

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Elettrica

Tesi di Laurea

Applicazione domotica Open Source negli impianti elettrici



Relatore:

Prof. Paolo Di Leo

Correlatore:

Ing. Alessandro Ciocia

Candidato:

Candian Giorgio

S230874

Anno accademico 2017-2018

Ringraziamenti

Questa tesi rappresenta la conclusione di un percorso pieno di difficoltà, e di soddisfazioni. In primo luogo desidero ringraziare il Professor Di Leo e l'Ing. Ciocia che con la loro pazienza e grandissima competenza mi hanno seguito nella realizzazione di questo progetto.

Ringrazio i miei genitori che con il loro grande affetto e il loro costante sostegno mi hanno permesso di raggiungere questo obiettivo.

Ringrazio Paolo e Antonello che sono riusciti a rendere più leggero questo percorso che all'inizio sembrava infinito.

Ringrazio Maso, Simo, Pasqu, Carlo e gli amici di sempre per tutto ciò che abbiamo condiviso, vi voglio bene.

Ringrazio mio fratello Pasqui per tutto il tempo passato insieme e per quello che verrà.

Infine ringrazio il Famila Team con cui tra gioie e dolori ho passato momenti indimenticabili.

Sommario

1	Open source per la domotica	8
1.1	Domotica	9
1.2	Arduino	10
1.3	Perché Arduino.....	10
1.4	Arduino – Hardware	11
1.5	Arduino – Software	13
1.6	μPanel.....	14
1.7	Applicazione μPanel	14
1.8	Modulo Wi-Fi ESP8266 ESP-01	15
2	Strumenti e metodi di misura.....	16
2.1	Generalità	16
2.2	Incertezze sulle misure	17
2.3	Caratteristiche degli strumenti di misura.....	18
2.3.1	Caratteristiche di taratura.....	18
2.3.2	Risoluzione	19
2.3.3	Sensibilità	20
2.3.4	Precisione	20
2.4	Campionamento	21
2.5	Sensori di corrente	23
2.5.1	Sensori di corrente ad effetto Hall.....	23
2.5.2	Interfacciamento con Arduino	24
2.6	Sensori di tensione	26
2.6.1	Trasformatori AC-AC	26
2.6.2	Trasformatori AC-AC per PCB.....	28
3	Introduzione alla AC Power	29
3.1	Carichi resistivi.....	29
3.2	Carichi parzialmente reattivi	30
3.3	Potenza attiva, potenza reattiva e potenza apparente	31
3.4	Carichi non lineari.....	31
4	Progetto presa domotica	33

4.1	Componenti utilizzati	33
4.1.1	Sensore di corrente – Effetto Hall – ACS 712 x 20A.....	33
4.1.2	Sensore di tensione AC monofase ZMPT101B.....	34
4.1.3	Modulo SCF – TOP03.....	36
4.2	Circuito elettrico.....	37
4.3	Calibrazione	38
4.3.1	Calibrazione di fase	39
4.4	Calcolo incertezza.....	41
5	Realizzazione software di controllo e monitoraggio	42
5.1	Flow chart del software.....	42
5.2	Programmazione libreria IDE Arduino	46
5.2.1	Dichiarazione delle variabili	46
5.2.2	Void setup	46
5.2.3	Void loop.....	47
5.3	Progettazione dell'applicazione	49
5.4	Codice Definitivo	49
6	Prove sperimentali e grafici	58
6.1	Frigorifero.....	58
6.2	Forno & Lavastoviglie	61
6.3	Televisore	67
6.4	Computer & stampante.....	70
6.5	Energia consumata	75
6.6	Principali dati rilevati.....	81
7	Conclusioni.....	82
7.1	Sviluppi futuri	83
8	Appendice	84
9	Bibliografia	92

Introduzione

In un mondo sempre più caratterizzato dalla necessità di ridurre le emissioni e di conseguenza i consumi, la domotica svolge un ruolo fondamentale.

La “casa intelligente”, con l’avvento della domotica mette a disposizione dell’utente impianti dove apparecchiature e sistemi sono in grado di svolgere funzioni parzialmente o completamente autonome tramite opportune interfacce.

Negli ultimi anni si sta sviluppando sempre di più lo studio delle tecnologie atte a migliorare la qualità della vita, la sicurezza, semplificare la progettazione, l’installazione, la manutenzione e l’utilizzo della tecnologia, portando l’elettronica a basso costo in ogni ambiente domestico.

Spesso un sistema domotico viene completato attraverso uno o più sistemi di comunicazione con il mondo esterno per permettere il controllo e la visualizzazione dello stato anche da remoto.

In questo elaborato di tesi viene descritto e realizzato un prototipo di presa a spina smart Open Source, a basso costo per la misura in tempo reale del consumo elettrico e di tutti i parametri ad esso correlati. Gli hardware e i software che vengono utilizzati sono di tipo Open Source basati su Arduino e configurati in modo opportuno per gestire vari tipi di sensori.

Con il termine Open Source si vuole sottolineare il fatto che si tratta di file il cui formato è noto, accessibile a tutti e può essere modificato da qualsiasi programmatore.

1 Open Source per la domotica

Il concetto di Open Source è di rendere disponibile del materiale in termine di hardware e software in modo che chiunque possa sviluppare e condividere dei progetti per un beneficio collettivo. I programmi vengono sviluppati a partire da un codice sorgente (in inglese, source) che in seguito viene convertito in codice eseguibile, il quale se modificato può essere corretto, tradotto o esteso. Il codice sorgente dei programmi commerciali è di norma chiuso, ciò significa che solamente il produttore ne conosce il formato e può modificarlo.

Questo sicuramente comporta degli svantaggi:

- Solo il produttore può intervenire per modificare il programma, poiché il codice non è disponibile.
- L'utente non può sapere se il programma è sicuro o contiene malware.
- Il salvataggio di documenti in formati proprietari obbliga l'utente all'utilizzo di un particolare programma. L'interscambio dei documenti diventa impossibile se la controparte non possiede il programma.
- I documenti creati con vecchie versioni dei programmi possono risultare illeggibili.

Esistono però programmi Open Source, il cui codice sorgente è disponibile. Si tratta di file il cui formato è noto e disponibile all'implementazione da parte di qualsiasi produttore.

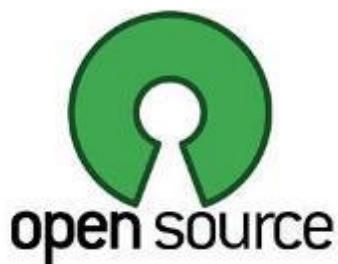


Figura 1-1 Logo Open Source

In questo modo il software Open Source:

- È disponibile senza restrizioni e gratuitamente per tutti. In questo modo può essere copiato ed installato ovunque si voglia.
- Essendo ispezionabile è più sicuro rispetto ai software commerciali perché gli errori vengono corretti rapidamente.
- Garantisce l'indipendenza dal produttore.

1.1 Domotica

La domotica si occupa dello studio delle tecnologie volte a migliorare la qualità della vita nella casa e più in generale negli edifici.

Si occupa in oltre di ottenere un notevole incremento delle prestazioni e delle possibilità offerte dai vari impianti presenti nell'unità abitativa, ottimizzando i consumi e permettendo l'integrazione di funzioni come controllo, comfort, comunicazione, risparmio energetico e sicurezza.



Figura 1-2 Tecnologie domotiche

Sia in ambito residenziale che in quello terziario, un sistema domotico permette infatti di realizzare la gestione coordinata di tutte queste funzioni.

Ci troviamo quindi di fronte ad una “smart home”, cioè un ambiente che mette a disposizione di chi lo vive, impianti che vanno ben oltre quello tradizionale.

Il ventaglio di soluzioni offerte è davvero ampio e ha l'enorme vantaggio che queste possono essere aumentate nel tempo per assecondare le esigenze di una continua trasformazione.

Infatti, una volta predisposto il cavo al quale collegare i dispositivi, in ogni momento sarà facilmente possibile, senza dover intervenire con ulteriori opere murarie, aggiungerne di nuovi.

Per quanto riguarda l'ambito terziario si parla di “building automation”, significa cioè integrare in un unico sistema le reti informatiche e di comunicazione con i vari impianti di climatizzazione, sicurezza ed illuminazione semplificandone così la gestione ed il controllo.

1.2 Arduino

Arduino è nato all'Interaction Design Institute di Ivrea come strumento facile per la prototipazione rapida, rivolto a studenti senza esperienza in elettronica e programmazione.



Figura 1-3 Logo Arduino

Le schede Arduino sono in grado di leggere gli input - luce su un sensore, un dito su un pulsante o un messaggio di Twitter - e trasformarli in output - attivare un motore, accendere un LED, pubblicare online. Per fare ciò si utilizza il linguaggio di programmazione Arduino e il Software Arduino (IDE). Nel corso degli anni Arduino è stato il cervello di migliaia di progetti, dagli oggetti di uso quotidiano a strumenti scientifici complessi. Una comunità mondiale di produttori - studenti, hobbisti, artisti, programmatori e professionisti - si è riunita attorno a questa piattaforma Open Source, i loro progetti hanno contribuito a un'incredibile quantità di conoscenza accessibile che può essere di grande aiuto sia per i principianti che per gli esperti.

Non appena ha raggiunto una comunità più ampia, la scheda Arduino ha iniziato a cambiare per adattarsi alle nuove esigenze e sfide.

Tutte le schede Arduino sono completamente Open Source, consentendo agli utenti di costruirle in modo indipendente e adattarle alle loro particolari esigenze.

Anche il software è Open Source e sta crescendo grazie ai contributi degli utenti di tutto il mondo.

1.3 Perché Arduino

Il software Arduino è facile da usare per i principianti, ma abbastanza flessibile per gli utenti avanzati. Funziona su Mac, Windows e Linux.

Insegnanti e studenti lo usano per costruire strumenti scientifici a basso costo, per dimostrare principi di chimica e fisica, o per iniziare con la programmazione e la robotica.

Designer e architetti costruiscono prototipi interattivi, musicisti e artisti lo usano per le installazioni e per sperimentare nuovi strumenti musicali.

Chiunque può iniziare ad armeggiare seguendo semplicemente le istruzioni passo passo di un kit o condividendo idee online con altri membri della comunità di Arduino.

Arduino semplifica anche il processo di utilizzo dei microcontrollori e offre alcuni vantaggi a insegnanti, studenti e amatori interessati rispetto ad altri sistemi:

- Economico - Le schede Arduino sono relativamente economiche rispetto ad altre piattaforme di microcontrollori.
- Ambiente di programmazione semplice e chiaro - Il software Arduino (IDE) è facile da usare per i principianti, ma abbastanza flessibile da consentire agli utenti avanzati di trarne vantaggio.
- Cross-platform - Il software Arduino (IDE) funziona su sistemi operativi Windows, Macintosh OSX e Linux. La maggior parte dei sistemi di microcontrollori sono limitati a Windows.
- Hardware Open Source ed estensibile - I piani delle schede Arduino sono pubblicati sotto una licenza Creative Commons, quindi i progettisti di circuiti esperti possono creare la propria versione del modulo, estenderlo e migliorarlo. Anche gli utenti relativamente inesperti possono creare la versione breadboard del modulo per capire come funziona e risparmiare denaro.
- Software Open Source ed estensibile - Il software Arduino è pubblicato come strumenti Open Source, disponibili per l'estensione da programmatori esperti. Il linguaggio può essere espanso attraverso le librerie C ++ e le persone che vogliono comprendere i dettagli tecnici possono fare il salto da Arduino al linguaggio di programmazione AVR C su cui si basa.

1.4 Arduino – Hardware

Con il nome Arduino sono state prodotte, dal 2005 ad oggi, 19 schede elettroniche “ufficiali” o riconosciute dal team originale di Arduino.

Differiscono fra di loro per alcune specifiche, ma condividono tutte delle caratteristiche costruttive comuni:

- connettore USB: usato per caricare il programma su un microcontrollore e per alimentare la scheda con una tensione massima di 5 V;
- sorgente di alimentazione esterna: usata unicamente per alimentare la scheda con una tensione compresa tra i 9 e i 12 V, nel caso in cui la potenza fornita tramite connessione USB non fosse sufficiente a garantire la funzionalità della scheda, correlata alle specifiche di progetto.

- tasto di reset: permette di resettare la scheda prima di caricare un codice che dovrà essere nuovamente interpretato dalla scheda;
- microcontrollore: riceve ed invia le informazioni e comanda il rispettivo circuito. I modelli di microcontrollore variano in funzione della scheda (ATmega328 per Arduino Uno, AT91SAM3X8E per Arduino Due, ecc.)
- 6 pin analogici: da A0 a A5;
- 12 pin digitali per ingresso/uscita: da 2 a 13;
- “programmatore in circuito”: è un’altra sorgente per caricare o programmare il codice, attuabile anche usando l’uscita TX1 e l’ingresso RX0;
- pin di massa (GND);
- pin di alimentazione a 3.3 e 5V.



Figura 1-4 Scheda Arduino UNO [10]

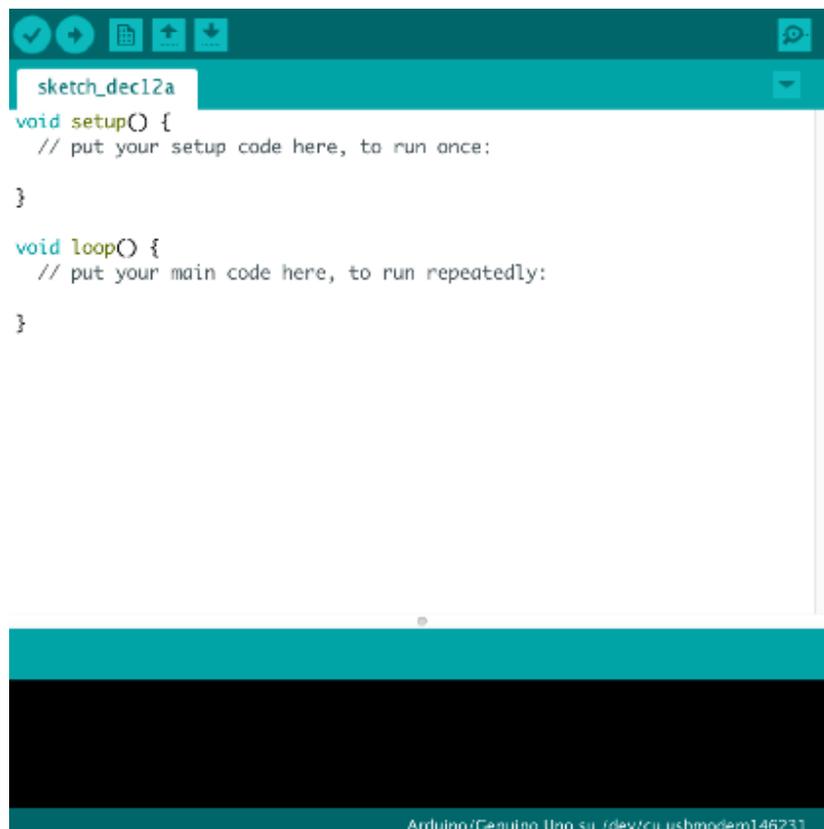
1.5 Arduino – Software

Il software è costituito da una sequenza di istruzioni che inviano informazioni e comandi all'hardware. L'area di comando dell'IDE Arduino citato precedentemente è composta da due funzioni principali:

- 1 - *void setup()* : dove vengono inizializzate le variabili, dichiarate le librerie che dovranno essere usate, impostate le comunicazioni seriali e lo stato dei pin.

Questa funzione sarà la prima ad essere eseguita dopo ogni accensione o reset di Arduino.

- 2 - *void loop()* : esegue ciclicamente, come suggerisce il suo nome, le operazioni definite al suo interno ed interagisce con la scheda Arduino.



```
sketch_dec12a
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
}

Arduino/Genuino Uno su /dev/cu.usbmodem146231
```

Figura 1-5 Schermata iniziale del compilatore di Arduino [9]

1.6 μ Panel

μ Panel è la soluzione universale ed innovativa per implementare con una connettività Wi-Fi qualsiasi sistema elettronico di controllo e monitoraggio remoto, semplicemente tramite un'applicazione sul proprio smartphone o tablet.

Il sistema nella sua completezza è costituito dall'applicazione μ Panel, gratuita e facilmente scaricabile da tutti gli store, da un modulo Wi-Fi e da un Cloud (opzionale) anch'esso gratuito.

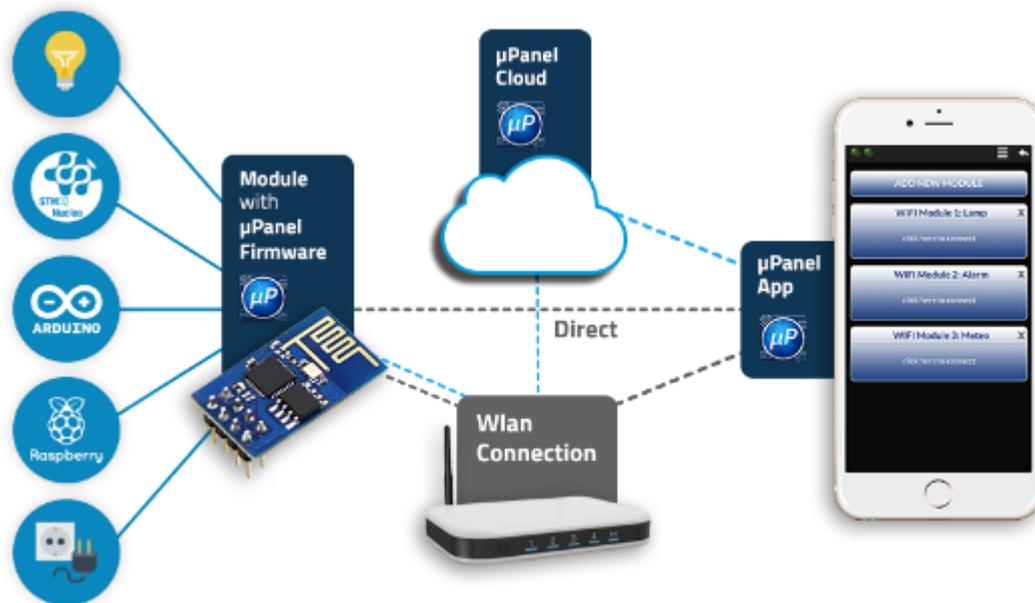


Figura 1-6 Possibili connessioni con il mondo μ Panel [16]

1.7 Applicazione μ Panel

Nell'architettura dell'applicazione μ Panel il pannello grafico è completamente definito ed inviato dal microcontrollore collegato al modulo Wi-Fi.

La definizione del pannello si basa su una linea di testo compatta che definisce il layout e gli elementi del pannello.

Grazie a questa architettura, ogni microcontrollore può facilmente inviare all'App μ Panel sia gli oggetti che la descrizione del layout, utilizzando una quantità di memoria molto limitata.

Inoltre il microcontrollore può anche cambiare il pannello durante la fase di esecuzione semplicemente inviando una nuova stringa.

1.8 Modulo Wi-Fi ESP8266 ESP-01

Il modulo Wi-Fi ESP8266 è un SOC (*System On a Chip*), sistema su circuito integrato autonomo con protocollo internet TCP (*Transmission Control Protocol*) / IP (*Internet Protocol*) integrato che può fornire a qualsiasi microcontrollore l'accesso ad una rete Wi-Fi.

ESP8266 è una scheda estremamente economica in grado di ospitare un'applicazione o di scaricare tutte le funzioni di rete Wi-Fi da un altro processore dell'applicazione.

Ogni modulo ESP8266 viene pre-programmato con un firmware di comandi AT, il che significa che può semplicemente venire collegato al dispositivo Arduino ed essere subito pronto all'uso.

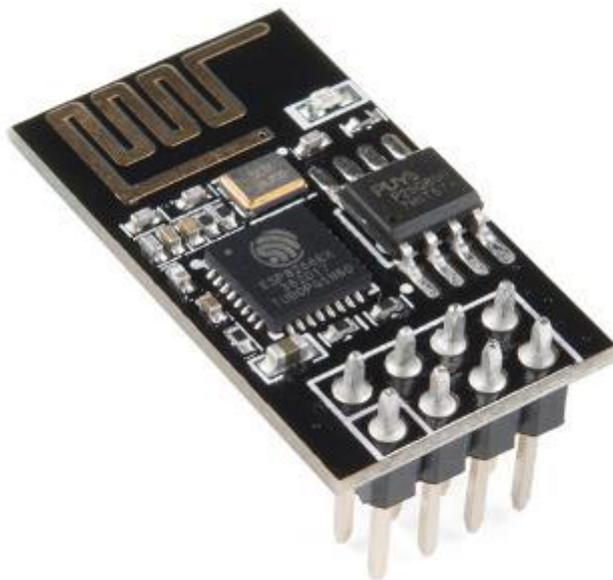


Figura 1-7 Modulo Wi-Fi - ESP8266 [17]

Questo modulo ha una capacità di elaborazione e archiviazione on-board tanto potente da poter essere integrato con sensori e altri dispositivi specifici dell'applicazione attraverso i suoi GPIO (*General Purpose Input/Output*).

L'elevato grado di integrazione su chip consente una circuiteria esterna minima, incluso il modulo front-end, progettato per occupare un'area PCB minima.

È inoltre disponibile una fonte di informazioni quasi illimitata per ESP8266, il tutto fornito da un incredibile supporto della community.

2 Strumenti e metodi di misura

2.1 Generalità

La conoscenza di ogni fenomeno si basa sulla misura delle grandezze che lo caratterizzano.

Il termine misura indica, usualmente, sia il procedimento di misurazione, che trasforma la grandezza da misurare o “misurando” in un'altra percepibile, sia il risultato di essa, che fornisce il valore del misurando.

La misurazione richiede strumenti di misura idonei ad effettuare, sul misurando in entrata, un confronto che sia percepibile da un osservatore o da un apparecchio di percezione in uscita.

La misura diretta viene quindi espressa con un numero dato dal rapporto tra il misurando e un'altra grandezza ad esso omogenea assunta come campione di riferimento.

La misura indiretta fornisce invece il misurando X tramite la misura di altre grandezze legate a X tramite qualche relazione: $X = f(A, B, C, \dots)$.

La scelta delle grandezze e delle unità fondamentali è arbitraria in specie e numero.

La specie dipende dallo stato di avanzamento delle scienze e il numero dalle relazioni indipendenti tra le grandezze fisiche che si prendono in considerazione.

La diversa scelta delle grandezze e delle unità fondamentali porta ai diversi sistemi di unità di misura.

Le unità di misura si attuano con campioni materiali che devono presentare minima incertezza ed elevata, riproducibilità e invariabilità nel tempo e nello spazio.

I campioni primari del Sistema Internazionale di unità di misura (SI), sono costituiti da determinati prototipi depositati presso laboratori internazionali (come il metro a Sevres).

Perciò partendo dai campioni primari si costruiscono per le unità fondamentali e per le unità derivate, una serie di campioni secondari o di lavoro con incertezza via via crescente.

Grandezza		Unità di misura		
Nome	Simbolo	Nome	Simbolo	Dimensioni
frequenza	f	hertz	Hz	1/s
forza	F	newton	N	kg m/s ²
pressione	p	pascal	Pa	N/m ²
lavoro, energia, quantità di calore	W	joule	J	N m
potenza ⁽²⁾	P	watt	W	J/s
quantità di elettricità, carica elettrica	Q	coulomb	C	A s
tensione elettrica, differenza di potenziale, forza elettromotrice	U, V, E	volt	V	W/A
resistenza elettrica	R	ohm	Ω	V/A
capacità elettrica	C	farad	F	C/V
auto induttanza				
induttanza mutua	L, M	henry	H	Wb/A
flusso magnetico	Φ	weber	Wb	V s
induzione magnetica	B	tesla	T	Wb/m ²
conduttanza elettrica	G	siemens	S	A/V
flusso luminoso	Φ	lumen	lm	cd sr
illuminamento	E, E _v	lux	lx	lm/m ²
luminanza o brillantezza	L, L _v	nit	nt	cd/m ²
attività		becquerel	Bq	1/s
dose assorbita		gray	Gy	J/kg

Tabella 2-1 Principali unità di misura del Sistema Internazionale [1]

2.2 Incertezze sulle misure

Ogni grandezza misurata presenta inevitabilmente un errore:

- Assoluto (ΔX) – definito come la differenza algebrica tra il valore misurato X e il valore effettivo X_0 :

$$\Delta X = X - X_0$$

Equazione 2-1

X_0 è anche chiamato valore vero, il quale non è determinabile con l'esperienza (principio di indeterminazione). Per questo motivo nell'equazione X_0 rappresenta un valore di riferimento ottenibile da una misurazione la più perfetta possibile.

- Relativo (ε) – definito come il rapporto tra l'errore assoluto (ΔX) e il valore effettivo X_0 .

$$\varepsilon = \frac{X - X_0}{X_0}$$

Equazione 2-2

può essere espresso sia in percento: $\varepsilon = \frac{X - X_0}{X_0} 100$; sia con le potenze negative del 10, ad esempio $10^{-3} = 0.1\%$, o in parti per milione (p.p.m.).

Questi errori possono essere classificati in:

- Grossolani – Errori dovuti a strumentazione non tarata, inserzioni errate, ecc...
- Sistemati – Errori che, con misurazione nelle medesime condizioni, rimangono costanti in modulo e segno. Sono provocati sempre dalla stessa causa e non sono facili da individuare.
- Accidentali – Errori che, con misurazione nelle medesime condizioni, variano in modulo e segno. Sono provocati da cause occasionali il cui singolo contributo agisce ogni volta con diversa entità e segno.

2.3 Caratteristiche degli strumenti di misura

Lo strumento di misura raggiunge la condizione di regime (caratteristiche statiche) dopo un tempo transitorio di durata dipendente dalla struttura dello strumento stesso.

2.3.1 Caratteristiche di taratura

Un qualunque strumento di misura si può considerare come un sistema entrata-uscita, con X grandezza in entrata e Y misura.

La caratteristica di taratura statica definisce la dipendenza di Y da X .

Per ottenere la caratteristica sperimentale si riporta per ogni valore del misurando X la corrispondente indicazione in uscita Y , mantenendo costanti quelle grandezza di influenza alle quali lo strumento è sensibile come: campi magnetici, temperatura, ecc..

La relazione $Y = f(X)$ così ottenuta fornisce la caratteristica di taratura nelle condizioni specificate.

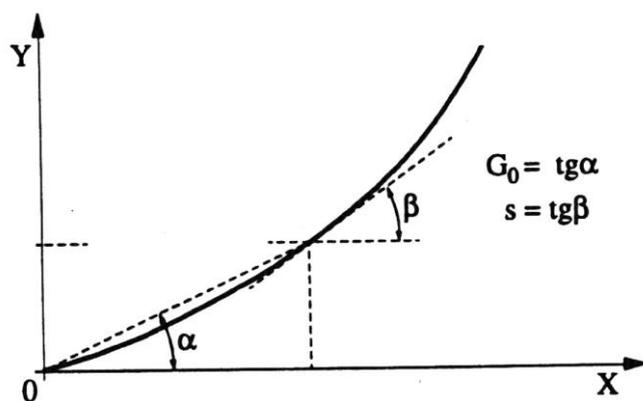


Figura 2-1 Caratteristica di taratura [1]

Per ricavare $Y = f(X)$ è necessario misurare sia X , che le grandezze di influenza mantenute costanti.

La misura di queste non richiede elevata precisione, mentre la misura della grandezza in entrata X deve essere effettuata con uno strumento di riferimento o campione.

La precisione di quest'ultimo deve essere almeno di un ordine di grandezza superiore di quella dello strumento da tarare.

La risposta statica di uno strumento è definita dal rapporto: $G_0 = Y/X$.

L'inverso di G_0 fornisce il fattore di taratura dello strumento, cioè il fattore per cui bisogna moltiplicare l'indicazione di uscita per ottenere il valore del misurando.

Bisogna sottolineare che la caratteristica di taratura dello strumento è valida tra un limite inferiore (portata minima) ed un limite superiore (portata massima) che delimitano il campo di misura entro cui lo strumento può essere adoperato con una certa precisione.

Se non viene evidenziata la portata minima di uno strumento, essa sarà zero.

2.3.2 Risoluzione

Con il termine risoluzione si intende la minima variazione del misurando rivelabile in uscita dallo strumento, in un determinato punto del campo di misura.

Può essere espressa sia in valore assoluto, sia in valore percentuale (potere risolutivo) rispetto alla portata dello strumento.

Negli strumenti analogici la risoluzione dipende dal valore della frazione di divisione apprezzabile, mentre in quelli digitali dal valore dell'ultima cifra significativa del visualizzatore.

Si può dire quindi che la precisione include la risoluzione, ma non è vero il contrario.

Una maggiore risoluzione può rivelare fenomeni prima nascosti, perciò è determinante per il progresso scientifico.

Per elevarne il valore si ricorre a tecniche sempre più avanzate; però ciò avviene a spese di una diminuzione del rapporto segnale-disturbo, di un aumento del tempo di risposta e del costo.

Per queste ragioni è consigliabile ogni volta adeguare la risoluzione dello strumento al tipo e alla precisione della misura in atto, invece di ricorrere subito a strumenti con risoluzione elevata che potrebbero portare a misurazioni inutilmente lunghe e costose.

2.3.3 Sensibilità

Si definisce sensibilità assoluta s , in un determinato punto del campo di misura, il rapporto tra la variazione ΔY dell'indicazione in uscita (variazione dell'ultima cifra, deviazione di un indice, ecc..) e la corrispondente variazione ΔX del misurando:

$$s = \Delta Y / \Delta X$$

Equazione 2-3

Data la caratteristica di taratura, la sensibilità assoluta s è fornita dalla pendenza di tale curva:

$$s = dY/dX$$

Equazione 2-4

Se lo strumento è a risposta proporzionale (o lineare) la sensibilità s è costante e coincide con la risposta statica.

Con una curva di taratura non lineare la sensibilità s varia da punto a punto, per cui è necessario specificare le condizioni alle quali si riferisce.

La sensibilità s (come G_0) essendo il rapporto di due grandezze fisiche è dimensionata o no, secondo che le grandezze siano di specie diversa o meno.

Uno strumento a più portate, come molti strumenti elettrici usuali (voltmetri, amperometri, ecc..) presenta diverse sensibilità.

2.3.4 Precisione

La precisione può essere definita come la qualità globale dello strumento. Rappresenta l'attitudine dello strumento a fornire la misura col minimo errore rispetto al valore esatto.

La precisione degli strumenti elettromeccanici è data da un numero detto *indice di classe*.

Questo fornisce in condizioni specificate, l'errore assoluto massimo costante su tutto il campo di misura, espresso in percento di un valore convenzionale che, per gli strumenti a zero laterale, è la portata massima.

Le norme C.E.I. 13-6, fasc. 219 classificano gli strumenti nelle classi seguenti: 0.05 – 0.1 – 0.2 – 0.3 – 0.5 – 1 – 1.5 – 2.5 – 5.

Se un voltmetro di portata 300V ha una classe 0.5 ogni misura su di esso effettuata (sia essa 100, 200 o 300) è affetta da un errore assoluto $\Delta U = \mp 0.5 \cdot \frac{300}{100} = \mp 1.5V$

Per un generico valore letto si ottiene un errore relativo di classe in percento dato da:

$$\varepsilon_{classe} = classe \frac{\text{portata massima}}{\text{valore letto}}$$

Equazione 2-5

Pertanto mentre l'errore assoluto è costante su tutti i punti del campo di misura, l'errore relativo diventa inaccettabile all'inizio di esso.

Si riduce tale errore con strumenti a portate multiple allo scopo di effettuare le letture oltre la metà o, meglio ancora, oltre i due terzi del campo di misura.

La precisione di componenti come resistori, condensatori, ecc., e altri strumenti come misuratori di rapporto, ohmmetri e trasformatori di misura, è data dall'errore relativo garantito dal costruttore.

Per i campioni di resistenza e capacità si raggiungono precisioni fino a 10^{-6} .

La precisione degli strumenti elettronici a deviazione è data in percento della portata e, nel caso di ohmmetri e strumenti con scala logaritmica, in percento del valore letto.

Si arriva a precisioni di qualche percento.

La precisione degli strumenti elettronici digitali, è data come errore assoluto pari alla somma di un errore percentuale del valore letto più un errore costante.

È espressa con formule binomie del tipo:

$\pm(\% \text{lettura} + \% \text{portata})$

oppure $\pm(\% \text{lettura} + 1 \text{ o più cifre})$.

Si ottengono precisioni fino a $10^{-4} \div 10^{-5}$.

2.4 Campionamento

Un segnale analogico variabile può essere riconosciuto dalla misura di un numero finito di suoi campioni opportunamente prelevati.

L'acquisizione dei campioni del segnale in esame può essere effettuata:

- in **tempo reale**, cioè durante il tempo in cui il segnale si presenta per la prima volta per cui è possibile ricostruire un transitorio singolo (*single shot*);
- in **modo ripetitivo** per cui occorre che il segnale sia periodico.

Per effettuare il **campionamento in tempo reale**, la frequenza di campionamento deve essere adeguata alla banda del segnale.

Allo scopo bisogna tenere presente che per il teorema del campionamento (Nyquist) un segnale analogico variabile a banda limitata è riconoscibile quando sia campionato a una frequenza f_c almeno doppia della più alta frequenza f_M contenuta nel suo spettro, ossia deve essere $f_c = 2 f_M$.

In pratica il campionamento è iniziato da un impulso di comando (*trigger*) attivato su una soglia ad un opportuno livello del segnale da catturare.

Quindi si effettua il campionamento ad una frequenza maggiore di quella data dal teorema del campionamento, spesso è $f_c = 10 f_M$, per ottenere una ricostruzione del segnale la più accurata possibile.

Invece se la frequenza di campionamento è minore di quella di Nyquist, può verificarsi un errore di *aliasing* per cui il segnale in esame si presenta come un "alias" segnale di frequenza molto più bassa.

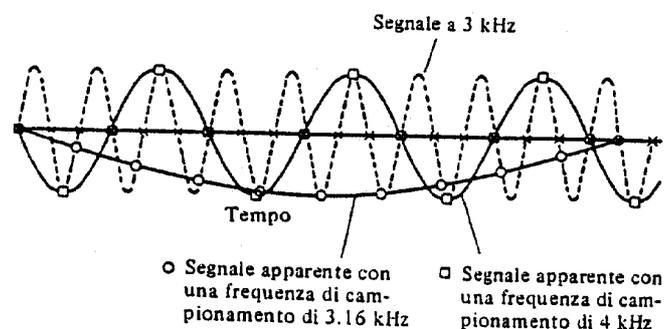


Figura 2-2 Effetto Aliasing [1]

Il **campionamento ripetitivo** prescinde dal teorema del campionamento e opera solo su segnali periodici perché i successivi campioni sono acquisiti ad ogni periodo del segnale. Dopo un numero sufficiente di periodi, il numero di campioni acquisiti è tale da permettere la ricostruzione del segnale.

2.5 Sensori di corrente

Il sensore è un dispositivo che si trova in diretta interazione con il sistema misurato. I trasformatori di corrente (TA) sono sensori che misurano la corrente alternata.

2.5.1 Sensori di corrente ad effetto Hall

L'effetto Hall fa riferimento alla tensione misurabile attraverso un conduttore (o semiconduttore), quando una corrente elettrica che vi scorre è influenzata da un campo magnetico. Il campo magnetico ha la capacità di influire le cariche in movimento che fluiscono all'interno di un conduttore (o semiconduttore).

Gli elettroni (q) in movimento subiscono una forza magnetica verso un lato del conduttore, lasciando una carica positiva netta sull'altro lato.

Questa separazione di carica crea una tensione.

La creazione di una tensione (V_H) attraverso un conduttore percorso da corrente e sottoposto ad un campo magnetico, è noto come effetto Hall, in onore al fisico americano Edwin Hall che lo scoprì nel 1879.

Una corrente elettrica viene fatta passare attraverso il blocco semiconduttore mentre un campo magnetico B viene applicato perpendicolarmente sia alla superficie che alla corrente elettrica.

La tensione di Hall (V_H) è perpendicolare alla direzione del flusso di corrente.

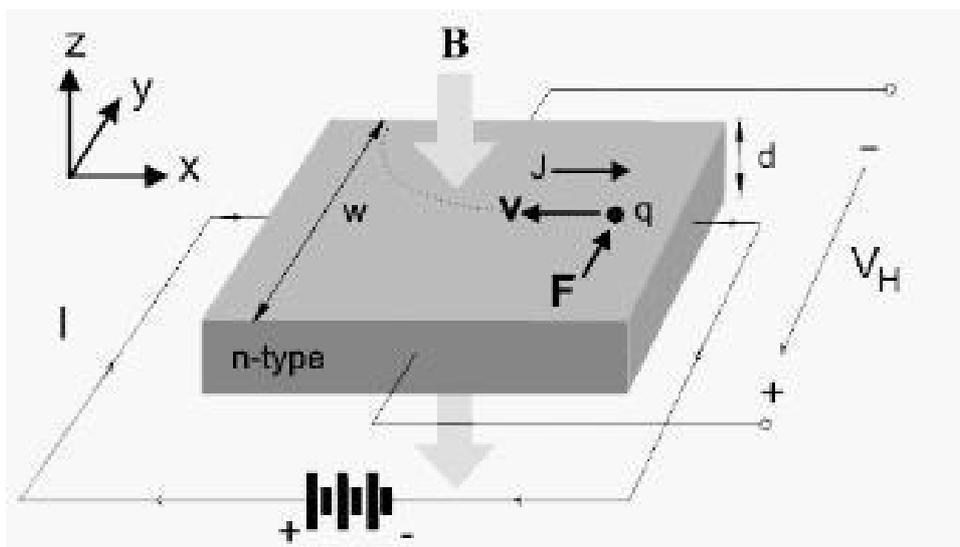


Figura 2-3 Schema effetto Hall [15]

L'implementazione di sensori Hall migliora l'affidabilità e la durata nel tempo, eliminando l'usura meccanica delle movimentazioni.

Le piccole dimensioni del package integrato riducono lo spazio del sistema e la relativa complessità meccanica di attuazione.

La progettazione di qualsiasi dispositivo di rilevamento ad effetto Hall richiede un sistema magnetico in grado di rispondere al parametro fisico rilevato attraverso un'interfaccia di ingresso che può essere di tipo meccanica o elettrica.

Il sensore ad effetto Hall rileva il campo magnetico e produce un segnale analogico o digitale opportunamente convertito in uno standard secondo i requisiti del sistema elettronico.

2.5.2 Interfacciamento con Arduino

Per collegare un sensore TA ad un Arduino, il segnale di uscita dal sensore TA deve essere condizionato in modo da soddisfare i requisiti di ingresso degli ingressi analogici Arduino, cioè una tensione positiva compresa tra 0 V e la tensione di riferimento V_{cc} .

Questo può essere ottenuto con il seguente circuito composto da due parti principali:

- Il sensore TA e la resistenza di carico
- Il partitore di tensione di polarizzazione (R1 e R2)

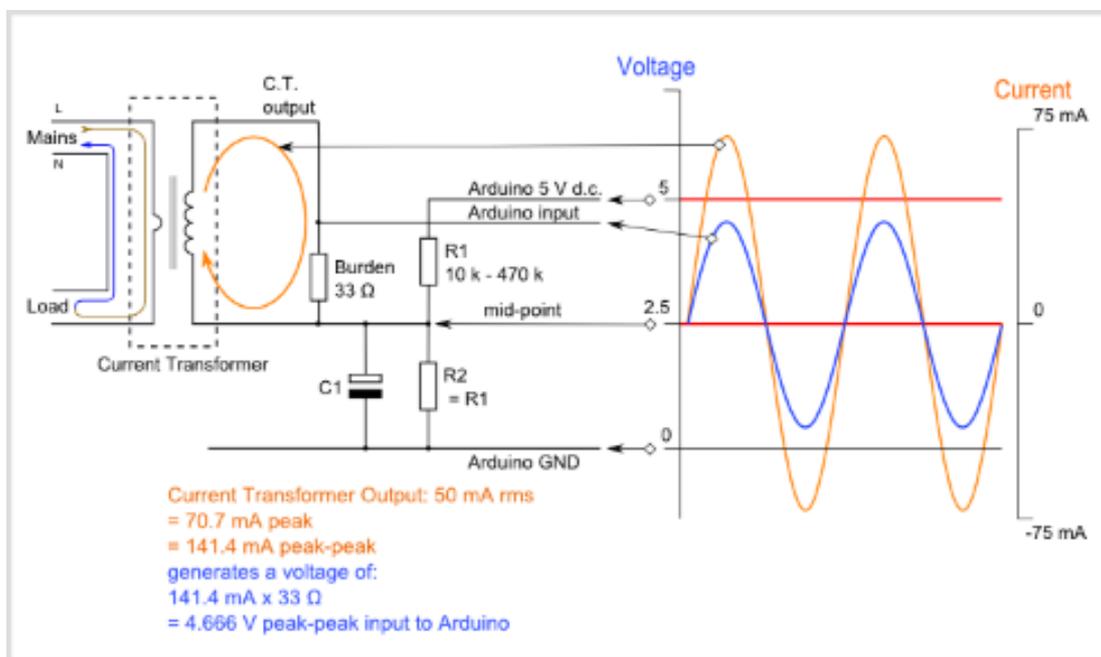


Figura 2-4 Circuito di collegamento TA – Arduino [12]

Il segnale di corrente deve essere convertito in un segnale di tensione con un resistore di carico.

Per eseguire questa operazione come prima cosa bisogna individuare l'intervallo di corrente misurabile.

Il seguente esempio viene fatto con un intervallo di corrente che va da 0 A a 100 A.

La prima operazione è quella di individuare il picco di corrente a primario:

$$\text{Picco di corrente primaria} = I_{rms} * \sqrt{2} = 100 \text{ A} * \sqrt{2} = 141.4 \text{ A}$$

Equazione 2-6

Dividere la corrente di picco per il numero di spire nel TA per fornire la corrente di picco nella bobina secondaria (il TA SCT-013-030 ha 2000 spire nel suo avvolgimento):

$$\text{Picco di corrente secondaria} = \frac{\text{Picco di corrente primaria}}{2000} = 0.0707 \text{ A}$$

Equazione 2-7

Per massimizzare la risoluzione di misurazione, la tensione attraverso la resistenza di carico (di Burden) alla corrente di picco dovrebbe essere pari alla metà della tensione di riferimento analogica di Arduino.

Se si sta usando un Arduino a 5V, la tensione attraverso la resistenza di carico sarà 2.5 V.

Quindi la resistenza ideale al carico sarà:

$$\text{Resistenza di Burden} = \frac{2.5}{\text{Picco di corrente secondaria}} = 35.4 \Omega$$

Equazione 2-8

35 Ω non è un valore di resistenza comune. I valori più vicini su entrambi i lati di 35 Ω sono 39 Ω e 33 Ω. È bene scegliere sempre il valore più piccolo o la corrente di carico massima creerà una tensione superiore a V_{cc}.

I resistori R1 e R2 nello schema circuitale sopra indicato sono un partitore di tensione che fornisce la sorgente da 2,5 V, in questo modo la tensione di uscita del TA oscillerà sopra e sotto 2,5 V rimanendo così positiva. Questa operazione è necessaria perché gli ingressi analogici di Arduino richiedono una tensione solo positiva.

Il condensatore C1 (10 μF) ha una bassa reattanza - poche centinaia ohm - e fornisce un percorso per la corrente alternata per bypassare il resistore.

2.6 Sensori di tensione

Per il calcolo della potenza reale, della potenza apparente e del fattore di potenza è necessaria una misurazione della tensione AC.

Questa misurazione può essere eseguita in sicurezza utilizzando un trasformatore AC-AC, il quale fornisce un isolamento galvanico tra rete ad alta tensione ed utenza.

L'obiettivo principale è quello di condizionare l'uscita dell'adattatore AC in modo che soddisfi i requisiti degli ingressi analogici Arduino: una tensione positiva tra 0 V e la tensione di riferimento (solitamente 5 V o 3,3 V).

2.6.1 Trasformatori AC-AC

Il segnale di uscita del trasformatore di tensione (TV) è una forma d'onda quasi sinusoidale. Se si dispone di un trasformatore di alimentazione a 9 V (RMS), il picco di tensione positiva deve essere di 12,7 V, il picco negativo di -12,7 V.

Tuttavia, a causa della scarsa regolazione della tensione con questo tipo di adattatore, l'uscita è spesso 10-12 V (RMS) dando una tensione di picco di 14-17V.

L'uscita di tensione del trasformatore è proporzionale alla tensione di ingresso AC.



Figura 2-5 Trasformatore AC-AC, 9V, 1.5 A

L'elettronica di condizionamento del segnale deve convertire l'uscita del trasformatore in una forma d'onda con un picco positivo inferiore a 5 V e un picco negativo superiore a 0 V.

Per fare questo il circuito dovrà:

- Diminuire la forma d'onda sinusoidale
- Aggiungere un offset in modo da non avere valori negativi

La forma d'onda può essere ridimensionata usando una caduta di tensione ai terminali del trasformatore e l'offset può essere aggiunto utilizzando una sorgente di tensione creata da una resistenza di 'burden' (di carico) collegata attraverso l'alimentazione di Arduino come per il sensore di corrente.

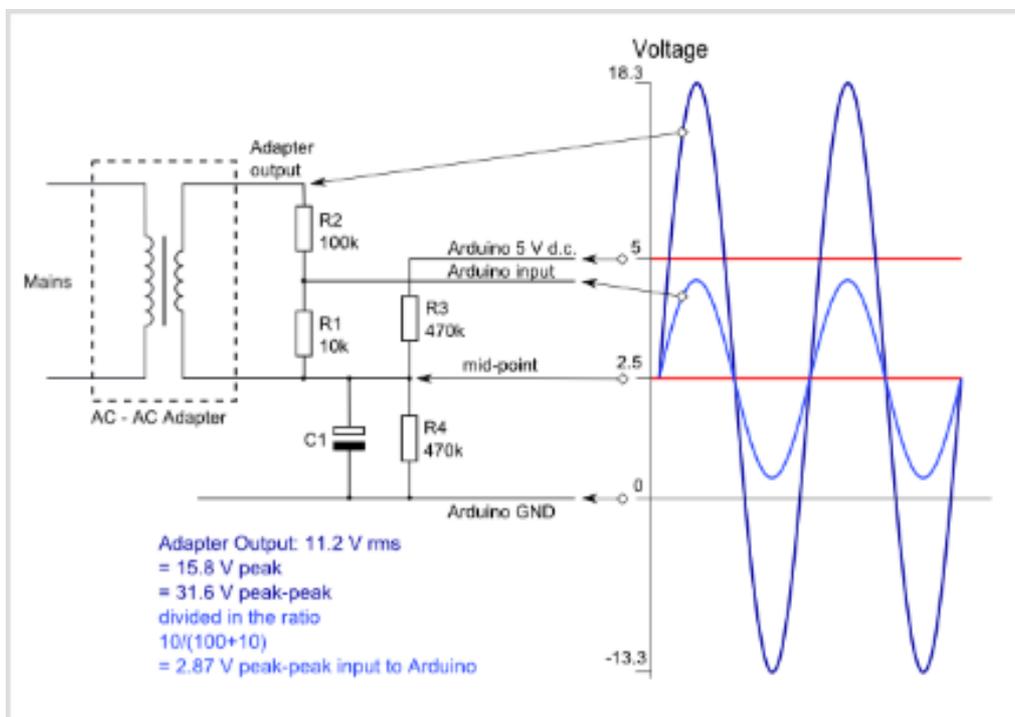


Figura 2-6 Circuito di collegamento TV – Arduino [12]

I resistori R1 e R2 formano un partitore di tensione che riduce la tensione AC dell'alimentatore.

I resistori R3 e R4 forniscono la polarizzazione di tensione.

Il condensatore C1 (con un valore tipico tra 1 μ F e 10 μ F) fornisce un percorso a bassa impedenza per il segnale AC.

R1 e R2 devono essere scelti per fornire un'uscita di tensione di picco di circa 1V.

Per un trasformatore AC-AC con un'uscita a 9 V (RMS), sarebbe opportuno utilizzare una combinazione di resistori di 10k per R1 e 100k per R2

$$\begin{aligned} \text{Tensione output di picco} &= \frac{R1}{(R1 + R2)} * \text{Tensione input di picco} = \\ &= \frac{10k}{(10k + 100k)} * 12.7 V = 1.15 V \end{aligned}$$

Equazione 2-9

La polarizzazione di tensione fornita da R3 e R4 dovrebbe essere la metà della tensione di alimentazione di Arduino.

Come tale, R3 e R4 devono essere di pari resistenza.

Una maggiore resistenza riduce il consumo di energia.

Se l'Arduino ha una V_{cc} di 5 V, la forma d'onda risultante ha un picco positivo di $2,5 V + 1,15 V = 3,65 V$ e picco negativo di $2,5 V - 1,15 V = 1,35 V$ che soddisfa i requisiti di tensione di ingresso analogico di Arduino.

2.6.2 Trasformatori AC-AC per PCB

I trasformatori per PCB hanno la stessa funzione dei classici trasformatori studiati in precedenza con la caratteristica di poter essere utilizzati nei circuiti stampati (*PCB = 'printed circuit board'*) a causa delle dimensioni ridotte, le quali fanno sì che vengano usati in monitoraggi di tensione nei quali è importante occupare poco spazio.



Figura 2-7 Trasformatori per PCB RS Pro

3 Introduzione alla AC Power

Un misuratore di energia, misura l'energia utilizzata dagli apparecchi collegati alla rete domestica. Per capire come funziona, è utile sapere qualcosa su come gli apparecchi interagiscono con il sistema elettrico perché non tutti gli elettrodomestici interagiscono con il sistema elettrico nello stesso modo.

3.1 Carichi resistivi

Lampadine a incandescenza, bollitori, ferri da stiro, scaldabagni elettrici, fornelli elettrici sono tutti carichi resistivi. Usano tutta l'energia che viene loro data, il che significa che il loro assorbimento di corrente è uguale alla tensione divisa per la loro resistenza (legge di Ohm). Un carico puramente resistivo fornisce un output di forma d'onda di tensione e corrente simile al seguente:

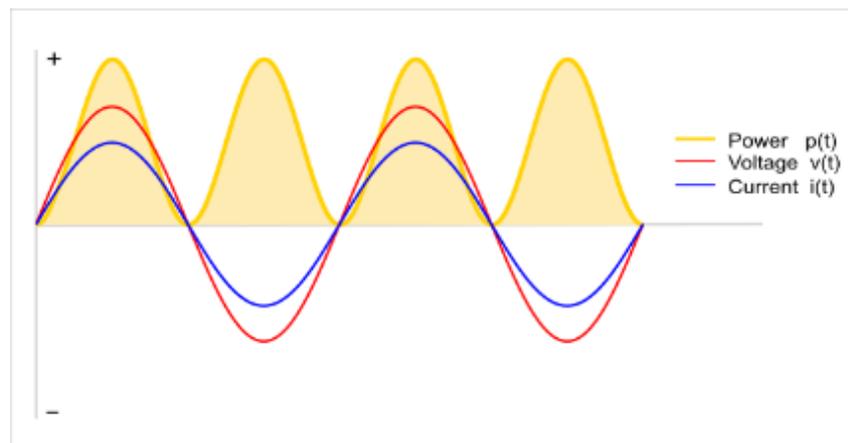


Figura 3-1 Forme d'onda V , I , P , con carico resistivo [12]

La linea gialla rappresenta la potenza in un dato istante che è uguale al prodotto della tensione per la corrente in un dato momento.

Si noti che, con carichi resistivi, la potenza è sempre positiva.

In questo caso, la direzione positiva è verso il carico.

3.2 Carichi parzialmente reattivi

Tuttavia elettrodomestici come i frigoriferi, le lavatrici, i trapani a colonna e le saldatrici ad arco non sono così semplici perché queste apparecchiature assorbono una certa quantità di energia, quindi rilasciano nuovamente energia nella rete elettrica.

Questi hanno componenti induttivi (ad esempio motori) o capacitivi (ad esempio saldatori ad arco) in aggiunta al componente resistivo.

Un carico parzialmente induttivo fornisce un output di forma d'onda di tensione e corrente simile al seguente:

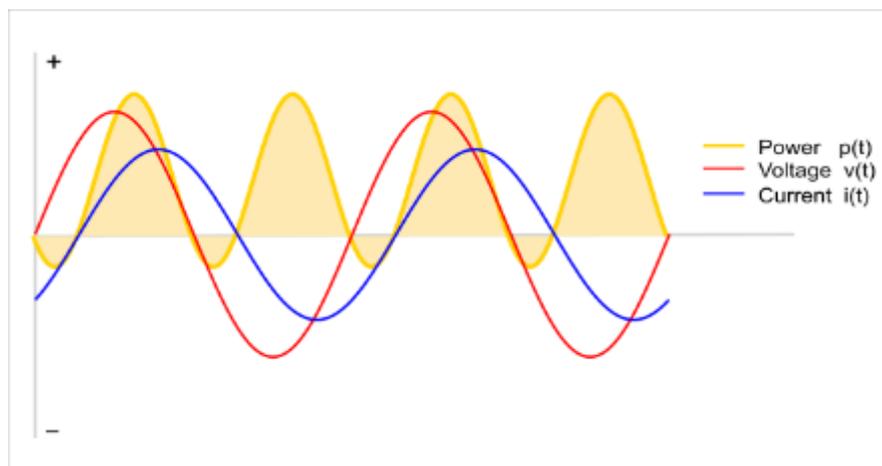


Figura 3-2 Forme d'onda V , I , P , con carico reattivo [12]

Si noti che la linea gialla, rappresentante la potenza, ora diventa negativa per un periodo di tempo, l'area positiva è l'energia che scorre verso il carico mentre quella negativa è l'energia che scorre verso la rete.

L'altra cosa da notare è che le forme d'onda di tensione e corrente sono state spostate.

Si immagina di caricare un condensatore abbastanza grande con una resistenza in serie (in modo che non possa caricarsi istantaneamente): per cominciare, il condensatore è scarico.

La tensione di alimentazione aumenta ed è superiore alla tensione sul condensatore, quindi la corrente fluisce nel condensatore (la direzione positiva sul grafico), causando l'aumento della tensione dello stesso.

Quando la tensione di alimentazione diminuisce, essa attraverso il condensatore caricato è superiore alla tensione di alimentazione.

La corrente inizia a fluire nella direzione dell'alimentazione (la direzione negativa sul grafico).

Ciò fa apparire la forma d'onda corrente come se fosse spostata, come illustrato nel grafico.

Questo fenomeno è indicato come sfasamento.

3.3 Potenza attiva, potenza reattiva e potenza apparente

Tensione, corrente e potenza, alla frequenza di rete, fluttuano 50/60 volte al secondo. Non è possibile tenere il passo con il cambiamento a questa velocità, quindi si deve calcolare la media della potenza istantanea, che chiamiamo potenza reale o attiva.

La potenza attiva viene spesso definita come la potenza utilizzata da un dispositivo per produrre un lavoro utile.

La potenza reattiva o immaginaria, invece, è una misura della potenza che va avanti e indietro tra il carico e l'alimentazione non svolgendo alcun lavoro utile.

Un'altra misura utile è la potenza apparente, la quale è il prodotto della tensione Root-Mean-Square (RMS) e della corrente RMS. Per carichi puramente resistivi, la potenza reale è uguale alla potenza apparente. Ma per tutti gli altri carichi, la potenza reale è inferiore alla potenza apparente.

La potenza apparente è una misura della potenza reale e reattiva, ma non è una somma delle due, in quanto la somma dei due non tiene conto delle differenze di fase.

Rapporti tra le varie potenze:

- $Potenza\ attiva = Potenza\ apparente * \cos \varphi$

Equazione 3-1

- $Potenza\ reattiva = Potenza\ apparente * \sin \varphi$

Equazione 3-2

Dove $\cos \varphi$ è anche noto come fattore di potenza.

Esistono molti parametri che possiamo misurare per quanto riguarda l'uso di energia nei sistemi in corrente alternata.

Per la misurazione dell'energia domestica, è probabile che la potenza reale sia il valore più utile, poiché indica la quantità di energia effettivamente consumata da tutti gli elettrodomestici, ed è ciò che l'ente erogatore addebita.

3.4 Carichi non lineari

Questo rapporto del fattore di potenza è valido solo per carichi sinusoidali lineari.

La maggior parte degli alimentatori per dispositivi DC come i computer portatili presentano un carico non lineare alla rete. Il loro attuale disegno assomiglia spesso a questo:

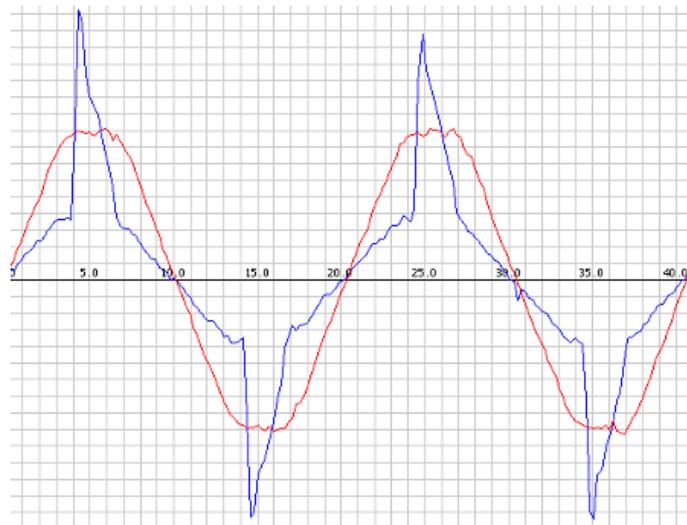


Figura 3-3 Relazione tra tensione (in rosso) e corrente (in blu) con carico non lineare [12]

Possiamo ancora calcolare il fattore di potenza dalla seguente equazione:

$$\cos \varphi = \frac{\text{Potenza attiva}}{\text{Potenza apparente}}$$

Equazione 3-3

ma la relazione

$$(\text{Potenza apparente})^2 = (\text{Potenza attiva})^2 + (\text{Potenza reattiva})^2$$

Equazione 3-4

che è vera per le onde sinusoidali, non è più corretta.

In realtà anche il fattore di potenza non sarà più preciso, dal momento che devono essere considerati gli effetti di armoniche di ordine superiore in entrambe le forme d'onda di tensione e corrente.

4 Progetto presa domotica

La sfida di questo progetto è di realizzare una presa a spina intelligente Open Source, a basso costo, dotata di sensori di tensione e corrente accurati, un microcontrollore con modulo Wi-Fi e di sviluppare un'applicazione che riesca a comunicare istantaneamente allo smartphone i diversi parametri rilevati in modo semplice e intuitivo così da essere di facile lettura anche per chi non è del settore.

4.1 Componenti utilizzati

4.1.1 Sensore di corrente – Effetto Hall – ACS 712 x 20A

ACS 712 fornisce soluzioni economiche e precise per il rilevamento di corrente alternata o continua.

Il modello scelto per questo progetto è utilizzabile fino ad un valore di corrente misurabile non superiore a 20 Ampere.

Le applicazioni tipiche includono il controllo del motore, il rilevamento e la gestione del carico, gli alimentatori switching e la protezione da sovracorrente.

Il dispositivo è costituito da un circuito del sensore di Hall, con un percorso di conduzione in rame situato vicino alla superficie dello stampo.

La corrente applicata che fluisce attraverso questo percorso di conduzione del rame genera un campo magnetico che viene rilevato dall'Intel Hall integrato e convertito in una tensione proporzionale.

La precisione del dispositivo è ottimizzata grazie alla stretta prossimità del segnale magnetico al trasduttore Hall.

La resistenza interna del percorso conduttivo è di 1,2 mΩ e fornisce una bassa perdita di potenza.

Lo spessore del conduttore di rame consente la sopravvivenza del dispositivo fino a una sovracorrente 5 volte superiore alla corrente nominale.

I terminali del percorso conduttivo sono isolati elettricamente dai conduttori del sensore.

Ciò consente di utilizzare il sensore di corrente ACS712 in applicazioni che richiedono l'isolamento elettrico senza l'uso di optoisolatori o altre costose tecniche di isolamento.



Figura 4-1 Sensore di corrente - Effetto Hall - ACS 712 [18]

Di seguito vengono elencate le principali caratteristiche e i principali vantaggi di questo componente:

- Tempo di salita in output di 5 μ s in risposta alla corrente di ingresso a gradino
- Larghezza di banda 80 kHz
- Errore totale 1,5% a temperatura ambiente (25 ° C): $i = 20 \pm 0,3$ A
- Ingombro ridotto
- Singola alimentazione a 5 V
- Sensibilità di uscita da 66 a 185 mV / A
- Tensione di output estremamente stabile
- Isteresi magnetica quasi nulla
- Intervallo di temperatura di funzionamento: da - 40° C a + 150° C

4.1.2 Sensore di tensione AC monofase ZMPT101B

I trasformatori standard per circuito stampato, sono trasformatori di rete a bassa tensione con avvolgimento primario singolo a 230 V AC, 50/60 Hz.

Questi trasformatori hanno avvolgimenti secondari adatti per il collegamento in serie/parallelo per fornire un'ampia gamma di correnti e sono sottoposti al collaudo elettrico. La bobina è caratterizzata dalla doppia sezione che comporta elevata efficienza e ridotto innalzamento della temperatura. Questi trasformatori hanno inoltre una bassa capacità di avvolgimento e bassa emissione di rumore.

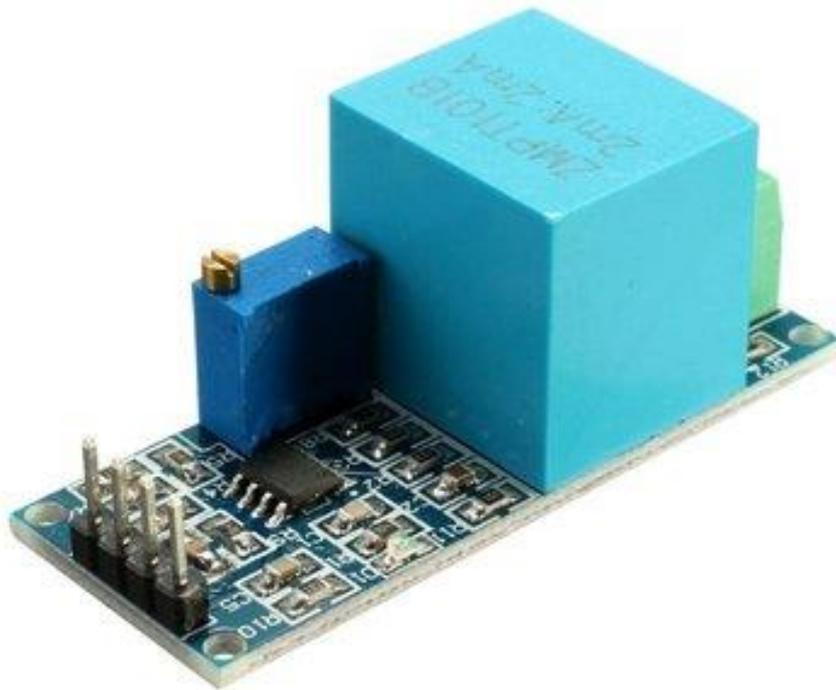


Figura 4-2 Sensore di tensione AC monofase – ZMPT101B [19]

Di seguito vengono elencate le principali caratteristiche, le dimensioni e i principali vantaggi di questo componente:

- Dimensioni della scheda PCB: 50 x 19 mm
- Corrente di ingresso nominale: 2 mA
- Tensione di isolamento: 4000 V
- Temperatura di funzionamento: da - 40° C a + 70° C
- Peso 200 g
- Frequenza operativa minima 50 Hz
- Frequenza operativa massima 60 Hz
- Classe di accuratezza 0.2: $v = 230 \pm 0,46$ V

4.1.3 Modulo SCF – TOP03

SCF Electronics ha adottato questo hardware molto compatto (il Cactus Rev.2) con lo scopo di sviluppare una singola scheda che incorpori un microcontrollore 32 bit Arduino compatibile al 100% insieme ad un modulo Wi-Fi.

Questo modulo è un punto di riferimento per i produttori che vogliono sviluppare facilmente progetti a bassa potenza ed in modo rapido.

L'unità microcontrollore è un Atmel ATMEGA32U4 mentre il modulo Wi-Fi si basa sul modulo ESP8266.



Figura 4-3 Modulo SCF – TOP03 [16]

I pin Input/Output del modulo – 18 in tutto – sono multi funzionali. Ogni pin può essere utilizzato come ingresso o uscita digitale, per LED lampeggianti o per leggere la pressione di un pulsante. Questi pin si definiscono tramite un valore intero compreso tra 0 e 21.

I pin A0-A3 possono essere utilizzati sia come ingressi analogici che come Input/Output digitali. Nove pin presentano convertitori analogico-digitale e possono essere utilizzati come ingressi analogici. Questi sono utili per potenziometri di lettura o come in questo progetto per sensori di vario tipo che utilizzano la funzione `analogRead ([pin])`.

Ci sono cinque pin che possono essere utilizzati come uscita analogica utilizzando la funzione (`[pin], [value]`) `analogWrite`.

La principale caratteristica del modulo SCF - TOP03 è l'alimentazione attraverso connessione USB. In questa configurazione la tensione a 5 V proveniente dalla USB verrà regolata a 3.3 V.

In alternativa il modulo può essere alimentato attraverso i pin RAW (la tensione applicata può essere fino a 9 V) o Vcc (che non disponendo di un regolatore può essere utilizzato solo se è disponibile una fonte a 3.3 V).

4.2 Circuito elettrico

Di seguito viene riportato lo schema elettrico di progetto disegnato con il software Eagle. EAGLE è un'applicazione di EDA (*electronic design automation*) con acquisizione schematica, layout di circuiti stampati (PCB), auto-router e funzionalità di produzione assistita da computer (CAM). Questo software contiene un editor di schemi, per la progettazione di schemi circuitali. EAGLE fornisce un'interfaccia utente grafica multi-finestra e un sistema di menu per la modifica, la gestione dei progetti e la personalizzazione dell'interfaccia e dei parametri di progettazione. Il sistema può essere controllato tramite mouse, tasti di scelta rapida da tastiera o immettendo comandi specifici su una riga di comando incorporata. Più comandi ripetuti possono essere combinati in file di script (con estensione .SCR).

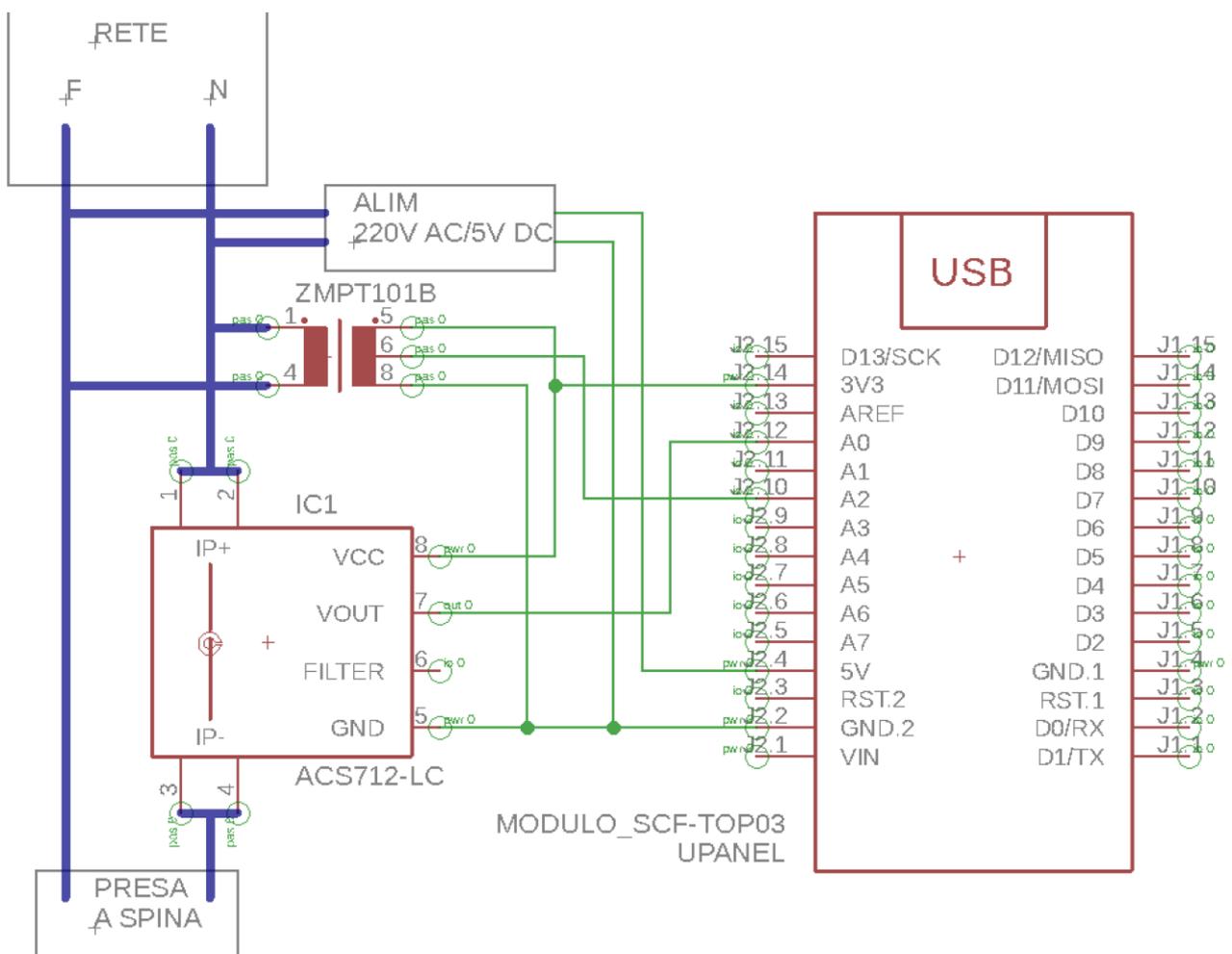


Figura 4-4 Circuito elettrico di progetto [8]

4.3 Calibrazione

In fase di progetto si procede con la calibrazione dei sensori di corrente e tensione tramite un confronto diretto tra i valori misurati con Arduino e il Wattmetro CLM1000-Professional progettato per misurare i seguenti parametri elettrici:

- Potenza reale istantanea [W]
- Min. e max. di potenza reale istantanea [W]
- Potenza apparente istantanea [VA]
- Potenza reattiva istantanea [var]
- Tensione [V]
- Min. e max. di tensione [V]
- Corrente [A]
- min. e max. di corrente [A]
- Fattore di potenza
- Rilevamento del carico (resistenza, induttanza, capacità)
- Energia attiva (consumo) [kWh]
- Energia apparente [kVAh]
- Energia reattiva [kvarh]
- Tempo di prova [hh: mm]



Figura 4-5 Sensore Christ Elektronik CLM Professional [14]

La tensione viene misurata direttamente al carico mentre la corrente viene misurata tramite uno shunt di precisione.

Le misure vengono eseguite approssimativamente ogni secondo ed hanno un errore del $\pm 0,3\%$ dalla lettura con fattore di potenza $> 0,3$.

Valore massimo di corrente: 16 A.

Range di tensione applicabile: 100 – 264 V_{AC}, 47 – 63 Hz.

Potenza consumata: < 4 V.

Per fare in modo che la tensione, la corrente e le potenze riportate dal programma siano le stesse di quelle misurate con il Wattmetro CLM1000-Professional, devono essere modificati dei coefficienti di calibrazione secondo la seguente formula:

$$\text{Calibrazione}V = \frac{\text{Valore reale di } V}{\text{Valore misurato di } V} * \text{Calibrazione}V_{\text{precedente}},$$

Equazione 4-1

$$\text{Calibrazione}I = \frac{\text{Valore reale di } I}{\text{Valore misurato di } I} * \text{Calibrazione}I_{\text{precedente}}.$$

Equazione 4-2

Questi coefficienti verranno approfonditi nel capitolo riguardante la programmazione.

4.3.1 Calibrazione di fase

L'algoritmo di correzione utilizzato nel software per il calcolo dello sfasamento tra tensione e corrente applica un coefficiente proporzionale alla differenza tra il valore campionato istantaneamente e quello campionato durante il ciclo precedente. Il risultato genera una nuova forma d'onda, spostata nel tempo rispetto all'originale.

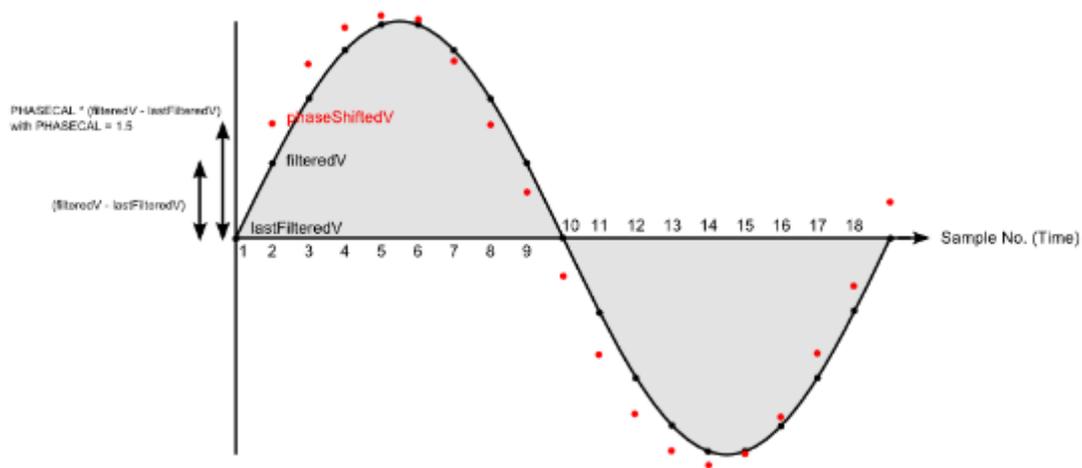


Figura 4-6 Procedura di calibrazione della fase [12]

L'onda viene campionata circa 53 volte per ciclo ma per semplificare il diagramma il numero di campionamenti viene ridotto a 18 per ciclo.

Tempo e campioni vanno da sinistra a destra.

Il primo campione viene letto dall'ingresso analogico, filtrato e diventa 'filteredV'. All'inizio del secondo ciclo, quel primo campione viene copiato nella variabile di programma 'lastFilteredV'.

A questo punto del programma viene calcolata la variabile 'phaseShiftedV' tramite la seguente formula:

$$\text{phaseShiftedV} = \text{lastFilteredV} + \text{PHASECAL} * (\text{filteredV} - \text{lastFilteredV})$$

Equazione 4-3

Nel diagramma è stato impostato un valore di 1.5 per PHASECAL.

In questo modo la fase del phaseShiftedV (indicato dal punto rosso) supera il punto precedente di 1½ volte la distanza verticale tra questo punto e il punto precedente.

Nel ciclo successivo questo punto diventerà 'lastFilteredV' e il punto campionato sarà il nuovo 'filteredV'.

È facile notare che è stata creata una nuova forma d'onda spostata a sinistra equivalente ad uno sfasamento.

È facilmente osservabile che con valori tipici di PHASECAL si ottengono singolarità come:

- PHASECAL = 1 La forma d'onda rimane inalterata
- PHASECAL = 0 Equivale a spostare la forma d'onda di un periodo di campionamento verso destra.
- PHASECAL = 2 Equivale a spostare la forma d'onda di un periodo di campionamento verso sinistra.

Il tempo tra i campioni è stato misurato come 377 µs. Questo equivale a 6,79 ° (a 50 Hz, un ciclo completo, cioè 360 °, richiede 20 ms).

Pertanto, il valore 1 non applica alcuna correzione, 0 e 2 applicano circa 7 ° di correzione in direzioni opposte. Un valore di 1,28 correggerà l'errore di 2 ° causato dal ritardo tra la tensione di campionamento e la corrente.

4.4 Calcolo incertezza

L'incertezza relativa è una quantità priva di unità di misura che correla l'incertezza assoluta di una misura al suo risultato, indicando il livello di precisione della misura stessa.

L'incertezza relativa della potenza attiva, $\Delta (i \cdot v)$, è calcolata come incertezza del prodotto tensione-corrente:

$$\Delta (i \cdot v) = i \cdot v \left(\frac{\Delta i}{i} + \frac{\Delta v}{v} \right) = 20 \cdot 230 \left(\frac{0,3}{20} + \frac{0,46}{230} \right) = 78,2$$

Equazione 4-4

Dove:

- i : valore di corrente massimo misurabile
- v : valore di tensione massimo misurabile
- Δi : errore assoluto di corrente
- Δv : errore assoluto di tensione

Ipotizzando una potenza massima disponibile di 3 kW, l'incertezza relativa è del 2,61 % alla quale deve essere sommata l'incertezza relativa del sensore Christ Elektronik utilizzato in fase di calibrazione, ottenendo così un'incertezza assoluta:

$$\Delta P = 2,61 + 0,3 = 2,91 \%$$

Equazione 4-5

5 Realizzazione software di controllo e monitoraggio

Di seguito viene riportata la programmazione di Arduino.

Il programma è stato caricato tramite ingresso USB.

Dato che è stata predisposta un'alimentazione esterna, il cavo USB deve essere rimosso dopo il caricamento del programma in modo che il sistema risulti completamente indipendente.

5.1 Flow chart del software

In questo capitolo i nomi delle variabili sono stati modificati in modo da rendere più chiare le operazioni eseguite.

Il programma consiste in un loop di misurazione che verrà eseguito per 20 semionde, quindi con una durata di circa 200 ms essendo la frequenza di rete a 50 Hz.

Il loop verrà quindi eseguito 5 volte al secondo.

Se il normale meccanismo non riesce a funzionare viene utilizzato un timeout di 2 secondi che terminerà il processo di misurazione.

Per individuare le semionde da misurare si è aggiunto un ciclo while il quale impone di iniziare il processo di misurazione quando la forma d'onda della tensione di rete è intorno allo zero.

Il vero e proprio programma inizia con la lettura grezza dei valori di tensione e corrente (CampioneV & CampioneI) inviati ad Arduino da entrambi i sensori.

Viene poi applicato un filtro passa basso per estrarre lo scostamento cc da 2.5 V e sottrarlo in modo che il segnale diventi centrato in zero

$$\text{CompensatoreV} = \text{compensatoreV} + \frac{(\text{CampioneV} - \text{CompensatoreV})}{1024};$$

$$V_{\text{Filtrata}} = \text{CampioneV} - \text{CompensatoreV};$$

Equazione 5-1

$$\text{CompensatoreI} = \text{compensatoreI} + \frac{(\text{CampioneI} - \text{CompensatoreI})}{1024};$$

$$I_{\text{Filtrata}} = \text{CampioneI} - \text{CompensatoreI};$$

Equazione 5-2

I valori efficaci di tensione e corrente vengono calcolati con il metodo quadratico medio: $X = \sqrt{\frac{\sum x^2}{n}}$
 ed a questo punto del programma vengono calcolate il valore di grandezze al quadrato

$$Vquadra = VFiltrata * VFiltrata$$

Equazione 5-3

$$Iquadra = IFiltrata * IFiltrata$$

Equazione 5-4

e la loro somma

$$SommaV = \sum Vquadra$$

Equazione 5-5

$$SommaI = \sum Iquadra$$

Equazione 5-6

La calibrazione della fase viene fatta utilizzando un coefficiente costante chiamato CalibrazioneFase con un valore tra 0 e 2.

$$Vsfasata = UltimaVFiltrata + CalibrazioneFase * (VFiltrata - UltimaVFiltrata)$$

Equazione 5-7

L'ultima operazione del ciclo di misurazione è il calcolo della Potenza Attiva istantanea e della sua somma

$$Pistantanea = Vsfasata * IFiltrata$$

Equazione 5-8

$$SommaP = \sum Pistantanea$$

Equazione 5-9

Dopo la chiusura del ciclo while dove vengono raccolti i segnali utili al calcolo delle grandezze in esame si procede con il rapporto di tensione e corrente

$$\text{RapportoV} = \text{CalibrazioneV} * \frac{\left(\frac{\text{TensioneAlimentazione}}{1000}\right)}{\text{ADCcounts}}$$

Equazione 5-10

$$\text{RapportoI} = \text{CalibrazioneI} * \frac{\left(\frac{\text{TensioneAlimentazione}}{1000}\right)}{\text{ADCcounts}}$$

Equazione 5-11

$$\text{Vrms} = \text{RapportoV} * \sqrt{\frac{\text{SommaV}}{\text{NumeroDiCampioni}}}$$

Equazione 5-12

$$\text{Irms} = \text{RapportoI} * \sqrt{\frac{\text{SommaI}}{\text{NumeroDiCampioni}}}$$

Equazione 5-13

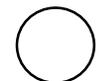
Ora si procede con il calcolo della Potenza Attiva, Potenza Apparente e Fattore di Potenza

Equazione 5-14

$$\text{PotenzaApparente} = \text{Vrms} * \text{Irms}$$

$$\text{PotenzaAttiva} = \text{RapportoV} * \text{RapportoI} * \frac{\text{SommaP}}{\text{NumeroDiCampioni}}$$

Equazione 5-15



$$\text{FattoreDiPotenza} = \frac{\text{PotenzaAttiva}}{\text{PotenzaApparente}}$$

Equazione 5-16

Le costanti *CalibrazioneV* e *CalibrazioneI* sono valori che servono alla calibrazione e sono stati calcolati dopo la prima misurazione, con le seguenti formule:

$$\text{CalibrazioneV} = \frac{\text{Valore reale di V}}{\text{Valore misurato di V}} * \text{CalibrazioneVprecedente},$$

Equazione 5-17

$$\text{CalibrazioneI} = \frac{\text{Valore reale di I}}{\text{Valore misurato di I}} * \text{CalibrazioneIprecedente}.$$

Equazione 5-18

5.2 Programmazione libreria IDE Arduino

5.2.1 Dichiarazione delle variabili

All'inizio del programma vengono definite le variabili che serviranno in seguito, in particolare vengono definiti i pin collegati al sensore di corrente A0 e al sensore di tensione A2.

Le variabili possono essere definite diversamente in funzione delle dimensioni del valore che si vuole memorizzare.

```
unsigned int inPinV=A2;
unsigned int inPinI=A0;
unsigned int Attraversamenti=20;
unsigned int TempoMassimo=2000; // Tempo Massimo di misurazione
unsigned int ContatoreAttraversamenti, NumeroDiCampioni;
double CalibrazioneV=154.9;
double CalibrazioneFase=1.7;
double CalibrazioneI=8.57;
double CompensatoreV=1024; // Valore grezzo di V varia tra 0 e 1024
double CompensatoreI=1024; // Valore grezzo di I varia tra 0 e 1024
double VFiltrata, IFiltrata, UltimaVFiltrata;
double Vquadra, Iquadra, SommaV, SommaI, SommaP;
double Vsfasata,Pistantanea;
double PotenzaAttiva;
double PotenzaApparente;
double FattoreDiPotenza;
int ADCcounts=1024;
int TensioneAlimentazione=5000; // Valore massimo di tensione di input dell'operazionale
Int CampioneV, CampioneI; // Valori grezzi di tensione e corrente inviati dai sensori
int PrimoCampioneV;
double Vrms, Irms;
boolean st;
Boolean AttraversamentoV;
Boolean UltimoAttraversamentoV;
unsigned long Tempo;
```

5.2.2 Void setup

Comandi eseguibili una volta sola ad ogni accensione o reset di Arduino.

In questa sezione viene impostata la velocità dei dati in bit al secondo (baud) per la trasmissione seriale dei dati tra Arduino e computer.

```

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
}

```

5.2.3 Void loop

Nel void loop ogni processo di misurazione verrà eseguito per 20 semicicli che impiegano 200ms essendo la frequenza a 50 Hz. Il loop verrà eseguito 5 volte al secondo. Il time-out di 2 secondi viene utilizzato solo per terminare il processo di misurazione se il normale meccanismo non riesce a funzionare.

Inizializzo la variabile booleana sullo stato “false”.

La variabile “start” viene eguagliata alla funzione millis(), la quale restituisce il numero di millisecondi trascorsi da quando la scheda Arduino ha iniziato l’esecuzione del programma.

```

void loop() {
  st=false; // indicatore per uscire dal ciclo while
  Tempo = millis();
  while(st==false) // ciclo while
  {
    PrimoCampioneV = analogRead(inPinV); //viene usata la forma d’onda della tensione

    if((PrimoCampioneV < (ADCcounts*0.55)) && (PrimoCampioneV >(ADCcounts*0.45))) st=true;

    if((millis()-Tempo)>TempoMassimo) st=true;
  }
  Tempo=millis();

  while((ContatoreAttraversamenti<Attraversamenti) && ((millis()-Tempo)<TempoMassimo)){

    NumeroDiCampioni++; // contatore del numero di campioni
    UltimaV filtrata = V filtrata; // variabile utilizzata per il ritardo di fase

    CampioneV = analogRead(inPinV); // Lettura grezza del valore di tensione
    CampioneI = analogRead(inPinI); // Lettura grezza del valore di corrente

    // Applicazione di un filtro passa basso per estrarre lo scostamento cc da 2.5 V e sottrarlo in modo
    // che il segnale diventi centrato in zero.

    CompensatoreV = CompensatoreV + ((CampioneV-CompensatoreV)/1024);
    V filtrata = CampioneV-CompensatoreV;
    CompensatoreI = CompensatoreI + ((CampioneI-CompensatoreI)/1024);
    I filtrata = CampioneI-CompensatoreI;
  }
}

```

```

Vquadra = VFiltrata*VFiltrata; // Valore di tensione al quadrato
SommaV += Vquadra; // Somma dei valori di tensione al quadrato

Iquadra = IFiltrata*IFiltrata; // Valore di corrente al quadrato
SommaI += Iquadra; // Somma dei valori di corrente al quadrato

Vsfasata=UltimaVFiltrata+CalibrazioneFase(VFiltrata-UltimaVFiltrata);//Calibrazione fase

Pistantanea = Vsfasata*IFiltrata; // Potenza Attiva istantanea
SommaP += Pistantanea; // Somma dei valori di Potenza Attiva istantanea
}
double RapportoV = CalibrazioneV*((TensioneAlimentazione/1000)/(ADCcounts));
Vrms = RapportoV*sqrt(SommaV/NumeroDiCampioni);

Serial.print("Vrms: ");
Serial.println(Vrms);

double RapportoI = CalibrazioneI*((TensioneAlimentazione/1000)/( ADCcounts));
Irms = RapportoI*sqrt(SommaI/NumeroDiCampioni);

if(Irms < 0.05){
Irms=0;
}
Serial.print("Irms: ");
Serial.println(Irms);

PotenzaAttiva = RapportoV*RapportoI *SommaP/NumeroDiCampioni;
PotenzaApparente= Vrms*Irms;

if(Irms < 0.05){
PotenzaAttiva=0;
}

if(PotenzaAttiva>PotenzaApparente){
PotenzaApparente=PotenzaAttiva;
}

Serial.print("realPower: ");
Serial.println(abs(PotenzaAttiva));

Serial.print("apparentPower: ");
Serial.println(PotenzaApparente);

FattoreDiPotenza= PotenzaAttiva/PotenzaApparente;

Serial.print( "powerFactor: " );
Serial.println(abs(FattoreDiPotenza));
Serial.println(" ");

SommaV=0;
SommaI=0;
SommaP=0;
NumeroDiCampioni=0;
}

```

5.3 Progettazione dell'applicazione

Per non rendere troppo pesante la scrittura del programma è stata creata una libreria che racchiude tutto ciò che è stato esposto fino a questo punto.

In questo modo si evidenzia la parte del programma che interagisce con l'applicazione.

μ Panel utilizza un linguaggio speciale che è stato specificatamente concepito per questa applicazione. Questo linguaggio si chiama HCTML (*Hyper Compressed Text Markup Language*) e permette di codificare molti elementi HTML con un singolo carattere, in modo intuitivo e senza necessità di conoscere alcun linguaggio di programmazione per la progettazione del pannello.

μ Panel inoltre ha una pagina del proprio sito internet dedicata interamente ad un simulatore Online (*μ Panel Simulator, supportato da Chrome, Safari e Firefox*) il quale aiuta nella programmazione della virtualApp mostrando istantaneamente il pannello decodificato.

5.4 Codice Definitivo

Nella prima parte del codice è richiamata la libreria "EmonLib.h" descritta precedentemente con le variabili che verranno utilizzate nel codice.

```
#include "EmonLib.h" // Include Emon Library
EnergyMonitor emon1;

int sensorMax ;
int c;
int i = 0;
int p_da_disco[60];
int i_da_disco[60];
int s_da_disco[60];
int lettura = 0;
int attesa_ricezione_P = 0;
int attesa_ricezione_I = 0;
int attesa_ricezione_S = 0;
String Msg = "";
unsigned long tempo = 0;
unsigned long tempopotenza = 0;
int getPower();
int getIrms();
int getPowerSC();
int M,C,D,U;
double realPower, apparentPower, powerFactor, Vrms, Irms;

#define ESP_PROGRAM_PIN 12
#define ESP_ENABLE_PIN 13
```

```

void setup() {

  Serial1.begin(57600);          // La velocità di default della comunicazione seriale è 57600 baud

  pinMode(ESP_ENABLE_PIN, OUTPUT);
  pinMode(ESP_PROGRAM_PIN, OUTPUT);

  digitalWrite(ESP_PROGRAM_PIN, HIGH);
  digitalWrite(ESP_ENABLE_PIN, HIGH);

  emon1.voltage(2, 154.9, 1.7);      // Tensione: input pin, calibrazione V, calibrazione fase
  emon1.current(0, 8.57);          // Corrente: input pin, calibrazione I

  delay(5000);

  Serial1.println("");

  Serial1.println("$PING 200");

  Serial1.println("$P:Dg11;/20T*20:Consumo elettrico
;{%100,3!88F,228}*20/30L1G:0:ON;L2R:0:OFF;/20W3L*10:0;T:Grafico P;/20W5L*10:0;T:P
istantanea;/20W7L*10:0;T:Grafico Irms;/20W9L*10:0;T:Grafico S;"); //Con questa riga
viene stampato a schermo, sullo smatphone, il primo pannello.

```



Figura 5-1 Primo pannello applicazione μ Panel

Come si vede in figura 5-1, il primo pannello è composto da un indicatore LED, che informa se la presa è in funzione o meno, e da quattro interruttori che permettono di accedere agli altri pannelli con i dati monitorati.

```

Serial1.println("$DISK:AUTOFORMAT"); // miuPanel inizializzerà il disco, solo se necessario
delay(5000); // ritardo di 5 secondi

}

```

```

void loop()
{

```

//Nella parte iniziale del loop vengono comandati i led del primo pannello in modo tale che rimanga acceso il led Verde di ON se i sensori stanno monitorando un consumo, o il led Rosso di OFF in caso contrario

```

sensorMax = getPower();
if (sensorMax<5)
{
Serial1.println("#L10"); // comandi dei LED
Serial1.println("#L21");
}
else
{
Serial1.println("#L11"); // comandi dei LED
Serial1.println("#L20");
}
tempo = millis(); // conteggio del tempo

```

```

while ((c = Serial1.read()) > '\n') Msg += (char) c; // legge i caratteri via seriale e
compone il messaggio, fino alla nuova linea '\n'

```

```

{
if (c == '\n')
{
if (Msg == "$RES") //il pannello invia $RES se si è resettato, in questo caso reinvia il primo
pannello.
{
Serial1.println("$P:Dg11;/20T*20:Consumo elettrico
;{%100,3!88F,228}*20/30L1G:0:ON;L2R:0:OFF;/20W3L*10:0;T:Grafico P;/20W5L*10:0;T:P
istantanea;/20W7L*10:0;T:Grafico Irms;/20W9L*10:0;T:Grafico S;");
}
}

```

```

if (Msg == "#W31") // Selettore 3 stato 1, se viene premuto “Grafico P” appare a schermo il
secondo pannello.
{

```

```

Serial1.println("$P:Dg11;/W40*10:1;T:indietro;/20=/10G0%100,60*15:0,60,0,3000,10,10:
Consumi:Time(min):Power(W):F00:000:000:EEE:FFF;/10=/B1%20,8r10:Refresh;"); //Secondo
pannello
}

```

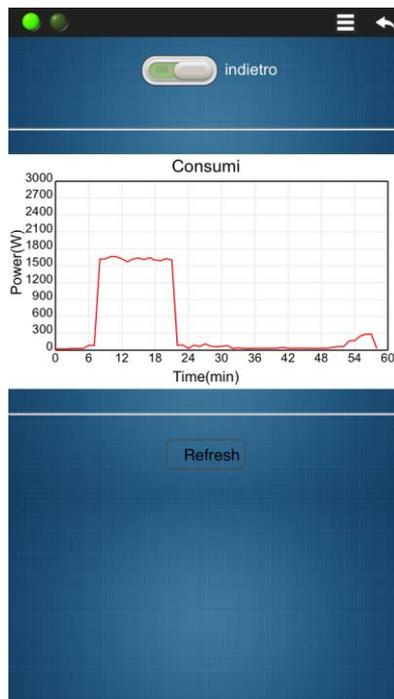


Figura 5-2 Secondo pannello applicazione μ Panel

Il secondo pannello fornisce le indicazioni sull'andamento della potenza attiva durante l'ultima ora di monitoraggio.

La figura 5-2 mostra il consumo in Watt di una lavatrice per un ciclo intensivo della durata di circa sessanta minuti.

Si noti inoltre il tasto di "Refresh", il quale serve per l'aggiornamento del grafico.

```

if (Msg == "#W40")
{
Serial1.println("$P:Dg11;/20T*20:Consumo elettrico
;{%100,3!88F,228}*20/30L1G:0:ON;L2R:0:OFF;/20W3L*10:0;T:Grafico P;/20W5L*10:0;T:P
istantanea;/20W7L*10:0;T:Grafico Irms;/20W9L*10:0;T:Grafico S;"); // cliccando sul tasto
indietro si torna al primo pannello.
}
if (Msg == "#B1P") // pulsante refresh premuto
{
attesa_ricezione_P = 1;
}

if (Msg == "#W71") // Selettore 7 stato 1, se viene premuto "Grafico Irms" appare a schermo il
quarto pannello.
{
Serial1.println("$P:Dg11;/W80*10:1;T:indietro;/20=/10G1%100,60*15:0,60,0,15,10,10:Cons
umi:Time(min):Irms(A):F00:000:000:EEE:FFF;/10=/B2%20,8r10:Refresh;"); //Quarto
pannello
}

```

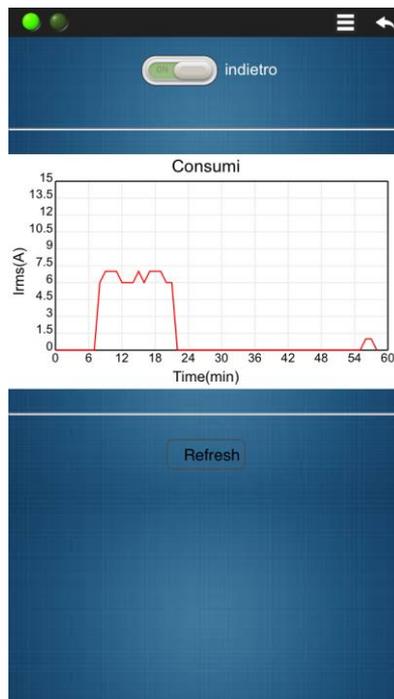


Figura 5-3 Terzo pannello applicazione μ Panel

In figura 5-3 viene mostrato il terzo pannello, il quale indica la variazione del valore efficace di corrente durante il ciclo di lavaggio di una lavatrice.

Il picco di corrente si ha nella fase di riscaldamento dell'acqua e misura circa 7 Ampere.

```

if (Msg == "#W80")
{
Serial1.println("$P:Dg11;/20T*20:Consumo elettrico
;{%100,3!88F,228}*20/30L1G:0:ON;L2R:0:OFF;/20W3L*10:0;T:Grafico P;/20W5L*10:0;T:P
istantanea;/20W7L*10:0;T:Grafico Irms;/20W9L*10:0;T:Grafico S;"); // cliccando sul tasto
indietro si torna al primo pannello.
}
if (Msg == "#B2P") // pulsante refresh premuto
{
attesa_ricezione_I = 1;
}

if (Msg == "#W91") // Selettore 9 stato 1, se viene premuto "Grafico S" appare a schermo il
quinto pannello.
{
Serial1.println("$P:Dg11;/WA0*10:1;T:indietro;/20=/10G2%100,60*15:0,60,0,3000,10,10:
Consumi:Time(min):Apparent Power(VA):F00:000:000:EEE:FFF;/10=/B3%20,8r10:Refresh;");
//Quinto pannello
}

```

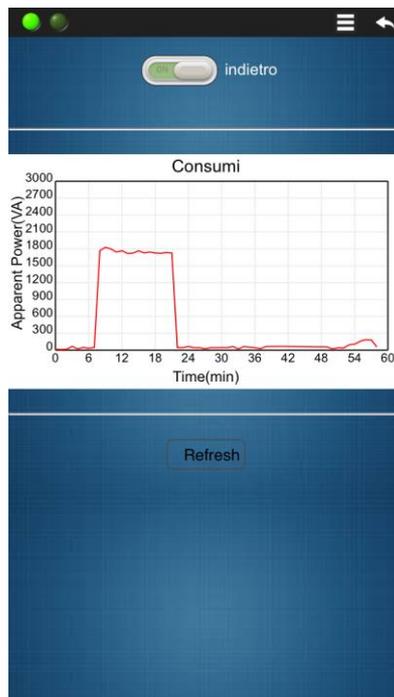


Figura 5-4 Quarto pannello applicazione μ Panel

Il quarto pannello fornisce le indicazioni sull'andamento della potenza apparente durante l'ultima ora di monitoraggio.

La figura 5-4 mostra il consumo in VoltAmpere di una lavatrice per un ciclo intensivo della durata di circa sessanta minuti.

È facile notare come l'andamento sia simile a quello della Potenza Attiva, differendo solo di una quantità minima in valore assoluto.

```

if (Msg == "#WA0")
{
Serial1.println("$P:Dg11;/20T*20:Consumo elettrico
;{%100,3!88F,228}*20/30L1G:0:ON;L2R:0:OFF;/20W3L*10:0;T:Grafico P;/20W5L*10:0;T:P
istantanea;/20W7L*10:0;T:Grafico Irsm;/20W9L*10:0;T:Grafico S;"); // cliccando sul tasto
indietro si torna al primo pannello.
}
if (Msg == "#B3P") // pulsante refresh premuto
{
attesa_ricezione_S = 1;
}

if (Msg == "#W51") //Selettore 5 stato 1, se viene premuto "P istantanea" appare a schermo il
terzo pannello.

{
Serial1.println("$P:D!228;/100{r50!228/*20{^*8L55:0;&L65:0;&L75:0;&L85:0;_T:
Power[W];}}/30W60*10:1;T:indietro;"); //Terzo
pannello
}

```



Figura 5-5 Quinto pannello applicazione *μPanel*

Il quinto pannello mostra, in modo semplice e intuitivo, quale sia istante per istante il consumo della presa a spina monitorata (in figura: 1739 W).

Si noti inoltre il pulsante “indietro” utilizzato per tornare il pannello iniziale.

```

if (Msg == "#W60")
{
Serial1.println("$P:Dg11;/20T*20:Consumo elettrico
;{%100,3!88F,228}*20/30L1G:0:ON;L2R:0:OFF;/20W3L*10:0;T:Grafico P;/20W5L*10:0;T:P
istantanea;/20W7L*10:0;T:Grafico Irsm;/20W9L*10:0;T:Grafico S;"); // cliccando sul tasto
indietro si torna al primo pannello.
}
Msg = "";
}

if (tempo > (tempopotenza + 60000)) // lettura e memorizzazione di un valore dai sensori ogni
minuto.
{
p_da_disco[i]=getPower();
i_da_disco[i]=getIrms();
s_da_disco[i]=getPowerS();

tempopotenza = tempo;
Serial1.println(p_da_disco[i]); // stampa del valore della potenza sul monitor seriale,
funzione utilizzata solo in fase di taratura.
i++;
if (i > 59) // dopo 59 letture la variabile “i” viene azzerata
{
i = 0;
lettura = 0; //lettura finita
}
}

```

```

if (attesa_ricezione_P == 1)
{
Serial1.print("#G0C:"); // composizione stringa da inviare a miupanel per creare il grafico P
for (int n = 0; n < 59; n++)
{
Serial1.print(n);
Serial1.print(",");
Serial1.print(p_da_disco[n]);
Serial1.print(",");
}
attesa_ricezione_P = 0; //reset "attesa_ricezione_P"
}

if (attesa_ricezione_I == 1)
{
Serial1.print("#G1C:"); //composizione stringa da inviare a miupanel per creare il grafico Irms
for (int n = 0; n < 59; n++)
{
Serial1.print(n);
Serial1.print(",");
Serial1.print(i_da_disco[n]);
Serial1.print(",");
}
attesa_ricezione_I = 0; //reset "attesa_ricezione_I"
}

if (attesa_ricezione_S == 1)
{
Serial1.print("#G2C:"); // composizione stringa da inviare a miupanel per creare il grafico S
for (int n = 0; n < 59; n++)
{
Serial1.print(n);
Serial1.print(",");
Serial1.print(s_da_disco[n]);
Serial1.print(",");
}
attesa_ricezione_S = 0; //reset "attesa_ricezione_S"
}

```

// In questa parte di codice viene calcolata e stampata sul terzo pannello il valore realPower istantaneo.

```

M=(getPower()/1000);
C=(getPower()/100)-(M*10);
D=(getPower()/10)-(M*100)-(C*10);
U=(getPower()-(M*1000)-(C*100)-(D*10));
Serial1.print("#L5");
Serial1.println(M);
Serial1.print("#L6");
Serial1.println(C);
Serial1.print("#L7");
Serial1.println(D);
Serial1.print("#L8");
Serial1.println(U);
};

```

// Le funzioni `getPower()`, `getIrms()`, `getPowerS()` si occupano di salvare i valori ottenuti dai sensori digitali (0 – 1024) e di convertirli in valori utili per il calcolo delle grandezze cercate.

```
int getPower()
{
    emon1.calcVI(20,2000);           //Numero di semionde passanti per lo zero, time-out
    emon1.serialprint();             // Stampa variabili

    float realPower = emon1.realPower;           //estrazione di Real Power
    float apparentPower = emon1.apparentPower;   //estrazione di Apparent Power
    float powerFactor = emon1.powerFactor;       //estrazione di Power Factor
    float supplyVoltage = emon1.Vrms;            //estrazione di Vrms
    float Irms = emon1.Irms;                     //estrazione di Irms

    return realPower;
}

int getIrms()
{
    emon1.calcVI(20,2000);
    emon1.serialprint();

    float realPower = emon1.realPower;
    float apparentPower = emon1.apparentPower;
    float powerFactor = emon1.powerFactor;
    float supplyVoltage = emon1.Vrms;
    float Irms = emon1.Irms;

    return Irms;
}

int getPowerS()
{
    emon1.calcVI(20,2000);
    emon1.serialprint();

    float realPower = emon1.realPower;
    float apparentPower = emon1.apparentPower;
    float powerFactor = emon1.powerFactor;
    float supplyVoltage = emon1.Vrms;
    float Irms = emon1.Irms;

    return apparentPower;
}
```

6 Prove sperimentali e grafici

Dopo aver caricato il programma sul Modulo SCF – TOP03 ed aver realizzato il circuito teorico all'interno della presa a spina Smart sono stati monitorati i consumi di vari elettrodomestici per verificare il corretto funzionamento della stessa e l'interfaccia con l'applicazione.

I test sono stati effettuati nel periodo che va dal 04 al 14 febbraio 2018.

Una volta salvati i dati sono stati creati i grafici dei vari andamenti con Excel per rendere le operazioni rapide.

6.1 Frigorifero

Il primo elettrodomestico monitorato è stato il Frigorifero Combinato BEKO 15RCSA270K20S Statico Classe A+ [20]



Figura 6-1 Frigorifero combinato BEKO [20]

Si è scelto come primo elettrodomestico un frigorifero perché presenta un ciclo di lavoro noto e risulta quindi semplice valutare l'effettiva qualità della misura.

Questo elettrodomestico infatti alterna cicli di lavoro durante i quali la potenza assorbita è costante, fino al raggiungimento della temperatura desiderata, o nulla.

Di seguito vengono riportati i grafici delle grandezze misurate per un tempo di 24 ore nei giorni 04 e 05 febbraio 2018:

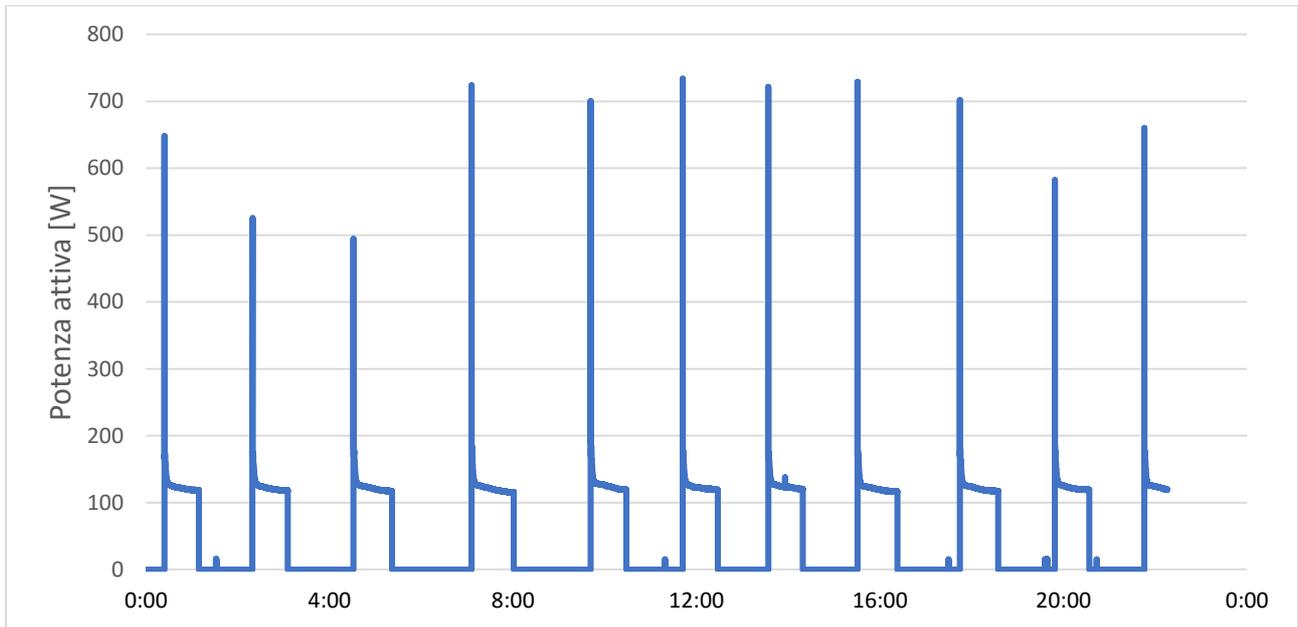


Grafico 6-1 Andamento della potenza attiva da 04/02/2018 22:15 a 05/02/2018 22:16

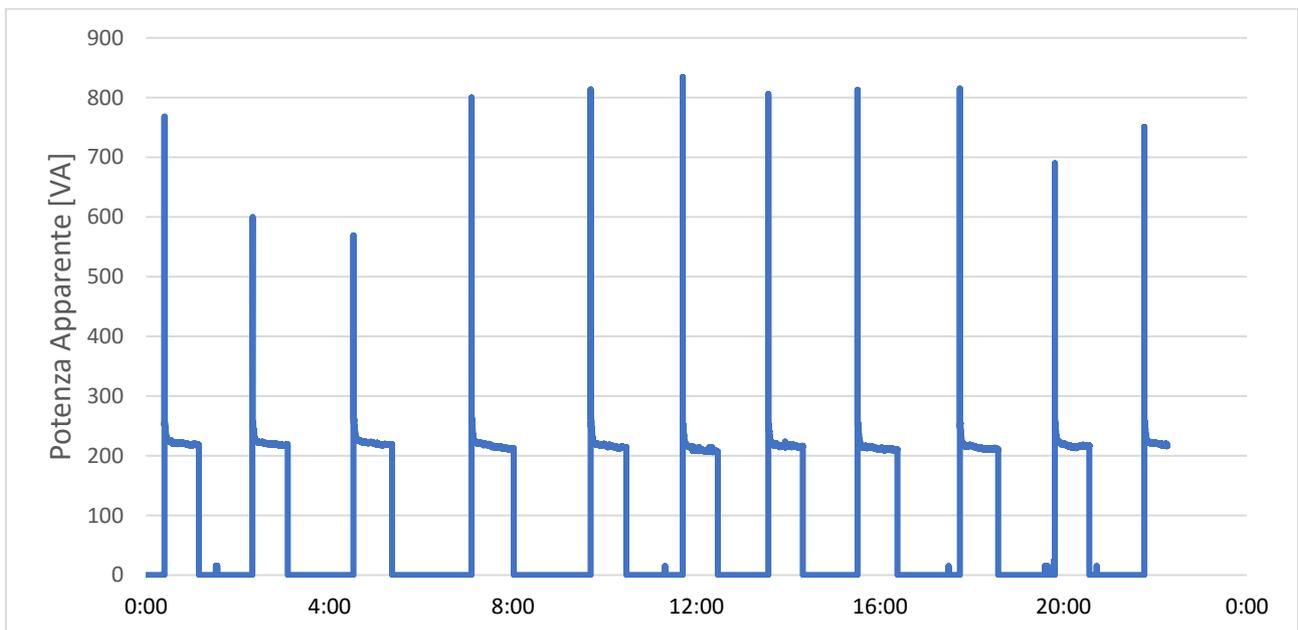


Grafico 6-2 Andamento della potenza apparente da 04/02/2018 22:15 a 05/02/2018 22:16

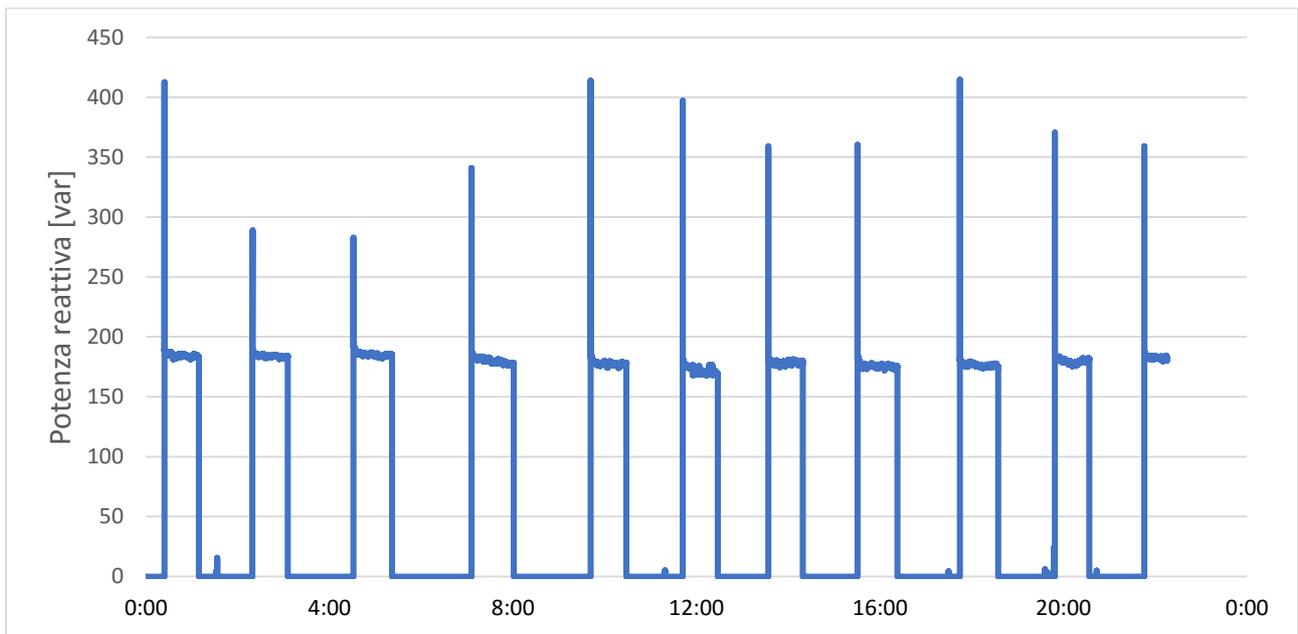


Grafico 6-3 Andamento della potenza reattiva da 04/02/2018 22:15 a 05/02/2018 22:16

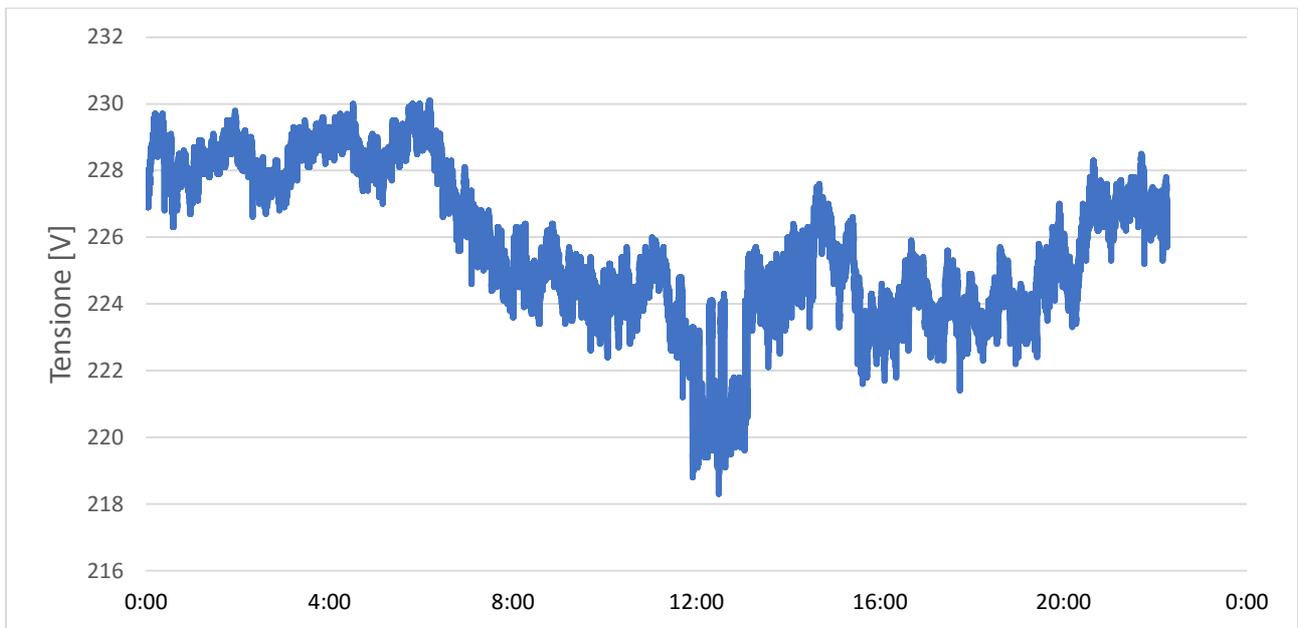


Grafico 6-4 Andamento della tensione da 04/02/2018 22:15 a 05/02/2018 22:16

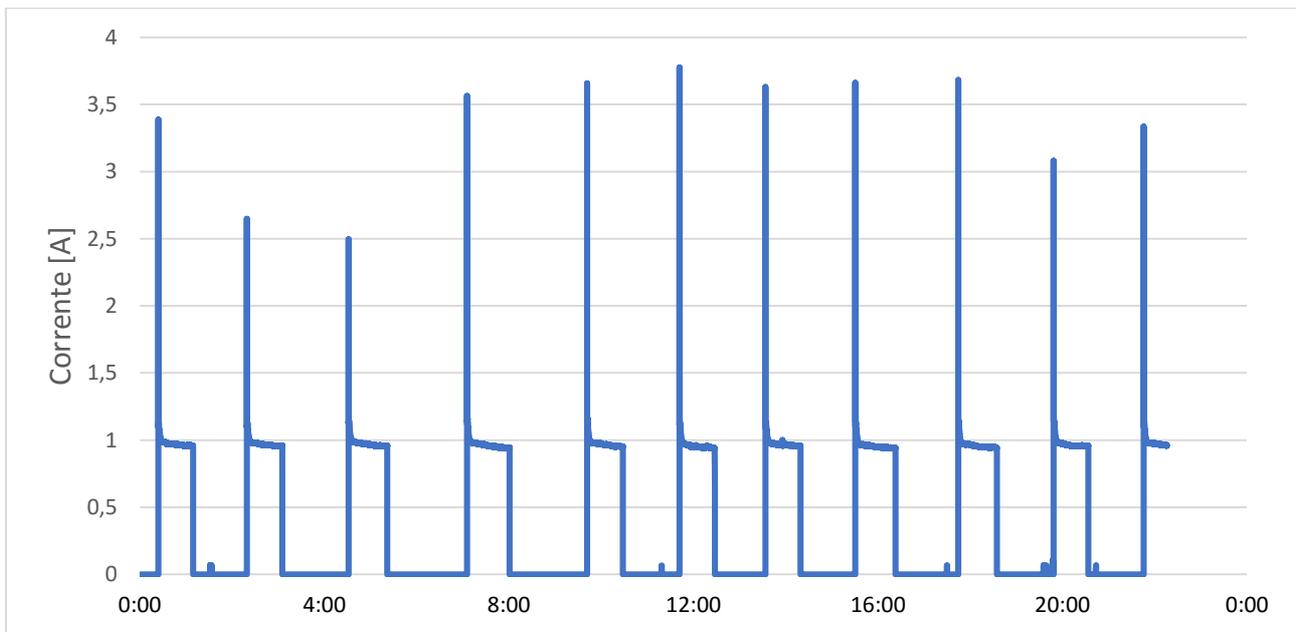


Grafico 6-5 Andamento della corrente da 04/02/2018 22:15 a 05/02/2018 22:16

Risulta immediato notare come il funzionamento del frigorifero sia esattamente ciclico e costante con una potenza attiva di circa 125 Watt e una corrente I_{rms} di 1 A.

Il carico è tipicamente induttivo e lo si può vedere dai valori di energia reattiva (185 var) rispetto a quelli di energia apparente (250 VA).

La tensione di alimentazione per la rete domestica standard in Europa è 230 V $\pm 10\%$, con limite inferiore: 207 V e limite superiore: 253 V.

È importante notare come la tensione V_{rms} abbia valori che variano tra 213 e 232 V, quindi entro i limiti imposti dalla legge.

6.2 Forno & Lavastoviglie

Il secondo monitoraggio è stato eseguito con una presa a spina alla quale sono stati collegati due elettrodomestici differenti: Forno elettrico BEKO BEO 5121 X classe A [20] e Lavastoviglie incasso scomparsa BEKO DIN14212 classe A+ [20].

Sono stati scelti di proposito due elettrodomestici con un consumo elevato in modo da valutare l'accuratezza delle misure anche vicino ai limiti massimi dei sensori.



Figura 6-2 Forno BEKO BEO 5121 X [20] & Lavastoviglie incasso scomparsa BEKO [20]

Di seguito vengono riportati i grafici delle grandezze misurate per un tempo di 4 giorni, dal 05 al 09 febbraio 2018:

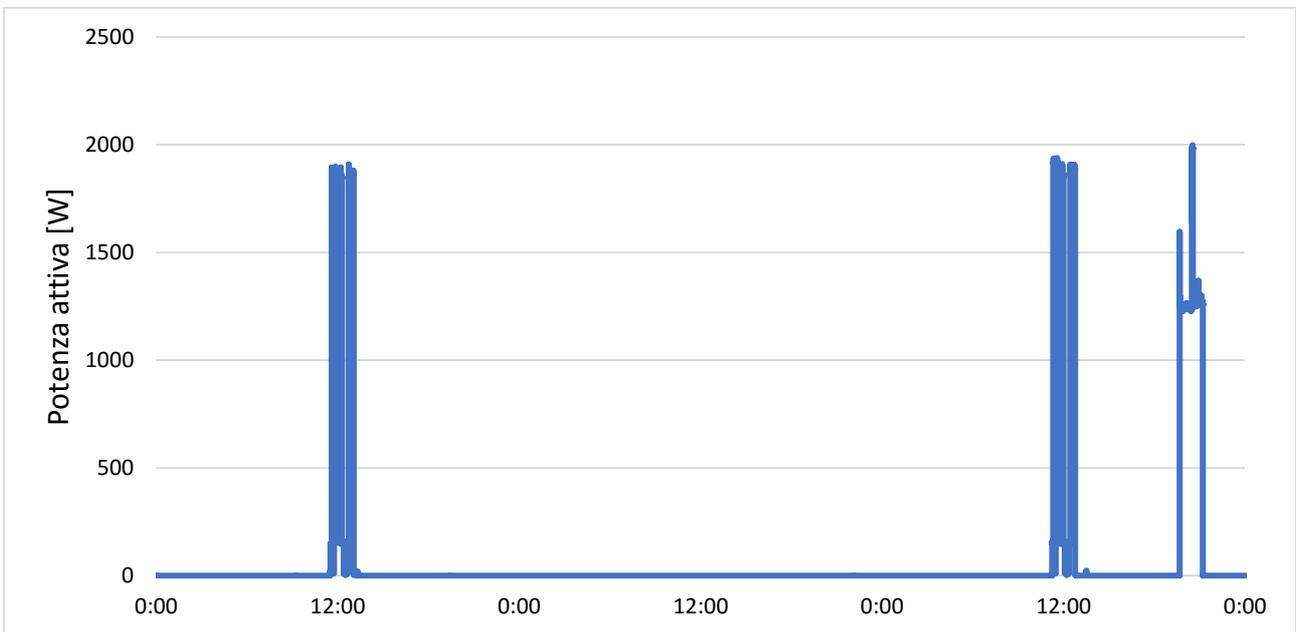


Grafico 6-6 Andamento della potenza attiva da 05/02/2018 23:26 a 09/02/2018 13:22

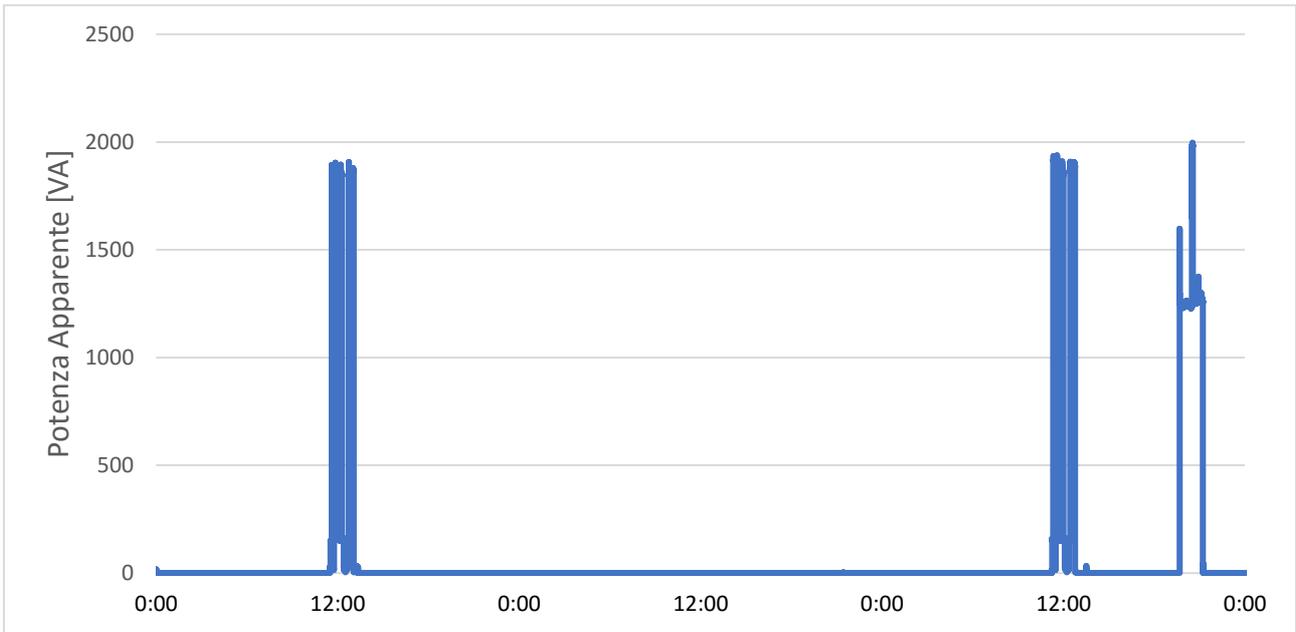


Grafico 6-7 Andamento della potenza apparente da 05/02/2018 23:26 a 09/02/2018 13:22

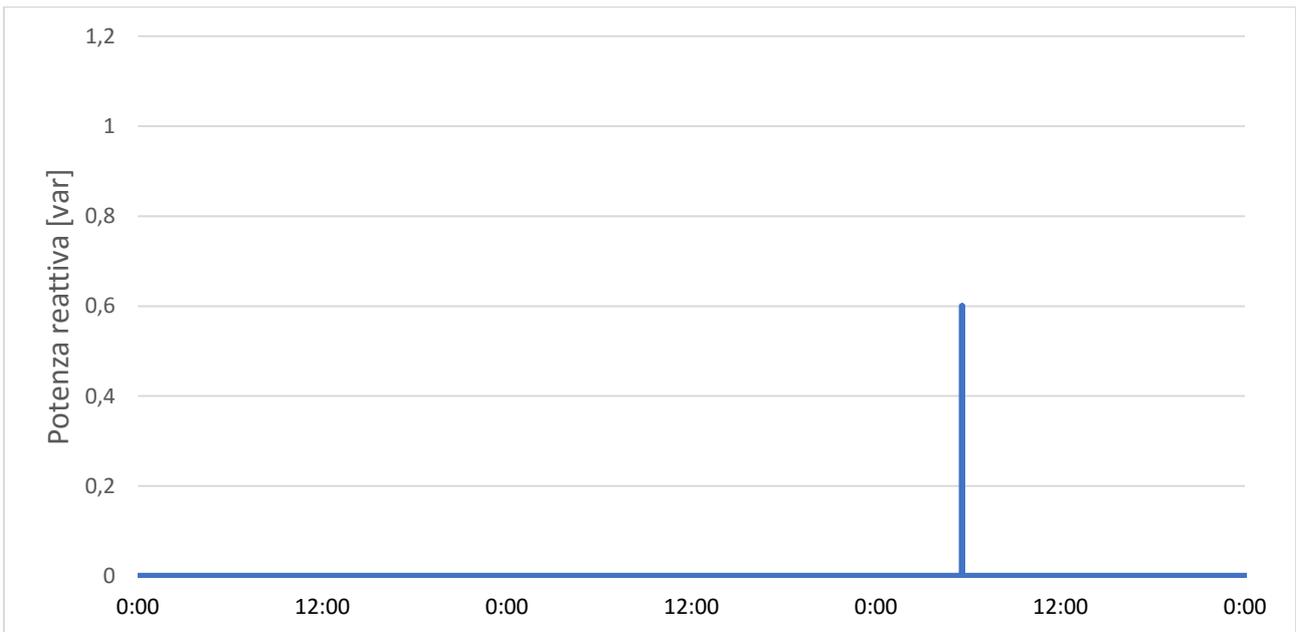


Grafico 6-8 Andamento della potenza reattiva da 05/02/2018 23:26 a 09/02/2018 13:22

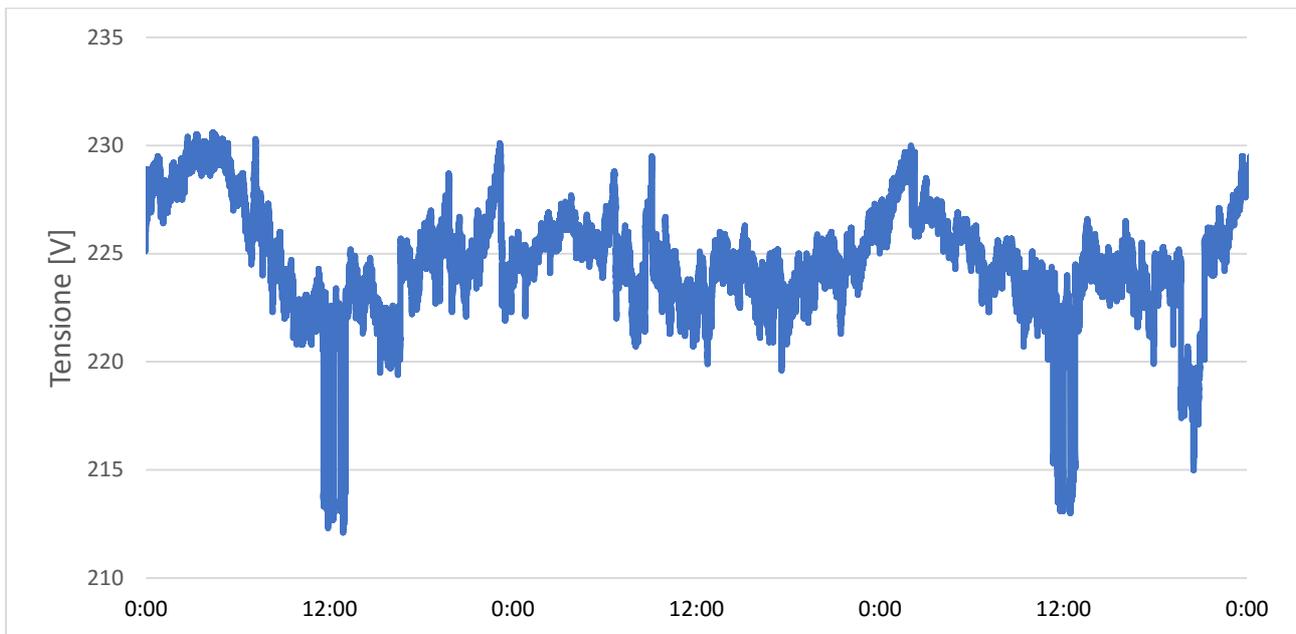


Grafico 6-9 Andamento della tensione da 05/02/2018 23:26 a 09/02/2018 13:22

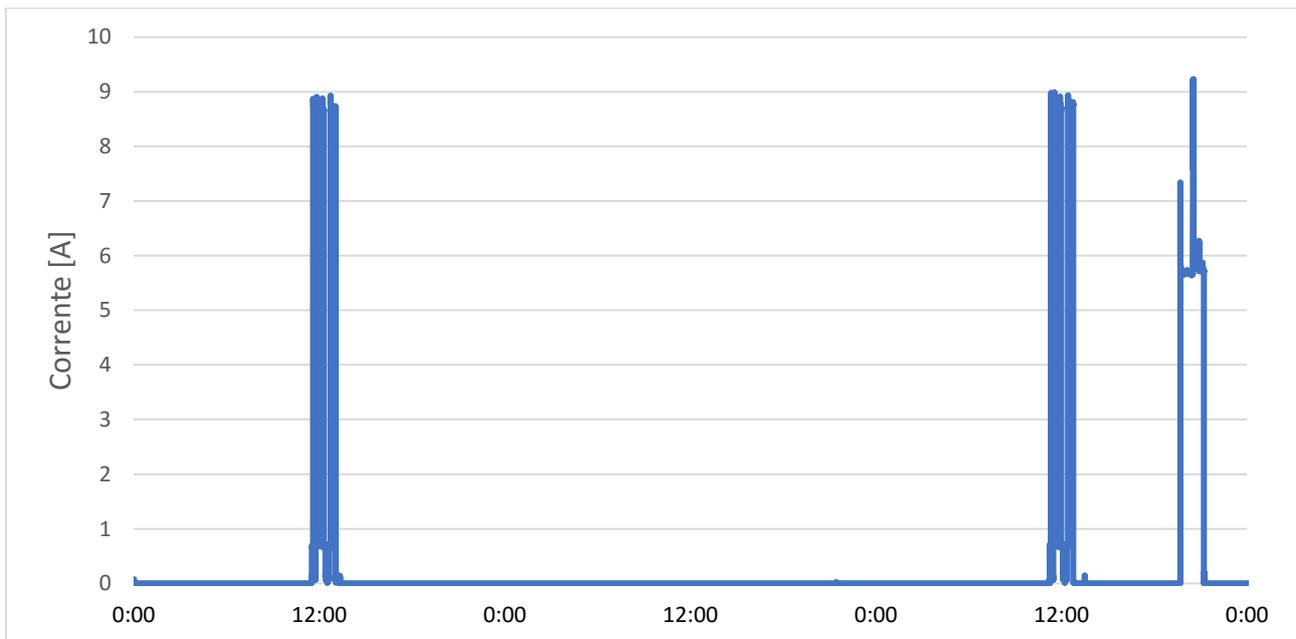


Grafico 6-10 Andamento della corrente da 05/02/2018 23:26 a 09/02/2018 13:22

I primi due picchi di potenza attiva e corrente si hanno in corrispondenza del funzionamento del forno, il terzo picco corrisponde al consumo della lavastoviglie.

Quando il forno è acceso l'andamento dei consumi è simile a quello del frigorifero con la differenza che in questo caso il carico è completamente resistivo.

Il forno alterna cicli di lavoro durante i quali la potenza richiesta alla rete è circa costante (1850 W, 8.7 A) finché non raggiunge la temperatura interna richiesta, quando il termostato interno registra il

valore atteso, il ciclo di lavoro si interrompe e per un certo periodo è richiesta alla rete solamente una potenza minima (150 W, 0.7 A) fino al ciclo successivo.

La potenza reattiva è sempre uguale a zero.

Il grafico della tensione ha un andamento del tipo atteso perché è evidente l'abbassamento del livello di rete quando il forno sta lavorando a massimo carico.

Di seguito vengono mostrati due grafici rappresentanti la potenza attiva e la corrente, in dettaglio, durante il funzionamento del forno:

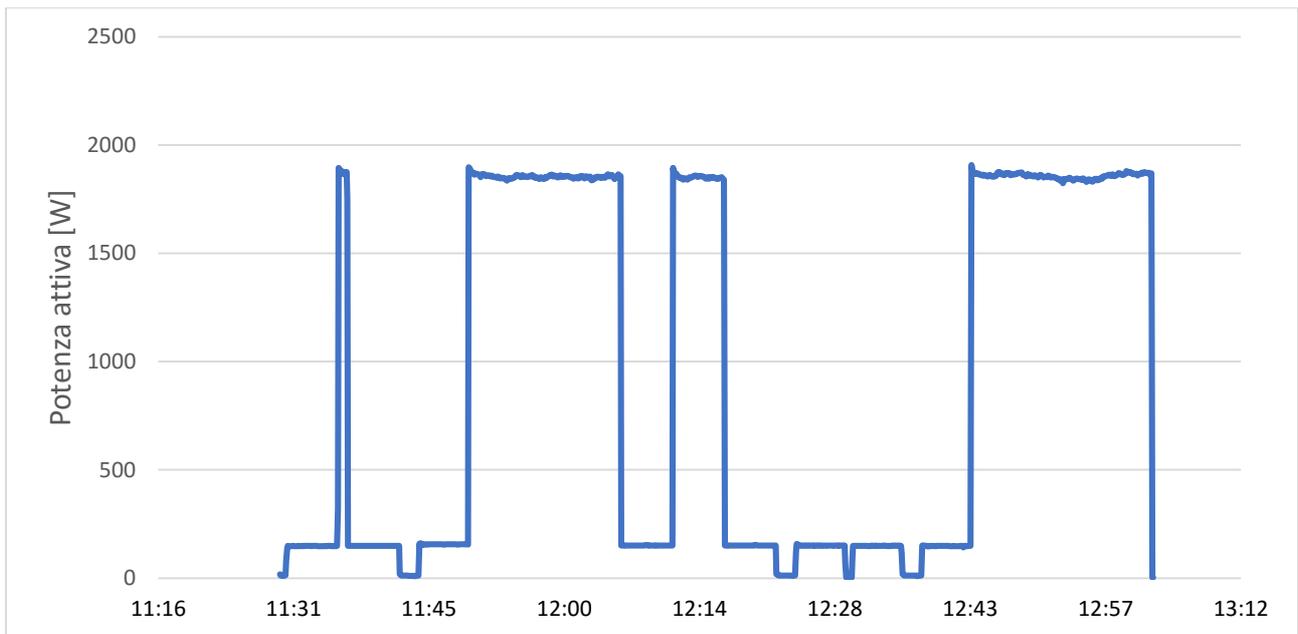


Grafico 6-11 Andamento della potenza attiva da 06/02/2018 11:29 a 06/02/2018 13:02

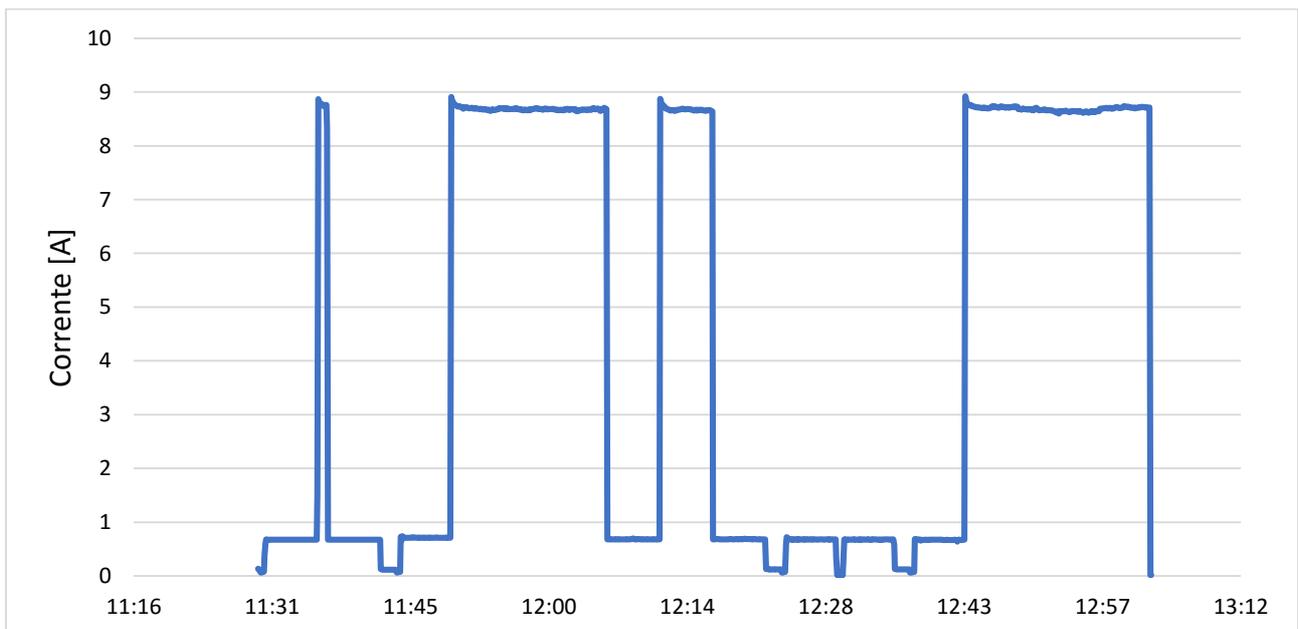


Grafico 6-12 Andamento della corrente da 06/02/2018 11:29 a 06/02/2018 13:02

L'andamento della potenza consumata dalla lavastoviglie, invece, non è più lineare ma varia in base alla fase (resistenza, carico, lavaggio, risciacquo, scarico, ecc..) del ciclo di lavaggio in cui si trova.

Il carico è sempre di tipo resistivo quindi la potenza reattiva è zero per tutta la durata del monitoraggio mentre potenza apparente e attiva sono uguali con picchi fino a 2000 W.

Di seguito vengono mostrati due grafici rappresentanti la potenza attiva e la corrente, in dettaglio, durante il funzionamento della lavastoviglie:



Grafico 6-13 Andamento della potenza attiva da 08/02/2018 19:52 a 08/02/2018 21:24

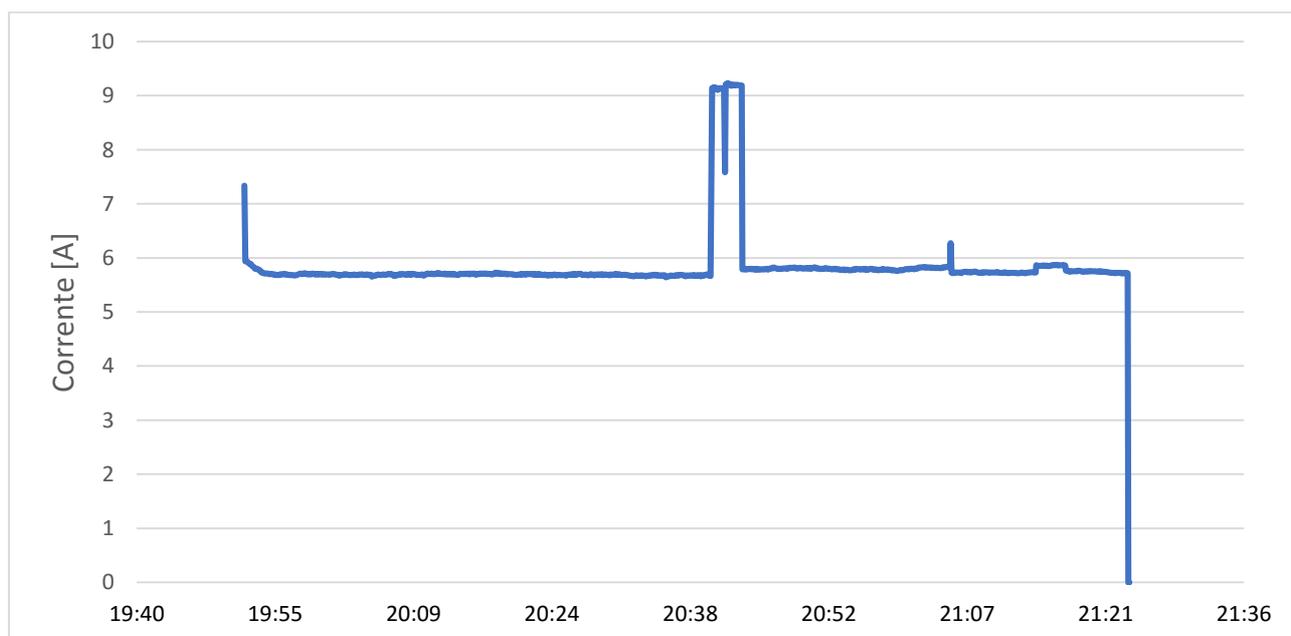


Grafico 6-14 Andamento della corrente da 08/02/2018 19:52 a 08/02/2018 21:24

6.3 Televisore

Il terzo elettrodomestico monitorato è stato il televisore LG 32LD420 full HD [20].



Figura 6-3 Televisore LG 32LD420 full HD [20]

Si è scelto come elettrodomestico un televisore perché ha un comportamento tipicamente capacitivo, diverso da quelli degli elettrodomestici esaminati in precedenza.

Di seguito vengono riportati i grafici delle grandezze misurate per un tempo di 5 giorni, dal 05 al 10 febbraio 2018:

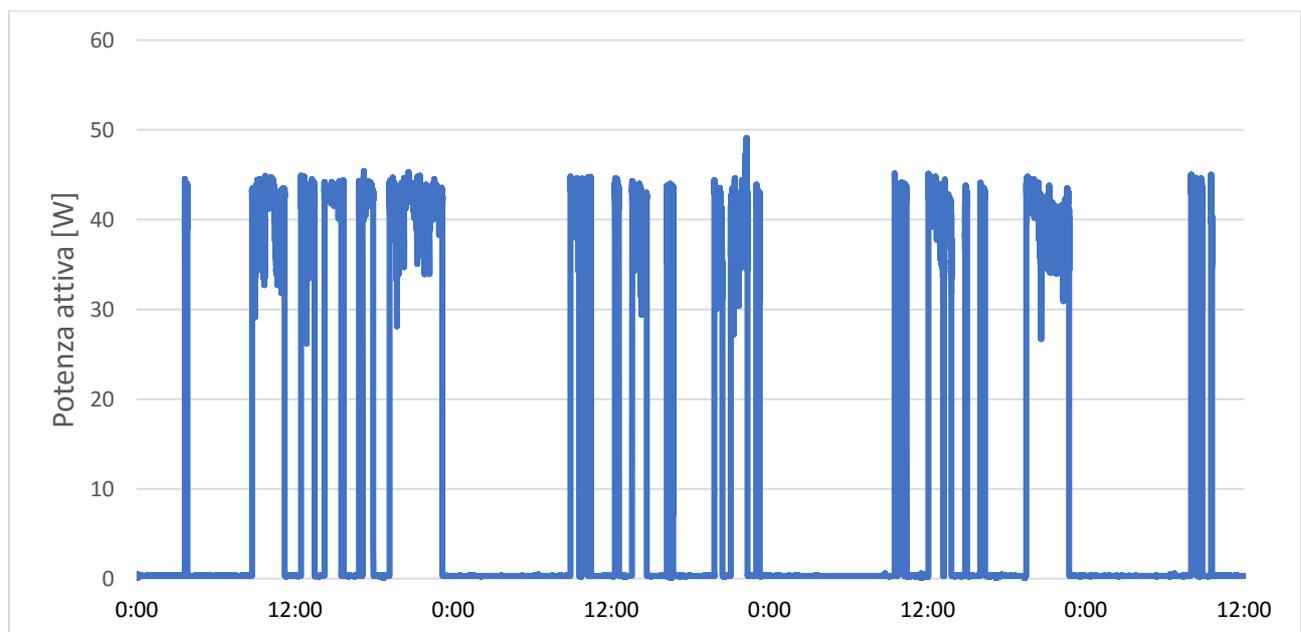


Grafico 6-15 Andamento della potenza attiva da 05/02/2018 23:18 a 10/02/2018 08:49

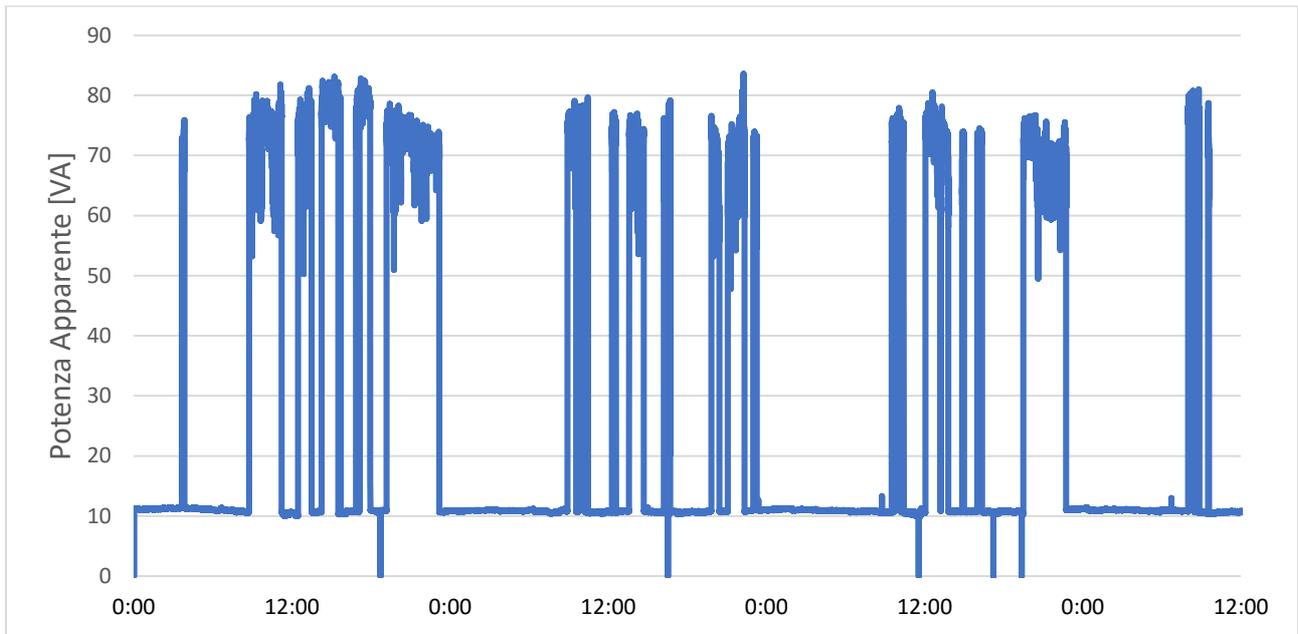


Grafico 6-16 Andamento della potenza apparente da 05/02/2018 23:18 a 10/02/2018 08:49

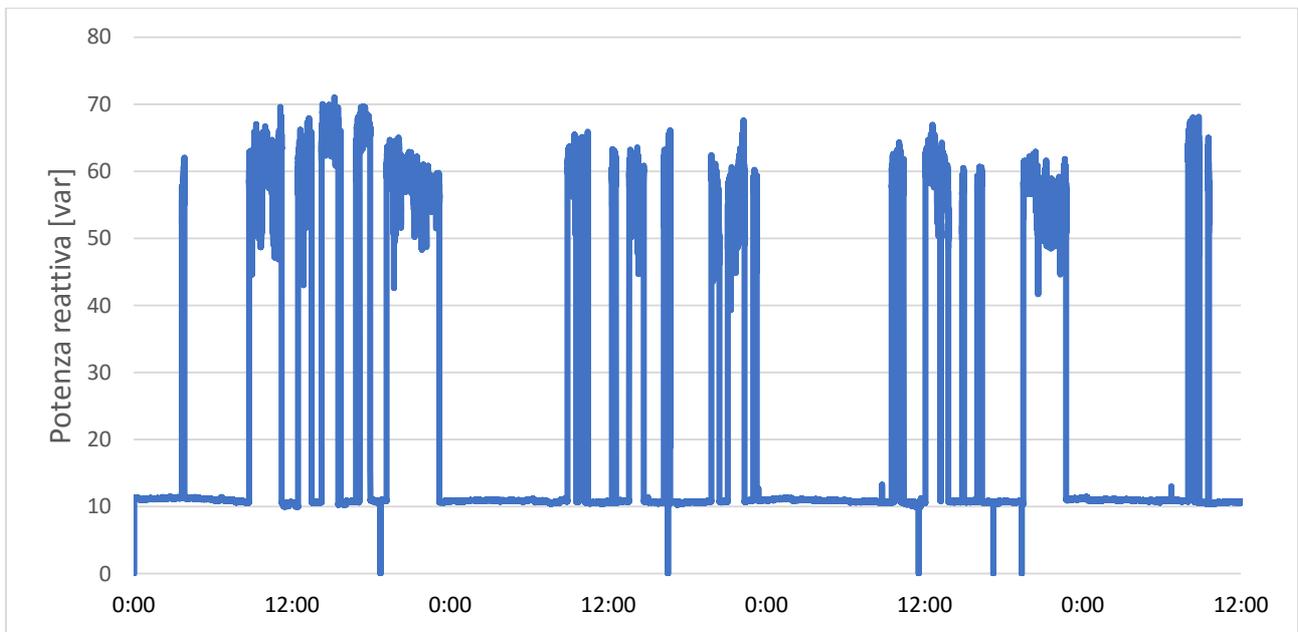


Grafico 6-17 Andamento della potenza reattiva da 05/02/2018 23:18 a 10/02/2018 08:49

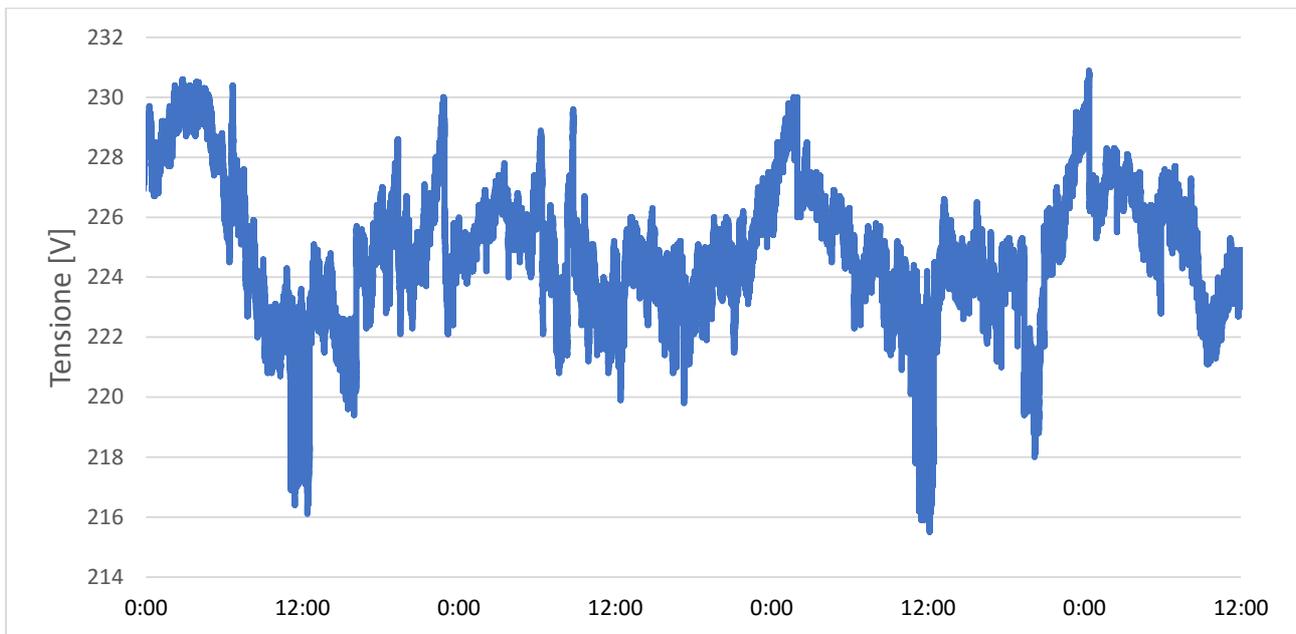


Grafico 6-18 Andamento della tensione da 05/02/2018 23:18 a 10/02/2018 08:49



Grafico 6-19 Andamento della corrente da 05/02/2018 23:18 a 10/02/2018 08:49

È immediato notare un consumo costante di potenza reattiva attorno ai 10 var che sottolinea come il comportamento dell'elettrodomestico sia prettamente capacitivo.

Inoltre è importante sottolineare come in fase di standby il televisore utilizzi 0,05 A che portano a consumare 0,3 W in ogni momento della giornata.

Il picco di corrente si ha intorno ai 0,37 A il quale corrisponde ad una potenza massima consumata di 45 W.

6.4 Computer & stampante

Il quarto e ultimo monitoraggio è stato eseguito con una presa a spina alla quale sono stati collegati due carichi differenti: Computer HP Elite 6300 Pro [20] e Stampante HP LaserJet Pro 100 [20]



Figura 6-4 Computer HP Elite 6300 Pro [20] & Stampante HP LaserJet Pro 100 [20]

Il primo monitoraggio è stato eseguito per un tempo di circa venti minuti con la stampante HP in funzione, restituendo i seguenti dati:

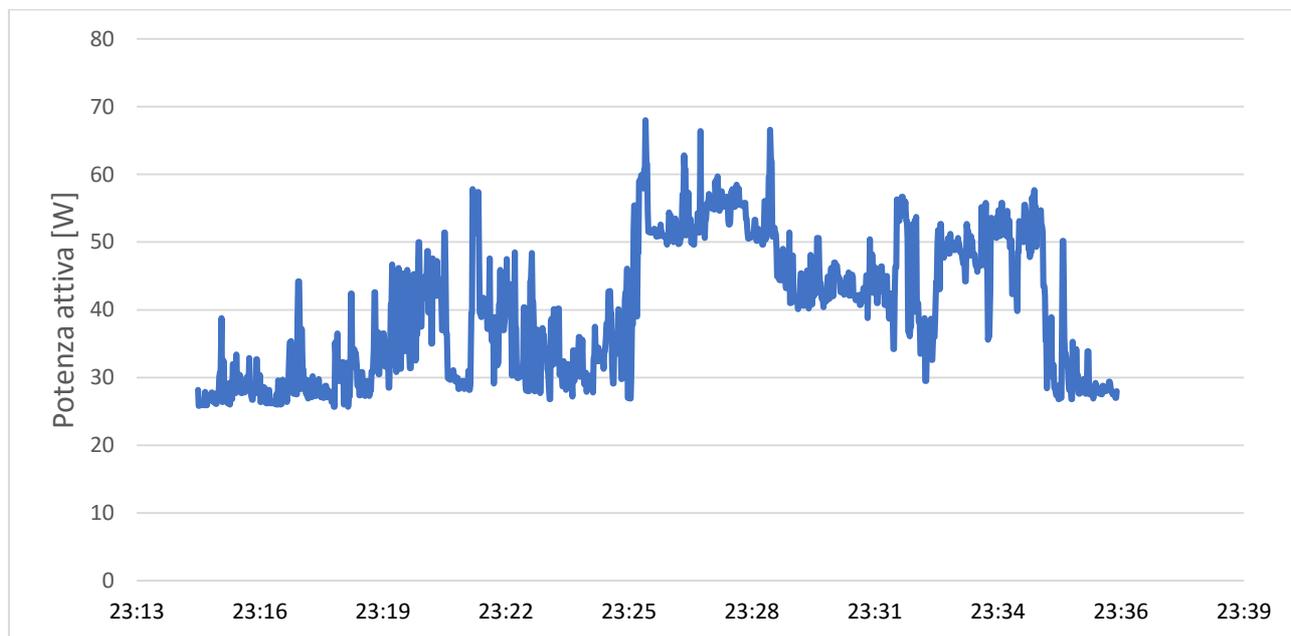


Grafico 6-20 Andamento della potenza attiva da 04/02/2018 23:15 a 04/02/2018 23:36

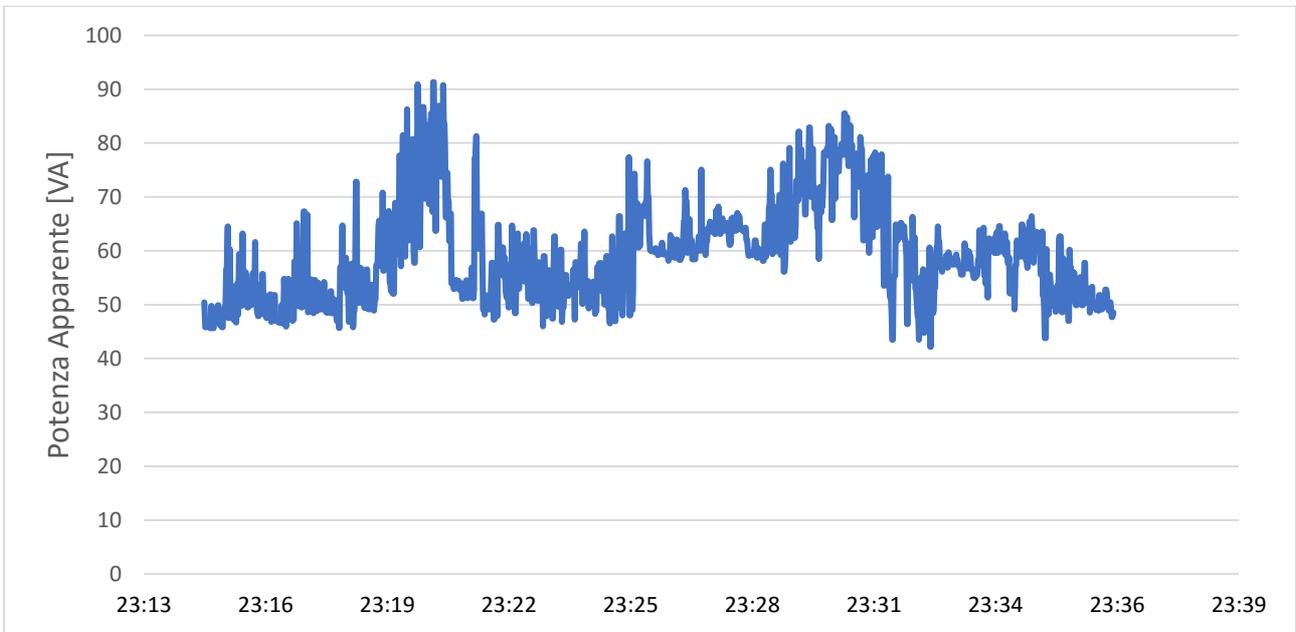


Grafico 6-21 Andamento della potenza apparente da 04/02/2018 23:15 a 04/02/2018 23:36

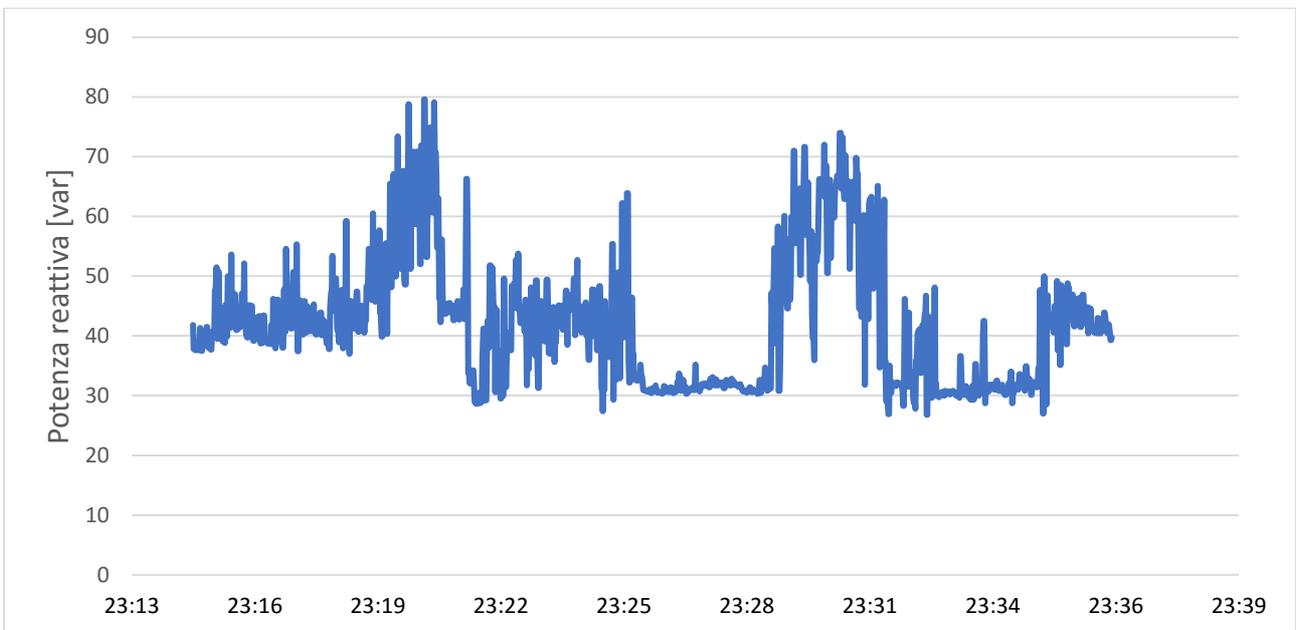


Grafico 6-22 Andamento della potenza reattiva da 04/02/2018 23:15 a 04/02/2018 23:36

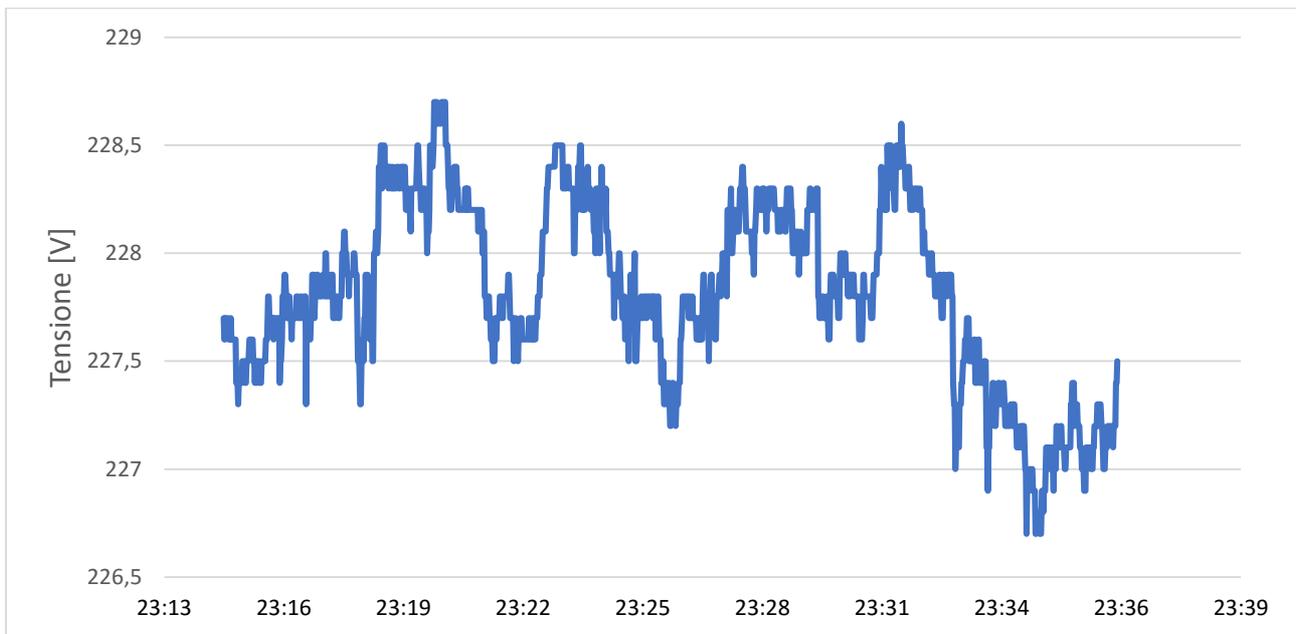


Grafico 6-23 Andamento della tensione da 04/02/2018 23:15 a 04/02/2018 23:36

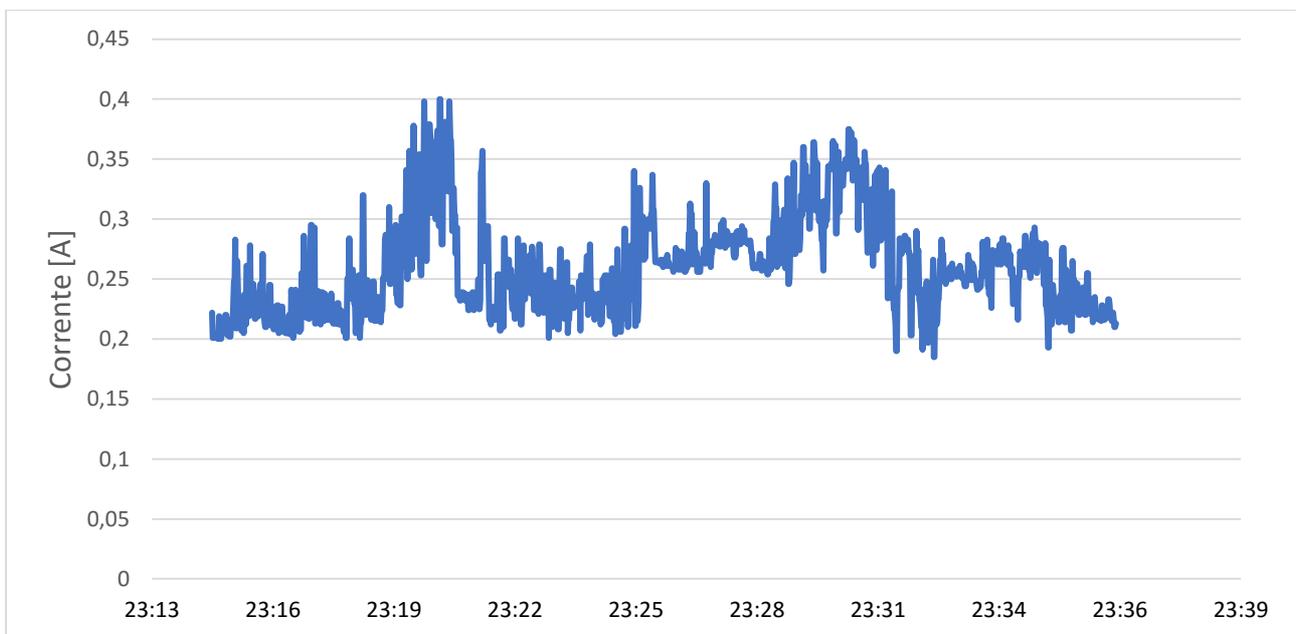


Grafico 6-24 Andamento della corrente da 04/02/2018 23:15 a 04/02/2018 23:36

Dai grafici si vede come anche la stampante sia un carico capacitivo, come ci si aspettava, avendo una potenza reattiva consistente.

La corrente varia tra 0,18 e 0,4 A con un andamento molto variabile in base alle operazioni che sta eseguendo la stampante.

La potenza attiva consumata varia tra 25 e 70 W, valori molto inferiori rispetto alla massima potenza teorica della stampante.

Nel grafico della tensione viene evidenziato come, con un carico così piccolo, il valore di V_{rms} rimanga quasi costante.

Tensione misurata minima 226.6 V, massima 228.7 V.

Sulla stessa presa a spina è stato poi monitorato il consumo del computer HP Elite 6300 Pro utilizzato svariate volte tra il 05 e l'08 febbraio 2018 con i seguenti risultati:

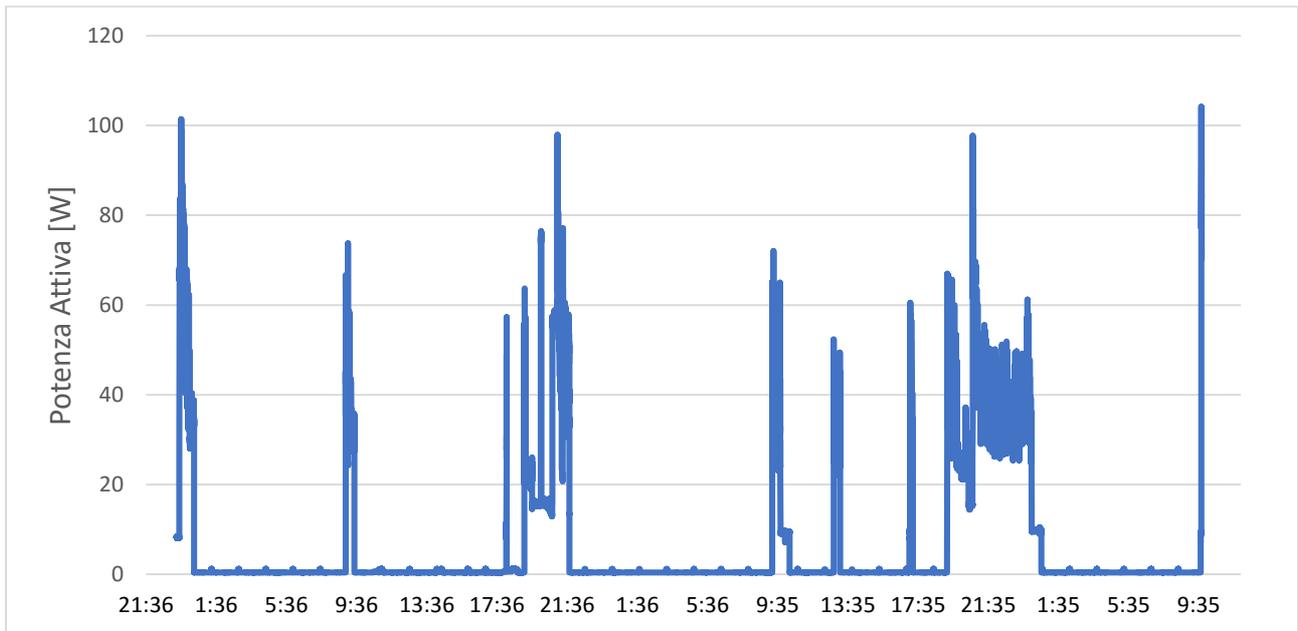


Grafico 6-25 Andamento della potenza attiva da 05/02/2018 23:19 a 08/02/2018 10:15

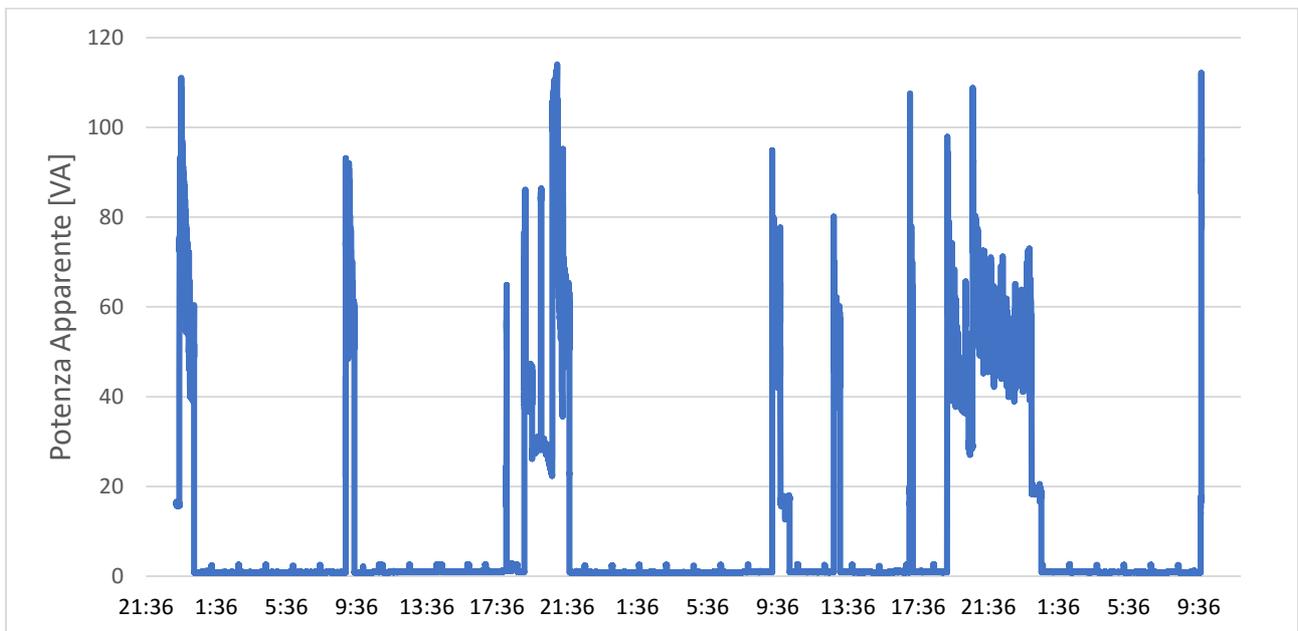


Grafico 6-26 Andamento della potenza apparente da 05/02/2018 23:19 a 08/02/2018 10:15

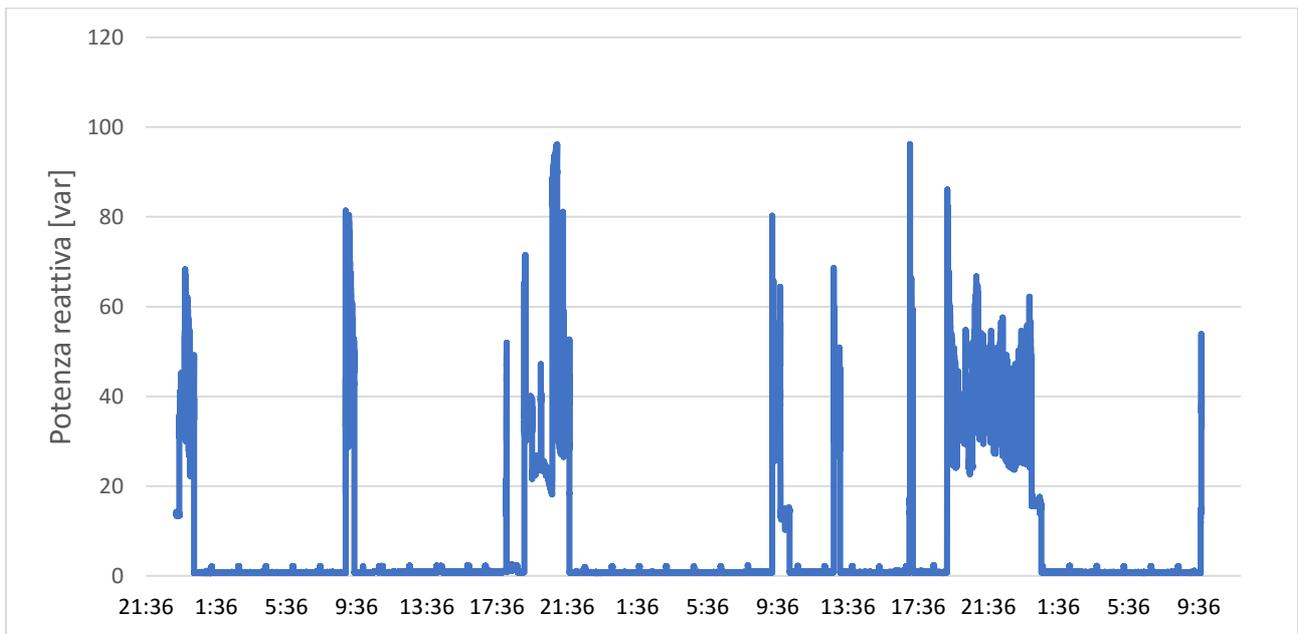


Grafico 6-27 Andamento della potenza reattiva da 05/02/2018 23:19 a 08/02/2018 10:15

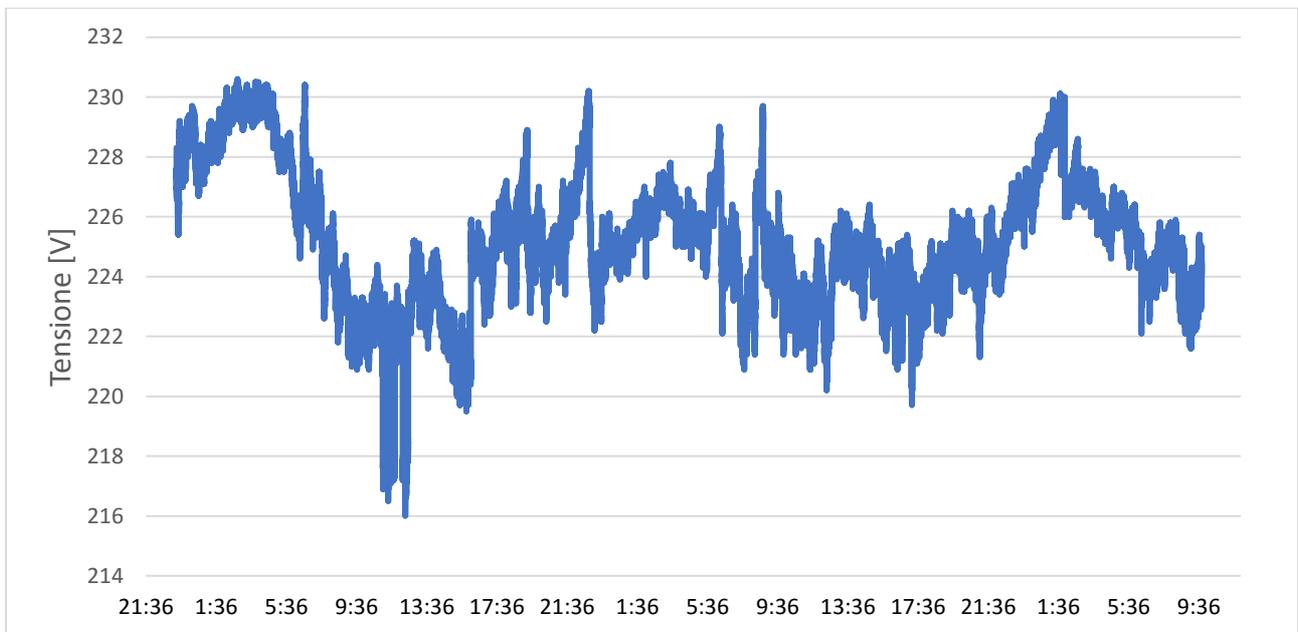


Grafico 6-28 Andamento della tensione da 05/02/2018 23:19 a 08/02/2018 10:15

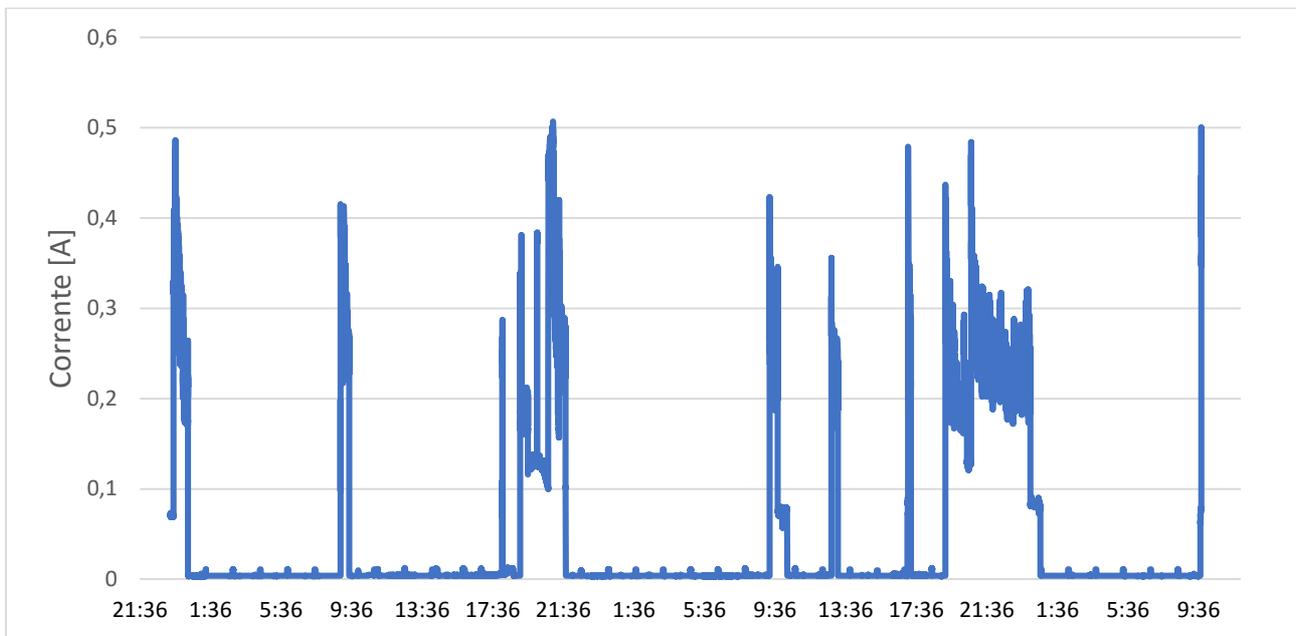


Grafico 6-29 Andamento della corrente da 05/02/2018 23:19 a 08/02/2018 10:15

L'andamento della potenza consumata dal computer non è lineare ma varia in base alla funzione in esecuzione.

La potenza istantanea massima consumata è circa 100 W con una corrente massima di circa 0.5 A.

Il carico è sempre di tipo capacitivo quindi la potenza reattiva è diversa da zero per tutta la durata del monitoraggio.

Durante il periodo di standby il consumo è di 0.4 W.

Per quanto riguarda la tensione è presente una sensibile diminuzione del valore di V_{rms} , fino a 216 V, dovuta però non al computer in esame ma al funzionamento nello stesso periodo di tempo di un carico elevato come il forno.

6.5 Energia consumata

Una volta immagazzinati tutti i dati utili, per disegnare i grafici sopra descritti, è possibile utilizzarli per calcolare delle ulteriori grandezze come l'energia consumata che è di fatto ciò che viene pagato nella bolletta.

In questo capitolo vengono mostrati gli andamenti d'energia, in kWh, ottenuti sommando le potenze attive istantanee moltiplicate per il tempo.

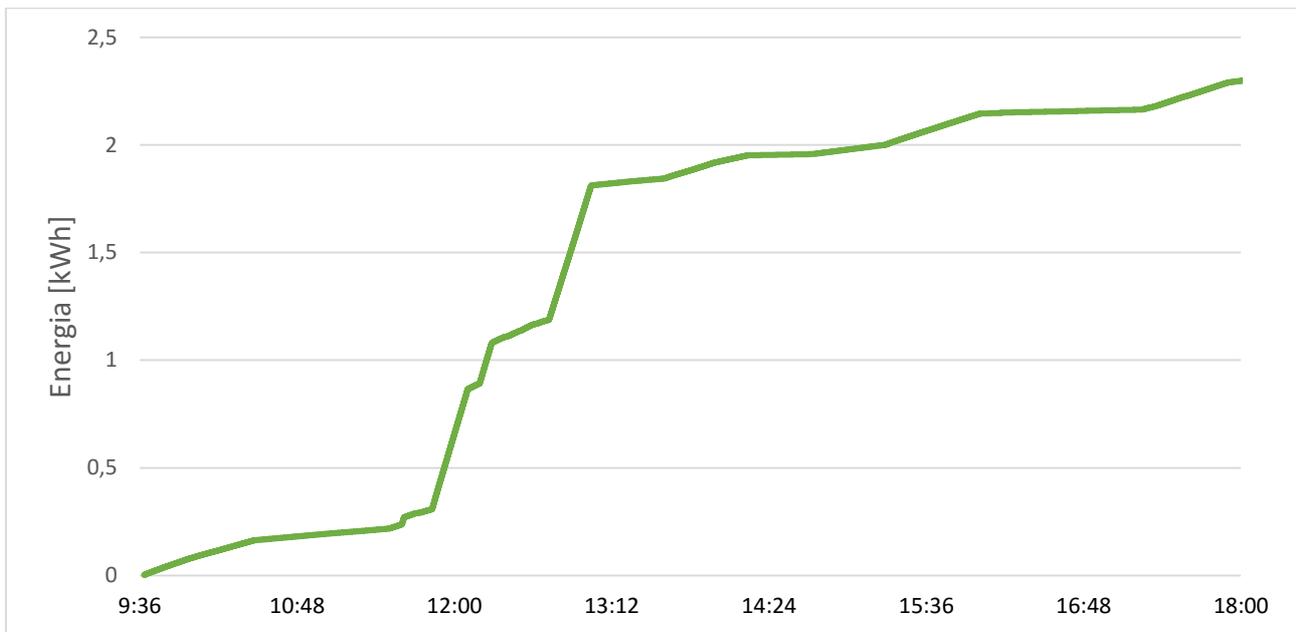


Grafico 6-30 Andamento dell'energia consumata da 06/02/2018 09:37 a 06/02/2018 18:42

Il grafico 6-30 evidenzia come il giorno 06/02/2018 intorno alle 11:30 ci sia un aumento notevole della pendenza dell'energia consumata dovuta all'accensione del forno.

Durante il resto della giornata il grafico ha un andamento di poco crescente in modo costante dovuto al continuo funzionamento del frigorifero.

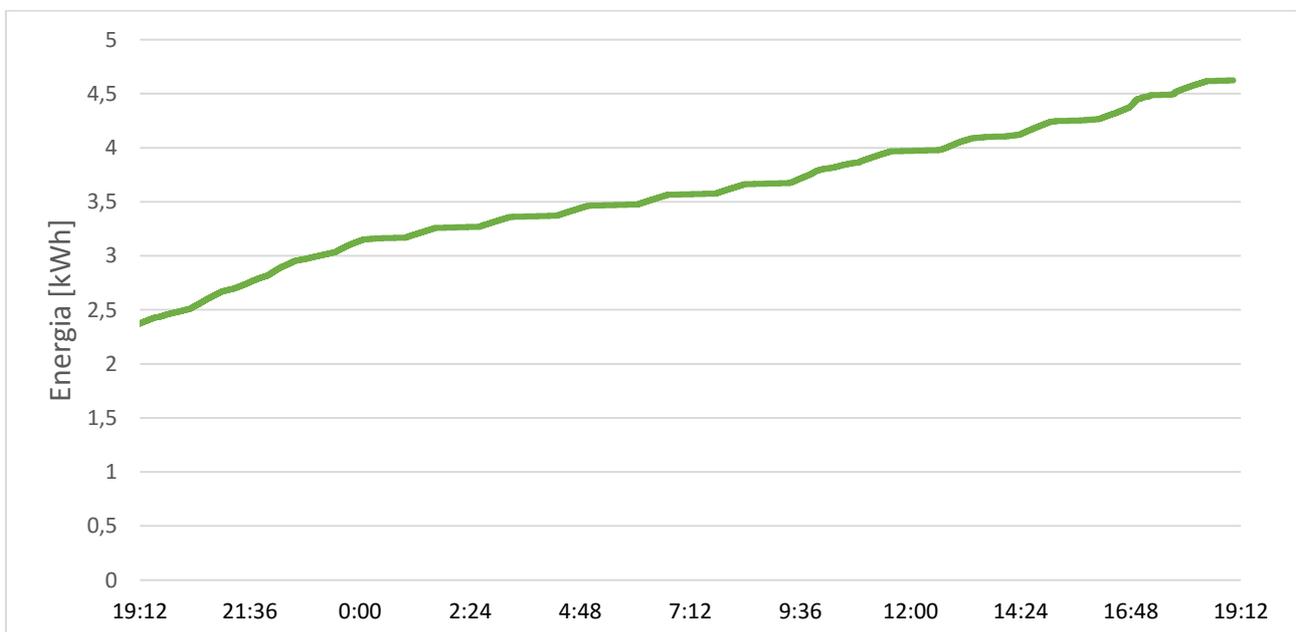


Grafico 6-31 Andamento dell'energia consumata da 06/02/2018 19:02 a 07/02/2018 19:02

Per tutto il tempo monitorato dal grafico 6-31 non si riscontra alcun aumento drastico di energia consumata.

L'andamento crescente costante è dovuto al continuo funzionamento del frigorifero.



Grafico 6-32 Andamento dell'energia consumata da 08/02/2018 01:06 a 08/02/2018 23:24

Il grafico 6-32 presenta un aumento di pendenza dovuto al forno intorno alle 11:30 ed un altro dovuto alla lavastoviglie alle ore 20 circa del 08/02/2018.

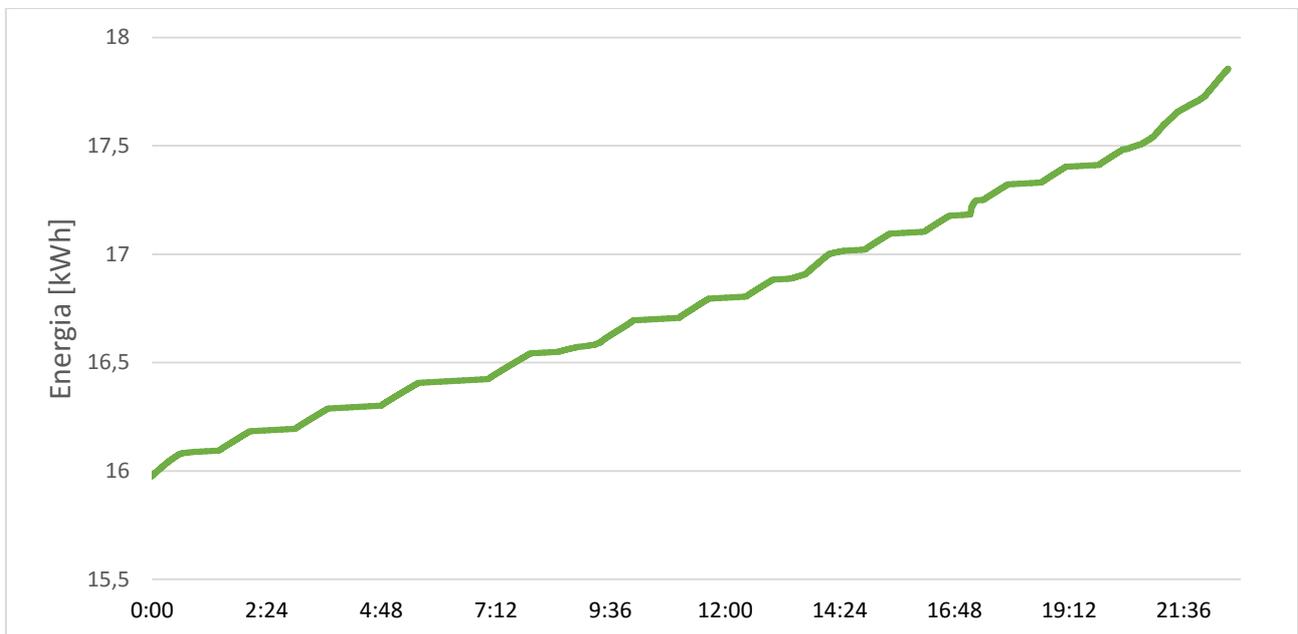


Grafico 6-33 Andamento dell'energia consumata da 08/02/2018 23:50 a 09/02/2018 22:32

Nel grafico 6-33 non si riscontrano aumenti drastici di energia consumata.

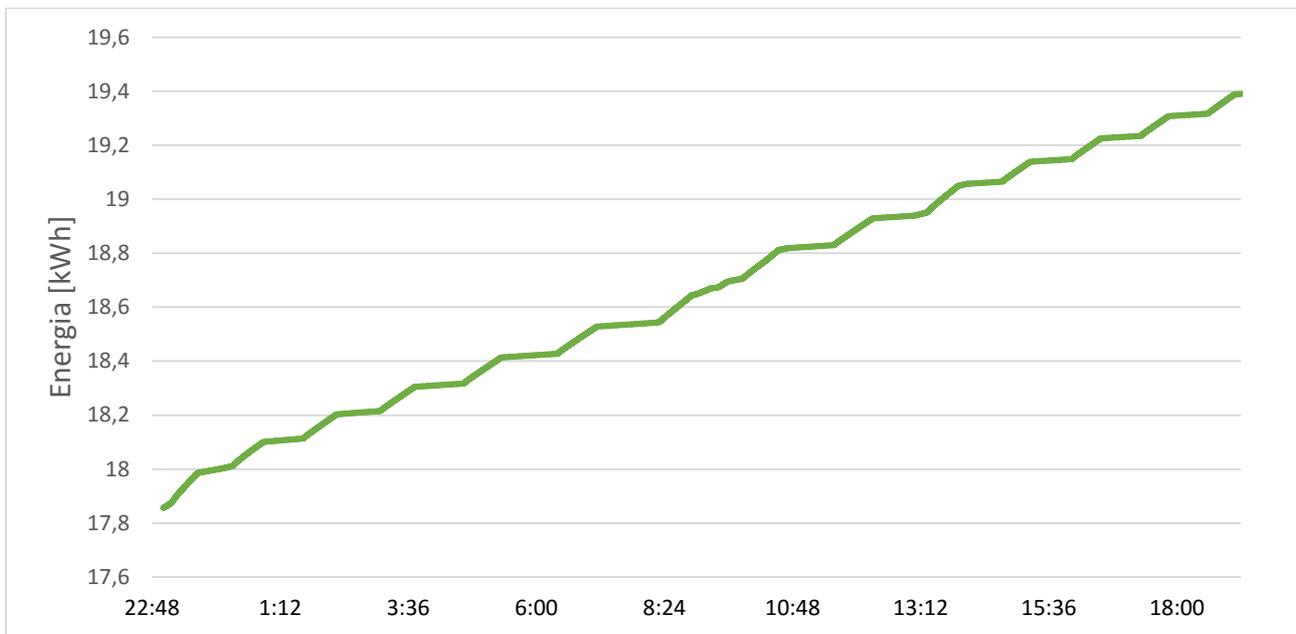


Grafico 6-34 Andamento dell'energia consumata da 09/02/2018 23:00 a 10/02/2018 19:43

Nel grafico 6-34 non si riscontrano aumenti drastici di energia consumata.

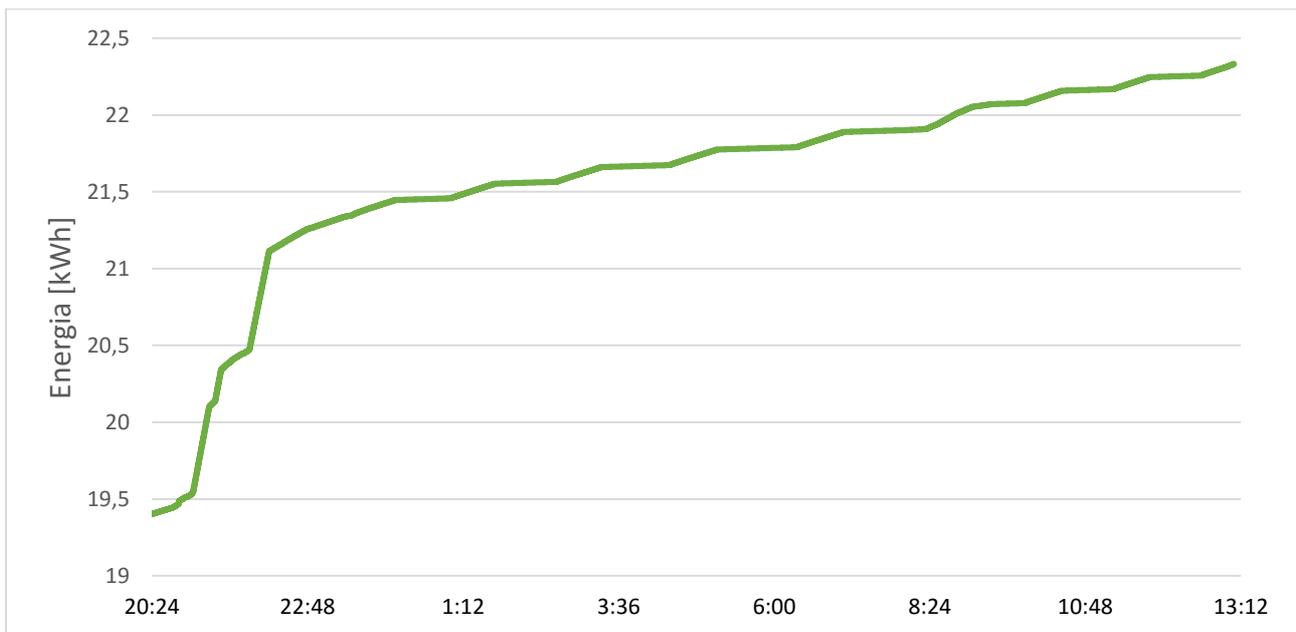


Grafico 6-35 Andamento dell'energia consumata da 10/02/2018 20:22 a 11/02/2018 13:05

Il grafico 6-35 evidenzia come il giorno 10/02/2018 intorno alle 20:45 ci sia un aumento notevole della pendenza dell'energia consumata dovuta all'accensione del forno.

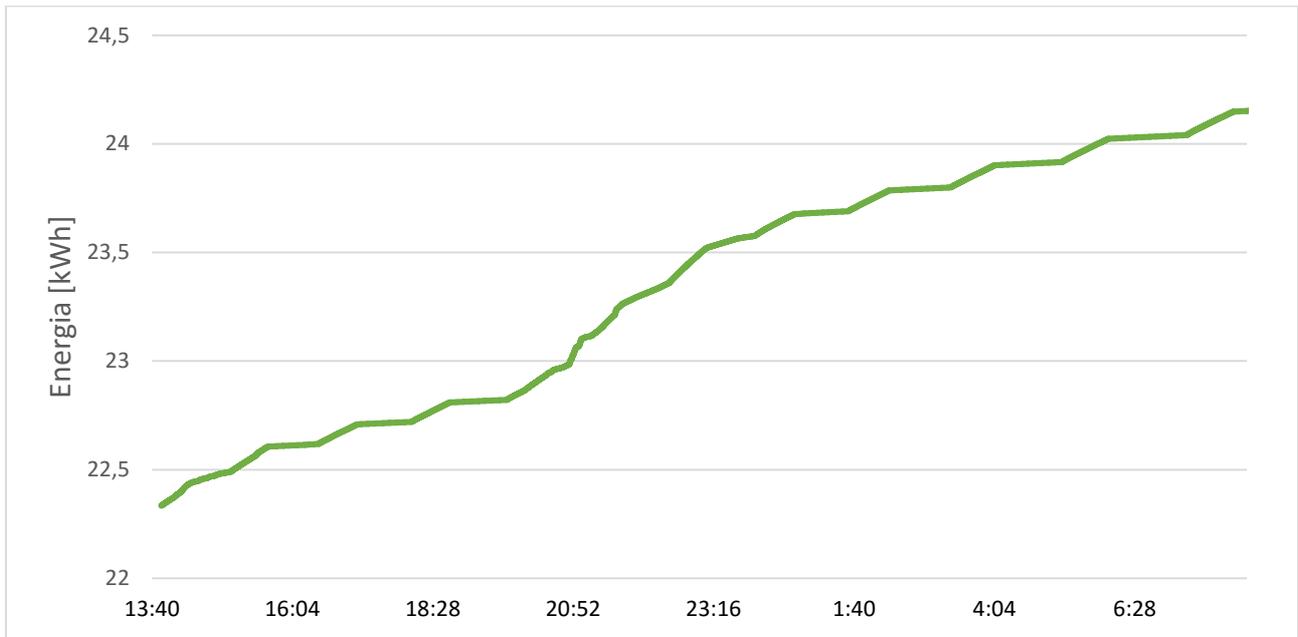


Grafico 6-36 Andamento dell'energia consumata da 11/02/2018 13:50 a 12/02/2018 08:43

Nel grafico 6-36 non si riscontrano aumenti drastici di energia consumata.

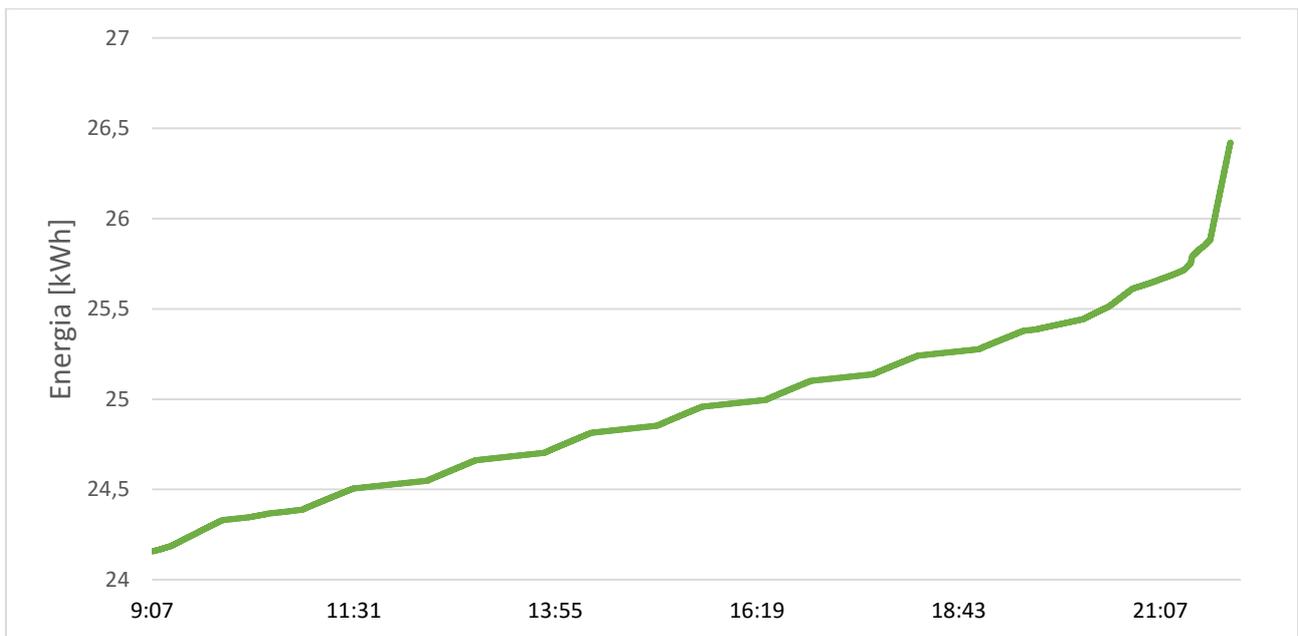


Grafico 6-37 Andamento dell'energia consumata da 12/02/2018 09:07 a 12/02/2018 21:57

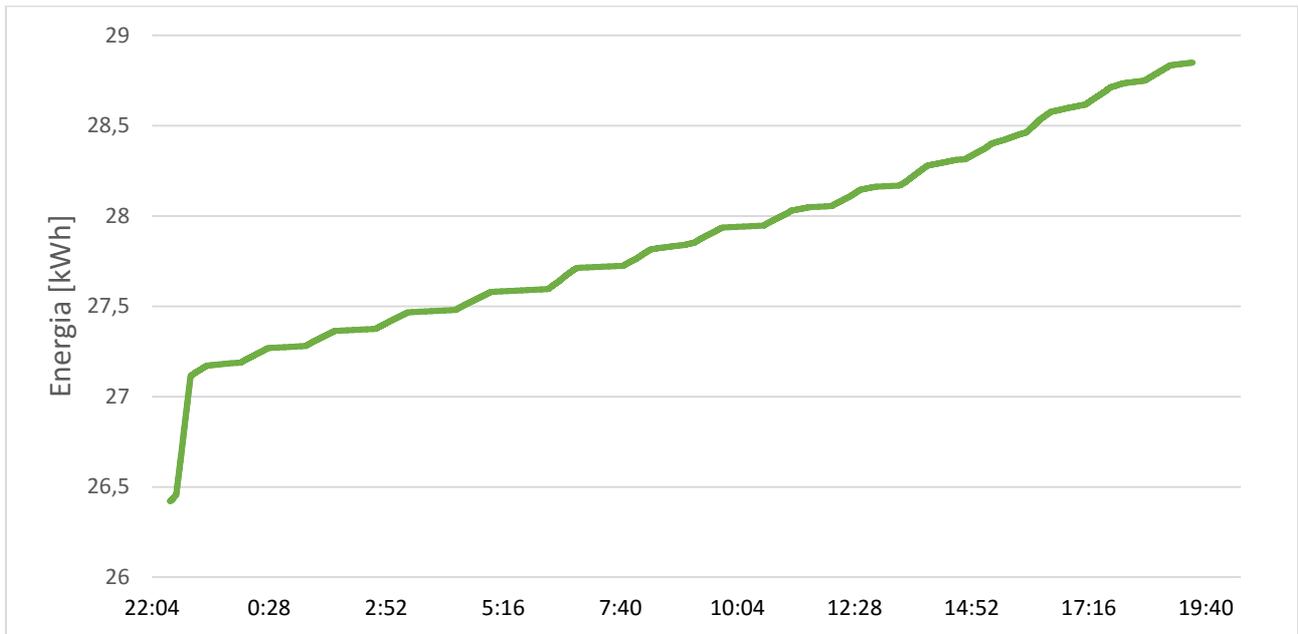


Grafico 6-38 Andamento dell'energia consumata da 12/02/2018 22:26 a 13/02/2018 19:24

A cavallo dei grafici 6-37 e 6-38 si registra un forte aumento del consumo domestico dovuto al forno che sta lavorando a massima potenza.

Il resto dei grafici segue sempre un andamento costante, in linea con il consumo del frigorifero.

6.6 Principali dati rilevati

Di seguito viene mostrata una tabella riassuntiva con i dati rilevati nei principali cicli di lavoro degli elettrodomestici monitorati:

Elettrodomestico	P_{pk} [W]	S_{pk} [VA]	Q_{pk} [var]	I_{pk} [A]	P.F.	En[kWh]	Time
Frigorifero	127.7	223.8	183.8	0.98	0.572	0.0828	39min
Forno	1897	1903.6	0	8.907	1	1.3328	1h33min
Lavastoviglie	1997.5	1998.1	48.7	9.228	1	1.9644	1h32min
Televisore	43.5	76	62.3	0.34	0.572	0.0997	2h57min
Stampante	68	76.6	35.2	0.337	0.888	0.0144	21min
Computer	73.3	81.2	34	0.364	0.364	0.0168	59min

Tabella 6-1 Principali dati rilevati

Dove:

- P_{pk} [W]: Potenza attiva di picco [Watt]
- S_{pk} [VA]: Potenza apparente di picco [Voltampere]
- Q_{pk} [var]: Potenza reattiva di picco [var]
- I_{pk} [A]: Corrente di picco [Ampere]
- P.F.: Fattore di Potenza
- En [kWh]: Energia consumata in un ciclo di lavoro [kWatt ora]
- Time: Durata di un ciclo di lavoro

7 Conclusioni

Il progetto sviluppato in questa tesi ha raggiunto gli obiettivi prefissati.

Grazie all'utilizzo dell'applicazione μ Panel infatti, è possibile valutare se l'elettrodomestico monitorato o un qualsiasi dispositivo elettrico che necessita di un'alimentazione da rete sia in funzione o meno.

Grazie alla parte grafica dell'applicazione risultano facilmente individuabili gli elettrodomestici che pesano di più sulla bolletta elettrica o quelli con un mal funzionamento dovuto a difetti o ad invecchiamento.

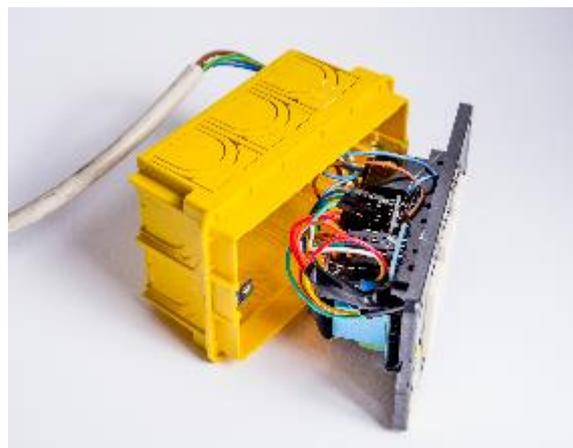
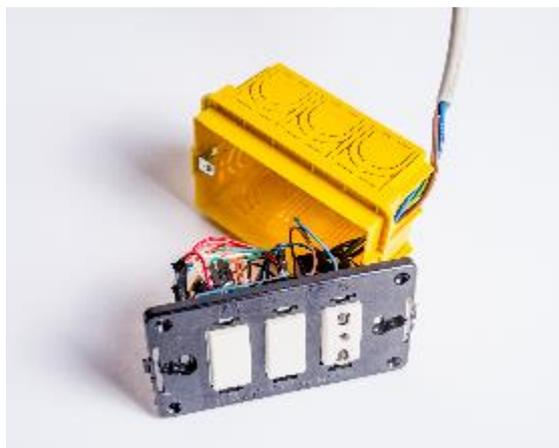


Figura 7-1 Prototipo presa domotica terminato

In figura si può notare come tutti i sensori ed il microcontrollore siano stati inseriti all'interno di una scatola ad incasso per pareti in muratura di dimensioni 59x96x49 mm occupando solamente una parte dello spazio a disposizione: 50x45x40 mm.

La presa a spina Smart studiata in questo progetto se inserita in un impianto domotico può essere molto utile per la gestione a distanza dei vari elettrodomestici.

Conoscendo i consumi dei carichi domestici e potendoli azionare dal proprio smartphone un impianto intelligente è in grado di autoregolare l'accensione degli elettrodomestici per non superare la soglia che farebbe scattare il contatore.

Il costo complessivo del prototipo è di circa 45,00 € (30,00 € microcontrollore - 15,00 € sensori ed alimentatore).

Con il collegamento da remoto inoltre si può ottenere un'indicazione sul consumo orario e istantaneo, con una misura di potenza attiva che non si distacca mai più del 3 % dal valore misurato con il sensore Christ Elektronik CLM Professional utilizzato in fase di calibrazione.

Con questo progetto si aprono le possibilità di monitoraggio e controllo all'Open Source per cui si mette in evidenza che a differenza delle case costruttrici, le quali tendono a mantenere i loro sistemi

chiusi, con i prodotti presenti sul mercato è possibile ottenere soluzioni aperte che siano affidabili, sufficientemente precise e dal prezzo contenuto.

7.1 Sviluppi futuri

Un progetto Open Source di questo tipo può avere svariate possibilità di ampliamento, che non si sono volute inserire per non appesantire troppo la fase di programmazione in modo che risulti più semplice capire a quale funzione si riferiscono i diversi comandi.

Possono essere installati all'interno della presa a spina, ad esempio:

- Sensori di temperatura e di umidità, che con una semplice e breve implementazione del codice Arduino coordinano l'accensione o lo spegnimento dell'impianto di riscaldamento
- Un relè per il coordinamento automatico del funzionamento degli elettrodomestici o per la disalimentazione completa di isole tecniche (televisore, decoder, ecc.) a comando
- Un sensore di movimento per il riconoscimento automatico di una prolungata assenza e il conseguente autospegnimento delle luci

Si può pensare inoltre di sostituire il modulo SCF – TOP03 con un microcontrollore Arduino Nano associato ad un modulo Wi-Fi ESP8266 (non utilizzati in questo progetto per motivi di ingombro all'interno della scatola ad incasso) i quali abbatterebbero ulteriormente i costi del 60%.

Questi verrebbero installati all'interno di un *case* 3D il quale darebbe la possibilità di integrare il tutto (sensori, microcontrollore e alimentatore) nello spazio di due moduli.

8 Appendice

Vengono di seguito mostrati gli andamenti delle principali grandezze elettriche riguardanti la seconda rilevazione sul frigorifero che è stata eseguita per un tempo di 4 giorni, dal 05 al 09 febbraio 2018:

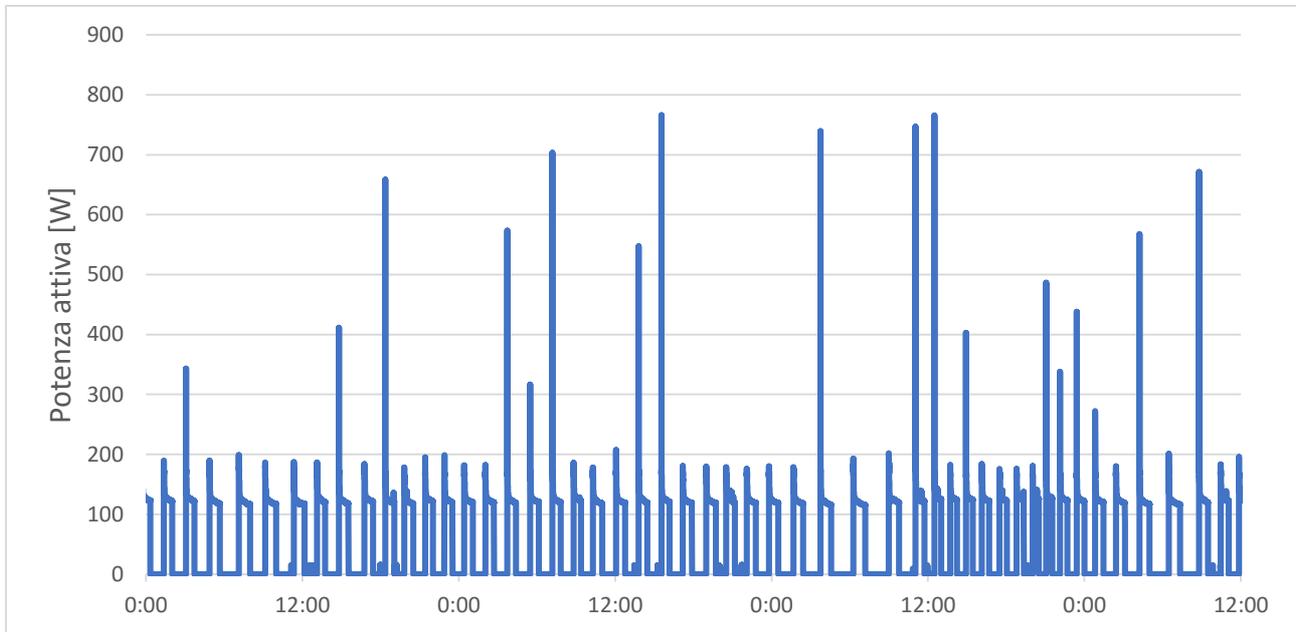


Grafico 8-1 Andamento della potenza attiva da 05/02/2018 23:19 a 09/02/2018 13:52

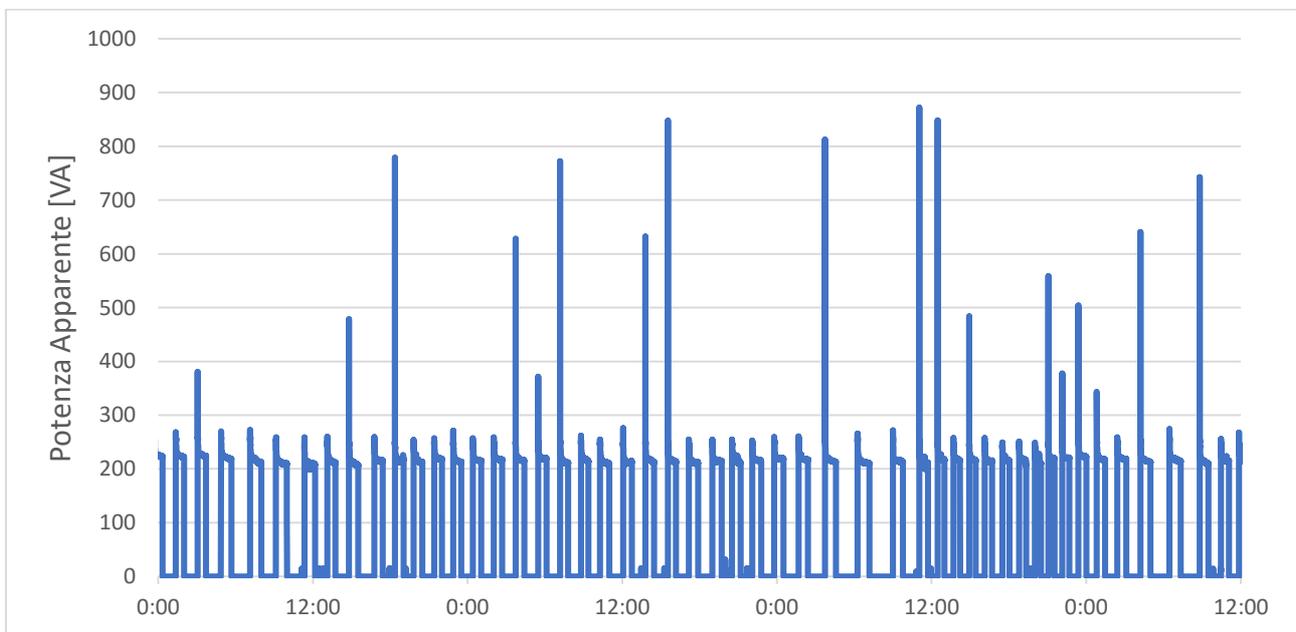


Grafico 8-2 Andamento della potenza apparente da 05/02/2018 23:19 a 09/02/2018 13:52

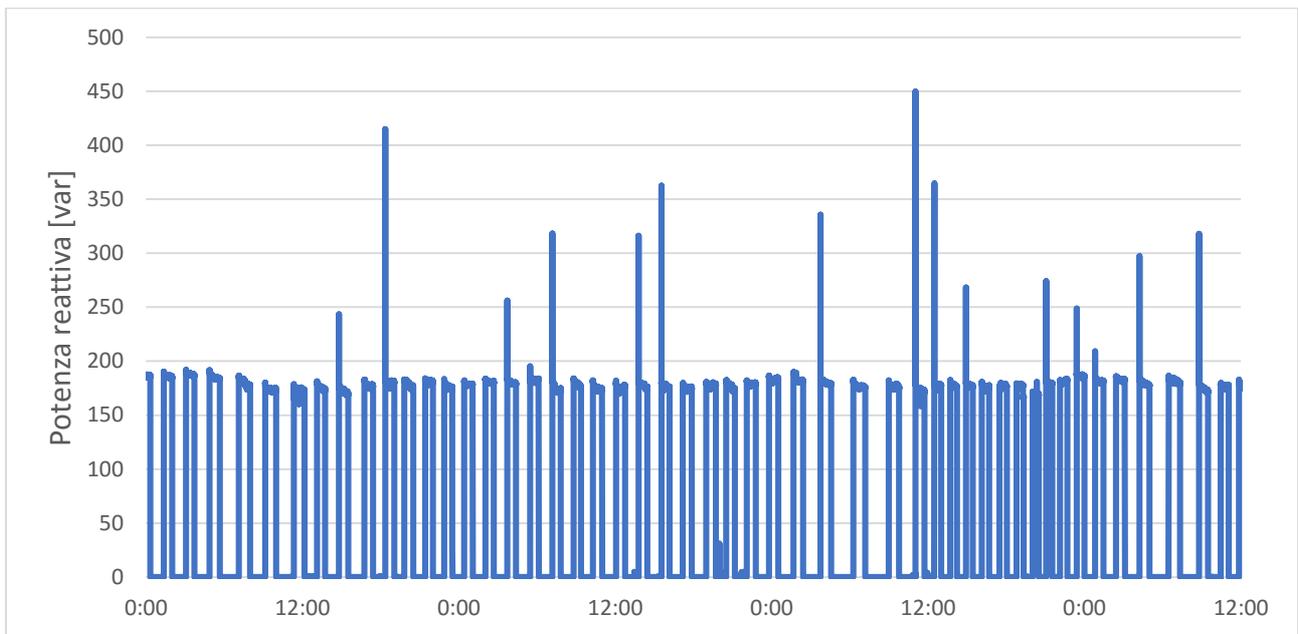


Grafico 8-3 Andamento della potenza reattiva da 05/02/2018 23:19 a 09/02/2018 13:52

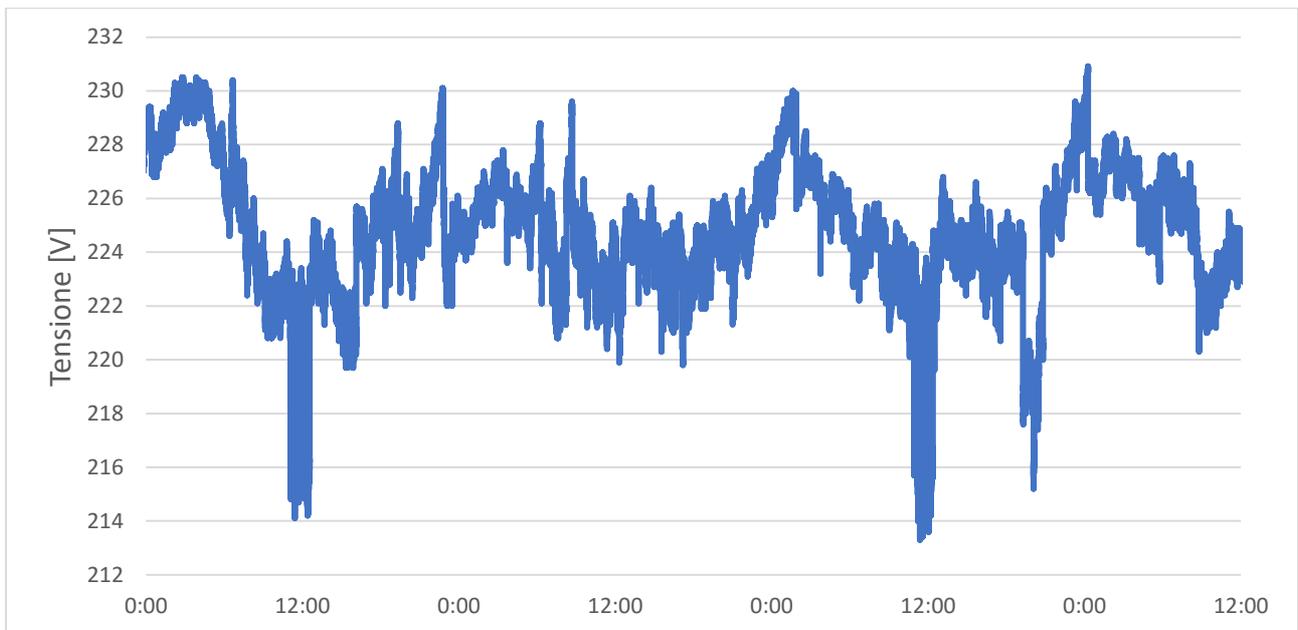


Grafico 8-4 Andamento della tensione da 05/02/2018 23:19 a 09/02/2018 13:52

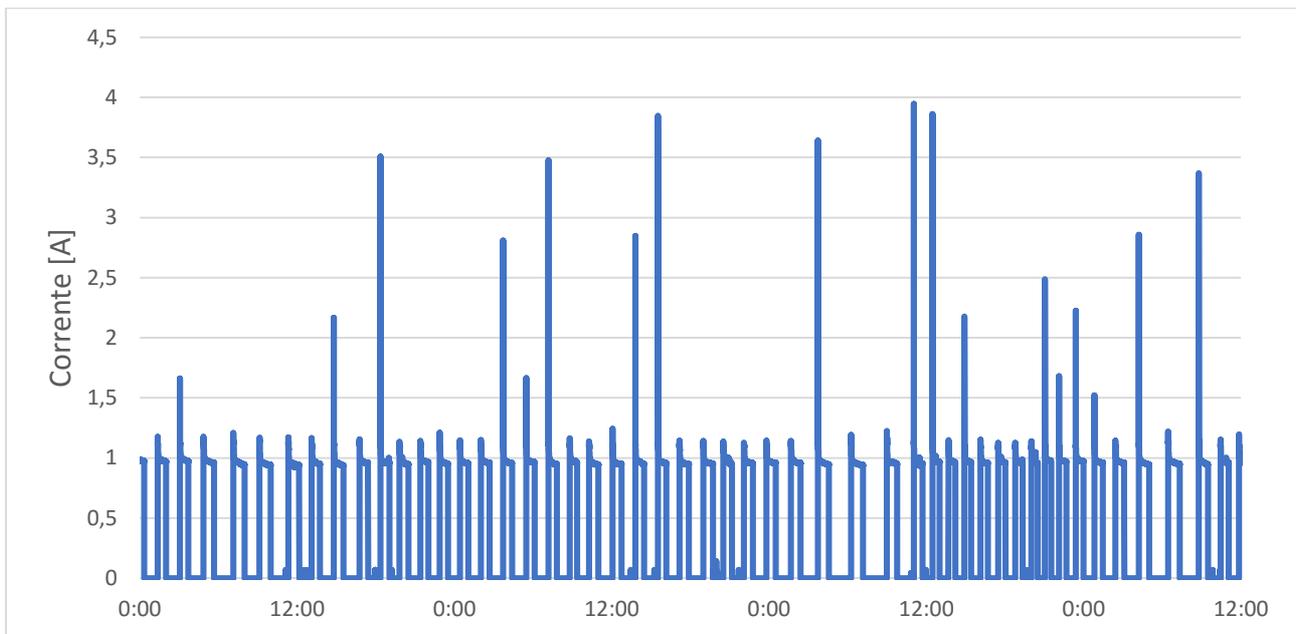


Grafico 8-5 Andamento della corrente da 05/02/2018 23:19 a 09/02/2018 13:52

L'ultimo monitoraggio del frigorifero è stato effettuato per un tempo di 5 giorni, dal 09 al 14 febbraio 2018:

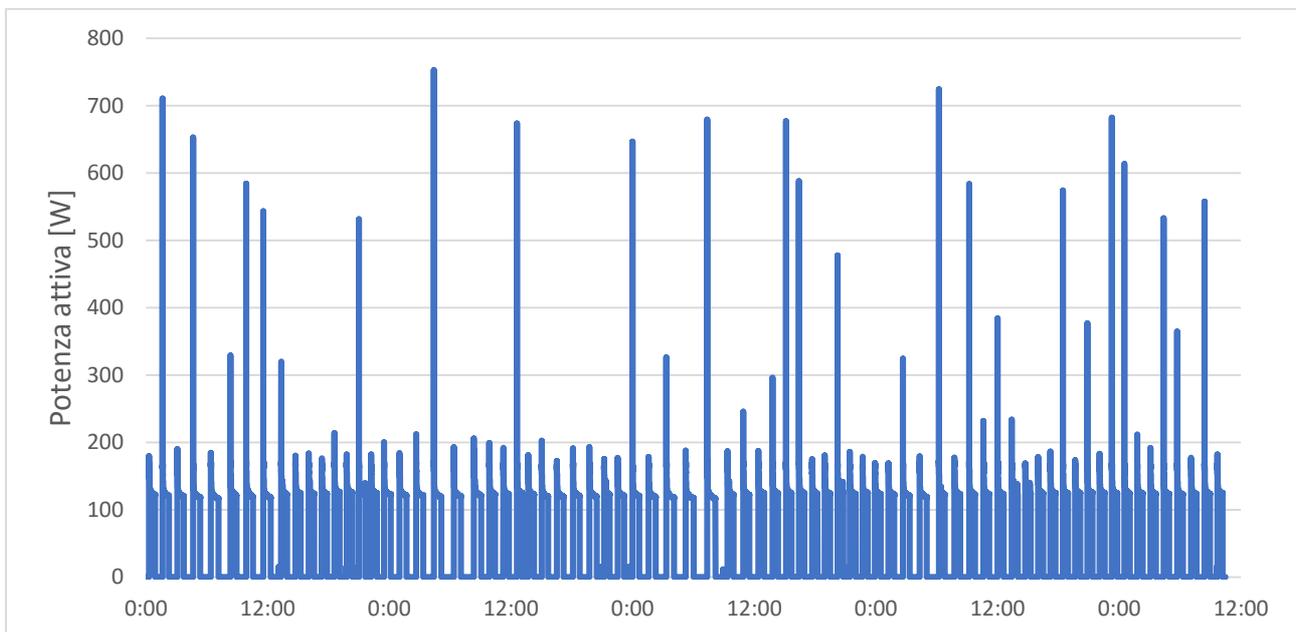


Grafico 8-6 Andamento della potenza attiva da 09/02/2018 14:12 a 14/02/2018 10:28

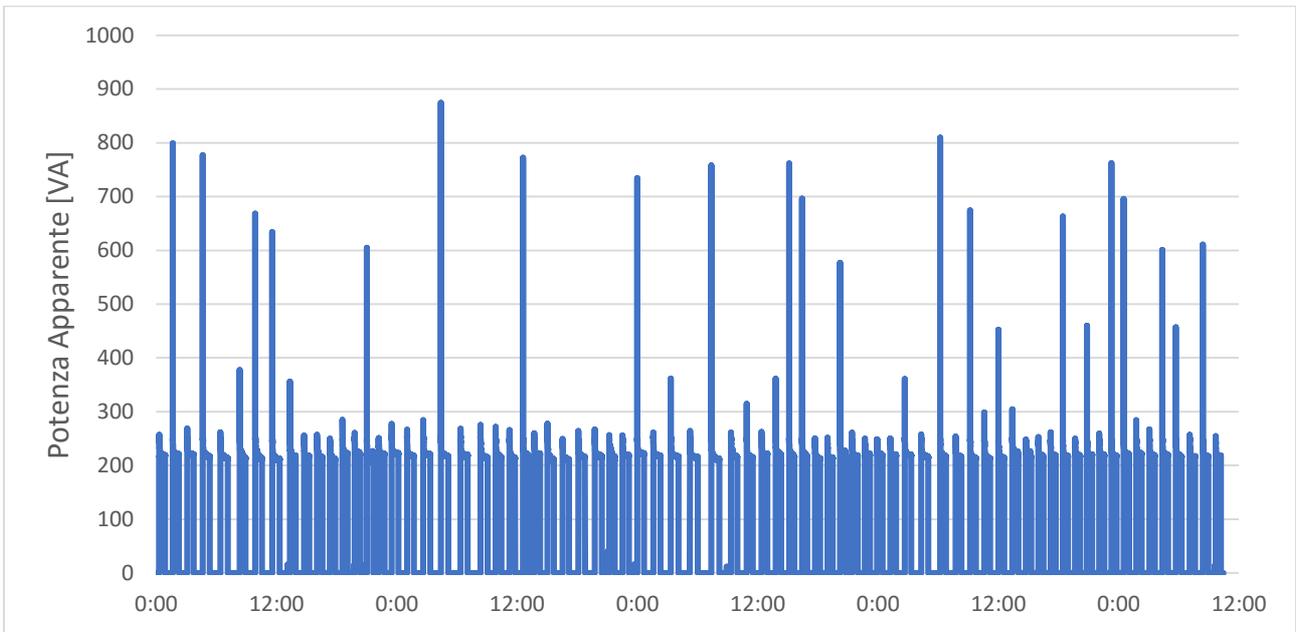


Grafico 8-7 Andamento della potenza apparente da 09/02/2018 14:12 a 14/02/2018 10:28

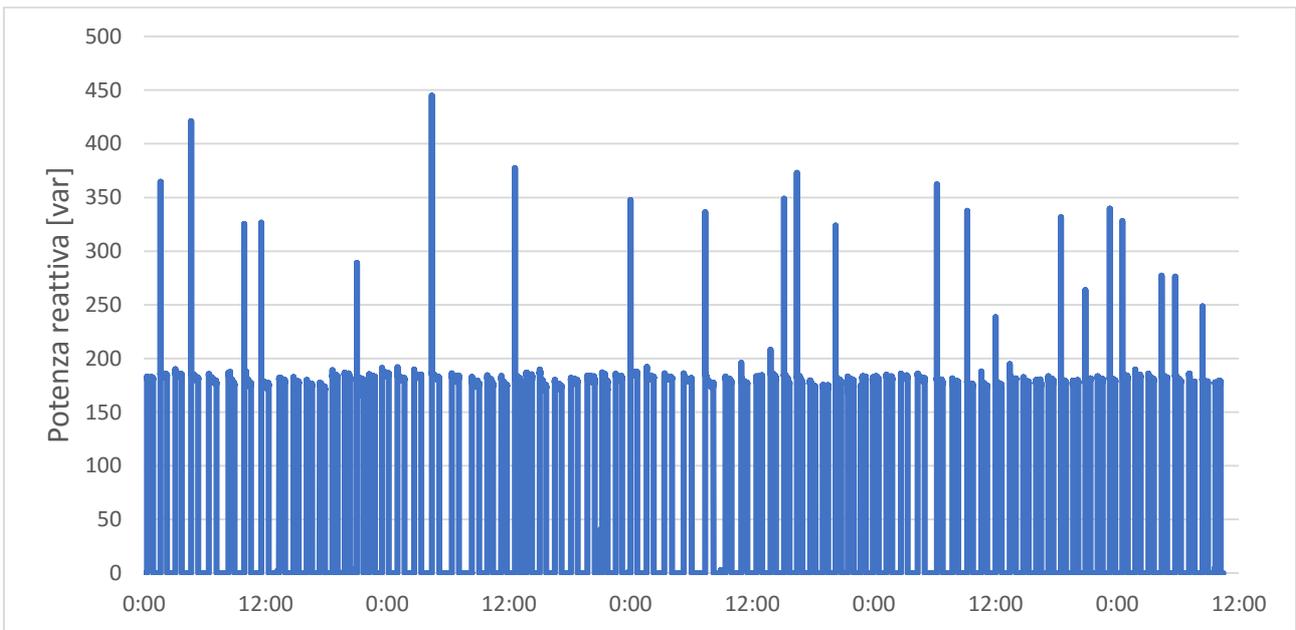


Grafico 8-8 Andamento della potenza reattiva da 09/02/2018 14:12 a 14/02/2018 10:28

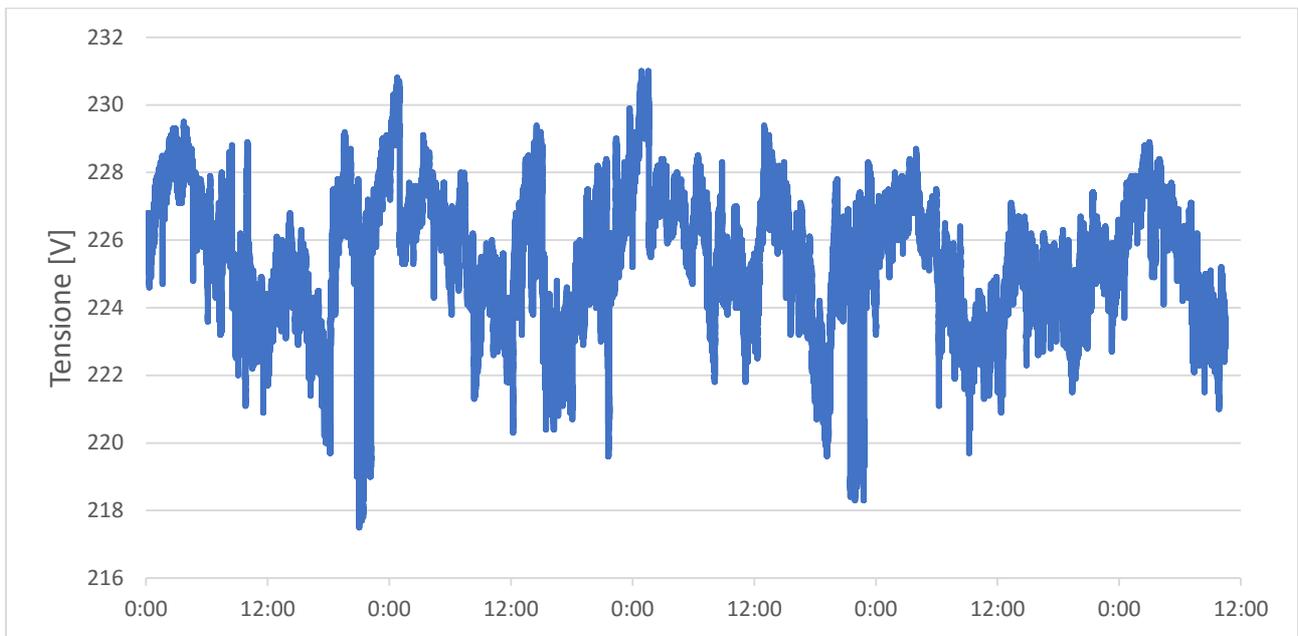


Grafico 8-9 Andamento della tensione da 09/02/2018 14:12 a 14/02/2018 10:28

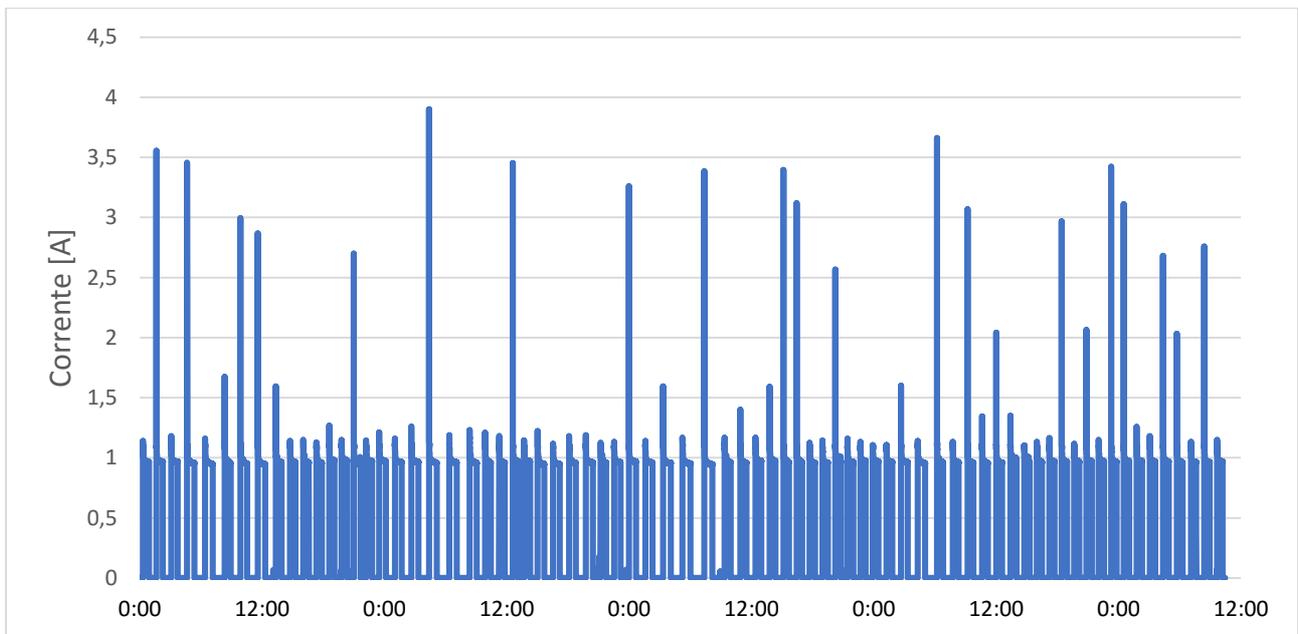


Grafico 8-10 Andamento della corrente da 09/02/2018 14:12 a 14/02/2018 10:28

Vengono di seguito mostrati gli andamenti delle principali grandezze elettriche riguardanti la seconda rilevazione sul televisore che è stata eseguita per un tempo di 5 giorni, dal 10 al 14 febbraio 2018:

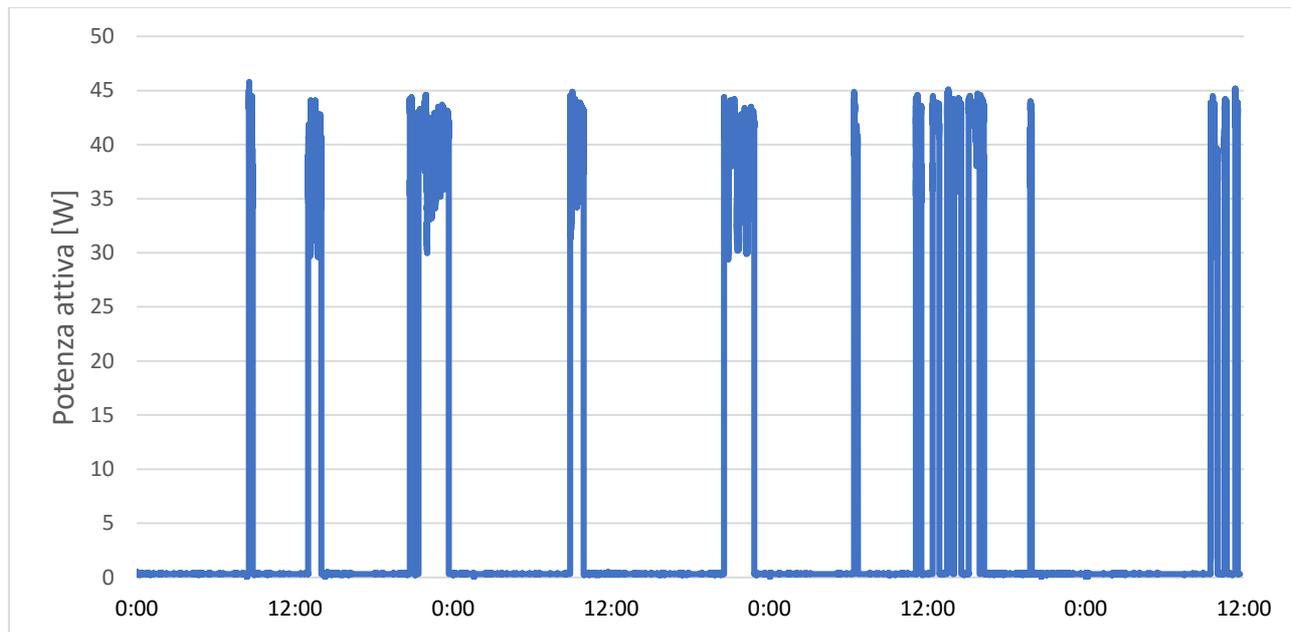


Grafico 8-11 Andamento della potenza attiva da 10/02/2018 09:37 a 14/02/2018 11:44

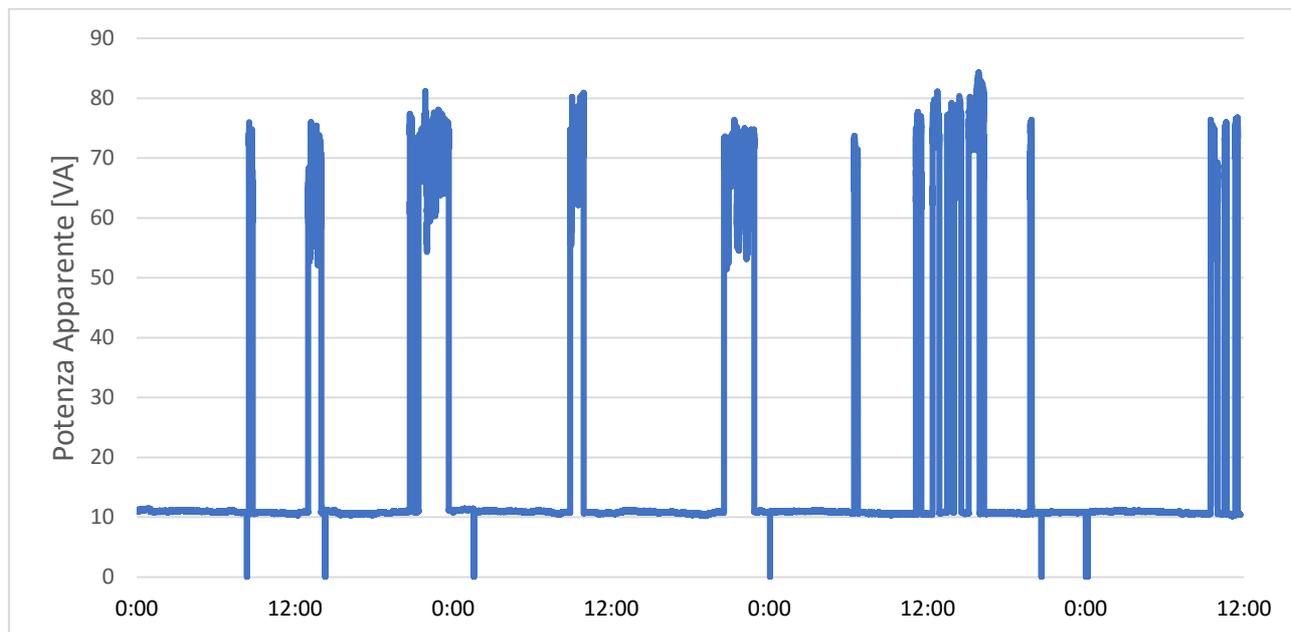


Grafico 8-12 Andamento della potenza apparente da 10/02/2018 09:37 a 14/02/2018 11:44

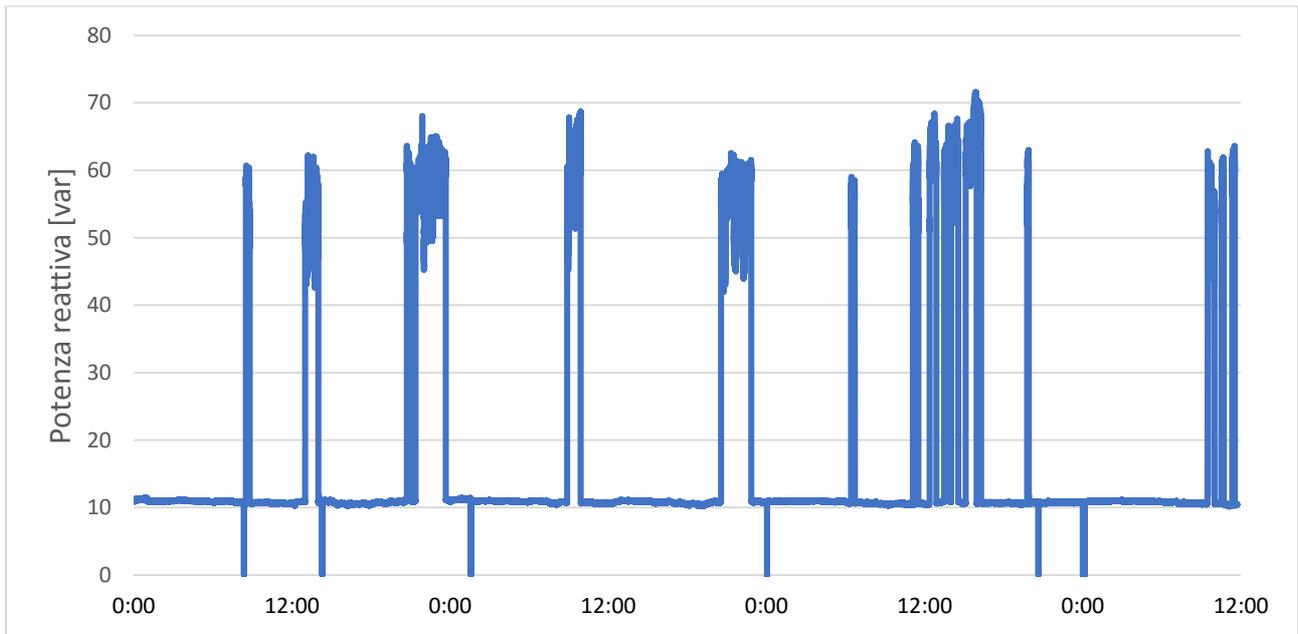


Grafico 8-13 Andamento della potenza reattiva da 10/02/2018 09:37 a 14/02/2018 11:44

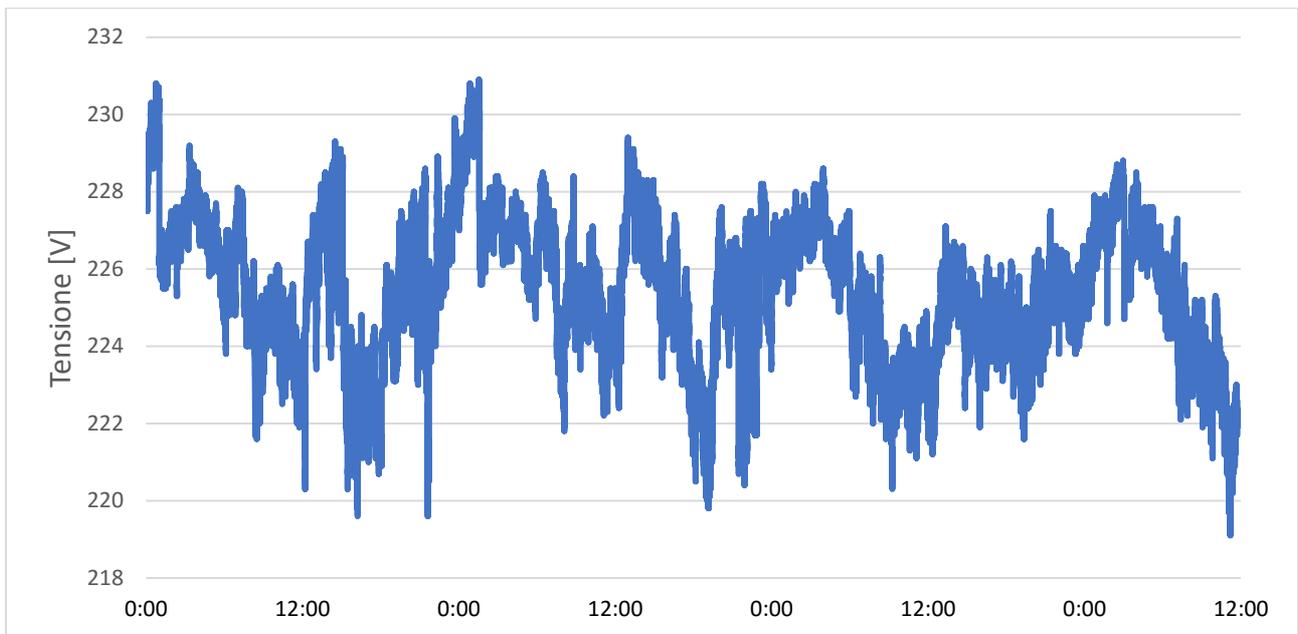


Grafico 8-14 Andamento della tensione da 10/02/2018 09:37 a 14/02/2018 11:44

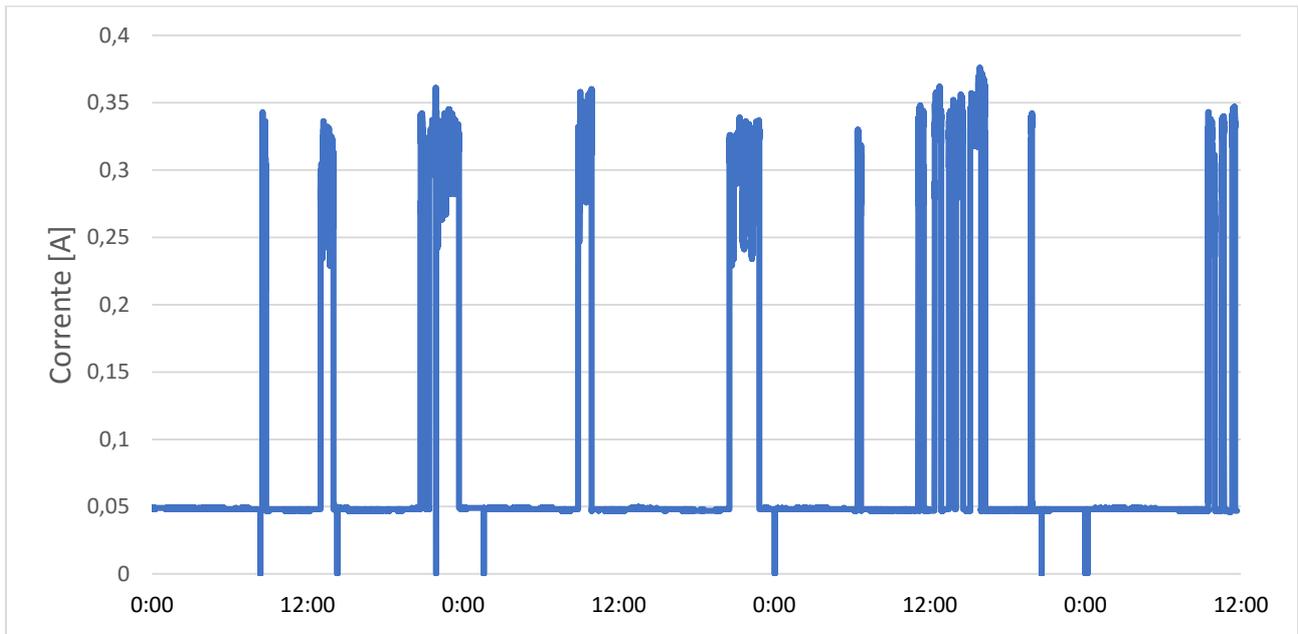


Grafico 8-15 Andamento della corrente da 10/02/2018 09:37 a 14/02/2018 11:44

9 Bibliografia

DOCUMENTI

1. L. Ferraris, F. Spertino, “Sinossi di Misure Elettriche” – Politecnico di Torino, A.A. 2001 – 2002.
2. A. Abete, “Misure Elettiche ed Elettroniche”, CELID, 1996.
3. A. Carullo, U. Pisani, A. Vallan, “Fondamenti di misure e strumentazione elettronica”, CLUT, 2006.
4. M. Chiampi, L. Zilberti, O. Bottauscio, D. Giordano, A. Manzin, P.E. Roccato, “Elettrotecnica dai campi ai circuiti”, Politeko, 2012.
5. Italo Esposito – Tesi di Laurea Triennale – “Piattaforma Open Source per Smart Metering”, 2015.
6. Davide Ottone – Tesi di Laurea triennale – “Monitoraggio remoto del consumo”, 2017.
7. F. Ferraris, Dispense di “Misure elettriche” – Politecnico di Torino, A.A. 2013 – 2014.

SOFTWARE

8. Eagle – Programma per il disegno di circuiti elettronici
www.eagle.it
9. Arduino Open Source Software (IDE)
www.arduino.cc

SITI WEB

10. Microcontrollore - Arduino UNO
www.distrelec.it
11. Wikipedia – Domotica
<https://it.wikipedia.org/wiki/Domotica>
12. Teoria AC Power e interfacciamento dei sensori con Arduino
www.openenergymonitor.org
13. Libreria IDE Arduino
www.github.com/openenergymonitor/EmonLib
14. Wattmetro CLM1000 – Professional per calibrazione
www.buerklin.com

15. Sensore di Corrente - Tecnologia ad Effetto Hall
www.emcelettronica.com
16. Connettività Wi-Fi μ Panel
www.miupanel.com
17. Modulo Wi-Fi ESP 8266
www.sparkfun.com/products/13678
18. Sensore di Corrente – ACS 712
www.sparkfun.com/products/8882
19. Sensore di Tensione AC monofase – ZMPT101B
www.plexishop.it
20. Elettrodomestici utilizzati nelle prove sperimentali
www.beko.it, www.lg.com, www.store.hp.com
21. Wikipedia – Incertezza relativa
https://it.wikipedia.org/wiki/Incertezza_di_misura
22. Zanichelli – Incertezza sul prodotto
<http://ebook.scuola.zanichelli.it/amaldiraettorie/>