assume frequentemente valori dell'ordine di alcune centinaia di watt, ma può raggiungere livelli sensibilmente superiori, fino all'ordine di alcuni kilowatt.

La potenza non monitorata deve pertanto essere interpretata come una stima complessiva del contributo dei carichi non acquisiti individualmente. Essa non consente di determinare quali specifici dispositivi siano responsabili del consumo residuo, ma permette di valutare la parte del profilo complessivo dell'abitazione che non può essere spiegata attraverso le sole misure dei carichi monitorati.

Questo risultato completa la caratterizzazione della potenza assorbita dall'utenza e fornisce un'informazione complementare rispetto alle analisi basate sugli eventi dei singoli dispositivi.

Effetti del disallineamento temporale sulla stima della potenza non monitorata

L'analisi della potenza non monitorata ha evidenziato, in alcuni intervalli temporali, la presenza di picchi positivi particolarmente elevati. Tali valori non sono necessariamente riconducibili a carichi elettrici effettivamente presenti nell'abitazione ma non direttamente monitorati. Una possibile causa è infatti rappresentata dal disallineamento temporale tra il segnale di potenza aggregata e i segnali acquisiti dai sensori associati ai singoli elettrodomestici.

Come evidenziato nella caratterizzazione preliminare dei dati, i diversi segnali presentano risoluzioni temporali differenti e i relativi campioni non risultano acquisiti in maniera perfettamente sincronizzata. Di conseguenza, una variazione di potenza associata all'attivazione di un elettrodomestico può essere registrata dal misuratore aggregato in un istante differente rispetto a quello in cui la stessa variazione compare nel segnale del dispositivo.

Per verificare direttamente tale fenomeno sono stati ricercati, nel segnale della lavastoviglie, fronti di salita sufficientemente marcati da poter essere confrontati con variazioni di ampiezza analoga presenti nel segnale aggregato. Il confronto è stato effettuato considerando l'intervallo compreso tra l'ultimo campione a bassa potenza e il primo campione ad alta potenza della lavastoviglie e ricercando, nello stesso intervallo temporale, la corrispondente variazione del segnale aggregato.

Nelle Figure 47 e 48 sono riportati due esempi rappresentativi. Le linee verticali permettono di confrontare l'istante in cui viene osservato il salto nel segnale aggregato con quello corrispondente al primo campione ad alta potenza acquisito dal sensore della lavastoviglie.

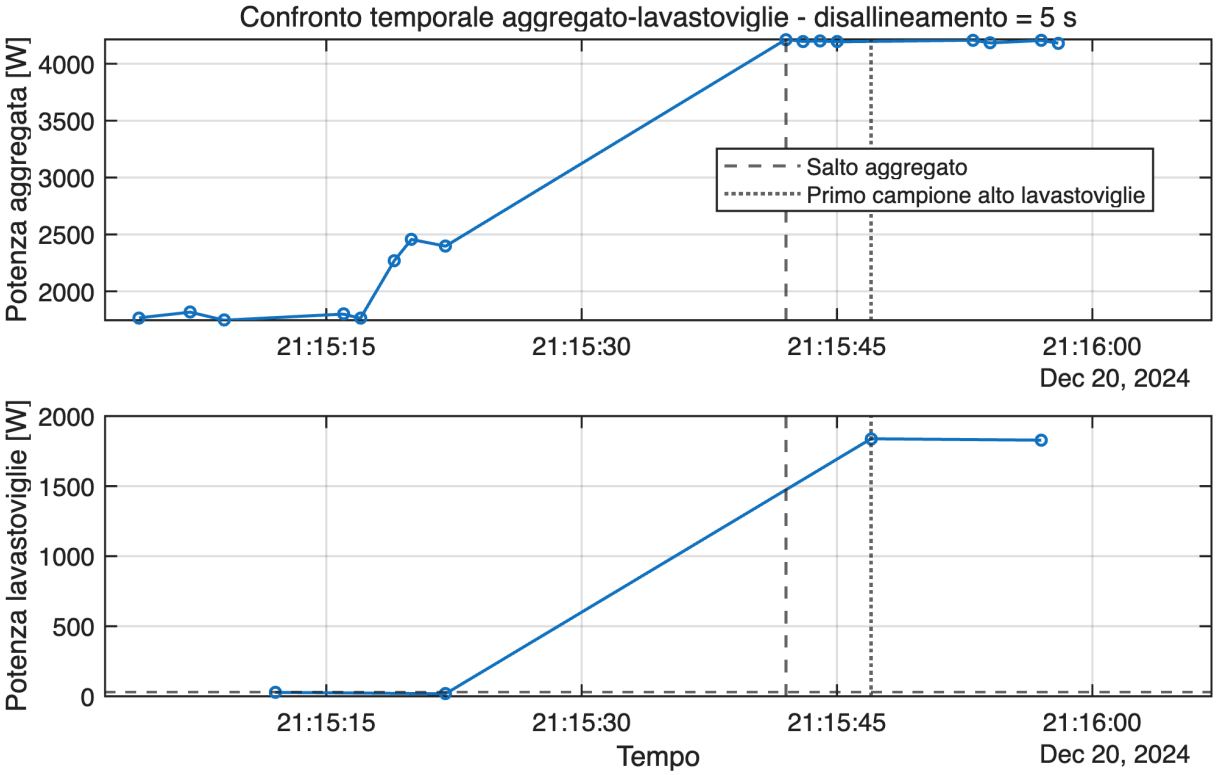


Figure 47: *Confronto temporale tra il segnale aggregato e il segnale della lavastoviglie nel primo caso analizzato.*

Nel primo caso, relativo al 20 dicembre 2024, il segnale aggregato presenta una variazione di circa 1817 W, mentre il corrispondente incremento rilevato per la lavastoviglie è pari a circa 1820 W. La forte

corrispondenza tra le ampiezze delle due variazioni rende plausibile l'associazione tra i due fronti. Dal punto di vista temporale, tuttavia, il salto risulta già osservabile nel segnale aggregato circa 5 s prima del primo campione ad alta potenza registrato dal sensore della lavastoviglie.

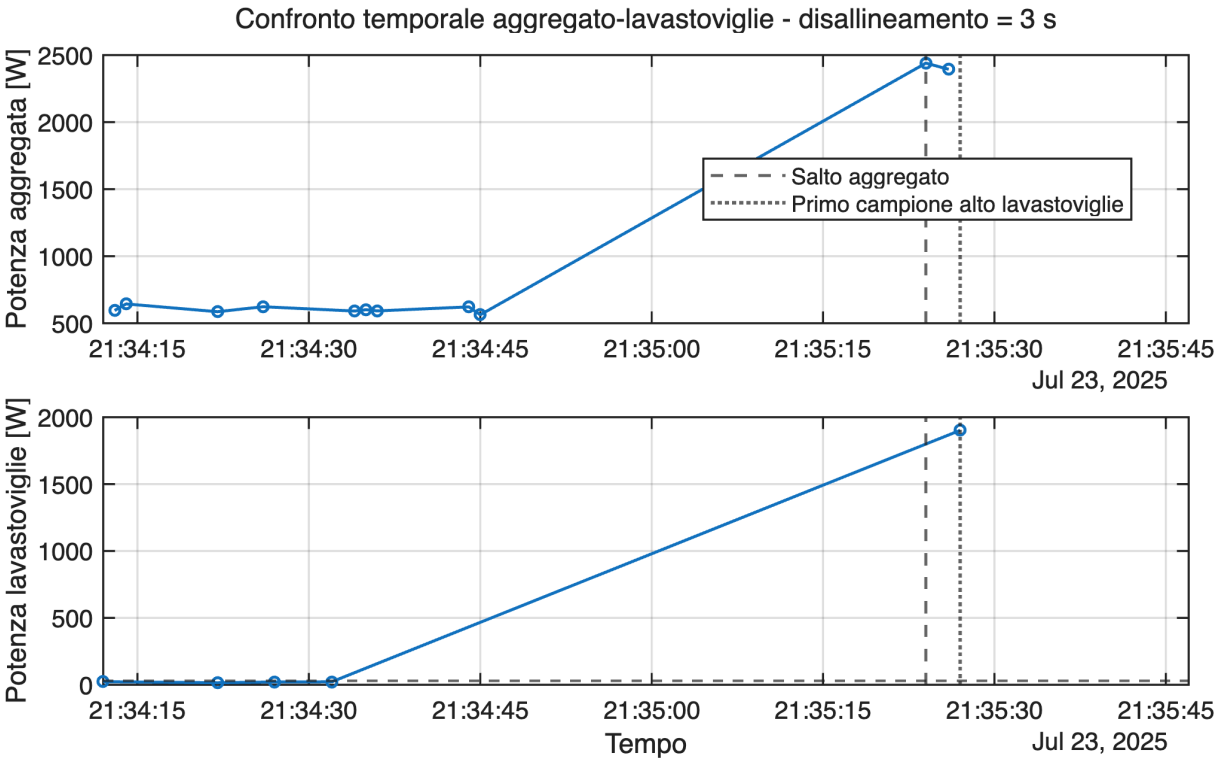


Figure 48: *Confronto temporale tra il segnale aggregato e il segnale della lavastoviglie nel secondo caso analizzato.*

Un comportamento analogo è osservabile nel secondo caso, relativo al 23 luglio 2025. In questo intervallo la variazione individuata nel segnale aggregato è pari a circa 1877 W, a fronte di un incremento di circa 1880 W nel segnale della lavastoviglie. Anche in questo caso le ampiezze risultano molto simili, mentre il salto nel segnale aggregato precede di circa 3 s il primo campione ad alta potenza della lavastoviglie.

I due esempi mostrano quindi come la diversa collocazione temporale dei campioni possa produrre un disallineamento tra il segnale aggregato e quello del singolo dispositivo. È importante sottolineare che le linee che congiungono i campioni nei grafici hanno esclusivamente funzione di supporto alla visualizzazione: in presenza di intervalli temporali relativamente ampi tra due misure consecutive non permettono di determinare l'istante esatto in cui si è verificata fisicamente la variazione di potenza.

Questo fenomeno assume particolare rilevanza nel calcolo della potenza non monitorata. Quest'ultima viene infatti ottenuta, a ciascun istante di confronto, come differenza tra la potenza aggregata e la somma delle potenze associate ai dispositivi monitorati. Se il misuratore aggregato registra l'aumento di potenza prima che lo stesso aumento compaia nel campione disponibile del dispositivo interessato, per un breve intervallo tale incremento è presente nel segnale aggregato ma non nella somma dei carichi monitorati. La differenza può quindi generare un picco positivo di potenza apparentemente non monitorata, pur essendo la variazione riconducibile a un elettrodomestico effettivamente monitorato.

La presenza di tali disallineamenti deve pertanto essere considerata nell'interpretazione della potenza non monitorata. I picchi di breve durata non possono essere attribuiti automaticamente alla presenza di ulteriori carichi non misurati, poiché una parte di essi può derivare dalla diversa risoluzione temporale e dalla mancata sincronizzazione dei sistemi di acquisizione.

Per fornire anche una quantificazione complessiva della compatibilità temporale tra il segnale aggregato e quelli dei singoli dispositivi, è stata effettuata un'ulteriore analisi sulle 195 giornate comuni. Per ciascun campione del segnale aggregato è stato individuato il campione temporalmente più vicino del singolo dispositivo ed è stata calcolata la distanza temporale tra i due timestamp.

Coerentemente con il criterio adottato per il calcolo della potenza non monitorata, è stata utilizzata una tolleranza massima di 5 minuti. Le associazioni caratterizzate da una distanza temporale non superiore a tale valore sono state considerate entro la tolleranza, mentre le restanti sono state classificate

come oltre la tolleranza. I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 7.

Table 7: *Compatibilità tra i campioni dell'aggregato e dei singoli dispositivi con tolleranza massima di 5 minuti.*

Dispositivo	Campioni	Entro 5 min	Oltre 5 min	Entro 5 min [%]
Lavatrice	481031	470045	10986	97.72
Lavastoviglie	481031	196386	284645	40.83
Asciugatrice	481031	466959	14072	97.07
Frigorifero	481031	469235	11796	97.55
HVAC1	481031	418511	62520	87.00
HVAC2	481031	419723	61308	87.25

I risultati evidenziano una buona compatibilità temporale per lavatrice, asciugatrice e frigorifero, per i quali oltre il 97% delle associazioni ricade entro la tolleranza adottata. Per HVAC1 e HVAC2 tale percentuale risulta pari rispettivamente a circa l'87.00% e all'87.25%. Un comportamento differente si osserva per la lavastoviglie, per la quale soltanto il 40.83% delle associazioni presenta una distanza temporale non superiore a 5 minuti.

Quest'ultimo risultato è coerente con la minore risoluzione temporale osservata per il segnale della lavastoviglie, caratterizzato da un passo temporale mediano di 168 s e da intervalli tra campioni che possono risultare sensibilmente più ampi. La diversa frequenza e irregolarità delle acquisizioni determina quindi una diversa efficacia della medesima tolleranza temporale per i vari dispositivi.

La soglia di 5 minuti non è stata ricavata inizialmente mediante una calibrazione statistica, ma è stata introdotta come criterio operativo per evitare associazioni tra campioni eccessivamente distanti nel tempo. La verifica effettuata mostra pertanto che tale scelta risulta adeguata per gran parte dei segnali monitorati, mentre presenta maggiori limitazioni nel caso della lavastoviglie. Questo aspetto, insieme alla mancata sincronizzazione tra i sistemi di misura, costituisce una delle principali criticità nell'interpretazione puntuale della potenza non monitorata.

4.1.7 Modalità e regimi operativi

Dopo aver caratterizzato gli eventi in termini di distribuzione temporale e durata, è stata effettuata un'ulteriore analisi finalizzata a verificare l'esistenza di comportamenti operativi ricorrenti all'interno degli eventi appartenenti allo stesso dispositivo.

A tale scopo, ciascun evento è stato descritto mediante tre caratteristiche principali: durata dell'evento, potenza media assorbita ed energia associata. L'utilizzo congiunto di queste grandezze consente di distinguere eventi che, pur appartenendo allo stesso elettrodomestico, presentano comportamenti energetici differenti.

Prima dell'applicazione dell'algoritmo di raggruppamento, le caratteristiche sono state normalizzate in modo robusto, utilizzando valori centrali e misure di dispersione poco sensibili alla presenza di valori estremi. Tale operazione consente di rendere confrontabili grandezze espresse in unità di misura e scale numeriche differenti, evitando che una singola caratteristica influenzi eccessivamente il processo di raggruppamento.

Il clustering è stato effettuato mediante l'algoritmo *K-means*, applicato alle tre caratteristiche considerate. L'obiettivo è individuare gruppi di eventi tra loro simili in termini di durata, potenza media ed energia consumata. Ogni gruppo ottenuto viene interpretato come una modalità operativa stimata oppure, nel caso dei sistemi HVAC, come un regime operativo stimato.

Poiché il numero di modalità non è noto a priori, sono state confrontate differenti soluzioni comprese tra 2 e 5 gruppi. Per ciascuna configurazione è stata valutata la qualità del raggruppamento mediante l'indice di silhouette, che fornisce una misura di quanto gli eventi risultino ben raggruppati all'interno del proprio cluster e separati rispetto agli altri. La configurazione con il valore medio di silhouette più elevato viene scelta come soluzione preferenziale.

Qualora anche la migliore soluzione presenti una separazione poco significativa, gli eventi vengono ricondotti ad un'unica modalità prevalente, evitando di introdurre suddivisioni prive di reale significato.

Una volta determinato il numero di gruppi, per ciascuna modalità vengono calcolati il numero di eventi, la percentuale rispetto al totale, la durata mediana, la potenza media e l'energia media. Tali parametri consentono di descrivere e confrontare quantitativamente i differenti comportamenti operativi individuati.

Per la rappresentazione grafica dei risultati è stata inizialmente considerata una visualizzazione tridimensionale nello spazio durata–potenza media–energia, coerente con le tre caratteristiche utilizzate dal

clustering. Tale soluzione è stata successivamente sostituita da una rappresentazione bidimensionale nel piano durata–energia, risultata più leggibile e immediata nell'evidenziare la distribuzione dei gruppi.

La modifica riguarda esclusivamente la visualizzazione dei risultati: il clustering continua infatti ad essere eseguito utilizzando contemporaneamente durata, potenza media ed energia. Nel grafico finale, durata ed energia sono rappresentate su scala logaritmica, in modo da migliorare la visibilità di eventi distribuiti su intervalli molto differenti. Il colore dei punti identifica la modalità o il regime operativo stimato, come indicato nella relativa legenda.

È importante sottolineare che i gruppi individuati rappresentano classificazioni ottenute esclusivamente a partire dai dati elettrici disponibili e non permettono di identificare con certezza il programma effettivamente selezionato dall'utente. Nel caso di lavatrice, lavastoviglie e asciugatrice, essi possono essere interpretati come una stima di differenti modalità di utilizzo; per i sistemi HVAC è invece più corretto parlare di regimi operativi, poiché il comportamento può dipendere anche da condizioni ambientali, set-point e regolazione automatica.

Lavatrice

Per la lavatrice, il confronto tra le differenti configurazioni di clustering ha portato all'individuazione di tre modalità operative stimate. In particolare, la soluzione con tre gruppi presenta il valore medio dell'indice di silhouette più elevato, pari a 0,835, rispetto ai valori di 0,802, 0,819 e 0,814 ottenuti rispettivamente considerando 2, 4 e 5 gruppi.

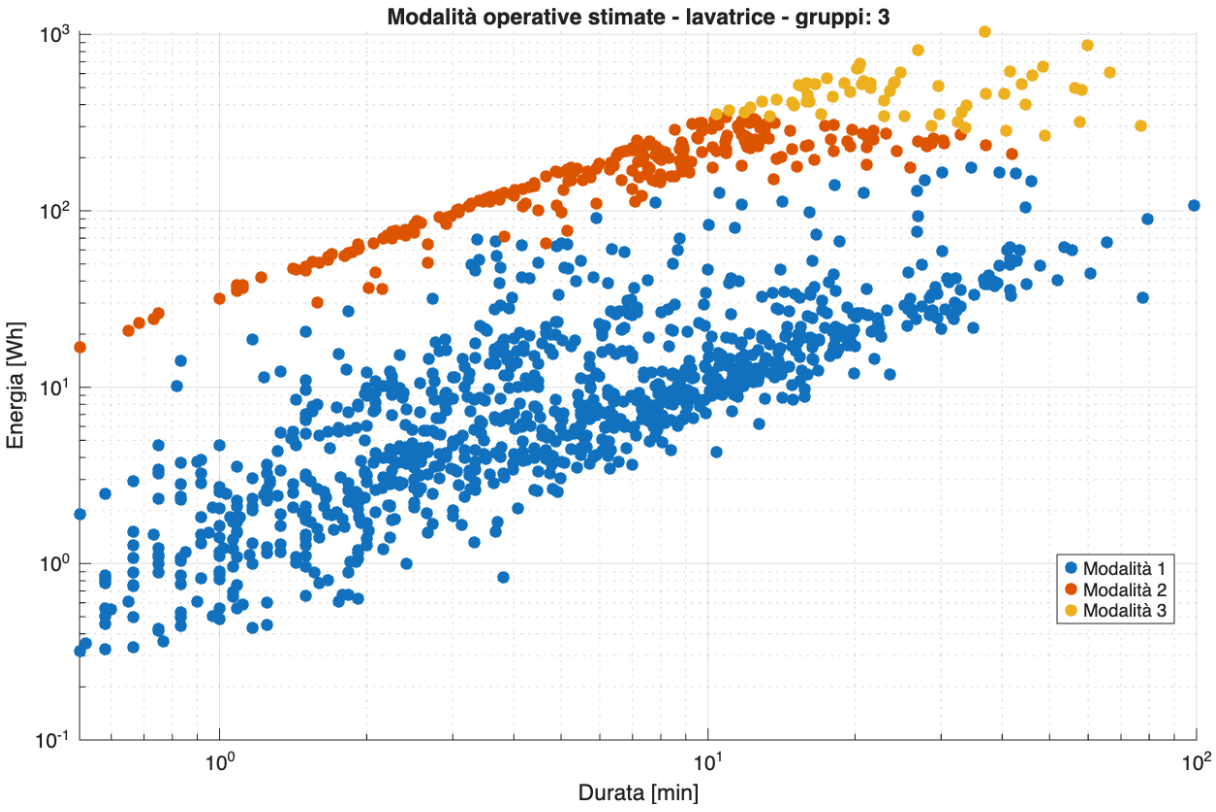


Figure 49: *Modalità operative stimate per la lavatrice nel piano durata–energia.*

Come mostrato in Figura 49, la prima modalità comprende prevalentemente eventi caratterizzati da valori inferiori di energia, distribuiti su un intervallo piuttosto ampio di durate. All'aumentare della durata si osserva generalmente un incremento dell'energia associata all'evento, pur con una significativa dispersione dei punti.

La seconda modalità è invece caratterizzata da consumi energetici sensibilmente superiori. Gli eventi appartenenti a questo gruppo formano una regione abbastanza ben riconoscibile, nella quale l'energia aumenta progressivamente con la durata dell'evento. Rispetto alla prima modalità, tali eventi risultano quindi associati ad un comportamento energetico differente e mediamente più intenso.

La terza modalità occupa la regione caratterizzata dai valori energetici più elevati e comprende prevalentemente eventi di maggiore durata. Essa può essere interpretata come un ulteriore regime di funzion-

amento distinto dalla seconda modalità, caratterizzato da un maggiore consumo energetico complessivo.

La separazione osservata non deve tuttavia essere interpretata come una corrispondenza diretta con tre specifici programmi selezionabili sulla lavatrice. Il clustering è infatti effettuato utilizzando esclusivamente le caratteristiche elettriche degli eventi e individua quindi tre differenti comportamenti energetici ricorrenti nei dati. In assenza di informazioni sul programma effettivamente impostato dall'utente, è più corretto considerarli come tre modalità operative stimate.

Nel complesso, il risultato indica che il comportamento della lavatrice non è riconducibile ad un'unica tipologia di evento: nel periodo analizzato emergono differenti condizioni di funzionamento, distinguibili principalmente sulla base della durata e dell'energia consumata.

Lavastoviglie

Per la lavastoviglie, la procedura automatica di clustering ha individuato due modalità operative stimate. Tra le configurazioni analizzate, la soluzione con due gruppi presenta infatti il valore medio dell'indice di silhouette più elevato, pari a 0,657. Le configurazioni con 3, 4 e 5 gruppi hanno invece restituito valori rispettivamente pari a 0,537, 0,609 e 0,604.

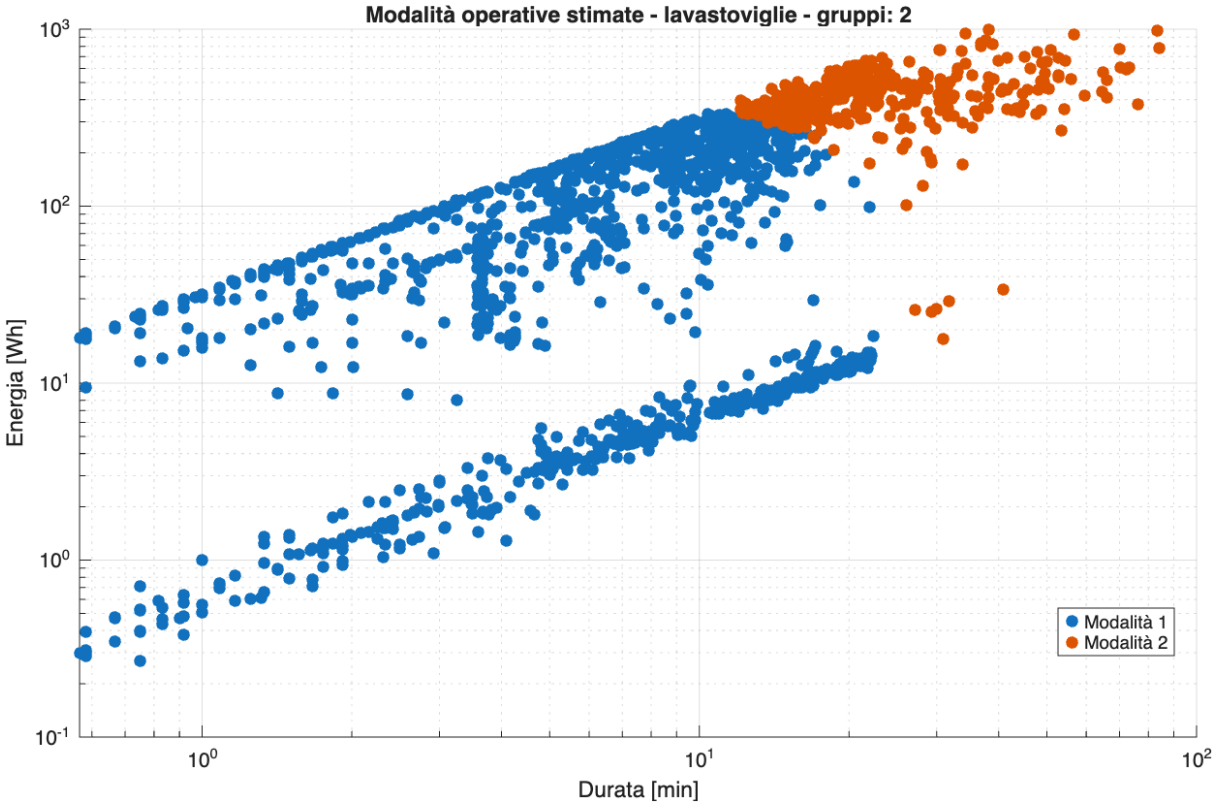


Figure 50: *Modalità operative stimate per la lavastoviglie nel piano durata–energia.*

Come mostrato in Figura 50, la prima modalità comprende la maggior parte degli eventi caratterizzati da durate ed energie inferiori. La distribuzione presenta tuttavia una struttura articolata: oltre alla fascia principale caratterizzata da valori energetici relativamente elevati, è chiaramente visibile una seconda fascia a energia inferiore, anch'essa caratterizzata da una relazione crescente tra durata ed energia.

La seconda modalità comprende invece prevalentemente gli eventi caratterizzati dalle durate e dai consumi energetici più elevati. Il passaggio tra le due modalità risulta particolarmente evidente nella regione corrispondente agli eventi di maggiore durata, per i quali l'energia associata raggiunge valori di diverse centinaia di Wh.

La presenza di due fasce distinte all'interno della prima modalità ha suggerito di approfondire il risultato ottenuto automaticamente, verificando anche una suddivisione forzata degli eventi in tre gruppi. Con questa configurazione sono stati ottenuti gruppi costituiti rispettivamente da 583, 388 e 834 eventi, corrispondenti al 32,30%, 21,50% e 46,20% degli eventi analizzati. La suddivisione consente effettivamente di separare maggiormente alcune delle strutture osservabili nel piano durata–energia.

Tuttavia, la silhouette media della soluzione con tre gruppi risulta pari a 0,537, sensibilmente inferiore al valore di 0,657 ottenuto con due gruppi. Ciò indica che, considerando congiuntamente durata, potenza media ed energia utilizzate dal processo di clustering, la suddivisione in tre modalità produce gruppi complessivamente meno compatti e meno separati.

Per questo motivo, nonostante la presenza di ulteriori strutture visivamente riconoscibili nella rappresentazione bidimensionale, è stata mantenuta come soluzione finale quella costituita da due modalità operative stimate. La verifica con tre gruppi evidenzia inoltre l'importanza di non identificare automaticamente ogni struttura visibile nel piano durata–energia con una differente modalità di funzionamento: la rappresentazione grafica utilizza infatti solamente due delle tre caratteristiche considerate dall'algoritmo.

Anche in questo caso, i due gruppi individuati non possono essere associati con certezza a specifici programmi della lavastoviglie. Essi rappresentano piuttosto due comportamenti energetici ricorrenti ricavati dai dati disponibili, la cui eventuale corrispondenza con differenti programmi reali richiederebbe informazioni aggiuntive sulle impostazioni effettivamente selezionate dall'utente.

Asciugatrice

Per l'asciugatrice, la procedura automatica di clustering ha individuato due modalità operative stimate. La configurazione con due gruppi presenta infatti il valore medio dell'indice di silhouette più elevato, pari a 0,834. Le configurazioni con 3, 4 e 5 gruppi hanno invece restituito valori rispettivamente pari a 0,670, 0,701 e 0,666. La differenza rispetto alle altre configurazioni indica quindi una buona separazione degli eventi in due gruppi principali.

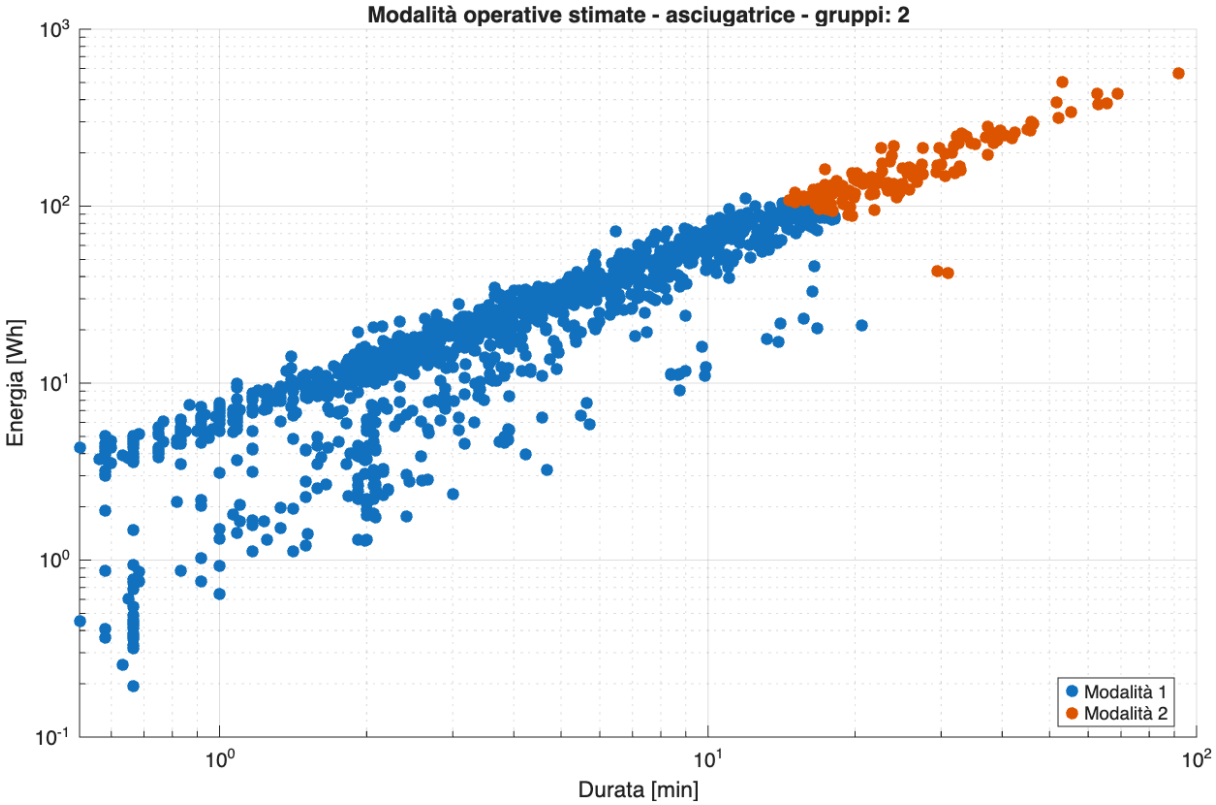


Figure 51: *Modalità operative stimate per l'asciugatrice nel piano durata–energia.*

Come mostrato in Figura 51, la prima modalità comprende gli eventi caratterizzati dalle durate e dai consumi energetici più contenuti e rappresenta la parte più estesa della distribuzione. All'interno di questo gruppo è comunque presente una certa variabilità, soprattutto per gli eventi di breve durata, che possono presentare valori energetici differenti.

La seconda modalità risulta invece concentrata nella regione corrispondente agli eventi di maggiore durata e maggiore energia. La separazione rispetto alla prima modalità è particolarmente evidente nella rappresentazione durata–energia: superata la regione di transizione tra i due gruppi, gli eventi appartenenti alla seconda modalità proseguono verso valori progressivamente maggiori di durata ed energia.

In entrambi i gruppi è inoltre chiaramente osservabile una relazione crescente tra le due grandezze: all'aumentare della durata dell'evento tende ad aumentare anche l'energia complessivamente assorbita. Questo andamento è coerente con la relazione esistente tra durata, potenza media ed energia e contribuisce alla struttura allungata assunta dai gruppi nella rappresentazione.

Tra gli elettrodomestici analizzati, l'asciugatrice presenta quindi una suddivisione particolarmente ben definita. Tale interpretazione è supportata sia dalla distribuzione osservabile graficamente sia dall'elevato valore dell'indice di silhouette ottenuto per la soluzione con due gruppi.

Anche in questo caso, tuttavia, le due modalità devono essere interpretate come comportamenti operativi stimati sulla base delle caratteristiche elettriche degli eventi e non come due specifici programmi dell'asciugatrice. In assenza dell'informazione relativa al programma effettivamente selezionato dall'utente, non è infatti possibile stabilire una corrispondenza diretta tra i gruppi individuati e i programmi nominali previsti dal costruttore.

HVAC1

Nel caso di HVAC1 è più appropriato parlare di regimi operativi stimati piuttosto che di modalità o programmi direttamente selezionati dall'utente. L'applicazione della procedura di clustering ha portato all'individuazione di due gruppi. La configurazione con due gruppi presenta infatti il valore medio dell'indice di silhouette più elevato, pari a 0,859. Le configurazioni con 3, 4 e 5 gruppi hanno invece restituito valori rispettivamente pari a 0,823, 0,643 e 0,622.

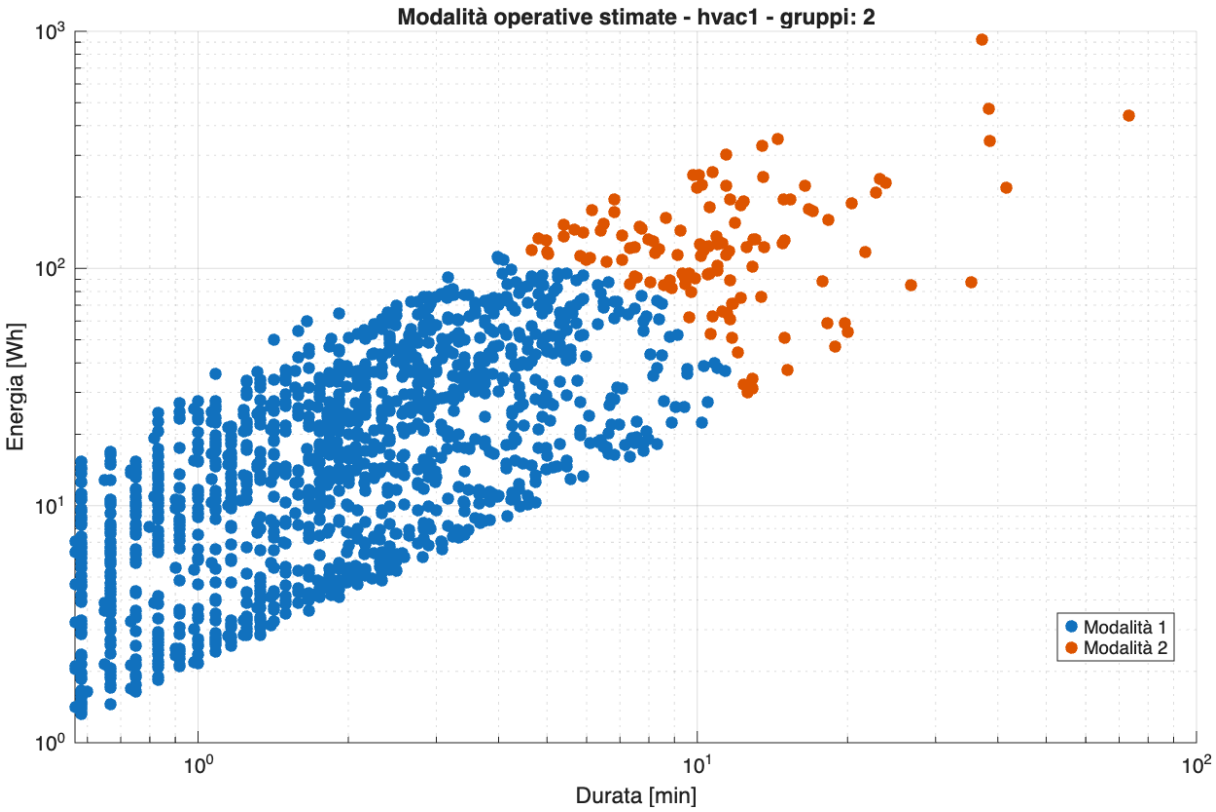


Figure 52: *Regimi operativi stimati per HVAC1 nel piano durata–energia.*

Come mostrato in Figura 52, il primo regime comprende la maggior parte degli eventi ed è caratterizzato prevalentemente da durate ed energie più contenute. La distribuzione risulta piuttosto ampia e mostra come, anche a parità di durata, possano verificarsi eventi caratterizzati da differenti consumi energetici.

Il secondo regime comprende invece un numero più limitato di eventi e occupa principalmente la regione associata a durate ed energie maggiori. Sebbene sia presente una zona di transizione tra i due gruppi, la separazione complessiva risulta ben definita ed è coerente con l'elevato valore dell'indice di silhouette ottenuto.

Anche per HVAC1 si osserva una generale crescita dell'energia consumata all'aumentare della durata dell'evento. La dispersione verticale presente nella figura indica tuttavia che la durata non è l'unico ele-

mento che caratterizza il comportamento del dispositivo: eventi di durata confrontabile possono essere associati a quantità di energia differenti e, di conseguenza, a differenti livelli medi di potenza assorbita.

L'individuazione dei due gruppi evidenzia quindi la presenza di almeno due differenti regimi di funzionamento riconoscibili nei dati. A differenza di quanto avviene per elettrodomestici come lavatrice, lavastoviglie e asciugatrice, tali gruppi non devono però essere interpretati come differenti programmi selezionati dall'utente. Il comportamento di un sistema HVAC può infatti dipendere dalle condizioni ambientali, dal set-point impostato, dalla regolazione automatica e dalla modalità di funzionamento del sistema.

In assenza di informazioni aggiuntive relative a tali condizioni, non è possibile attribuire ai due gruppi uno specifico significato fisico, ad esempio associandoli al funzionamento in riscaldamento o raffrescamento. Il risultato permette pertanto di affermare solamente che, dal punto di vista del comportamento elettrico osservato, HVAC1 presenta due regimi operativi distinti.

HVAC2

Anche per HVAC2 l'analisi viene interpretata in termini di regimi operativi stimati. La procedura di clustering ha individuato due gruppi come soluzione migliore, con un valore medio dell'indice di silhouette pari a 0,822. Le configurazioni con 3, 4 e 5 gruppi hanno invece restituito valori inferiori, rispettivamente pari a 0,702, 0,517 e 0,545. La soluzione con due gruppi risulta quindi quella che fornisce la migliore separazione complessiva degli eventi.

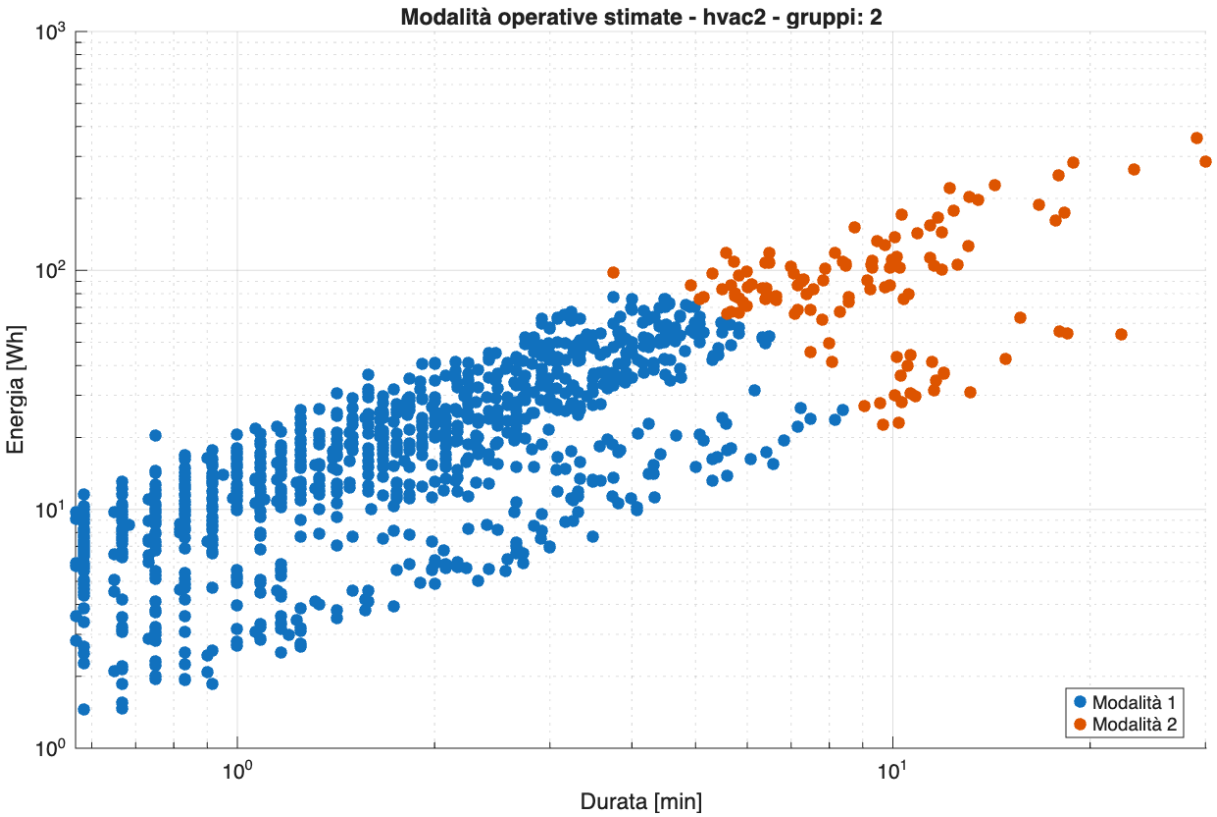


Figure 53: *Regimi operativi stimati per HVAC2 nel piano durata–energia.*

Come mostrato in Figura 53, il primo regime comprende la maggior parte degli eventi e occupa prevalentemente la regione caratterizzata da durate ed energie più contenute. All'interno di questo gruppo è comunque presente una certa variabilità energetica: eventi di durata simile possono infatti presentare consumi differenti.

Il secondo regime è invece associato prevalentemente a eventi di maggiore durata e maggiore consumo energetico. Rispetto al primo gruppo, gli eventi risultano distribuiti in una regione distinta del piano durata–energia, pur essendo presente una zona di transizione tra i due insiemi. La separazione osservata risulta coerente con l'elevato valore dell'indice di silhouette ottenuto per la configurazione a due gruppi.

Anche per HVAC2 emerge una generale relazione crescente tra durata ed energia consumata. La presenza di differenti livelli energetici a parità o quasi di durata indica tuttavia che il comportamento del dispositivo non può essere descritto esclusivamente attraverso la durata dell'attivazione, ma dipende anche dall'intensità del funzionamento durante l'evento.

I due gruppi individuati evidenziano pertanto la presenza di due differenti regimi di funzionamento riconoscibili dal punto di vista elettrico. Come già osservato per HVAC1, non è però possibile attribuire direttamente a tali regimi uno specifico significato fisico. Differenze di questo tipo potrebbero dipendere, ad esempio, dalle condizioni ambientali, dal set-point, dalla regolazione automatica o dalla modalità di funzionamento del sistema.

In assenza di informazioni aggiuntive sulle condizioni nelle quali si sono verificati gli eventi, non sarebbe quindi corretto identificare i due gruppi, ad esempio, con il funzionamento in riscaldamento e raffrescamento. Il risultato permette esclusivamente di concludere che HVAC2 presenta due regimi operativi elettricamente distinguibili all'interno dei dati analizzati.

Nel complesso, l'analisi ha evidenziato la presenza di differenti modalità o regimi operativi all'interno degli eventi rilevati. I gruppi individuati devono tuttavia essere interpretati come una classificazione data-driven dei comportamenti elettrici osservati e non come l'identificazione certa dei programmi o delle impostazioni effettivamente selezionate dall'utente. I risultati ottenuti verranno quindi utilizzati nella successiva profilazione finale dei dispositivi, insieme agli altri indicatori ricavati dalle analisi precedenti.

4.1.8 Profilazione finale dei dispositivi

A partire dai gruppi individuati nella precedente analisi, è stata costruita una profilazione finale dei dispositivi considerati, con l'obiettivo di sintetizzare il comportamento prevalente osservato per ciascuno di essi.

Per ogni dispositivo sono stati considerati il numero di modalità o regimi individuati, il gruppo prevalente, il numero di eventi appartenenti a tale gruppo, la relativa percentuale di prevalenza e le principali caratteristiche associate, in termini di durata tipica, potenza media ed energia media.

Come discusso nella Sezione 4.6, per lavatrice, lavastoviglie e asciugatrice i gruppi vengono interpretati come modalità operative stimate, mentre per HVAC1 e HVAC2 è più corretto parlare di regimi operativi stimati. In questi ultimi casi, infatti, le differenze osservate possono dipendere non soltanto dall'utilizzo del dispositivo, ma anche dalle condizioni ambientali e dalla regolazione automatica del sistema.

Lavatrice

Per la lavatrice sono state individuate 3 modalità operative stimate. La Modalità 1 risulta prevalente, comprendendo 1016 eventi, corrispondenti al 77.4981% del totale degli eventi considerati.

La modalità prevalente presenta una durata tipica pari a 4.7917 min, una potenza media di 129.2881 W e un'energia media di 14.6350 Wh.

La profilazione evidenzia quindi la presenza di un comportamento principale, che raccoglie oltre tre quarti degli eventi analizzati. La restante parte degli eventi è distribuita tra le altre due modalità individuate, mostrando come il funzionamento della lavatrice non sia riconducibile esclusivamente a un unico comportamento energetico.

Il risultato è coerente con quanto osservato nell'analisi precedente, nella quale erano emersi tre insiemi distinguibili sulla base della combinazione tra durata, potenza media ed energia. Si può quindi concludere che la lavatrice presenta una modalità prevalente, accompagnata tuttavia da modalità alternative utilizzate con frequenza non trascurabile.

Lavastoviglie

Per la lavastoviglie sono state individuate 2 modalità operative stimate. La Modalità 1 risulta prevalente, con 1337 eventi, pari al 74.0720% del totale.

La modalità prevalente è caratterizzata da una durata tipica di 6.1500 min, una potenza media pari a 937.7580 W e un'energia media di 91.6303 Wh.

Anche per la lavastoviglie emerge quindi una modalità principale, alla quale appartengono circa tre quarti degli eventi analizzati. La restante parte, pari a circa il 26%, appartiene alla seconda modalità e rappresenta pertanto una componente non trascurabile del comportamento complessivo.

Come discusso nella Sezione 4.6, è stata inoltre verificata una possibile suddivisione in tre gruppi, suggerita dalla struttura osservabile nel piano durata–energia. Sebbene tale configurazione producesse gruppi numericamente consistenti, il valore medio dell'indice di silhouette risultava inferiore rispetto alla soluzione con due gruppi. È stata pertanto mantenuta la configurazione a due modalità, risultata complessivamente più compatta e meglio separata.

Asciugatrice

Per l'asciugatrice sono state individuate 2 modalità operative stimate. La Modalità 1 risulta nettamente prevalente, con 1239 eventi, corrispondenti al 90.3061% del totale.

La modalità prevalente presenta una durata tipica pari a 3.3833 min, una potenza media di 323.7666 W e un'energia media di 26.6060 Wh.

Il comportamento dell'asciugatrice risulta quindi fortemente concentrato nella prima modalità, mentre la seconda comprende meno del 10% degli eventi complessivi. Nonostante la differenza numerica tra i due gruppi, la precedente rappresentazione nel piano durata–energia ha mostrato una separazione particolarmente chiara tra le due modalità, con il secondo gruppo associato prevalentemente a eventi di maggiore durata e maggiore consumo energetico.

La profilazione evidenzia pertanto un comportamento prevalente molto frequente, accompagnato da una seconda modalità meno utilizzata ma chiaramente distinguibile dal punto di vista temporale ed energetico.

HVAC1

Per HVAC1 sono stati individuati 2 regimi operativi stimati. Il Regime 1 risulta prevalente, comprendendo 1349 eventi, pari al 91.6440% del totale.

Il regime prevalente presenta una durata tipica di 1.8333 min, una potenza media di 596.7071 W e un'energia media pari a 22.2030 Wh.

Il funzionamento di HVAC1 risulta quindi fortemente concentrato in un regime principale, mentre il secondo regime rappresenta una quota inferiore al 10% degli eventi.

Come osservato nella precedente analisi, i due gruppi risultano distinguibili sulla base delle caratteristiche temporali ed energetiche degli eventi. La prevalenza del primo gruppo indica quindi che il sistema opera nella maggior parte dei casi secondo un comportamento elettrico ricorrente.

Non è tuttavia possibile attribuire direttamente ai due regimi uno specifico significato fisico. In assenza di informazioni relative alle condizioni ambientali, al set-point e alla modalità di funzionamento del sistema, i gruppi devono essere interpretati esclusivamente come differenti regimi elettrici osservati nei dati.

HVAC2

Anche per HVAC2 sono stati individuati 2 regimi operativi stimati. Il Regime 1 risulta prevalente, con 957 eventi, corrispondenti all'89.0233% del totale.

Il regime prevalente presenta una durata tipica pari a 1.7333 min, una potenza media di 625.4283 W e un'energia media di 21.2541 Wh.

HVAC2 presenta quindi un comportamento prevalentemente concentrato nel primo regime, sebbene il secondo rappresenti una quota superiore al 10% degli eventi e non possa pertanto essere considerato trascurabile.

La precedente rappresentazione nel piano durata–energia ha inoltre mostrato che il secondo regime occupa prevalentemente una regione caratterizzata da durate ed energie maggiori. Ciò conferma la presenza di due differenti condizioni di funzionamento riconoscibili dal punto di vista elettrico.

Anche in questo caso, tuttavia, non è possibile associare direttamente i gruppi a specifiche condizioni fisiche, come il funzionamento in riscaldamento o raffrescamento, senza disporre di ulteriori informazioni sulle impostazioni del sistema e sulle condizioni ambientali.

Considerazioni complessive

La profilazione finale mostra che tutti i dispositivi analizzati presentano un comportamento prevalente, ma con differenti livelli di concentrazione degli eventi.

L'asciugatrice presenta la maggiore prevalenza, con circa il 90.3% degli eventi appartenenti alla stessa modalità operativa. Valori analogamente elevati si osservano per HVAC1 e HVAC2, nei quali il regime prevalente comprende rispettivamente circa il 91.6% e l'89.0% degli eventi.

Lavatrice e lavastoviglie mostrano invece una maggiore distribuzione tra differenti modalità: il gruppo prevalente rappresenta rispettivamente circa il 77.5% e il 74.1% degli eventi. In questi due dispositivi, quindi, le modalità alternative assumono un peso maggiore nel comportamento complessivo osservato.

Nel complesso, i risultati consentono di sintetizzare quantitativamente non soltanto quale comportamento risulti prevalente per ciascun dispositivo, ma anche quanto le modalità o i regimi alternativi incidano sull'utilizzo complessivo. Le classificazioni ottenute rimangono comunque di natura data-driven e descrivono comportamenti elettrici ricorrenti, senza consentire l'identificazione certa dei programmi o delle condizioni operative effettivamente selezionate.

4.2 Applicazione della metodologia a un secondo utente

Al fine di verificare l'applicabilità della metodologia sviluppata anche a un caso di studio differente, la procedura descritta nel Capitolo 3 è stata applicata a un secondo dataset, relativo a una diversa utenza residenziale.

L'obiettivo di questa analisi non è quello di replicare integralmente tutte le elaborazioni presentate per il primo utente, ma di valutare se la procedura proposta sia in grado di fornire risultati interpretabili anche in presenza di una diversa composizione dei carichi monitorati e di differenti caratteristiche dei dati disponibili.

4.2.1 Caratteristiche del secondo dataset

Il secondo dataset presenta una struttura differente rispetto a quello utilizzato per il caso di studio principale. In particolare, oltre alla misura della potenza attiva aggregata dell'abitazione, sono disponibili le misure individuali relative a tre dispositivi: asciugatrice, macchina del caffè e microonde.

Anche in questo caso, i segnali presentano una risoluzione temporale non perfettamente uniforme. L'intervallo mediano tra campioni consecutivi risulta pari a circa 106 s per i tre dispositivi monitorati individualmente e a 60 s per il segnale aggregato.

La disponibilità temporale dei diversi segnali non coincide completamente. L'intersezione delle giornate per le quali risultano disponibili contemporaneamente tutte le misure ha permesso di individuare 183 giorni comuni, compresi tra il 24 marzo 2025 e il 12 agosto 2026. Tali giornate sono state utilizzate per le analisi che richiedono il confronto tra più segnali, secondo lo stesso criterio adottato per il primo utente.

Dal punto di vista implementativo, il passaggio al secondo utente non ha richiesto una modifica sostanziale della struttura generale delle routine sviluppate per il primo caso di studio. Le procedure di importazione e organizzazione dei dati, gestione delle informazioni temporali, individuazione delle giornate comuni ed estrazione degli eventi hanno potuto essere applicate mantenendo la stessa logica, modificando principalmente l'insieme dei segnali considerati e i parametri dipendenti dalle caratteristiche dei dispositivi.

In particolare, l'individuazione dello stato di funzionamento e la ricostruzione degli eventi hanno richiesto l'adattamento delle soglie e dei parametri temporali alle caratteristiche di asciugatrice, macchina del caffè e microonde, senza modificare la struttura delle relative routine. Anche le successive analisi della distribuzione temporale delle attivazioni e della contemporaneità sono state applicate secondo la stessa procedura, adattando quest'ultima alla presenza di tre dispositivi monitorati anziché dei sei disponibili per il primo utente.

La procedura utilizzata per la stima della potenza non monitorata è stata anch'essa mantenuta nella sua struttura generale: il segnale aggregato è stato utilizzato come riferimento temporale e confrontato con la somma delle potenze dei dispositivi individualmente monitorati. Analogamente, la caratterizzazione degli eventi e la procedura automatica per l'individuazione delle modalità operative stimate sono state applicate ai dispositivi del secondo utente senza richiedere modifiche alla logica generale dell'elaborazione.

L'applicazione al secondo dataset ha quindi richiesto principalmente un adattamento dei parametri e dell'insieme dei segnali considerati, piuttosto che una riprogettazione delle routine sviluppate per il primo utente. Dal punto di vista pratico, ciò ha permesso di utilizzare la stessa struttura di elaborazione anche in presenza di una configurazione del sistema di monitoraggio differente.

4.2.2 Risultati principali della profilazione

L'analisi della distribuzione temporale degli eventi ha evidenziato comportamenti differenti tra i dispositivi monitorati. In particolare, la macchina del caffè presenta una concentrazione marcata delle attivazioni nelle fasce mattutine, mentre per il microonde sono osservabili concentrazioni delle attivazioni sia nelle ore mattutine sia in quelle serali. L'asciugatrice presenta invece una distribuzione maggiormente dispersa nel corso della giornata.

Tali risultati mostrano come l'analisi degli istanti di inizio degli eventi consenta di evidenziare, anche per il secondo utente, fasce orarie caratterizzate da una maggiore frequenza di utilizzo dei singoli dispositivi. Le distribuzioni ottenute devono tuttavia essere interpretate come indicatori delle abitudini temporali osservate e non come una ricostruzione completa delle attività svolte dall'utente.

Per quanto riguarda la contemporaneità di utilizzo, il secondo utente presenta una sovrapposizione estremamente limitata tra i dispositivi individualmente monitorati. Per il 96.442% del tempo analizzato nessuno dei tre dispositivi risulta attivo, mentre nel 3.524% dei casi risulta attivo un solo dispositivo. La presenza contemporanea di due dispositivi si verifica solamente nello 0.033% del tempo, mentre l'attivazione simultanea di tutti e tre i dispositivi rappresenta circa lo 0.001% del periodo analizzato.

Complessivamente, la presenza di almeno due dispositivi monitorati contemporaneamente attivi interessa quindi circa lo 0.034% del tempo considerato. Tale risultato evidenzia una contemporaneità molto ridotta tra asciugatrice, macchina del caffè e microonde. È tuttavia necessario ricordare che l'analisi riguarda esclusivamente i dispositivi per i quali è disponibile una misura individuale e non consente pertanto di descrivere la contemporaneità complessiva di tutti i carichi presenti nell'abitazione.

Un'ulteriore indicazione sulla copertura del sistema di monitoraggio è fornita dall'analisi della potenza non monitorata. Sui campioni per i quali è stato possibile effettuare il confronto tra il segnale aggregato e tutti i segnali individuali, la potenza aggregata media risulta pari a circa 365.46 W, mentre la somma delle potenze individualmente monitorate presenta un valore medio di circa 45.45 W.

L'integrazione temporale dei segnali ha fornito un'energia aggregata complessiva pari a circa 724.04 kWh, dei quali circa 70.80 kWh risultano spiegati dai dispositivi individualmente monitorati. La copertura energetica del monitoraggio risulta pertanto pari al 9.78%, mentre la quota di energia attribuita ai carichi non monitorati è pari al 90.22%.

L'elevata percentuale di energia non monitorata è coerente con la disponibilità, per il secondo utente, delle misure individuali di soli tre dispositivi. Il residuo energetico non permette tuttavia di identificare quali ulteriori carichi siano responsabili della potenza non spiegata, ma fornisce un'indicazione quantitativa della porzione del consumo complessivo non rappresentata dai segnali individuali disponibili.

L'analisi delle caratteristiche degli eventi ha inoltre permesso di applicare la procedura automatica di individuazione delle modalità operative stimate anche ai dispositivi del secondo utente.

Per l'asciugatrice sono state individuate due modalità operative, caratterizzate da una silhouette media pari a 0.7845. Le due modalità comprendono ciascuna il 50% degli eventi analizzati, ma presentano caratteristiche nettamente differenti. La prima è associata a una durata mediana di circa 10.77 min e a un'energia media di circa 67.01 Wh, mentre la seconda presenta una durata mediana di circa 135.09 min e un'energia media di circa 1660.6 Wh.

Per la macchina del caffè sono state individuate tre modalità operative stimate, con silhouette media pari a 0.7131. La modalità più numerosa comprende il 42.76% degli eventi e presenta una durata mediana di circa 2.01 min.

Il microonde presenta invece due modalità operative stimate, con silhouette media pari a 0.8833. In questo caso emerge una modalità nettamente prevalente, alla quale appartiene il 92.31% degli eventi, caratterizzata da una durata mediana pari a circa 1 min, una potenza media di circa 1330.5 W e un'energia media di circa 26.31 Wh.

Come già discusso per il primo utente, i gruppi individuati mediante clustering devono essere interpretati come modalità operative stimate sulla base delle caratteristiche degli eventi rilevati e non come identificazione certa dei programmi di funzionamento definiti dal costruttore.

4.3 Confronto tra i due utenti

L'applicazione della stessa procedura ai due dataset permette di effettuare alcune considerazioni comparative. Tale confronto deve essere interpretato tenendo conto delle differenze esistenti tra i due casi di studio, in particolare per quanto riguarda il numero e la tipologia dei dispositivi individualmente monitorati e la copertura energetica complessiva del sistema di misura.

Table 8: *Confronto sintetico dei principali risultati ottenuti per i due utenti.*

Indicatore	Utente 1	Utente 2
Dispositivi individualmente monitorati	6	3
Giorni comuni	195	183
Tempo con almeno 2 dispositivi attivi	4.83%	0.034%
Copertura energetica del monitoraggio	29.97%	9.78%
Energia non monitorata	70.03%	90.22%

La contemporaneità tra i dispositivi monitorati risulta sensibilmente maggiore nel primo utente, per il quale almeno due dispositivi risultano contemporaneamente attivi per circa il 4.83% del tempo analizzato, rispetto a circa lo 0.034% osservato nel secondo utente.

Tale differenza non può tuttavia essere attribuita esclusivamente a differenti abitudini di utilizzo. Nel secondo dataset sono infatti disponibili soltanto tre segnali individuali, contro i sei del primo caso di studio. La probabilità di osservare sovrapposizioni tra dispositivi risulta quindi influenzata anche dalla diversa estensione del sistema di monitoraggio.

Una differenza analoga emerge dall'analisi energetica. Nel primo utente i dispositivi individualmente monitorati spiegano circa il 29.97% dell'energia aggregata, mentre nel secondo utente la copertura si riduce al 9.78%. Di conseguenza, la quota di energia non monitorata passa dal 70.03% al 90.22%.

Questo risultato evidenzia come l'interpretazione della potenza non monitorata dipenda in maniera significativa dal grado di copertura del sistema di misura. Una maggiore quota residua non implica necessariamente una minore efficacia della metodologia, ma può essere conseguenza della disponibilità di un numero inferiore di segnali individuali.

Un confronto più diretto può essere effettuato per l'asciugatrice, unico dispositivo presente in entrambi i dataset. In entrambi i casi la procedura di clustering individua due modalità operative stimate, con valori di silhouette media pari rispettivamente a 0.8343 per il primo utente e 0.7845 per il secondo.

La distribuzione degli eventi tra le due modalità risulta tuttavia profondamente differente. Nel primo utente la modalità prevalente comprende il 90.31% degli eventi, mentre la seconda rappresenta solamente il 9.69%. Nel secondo utente, invece, gli eventi risultano suddivisi in maniera uniforme tra le due modalità, con una percentuale del 50% per ciascun gruppo.

Anche le caratteristiche energetiche e temporali dei gruppi risultano differenti. Nel secondo utente, in particolare, una delle due modalità presenta una durata mediana di circa 135 min e un'energia media di circa 1.66 kWh, evidenziando un comportamento significativamente diverso rispetto alle modalità individuate nel primo caso di studio.

Il risultato mostra quindi che l'applicazione della stessa metodologia non conduce necessariamente a profili analoghi, ma permette di evidenziare differenze nelle caratteristiche degli eventi e nella distribuzione delle modalità operative tra utenze differenti.

Dal punto di vista metodologico, il confronto conferma quindi quanto osservato nell'applicazione al secondo utente: la struttura generale delle routine può essere mantenuta, mentre il contenuto delle analisi ottenibili dipende dai segnali effettivamente disponibili.

La sequenzialità tra dispositivi non è stata invece analizzata per il secondo utente, poiché tra i dispositivi individualmente monitorati non è presente una coppia caratterizzata da una relazione funzionale analoga a quella considerata tra lavatrice e asciugatrice nel primo dataset. L'estensione forzata di tale analisi a dispositivi privi di una relazione funzionale plausibile avrebbe prodotto risultati di limitato significato interpretativo.

I risultati ottenuti supportano pertanto l'utilizzo della procedura proposta come strumento generale di profilazione dei consumi residenziali, fermo restando che la completezza e il livello di dettaglio del profilo ottenibile dipendono dalla quantità, dalla tipologia e dalla qualità dei segnali individuali disponibili.

4.4 Discussione complessiva e limiti dell'analisi

Le analisi effettuate hanno permesso di caratterizzare le abitudini di consumo dell'utenza residenziale considerando congiuntamente differenti aspetti del comportamento dei dispositivi monitorati. In particolare, la distribuzione temporale delle attivazioni, la durata degli eventi, la contemporaneità di utilizzo, le relazioni sequenziali tra dispositivi, la componente di potenza non monitorata e l'individuazione di modalità o regimi operativi ricorrenti forniscono informazioni complementari che consentono di descrivere il profilo di consumo in maniera più articolata rispetto alla sola osservazione del segnale di potenza aggregata.

Dal punto di vista temporale, sono emerse differenze significative tra i dispositivi. Gli elettrodomestici il cui utilizzo è maggiormente legato alle decisioni dell'utente, come lavatrice, lavastoviglie e asciugatrice, presentano fasce orarie di attivazione preferenziali. Il frigorifero mostra invece un comportamento maggiormente distribuito nell'arco della giornata, coerentemente con il carattere automatico e ciclico del suo funzionamento. Anche i sistemi HVAC presentano specifiche concentrazioni temporali, la cui interpretazione risulta tuttavia condizionata dalla mancanza di informazioni relative alle condizioni ambientali e alla logica di regolazione adottata.

L'analisi della contemporaneità ha mostrato che, per la maggior parte del periodo considerato, risulta attivo al più uno dei dispositivi monitorati, mentre le condizioni caratterizzate dalla presenza simultanea di più carichi occupano una frazione più limitata del tempo. Tra le combinazioni osservate più frequentemente compare spesso il frigorifero. Tale risultato deve essere interpretato tenendo conto del suo funzionamento automatico: la sovrapposizione con altri elettrodomestici non rappresenta necessariamente una scelta comportamentale dell'utente, ma può derivare dalla coincidenza tra l'attivazione automatica del sistema di refrigerazione e l'utilizzo degli altri carichi.

Anche le durate degli eventi evidenziano la diversa natura dei dispositivi considerati. Alcuni carichi presentano eventi relativamente concentrati, mentre altri mostrano una maggiore variabilità. Gli eventi individuati devono tuttavia essere interpretati come intervalli di funzionamento ricostruiti a partire dai segnali di potenza e non necessariamente come cicli completi degli elettrodomestici. Pause interne, transizioni operative e discontinuità nell'acquisizione possono infatti determinare la suddivisione di uno stesso utilizzo fisico in più eventi distinti. In questo contesto, l'impiego di indicatori statistici robusti, quali mediana e percentili, permette di descrivere il comportamento tipico limitando l'influenza degli eventi estremi.

L'analisi sequenziale ha inoltre evidenziato una ricorrente vicinanza temporale tra le sessioni di utilizzo della lavatrice e dell'asciugatrice. La maggior parte delle sequenze individuate presenta infatti una distanza temporale contenuta, compatibile con un comportamento domestico nel quale l'asciugatura segue frequentemente il lavaggio, pur non avvenendo necessariamente nell'immediato. Tale relazione deve tuttavia essere interpretata esclusivamente come un'associazione temporale ricorrente: i dati disponibili non permettono di dimostrare che ogni sessione dell'asciugatrice individuata sia effettivamente conseguenza della specifica sessione della lavatrice alla quale è stata associata.

L'analisi delle modalità e dei regimi operativi stimati ha consentito di evidenziare differenti livelli di ripetitività nel funzionamento dei dispositivi. Lavatrice e lavastoviglie presentano un comportamento prevalente accompagnato da una quota non trascurabile di modalità alternative, mentre l'asciugatrice e i sistemi HVAC mostrano una maggiore concentrazione nel comportamento dominante. Tali gruppi descrivono tuttavia esclusivamente regolarità individuate nelle caratteristiche energetiche e temporali degli eventi e non possono essere associati direttamente a specifici programmi o condizioni fisiche di funzionamento.

Nel caso dei sistemi HVAC, in particolare, l'interpretazione dei regimi individuati richiederebbe informazioni aggiuntive relative, ad esempio, alla temperatura interna ed esterna, al set-point impostato e alla modalità effettivamente selezionata. In assenza di tali informazioni, i gruppi ottenuti devono essere interpretati come differenti comportamenti elettrici osservati nei segnali disponibili, senza attribuire loro una specifica condizione operativa.

L'analisi della potenza non monitorata ha mostrato inoltre che i dispositivi misurati singolarmente non sono sufficienti a descrivere completamente il consumo dell'abitazione. La differenza tra il segnale aggregato e la potenza attribuibile agli elettrodomestici monitorati consente di stimare la componente di consumo non spiegata dai sensori individuali disponibili, ma non permette di identificare quali apparecchiature siano responsabili dei singoli contributi osservati. La potenza non monitorata deve pertanto essere considerata una grandezza complessiva e non uno strumento per l'identificazione diretta dei carichi non misurati.

L'interpretazione puntuale di tale grandezza è inoltre influenzata dalle caratteristiche temporali dei segnali acquisiti. Il segnale aggregato e quelli dei singoli dispositivi presentano infatti risoluzioni temporali differenti e non risultano perfettamente sincronizzati. In corrispondenza di rapide variazioni di potenza, uno stesso fenomeno può quindi essere registrato in istanti differenti dai diversi sistemi di misura. Come evidenziato attraverso il confronto diretto tra il segnale aggregato e quello della lavastoviglie, questa condizione può produrre temporaneamente una differenza tra le potenze confrontate e, di conseguenza, contribuire alla comparsa di picchi nella potenza non monitorata che non corrispondono necessariamente alla reale attivazione di un carico aggiuntivo.

La verifica quantitativa dell'associazione temporale ha inoltre mostrato che l'effetto della tolleranza adottata non è uniforme per tutti i dispositivi. Considerando una distanza temporale massima di 5

minuti, la maggior parte delle associazioni relative a lavatrice, asciugatrice e frigorifero ricade entro la tolleranza, mentre percentuali inferiori si osservano per i sistemi HVAC e soprattutto per la lavastoviglie. Quest'ultima presenta infatti una risoluzione temporale più ridotta e intervalli tra campioni maggiormente variabili. La tolleranza di 5 minuti, introdotta come criterio operativo per evitare l'associazione di campioni eccessivamente distanti nel tempo, deve quindi essere considerata insieme alle differenti caratteristiche di acquisizione dei singoli segnali.

Più in generale, uno dei principali limiti del dataset riguarda proprio l'eterogeneità nella disponibilità e nella risoluzione temporale delle misure. I dispositivi non sono stati monitorati tutti nello stesso intervallo e sono presenti periodi privi di dati. Per le analisi che richiedono il confronto diretto tra più segnali è stato pertanto necessario limitarsi agli intervalli temporali comuni, riducendo la quantità di dati effettivamente utilizzabile per tali elaborazioni. La presenza di una giornata comune, inoltre, non implica necessariamente una disponibilità continua e uniforme dei campioni nell'intero arco della giornata.

Un ulteriore limite riguarda la ricostruzione degli eventi di funzionamento. L'identificazione degli eventi dipende dalle condizioni utilizzate per determinare lo stato dei dispositivi e dai criteri adottati per gestire le brevi interruzioni. Sebbene tali parametri siano stati verificati attraverso l'osservazione dei segnali e siano state introdotte procedure specifiche per ridurre la frammentazione, non è possibile garantire che ogni evento ricostruito corrisponda esattamente a un singolo ciclo fisico dell'elettrodomestico. Questo aspetto assume particolare importanza nelle analisi basate sulla durata e nella ricerca di relazioni sequenziali.

Anche l'interpretazione delle modalità operative stimate è limitata dall'assenza di etichette reali associate al funzionamento degli elettrodomestici. I gruppi individuati derivano dalle caratteristiche energetiche e temporali degli eventi e non da informazioni fornite direttamente dai dispositivi. Non è quindi possibile affermare che un determinato gruppo corrisponda, ad esempio, a uno specifico programma di lavaggio, asciugatura o a una determinata modalità di funzionamento dei sistemi HVAC.

Infine, l'applicazione della metodologia a un secondo utente ha consentito di verificarne l'utilizzo su un insieme di segnali differente, ma il confronto tra i due utenti deve essere interpretato considerando la diversa composizione dei rispettivi dataset. Il numero e la tipologia dei dispositivi monitorati non coincidono e, di conseguenza, differenze nella quota di consumo spiegata, nelle contemporaneità o nelle caratteristiche degli eventi non possono essere attribuite esclusivamente a differenti abitudini degli utenti. Il confronto costituisce quindi principalmente una verifica della trasferibilità della procedura di analisi a dataset con caratteristiche differenti.

Nel complesso, tali limitazioni non impediscono l'applicazione della metodologia, ma definiscono il livello di interpretazione che può essere attribuito ai risultati ottenuti. Le regolarità individuate descrivono comportamenti osservabili nei segnali disponibili, mentre l'attribuzione di specifiche cause fisiche o comportamentali richiederebbe informazioni aggiuntive non presenti nel dataset.

4.5 Sviluppi futuri

Un possibile sviluppo del lavoro riguarda l'estensione della metodologia verso sistemi di monitoraggio in grado di acquisire informazioni elettriche più dettagliate rispetto alla sola potenza attiva utilizzata nelle analisi svolte. In questa prospettiva potrebbe essere valutato l'impiego di circuiti integrati dedicati alla misura dell'energia e della qualità della potenza, come l'ADE9000 di Analog Devices.

L'ADE9000 è un circuito integrato per il monitoraggio dell'energia e della power quality che consente di ottenere, oltre alle misure di tensione e corrente efficaci, diverse grandezze elettriche, tra cui potenza attiva, reattiva e apparente, fattore di potenza e distorsione armonica totale. Il dispositivo integra inoltre un waveform buffer attraverso il quale è possibile acquisire le forme d'onda di tensione e corrente. Tra le modalità disponibili è presente il ricampionamento delle forme d'onda a 128 campioni per periodo della rete [9], funzionalità che facilita l'esecuzione di analisi armoniche mediante trasformata di Fourier su un processore esterno [10].

La disponibilità di tali informazioni permetterebbe di descrivere il funzionamento dei carichi attraverso un insieme di caratteristiche più ampio rispetto alla sola potenza attiva. Ad esempio, per ciascun intervallo di osservazione potrebbe essere costruito un vettore di caratteristiche del tipo

$$\mathbf{x} = [P,\, Q,\, S,\, I_{\mathrm{RMS}},\, V_{\mathrm{RMS}},\, PF,\, THD_I,\, I_1,\, I_2,\, \ldots,\, I_n]\,, \tag{21}$$

dove $I_1, \ldots, I_n$ rappresentano le componenti armoniche della corrente, ricavabili mediante l'elaborazione delle forme d'onda acquisite. Tali caratteristiche potrebbero successivamente essere utilizzate come ingresso di algoritmi di classificazione o di riconoscimento dei carichi, verificando se dispositivi differenti presentino firme elettriche sufficientemente distinguibili.

Questa estensione permetterebbe inoltre di approfondire uno dei limiti emersi nell'analisi della potenza non monitorata. Nel metodo sviluppato in questo lavoro, infatti, la differenza tra potenza aggregata e potenza associata ai dispositivi monitorati permette di quantificare la componente di consumo non spiegata dai sensori disponibili, ma non consente di identificare quali carichi ne siano responsabili. L'impiego di caratteristiche elettriche più informative, eventualmente combinato con tecniche di classificazione, potrebbe consentire di studiare la possibilità di riconoscere o distinguere alcuni dei carichi presenti nel segnale complessivo.

In una prospettiva più ampia, tale approccio potrebbe quindi costituire un primo passo verso tecniche di Non-Intrusive Load Monitoring (NILM), nelle quali l'obiettivo è stimare il contributo dei singoli carichi a partire principalmente da misure elettriche effettuate a monte dell'impianto, riducendo la necessità di disporre di un sensore dedicato per ciascun elettrodomestico.

Un sistema di acquisizione centralizzato permetterebbe infine di affrontare anche alcune delle criticità temporali osservate nel dataset analizzato. L'utilizzo di segnali acquisiti all'interno di una stessa catena di misura ridurrebbe infatti la necessità di associare campioni provenienti da sensori indipendenti caratterizzati da differenti risoluzioni temporali e non perfettamente sincronizzati. La realizzazione e la validazione sperimentale di una simile architettura, insieme allo sviluppo degli algoritmi necessari all'estrazione delle caratteristiche e alla classificazione dei carichi, rappresentano pertanto possibili sviluppi futuri del presente lavoro.

5 Conclusioni

Il presente lavoro ha avuto come obiettivo lo sviluppo di una metodologia per l'analisi e la profilazione delle abitudini di consumo elettrico di utenze residenziali a partire da misure di potenza attiva. La disponibilità congiunta del segnale aggregato dell'abitazione e dei segnali relativi a singoli elettrodomestici ha consentito di analizzare il comportamento dei diversi carichi e di ricavare informazioni non immediatamente osservabili attraverso la sola curva di consumo complessiva.

A partire dai dati grezzi è stata sviluppata una procedura di elaborazione articolata in più fasi. Dopo l'importazione e l'organizzazione dei segnali, sono state analizzate le rispettive caratteristiche temporali e sono stati individuati gli intervalli nei quali le misure risultavano confrontabili. Successivamente, attraverso la definizione dello stato di funzionamento dei dispositivi, sono stati ricostruiti gli eventi di utilizzo e ne sono state analizzate le principali caratteristiche temporali ed energetiche.

La metodologia sviluppata ha permesso di descrivere le abitudini di consumo da differenti punti di vista. L'analisi della distribuzione temporale delle attivazioni ha consentito di individuare le fasce della giornata maggiormente associate all'utilizzo dei diversi dispositivi, mentre lo studio delle durate ha fornito una caratterizzazione dei rispettivi eventi di funzionamento. L'analisi della contemporaneità ha permesso di valutare la sovrapposizione temporale tra i carichi monitorati e lo studio della sequenzialità tra lavatrice e asciugatrice ha evidenziato la presenza di una relazione temporale ricorrente tra le rispettive sessioni di utilizzo.

Il confronto tra la potenza aggregata e quella associata ai dispositivi monitorati ha inoltre consentito di stimare la componente di consumo non direttamente spiegata dalle misure individuali disponibili. Questa analisi ha messo in evidenza sia l'importanza dei carichi non monitorati sia le criticità derivanti dalle differenti caratteristiche temporali dei sistemi di acquisizione. In particolare, la diversa risoluzione dei segnali e la mancata sincronizzazione tra i sensori devono essere considerate nell'interpretazione puntuale della potenza non monitorata, soprattutto in corrispondenza delle rapide variazioni di potenza.

Un ulteriore livello di caratterizzazione è stato ottenuto attraverso l'individuazione di modalità e regimi operativi ricorrenti sulla base delle caratteristiche degli eventi. Tale analisi ha permesso di evidenziare differenti livelli di ripetitività nel comportamento elettrico dei dispositivi, senza tuttavia attribuire ai gruppi individuati specifici programmi o condizioni fisiche di funzionamento in assenza di informazioni aggiuntive.

L'applicazione della procedura a un secondo utente ha infine permesso di verificare l'utilizzo della metodologia su un dataset caratterizzato da una diversa disponibilità di dispositivi monitorati. Pur non consentendo un confronto completamente omogeneo tra le due utenze, tale applicazione ha mostrato la possibilità di utilizzare la stessa struttura di analisi anche in presenza di configurazioni di misura differenti.

Nel complesso, il lavoro svolto mostra come l'elaborazione strutturata delle misure di potenza possa trasformare una raccolta di serie temporali in una descrizione quantitativa delle principali caratteristiche di utilizzo dei carichi residenziali. L'integrazione di informazioni temporali, energetiche e relative alle relazioni tra dispositivi consente infatti di ottenere una profilazione più articolata rispetto alla semplice osservazione del consumo aggregato. La metodologia sviluppata costituisce pertanto una base per successive applicazioni nelle quali una maggiore disponibilità di misure, informazioni contestuali e caratteristiche elettriche possa consentire una caratterizzazione ancora più completa dei consumi residenziali.

References

[1] R. Agarwal, M. Garg, D. Tejaswini, V. Garg, P. Srivastava, J. Mathur and R. Gupta, "A review of residential energy feedback studies," *Energy and Buildings*, vol. 290, art. 113071, 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113071.

[2] J. Batalla-Bejerano, E. Trujillo-Baute and M. Villa-Arrieta, "Smart meters and consumer behaviour: Insights from the empirical literature," *Energy Policy*, vol. 144, art. 111610, 2020, doi: 10.1016/j.enpol.2020.111610.

[3] ARERA – Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente, "Sistema Informativo Integrato – SII," [Online]. Disponibile: `https://www.arera.it/en/area-operatori/sistema-informativo-integrato-sii`.

[4] ARERA – Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente, "Il Portale Consumi," [Online]. Disponibile: `https://www.arera.it/consumatori/il-portale-consumi`.

[5] G. W. Hart, "Nonintrusive appliance load monitoring," *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, no. 12, pp. 1870–1891, 1992, doi: 10.1109/5.192069.

[6] G.-F. Angelis, C. Timplalexis, S. Krinidis, D. Ioannidis and D. Tzovaras, "NILM applications: Literature review of learning approaches, recent developments and challenges," *Energy and Buildings*, vol. 261, art. 111951, 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.111951.

[7] J. MacQueen, "Some methods for classification and analysis of multivariate observations," in *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, vol. 1, pp. 281–297, 1967.

[8] P. J. Rousseeuw, "Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 20, pp. 53–65, 1987, doi: 10.1016/0377-0427(87)90125-7.

[9] Analog Devices, "ADE9000 High Performance, Multiphase Energy, and Power Quality Monitoring IC," *Data Sheet*, Rev. B. [Online]. Disponibile: `https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADE9000.pdf`.

[10] Analog Devices, "Harmonic Analysis Using the ADE9000," *Application Note AN-1483*. [Online]. Disponibile: `https://www.analog.com/en/resources/app-notes/an-1483.html`.