



Dottorato in Energy - Electrical Engineering

Dipartimento di Ingegneria

Settore Scientifico Disciplinare - ING-INF/07

**Studio e sviluppo di algoritmi innovativi per l'identificazione dell'ARC
FAULT adatti per l'implementazione su dispositivi innovativi di
misura per impianti elettrici domestici ed industriali.**

IL DOTTORE

Ing. Aurelio Zinno

IL COORDINATORE

Prof.ssa Eleonora Riva Sanseverino

TUTOR ACCADEMICO

Ch.mo Prof. Antonio Cataliotti

COTUTOR

Ing. Antonio Di Stefano Ph.D.

CICLO XXXVIII.

2025

INDICE

ABSTRACT 6

PREMESSA 7

INTRODUZIONE 8

1. ARC FAULT 14

1.1 Definizioni 14

1.2 Guasti ed incendi negli impianti elettrici 14

1.3 Fenomenologia Arc fault 16

1.3.1 Arc fault di tipo parallelo 18

1.3.2 Arc fault tipo serie 20

1.3.3 Arc fault in AC ed in DC 25

1.3.4 Arc Fault Detection Device 28

2. METODOLOGIE DI IDENTIFICAZIONE
DELL'ARCO ELETTRICO ED ASPETTI NORMATIVI 32

2.1 Metodi di rilevamento 32

2.1.1 Algoritmi basati su analisi spettrale 32

2.1.2 Algoritmi basati sull'analisi della corrente 34

2.1.3 Algoritmi basati su AI 37

2.1.4 Altri metodi 39

2.2 Quadro normativo nazionale ed internazionale 40

2.2.1 CEI 62606 Internazionale 43

2.2.2 Norma americana UL1699 51

2.3 Problematiche aperte 51

3.	AFFD REAL TIME CON ALGORITMO DI ANALISI ARMONICA A BASSA FREQUENZA	56
3.1	Algoritmo basato su analisi armonica a bassa frequenza.....	57
3.1.1	Analisi CZT	63
3.1.2	Confronto CZT ed FFT	64
3.2	Requisiti Hardware ed MCU scelto	69
3.3	Software e Stesura Del Codice	72
3.4	Strumenti e Banco di prova 1	77
3.4.1	Generatore di forma d'onda: AFG31152 Tektronix.....	78
3.4.2	Oscilloscopio: MSO54 Tektronix.....	78
3.4.3	DAQ National Instrument NI6080	80
3.4.4	Banco di prova iniziale	80
3.5	Risultati sperimentali primi test	82
3.5.1	Caso resistivo.....	83
3.5.2	Caso carico mascherante, trapano	86
3.6	Caratterizzazione prototipo	88
3.6.1	Caratterizzazione ADC.....	88
3.6.2	Test offline implementazione strategia sul secondo prototipo	89
3.6.3	Test real time	91
3.7	Conclusioni primo algoritmo.....	97
4.	AFFD CON ALGORITMO DI ANALISI NEL DOMINIO DEL TEMPO.....	99
4.1	Perché passare al dominio del tempo	99
4.2	Set Up di acquisizione	100

4.2.1	Presentazione carichi di test	104
4.3	Presentazione metriche.....	115
4.3.1	Autocorrelazione	116
4.3.2	Rectfied sum.....	124
4.3.3	Zero period	127
4.3.4	Mean Absolute Value	129
4.3.5	RMS.....	132
4.3.6	RMS Parameter	135
4.3.7	Entropia	138
4.3.8	Distanza massimo minimo	141
4.3.9	Analisi metriche con filtraggio MACD.....	145
4.3.10	Spettrogramma e Frequency Sum	149
4.4	Analisi success rate singole metriche.....	151
4.5	Sintesi metriche	166
4.6	Combinazione metriche.....	169
4.7	STRATEGIA: Arc Unmasking & eXtinction.....	179
5.	INTEGRAZIONE ALGORITMO SU DISPOSITIVO PRYSMIAN	191
5.1	Hardware dispositivo & specifiche tecniche.....	193
5.2	Analisi metriche con frequenza di campionamento ridotta e nuovo sistema di acquisizione.....	197
5.3	Adattamento metriche per omhero	202
5.4	Algoritmo.....	207
5.5	Strategia su Ohmero	212

5.5.1	Test finali multicarico.....	217
6.	CONCLUSIONI	226
7.	RINGRAZIAMENTI.....	228
8.	BIBLIOGRAPHY	229
	APPENDICE A.....	238
A.1	Spettrogrammi	238
A.2	CARICO MASCHERANTE CAPACITIVO: LAMPADE FLUORESCENTI	239
A.3	CARICO RESISTIVO 2	242

ABSTRACT

Negli ultimi anni la sicurezza elettrica ha assunto un ruolo sempre più centrale, con particolare attenzione alla prevenzione dei guasti che possono generare incendi. Tra questi, il guasto ad arco (arc fault) rappresenta una delle principali cause di rischio negli impianti elettrici, richiedendo soluzioni tecnologiche avanzate per una rilevazione efficace.

Questa tesi di dottorato si concentra sullo sviluppo di strategie innovative per l'identificazione degli arc fault negli impianti domestici monofase a 50 Hz, con l'obiettivo di realizzare algoritmi affidabili e computazionalmente leggeri, implementabili su dispositivi industriali con risorse limitate. Il percorso di ricerca si è articolato in più fasi: dall'implementazione real-time di una strategia basata sull'analisi armonica a bassa frequenza, alla definizione di nuove metriche nel dominio del tempo, fino alla realizzazione di un prototipo sperimentale validato su rete reale.

I risultati hanno portato all'individuazione e alla caratterizzazione di undici metriche, successivamente, tra cui una oggetto di brevetto congiunto, capaci in simulazione di garantire un tasso di successo nella rilevazione superiore al 99% con un carico computazionale minimo. L'integrazione di una ulteriore strategia di monitoraggio derivata dalla precedente è stata inserita direttamente sull'Omhero ha dimostrato la fattibilità tecnica e l'efficacia del sistema, raggiungendo un livello di maturità tecnologica (TRL) elevato e aprendo la strada alla commercializzazione di dispositivi AFDD compatti e affidabili da parte di Prysmian.

Il contributo di questa ricerca risiede quindi nella definizione e validazione di una metodologia per la rilevazione degli arc fault che coniuga solidità scientifica, applicabilità industriale e prospettive di estensione verso settori emergenti, come gli impianti fotovoltaici e le reti elettriche avanzate.

PREMESSA

Il presente lavoro di ricerca è stato svolto nell'ambito di un dottorato industriale finanziato dall'Università degli Studi di Palermo mediante fondi PNRR e dalla società EOSS S.r.l. (Prysmian Group).

Il percorso si è sviluppato secondo le modalità previste dal bando di dottorato, comprendendo un periodo di oltre sei mesi presso la sede aziendale di Palermo e un soggiorno di ricerca di sei mesi presso l'headquarter di Prysmian in Spagna.

Desidero esprimere la mia sincera gratitudine a entrambi gli enti per il supporto e le opportunità offerte durante questo percorso di dottorato.

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, la sicurezza elettrica ha assunto un ruolo di primaria importanza nella progettazione e nella gestione degli impianti elettrici, con un'attenzione crescente alla prevenzione dei guasti che possono generare incendi o compromettere l'affidabilità dei sistemi. Tra i fenomeni più critici in questo contesto si colloca il *guasto ad arco* (*arc fault*), una problematica nota da tempo ma che continua a rappresentare una delle principali cause di rischio di incendio negli impianti elettrici.

L'arc fault è un fenomeno anomalo che si verifica in un impianto elettrico quando, a seguito di un difetto di isolamento, di una discontinuità conduttiva o di una connessione degradata, si instaura una scarica elettrica sotto forma di plasma non intenzionale. Questo fenomeno può manifestarsi in diversi contesti, dai circuiti interni degli elettrodomestici ai cablaggi occultati all'interno delle strutture murarie, o più in generale, in qualunque apparato nel quale sia presente un flusso di corrente elettrica.

Il guasto ad arco può presentarsi in due forme principali: arco di tipo serie, che coinvolge un singolo conduttore, e arco di tipo parallelo, che si verifica tra due o più conduttori adiacenti. Nel caso dell'arco serie le correnti in gioco sono generalmente più basse rispetto all'arco parallelo, ma non per questo meno pericolose: le elevate temperature generate possono comunque portare il conduttore a migliaia di gradi, con la possibilità di innescare incendi nei materiali circostanti.

Secondo quanto riportato nella norma UL 1699[1] un arco elettrico è: "una scarica luminosa di elettricità attraverso un mezzo isolante, solitamente accompagnata dalla volatilizzazione parziale degli elettrodi". La stessa norma definisce l'*arc fault* come "una condizione di arco involontario in un circuito". È quindi necessario distinguere questa tipologia di arco da quelli generati deliberatamente da determinati carichi, nei quali il fenomeno è previsto e controllato. Tali carichi, detti carichi mascheranti, includono dispositivi comuni che, per caratteristiche costruttive e di funzionamento, generano archi elettrici innocui o introducono disturbi nella forma d'onda di corrente. Tra questi si annoverano: motori elettrici a spazzole (aspirapolveri, asciugacapelli, trapani), lampade a scarica, dispositivi con dimmer elettronici e interruttori elettromeccanici come relè e contattori. [11].

Nel caso dei motori a spazzole, inoltre, l'invecchiamento delle componenti può peggiorare il fenomeno, aumentando la probabilità di archi disturbanti più intensi.

Oltre ai dispositivi, anche i cavi rappresentano una delle principali sorgenti di incendio da arc fault. L'isolamento può deteriorarsi nel tempo per cause diverse innescando condizioni favorevoli alla formazione dell'arco.

La condizione di arco può essere causata da molteplici fattori [27] come ad esempio:

- Conduttori danneggiati o usurati
- Danneggiamento dell'isolante (dovuto a: animali, chiodi, fenomeni, atmosferici, invecchiamento, ecc....)
- Collegamenti elettrici poco sicuri e Connessioni elettriche instabili
- Viti di serraggio allentate
- Errori di installazione
- Degrado di dispositivi elettromeccanici
- Vibrazioni o movimenti meccanici

La necessità di prevenire incendi e ridurre le vittime che ne possono seguire[26] ha spinto verso lo sviluppo di dispositivi atti al miglioramento della sicurezza elettrica nelle abitazioni: gli AFDD (Arc Fault Detection Devices). Prima della loro introduzione, infatti, i dispositivi di protezione tradizionali (fusibili, interruttori magnetotermici, differenziali) non erano efficaci nella rilevazione degli arc fault: i fusibili non intervengono in caso di archi a bassa intensità, i magnetotermici richiedono tempi di persistenza troppo lunghi, mentre gli interruttori differenziali sono sensibili solo alle dispersioni verso terra e non agli archi di tipo serie.

Realizzare un AFDD efficace non è tuttavia banale. Un sistema di rilevazione deve infatti saper distinguere correttamente un arco pericoloso da un fenomeno innocuo: un falso positivo potrebbe causare l'interruzione non necessaria della corrente, mentre un falso negativo potrebbe portare a un incendio.

Questa tesi si concentra sulla progettazione di una strategia per AFDD destinati agli impianti domestici monofase a 50 Hz, ambito in cui la prevenzione degli arc fault assume particolare rilevanza. Va sottolineato che le applicazioni degli AFDD non si limitano al settore residenziale:

- Impianti AC civili e commerciali (abitazioni, aziende, negozi, grattacieli). [18][20][22][23][24]
- Aeromobili [17].
- Nel settore automotive, in transizione verso l'elettrificazione dei veicoli[19].
- Impianti industriali: In particolare in settori ad alto consumo energetico come manifatturiero, chimico, minerario e petrolchimico dove la presenza di apparecchiature complesse rende il rischio di arc fault elevato.
- Impianti agricoli (soprattutto con presenza di animali o materiali combustibili): L'ambiente spesso polveroso e la presenza di materiali facilmente infiammabili aumentano il rischio di incendi da arc fault
- Centrali elettriche e sottostazioni: La presenza di elevate correnti e tensioni negli impianti di produzione e distribuzione dell'energia comporta un rischio importante di guasti da arco elettrico, con possibili danni a infrastrutture critiche e interruzione dei servizi pubblici. [21][25].

L'attività di ricerca presentata in questa tesi di dottorato si inserisce nell'ambito dello sviluppo di soluzioni innovative per la rilevazione dei guasti ad arco pericolosi all'interno degli impianti elettrici domestici. L'obiettivo principale è progettare un sistema in grado di identificare in modo affidabile e tempestivo gli archi elettrici serie e parallelo non intenzionali, riducendo il rischio di incendi e migliorando la sicurezza degli utenti.

La trattazione è articolata in cinque capitoli, ciascuno dedicato a una fase specifica del percorso di ricerca, con l'obiettivo principale di definire una strategia per il riconoscimento dell'arco elettrico implementabile sull'Omhero, dispositivo Prysmian caratterizzato da un hardware con risorse molto limitate.

Il **Capitolo 1** introduce il fenomeno dell'*arc fault* analizzandone le caratteristiche, le diverse tipologie e la relativa fenomenologia, oltre a descrivere il funzionamento e il ruolo degli AFDD (Arc Fault Detection Devices).

Nel **Capitolo 2** viene presentato lo stato dell'arte delle metodologie di identificazione del guasto ad arco e il quadro normativo di riferimento, con particolare attenzione alle norme **UL1699** e **CEI 62606**.

Il **Capitolo 3** illustra l'implementazione su microcontrollore, in tempo reale, di una prima strategia di rilevazione basata sull'analisi armonica a bassa frequenza. Questa fase è stata utile per affrontare le problematiche legate all'implementazione real-time di una strategia brevettata dal gruppo di ricerca. Il lavoro è iniziato dalla selezione dell'hardware minimo necessario per l'esecuzione, per poi affrontare le sfide relative allo studio dell'ambiente di sviluppo e alla programmazione.

Nel **Capitolo 4** sposta l'analisi dal dominio della frequenza a quello del tempo, introducendo una nuova strategia per il riconoscimento degli archi pericolosi. Tale scelta nasce dall'esigenza di sviluppare un algoritmo più leggero e computazionalmente efficiente, capace di operare anche su dispositivi con risorse ridotte senza compromettere l'accuratezza nella rilevazione del guasto. Sono stati quindi condotti diversi passaggi: individuazione e analisi delle singole metriche a 10 kHz, caratterizzazione dell'uso combinato delle metriche su casi di studio noti e formulazione di una strategia basata su 11 parametri. Questa soluzione, pur risultando efficace, si è rivelata non ancora direttamente implementabile sul dispositivo Prycam di Prysmian, ma ha rappresentato un riferimento fondamentale grazie al quale sono state elaborate e caratterizzate le metriche che poi sono state realmente implementate sull'omhero. Questa fase di ricerca ha portato alla pubblicazione di un brevetto congiunto con l'azienda[68] inerente ad una delle metriche più efficaci individuate.

Capitolo 5 presenta la realizzazione di un prototipo funzionante basato sulla strategia sviluppata nel dominio del tempo e corredato da una fase di validazione sperimentale. Su questo prototipo è stata implementata una versione "alleggerita" della strategia, adattata per poter funzionare correttamente sull'hardware Prysmian e coesistere con le altre funzioni già integrate nel dispositivo.

In questo modo la tesi delinea un percorso completo: dall'analisi teorica e normativa, alla duplice sfida rappresentata da un lato dall'implementazione in tempo reale di una strategia computazionalmente onerosa, e dall'altro dall'attività di ricerca volta a individuare metriche efficaci ma leggere per realizzare una seconda strategia. Il lavoro parte dalla prima implementazione su microcontrollore, fino alla definizione e validazione sperimentale di una strategia innovativa, capace di adattarsi ai vincoli reali di un dispositivo industriale.

1. ARC FAULT

1.1 Definizioni

Arco: scarica luminosa di elettricità attraverso un mezzo isolante, normalmente accompagnata da una parziale volatilizzazione degli elettrodi

Guasto d'arco: arco pericoloso, involontario, in parallelo o in serie tra i conduttori.

AFDD: dispositivo previsto per limitare gli effetti dei guasti d'arco scollegando il circuito, quando viene rilevato un guasto d'arco

Unità AFD: parte dell'AFDD che assicura la funzione di rilevazione e di riconoscimento dei guasti d'arco pericolosi verso terra, in parallelo o in serie, e che avvia l'intervento del dispositivo che provoca l'interruzione della corrente

AFCI: Arc Fault Circuit Interrupter

SAF: Series Arc Fault.

1.2 Guasti ed incendi negli impianti elettrici

Molti studi mettono in luce come gli incendi di origine elettrica costituiscono una quota significativa del totale[26]. Come riporta ABB[28]: “Ogni anno in tutta Europa si registrano più di due milioni di incendi, un terzo circa dei quali è imputabile ad anomalie dell'impianto elettrico. Una parte di essi è causato dalla formazione di arco elettrico, in serie o in parallelo ai carichi, dovuta a un guasto.” Analogamente negli stati uniti, come riporta “the United States Fire Administration” (USFA) [12], oltre 67.800 incendi sono stati causati da problemi elettrici nel 2006, tra il 2011 ed il 2015 gli incendi elettrici hanno contribuito al 28,3% dei 375.840 incendi di edifici ed infine nel 2021 si sono verificati 24200 incendi di natura elettriche in edifici residenziali americani con 295 morti e 900 feriti stimati[29].

In Korea, invece, il National Fire Data System stima dal 2010 al 2016 più di 4000 incendi di cui oltre il 37% dovuti a cause elettriche[13]. I dati della National Fire Agency coreana indicano un aumento costante degli incendi elettrici negli edifici, soprattutto da guasto d'arco, nonostante l'utilizzo di interruttori differenziali e magnetotermici i quali appunto sono inefficaci[35].

In Cina gli incendi di natura elettrica rappresentano la principale causa di incendio in contesti urbani e industriali, con circa il 30 di tutti gli incendi totali attribuibili all'elettricità e fino al 75% degli incendi elettrici nelle abitazioni cinesi sono causati da arc fault, spesso dovuti a installazione o manutenzione carente, apparecchiature obsolete, sovraccarico e connessioni difettose.[31][32].

Un caso esemplificativo: nell'incendio di un edificio pubblico a Jilin nel 2021, il motivo diretto dell'innesco è stato un arc fault in un impianto elettrico, aggravato da problemi di installazione e supervisione[33].

In Germania si stima un raddoppiamento del valore di mercato per i dispositivi AFCI entro il 2033 a causa della crescente necessità di questi dispositivi di protezione.[34]

Infine, in Italia i dati non sono particolarmente omogenei ma il N.I.A. (Nucleo Investigativo Antincendi) come riportato nel sito dei vigili del fuoco mostra come nel 2017 produce il documento “gli incendi di natura elettrica”[30]. In questo documento si vengono messe insieme le conoscenze e le statistiche individuate da vari enti al fine di tracciare un quadro completo inerente agli incendi elettrici. Uno studio affrontato a Torino ha analizzato, alla fine degli anni 90, 1019 incendi di cui 274 sono stati identificati come sicuramente di natura elettrica e su permesso della procura di Torino in 76 di questi casi sono state identificate le cause di incendio con precisione, identificando il dispositivo da cui l'incendio ha avuto origine, in basso riporto la tabella con i risultati. Viene infine sottolineato come la maggioranza degli incendi elettrici avvenga in edifici residenziali più che industriali.

In conclusione, gli incendi elettrici nei vari paesi del mondo sono in generale aumento e si riconosce che una sostanziale parte di essi è dovuto alla mancata prevenzione dell'arc fault la cui richiesta nel mercato è sempre crescente. In questa tesi si tiene a sottolineare quanto sia importante una giusta prevenzione di questo fenomeno per salvaguardare adeguatamente le abitazioni ed in particolare, le vite umane.

Tabella 1.B - Percentuale di incendi provocati da componenti elettrici (Italia: 76 incendi di origine elettrica).

Componenti elettrici	Numero incendi elettrici	Percentuale (%)
Televisori	16	21
Condutture elettriche	14	18
Quadri elettrici	6	8
Apparecchi d'illuminazione	5	6,5
Lavastoviglie/lavabiancheria	4	5,4
Prese a spina	4	5,4
Contatori elettrici	4	5,4
Frigoriferi/congelatori	4	5,4
Caricabatterie	2	2,6
Interruttori	2	2,6
Aspiratori	2	2,6
Condizionatori	1	1,3
Coperte riscaldanti	1	1,3
Forni elettrici	1	1,3
Insegne luminose	1	1,3
Relè passo-passo	1	1,3
Stufe elettriche	1	1,3
Zanzariere	1	1,3
Altro	6	8
Totale	76	100

Tratta da Gli incendi elettrici – Supplemento al N.1 di TuttoNormel – Gennaio 2005

Figura 1 Tabella dispositivi causanti incendio

1.3 Fenomenologia Arc fault

Come detto in precedenza il nome “arc fault” indica un fenomeno complesso, ovvero, la generazione involontaria di un arco elettrico attraverso un gas, spesso aria, che può manifestarsi in diversi modi e condizioni. La formazione di un canale conduttivo porta ad una vera e propria scarica elettrica che può coinvolgere un singolo conduttore (guasto di tipo serie) oppure due conduttori vicini (guasto di tipo parallelo). Le cause che possono portare all’arco sono molteplici: allentamento/ossidazione di una connessione meccanica (micro-scatti e scintille), danneggiamento o invecchiamento dell’isolamento (crepa, abrasione, umidità, sporco che abbassa la rigidità dielettrica), stress meccanico o vibrazioni che separano temporaneamente i contatti, sovratensioni transitorie ecc.... ed in base alla causa cambierà anche il modo di presentarsi dell’arco come vedremo in seguito. Il carico, la tipologia di arco, la potenza nel circuito, il punto in cui l’arco di verifica, sono una parte delle innumerevoli variabili che rendono complessa la creazione

di un dispositivo capace di identificare in qualsiasi condizione un arco elettrico. La formazione di questo plasma porta ad un grande surriscaldamento dei conduttori coinvolti con conseguente fusione e vaporizzazione di vari elementi vicino ai conduttori come ad esempio l'isolante dei cavi. La combustione e decomposizione dell'isolante può addirittura creare un percorso conduttivo carbonioso che facilita l'innesco ed il mantenimento degli archi. Nel caso peggiore l'incendio si innesca non solo in prossimità dell'arco ma anche gli stessi cavi elettrici possono propagare l'incendio. Per questo motivo esistono cavi che hanno la capacità di fermare la propagazione grazie ad isolanti speciali, un esempio sono i cavi AFUMEX di Prysmian conformi alla CPR (Regolamento Prodotti da Costruzione)[36] che stabilisce requisiti minimi obbligatori per la reazione al fuoco dei cavi utilizzati in edifici e opere di costruzione.



Figura 2 test reazione al fuoco cavi elettrici

Vedremo nei prossimi capitoli che prima di arrivare ad un incendio ci sono molti segnali che l'arco lascia prima di diventare ingestibile: armoniche ad alta frequenza nella forma d'onda, luce, asimmetrie, variazioni di RMS, emissione luminosa, rumore acustico ecc..... e proprio per questo motivo la letteratura annovera molte pubblicazioni con approcci differenti.

Ora verranno trattate nel dettaglio le due principali tipologie di arco

1.3.1 Arc fault di tipo parallelo

Questa prima tipologia di arco che analizzeremo è a sua volta suddivisa in due sottocategorie:

- Guasti tra fase e neutro
- Guasti tra fase e terra

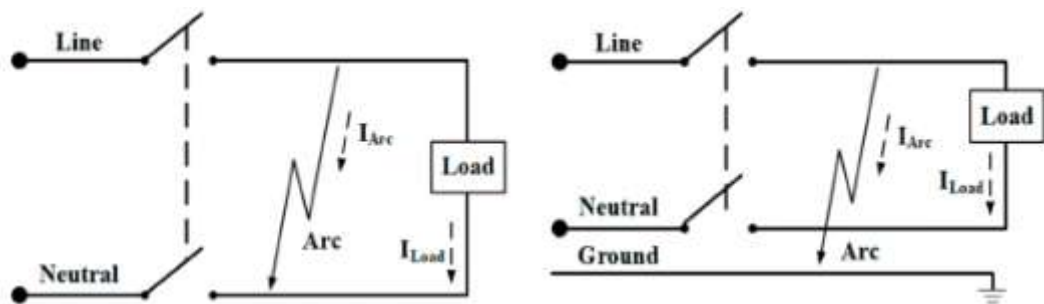


Figura 3 esempio visivo arco serie e parallelo

La figura mostra efficacemente la differenza tra le due sottocategorie, infatti, come si può intuire il guasto tra fase (line) e neutro (neutral) consiste in un vero e proprio arco elettrico che va da un conduttore ad un altro attraversando l'aria. In queste condizioni i fusibili o gli interruttori magnetotermici potrebbero intervenire in quanto, questa condizione è simile ad un cortocircuito, ma dipende esclusivamente dall'intensità e dalla durata dell'arco, in quanto tali dispositivi, per intervenire, hanno bisogno del superamento di una soglia minima che può essere elusa da archi ad alta impedenza che non provocano un grande aumento della corrente; ovviamente l'interruttore differenziale in questo caso non ha nessuna utilità.

Lo stesso si può dire del secondo caso, ovvero del guasto verso terra: anche qua sarà presente una scarica elettrica tra il conduttore di fase e, in questo caso, il conduttore di terra o un generico piano di massa, questo rende più imprevedibile il percorso dell'arco. In queste circostanze l'interruttore differenziale può intervenire in quanto si presenta una vera e propria dispersione di corrente verso terra; viceversa, fusibili ed interruttori magnetotermici non sono capaci di rilevarlo. Questo tipo di guasto normalmente è molto semplice da rilevare dal momento che la soglia di intervento dell'interruttore differenziale è generalmente molto piccola rispetto alla corrente di arco.

Ma come è possibile che in dei cavi elettrici isolati possa scoccare un arco elettrico di tipo parallelo?

La principale causa dell'arc fault parallelo, come detto in precedenza, è proprio l'isolante che viene in qualche modo danneggiato; infatti, con il passare del tempo l'invecchiamento dei cavi o la manomissione involontaria possono creare delle vere e proprie aperture nell'isolante, se ciò accade in punti paralleli (o quasi) di due conduttori diversi un arco potrebbe facilmente scoccare

Tantissime altre condizioni potrebbero favorire questo processo come, ad esempio, la presenza di materiale conduttivo tra le due fenditure, che faciliterebbe la generazione di un arco elettrico a causa dell'abbassamento dell'impedenza intrinseca dell'aria.

Scendiamo un po' più nella fisica del fenomeno: quello che accade è che grazie alla differenza di potenziale tra i due cavi danneggiati il campo elettrostatico riesce a superare il valore di rigidità dielettrica dell'aria, definita come; il valore limite di campo elettrico oltre il quale si produce una conduzione di elettricità. La stessa condizione che si genera quando scocca un fulmine in cui la differenza di potenziale si crea a causa dei moti convettivi che portano lo sfregamento all'interno della nuvola fra le particelle di acqua che salgono verso l'alto e quelle di ghiaccio e graupel trasportate verso il basso.

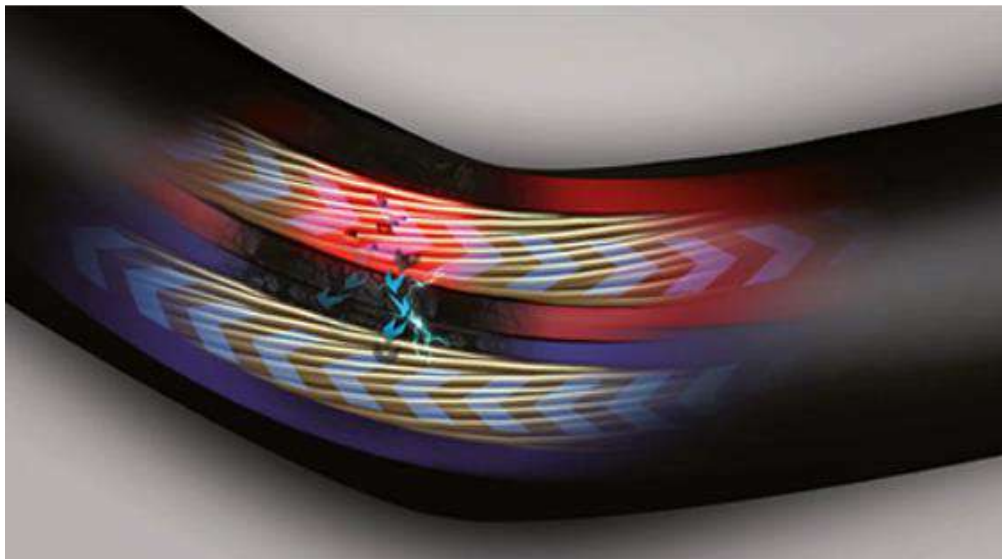


Figura 4 illustrazione arco parallelo tra cavo di fase e di neutro

Dopo la nascita dell'arco, ciò che accade a causa dell'innalzamento della temperatura dei conduttori (come si vede in fig. 4) la guaina del cavo si carbonizzerà diventando addirittura materiale conduttivo e facilitando il reiterarsi del processo.

Generalmente è una condizione più rara e soprattutto molto più semplice da identificare rispetto all'arco serie di cui parleremo in seguito.

1.3.2 Arc fault tipo serie

Come suggerisce la stessa denominazione, l'arco elettrico di tipo *serie* interessa un singolo conduttore del circuito e si colloca elettricamente in serie con il carico. Tale configurazione, rappresentata schematicamente nella figura seguente, può originarsi in corrispondenza di giunzioni, terminali di connessione o tratti di conduttore parzialmente interrotti, nei quali il contatto elettrico risulta instabile o difettoso

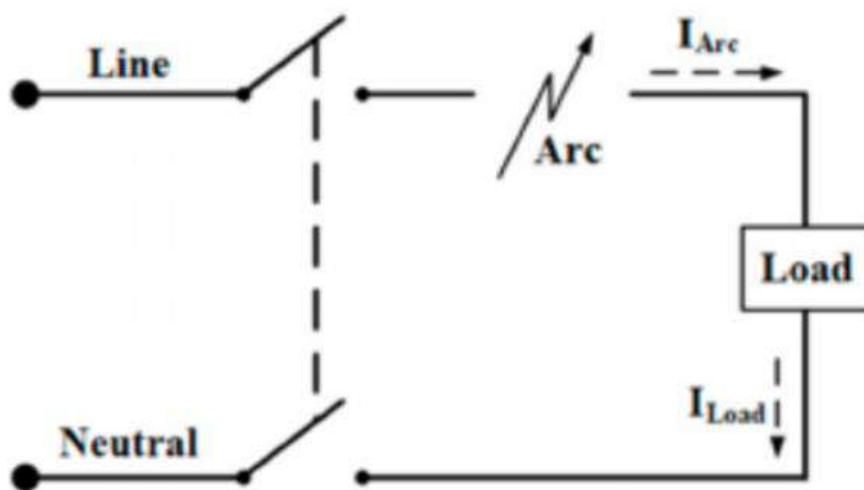


Figura 5 circuito arco serie

L'arco di tipo serie risulta particolarmente complesso da rilevare, in quanto le variazioni di corrente indotte dal fenomeno sono generalmente di entità ridotta. In questa configurazione, l'impedenza del carico si somma a quella dell'arco stesso, limitando la corrente che può circolare nel punto di guasto a valori non superiori a quelli nominali del carico. Ne consegue che l'ampiezza della corrente durante l'arco risulta spesso comparabile a quella del regime ordinario di funzionamento, rendendo difficile l'individuazione mediante le protezioni convenzionali. Va inoltre sottolineato che, tra le

diverse tipologie di guasto ad arco, quella di tipo serie è statisticamente la più frequente nei sistemi elettrici.

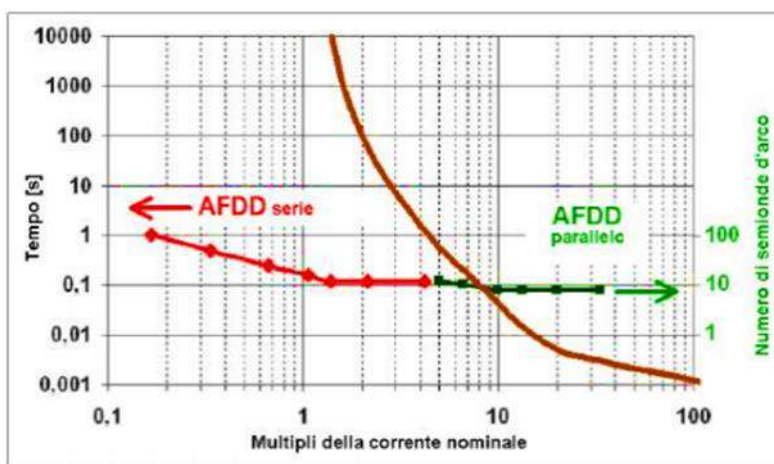


Figura 6 tempi di intervento AFDD

Come illustrato nella figura anche i dispositivi atti proprio all'identificazione dell'arc fault mostrano tempi di individuazione significativamente maggiori nel caso di un arco di tipo serie (curva rossa) rispetto a quello di tipo parallelo (curva verde) [38].

In termini quantitativi, l'identificazione di un arco parallelo richiede tipicamente un intervallo pari a circa dieci semionde di un segnale a 50 Hz, mentre per un arco di tipo serie il numero di semionde necessarie può raggiungere le cento, differendo di un intero ordine di grandezza rispetto al caso precedente.

Colmare questa differenza nei tempi di riconoscimento è una delle sfide più grandi da affrontare in quanto, più l'arco persiste nel tempo maggiore sarà il danno da lui causato.

L'arco di tipo serie non può essere rilevato da nessun dispositivo convenzionale. Come abbiamo visto in precedenza la corrente non subirà variazioni nella sua ampiezza ma solo delle distorsioni armoniche a cui nessun dispositivo commercializzato è sensibile.

Dal punto di vista fisico il principio è molto simile a quello dell'arco parallelo in quanto, si genera sempre un arco tra due "conduttori" solo che in questo caso si tratta di due punti distinti medesimo conduttore. Un guasto di questo tipo può essere dovuto a torsioni meccaniche del cavo, ad un animale domestico che potrebbe rosicchiare il filo elettrico danneggiandone l'isolante o ad altri fattori che portano all'indebolimento del conduttore.

Successivamente a questi eventi quello che può accadere è proprio che scocchi un arco tra due parti di conduttore reciso o comunque deteriorato [39].

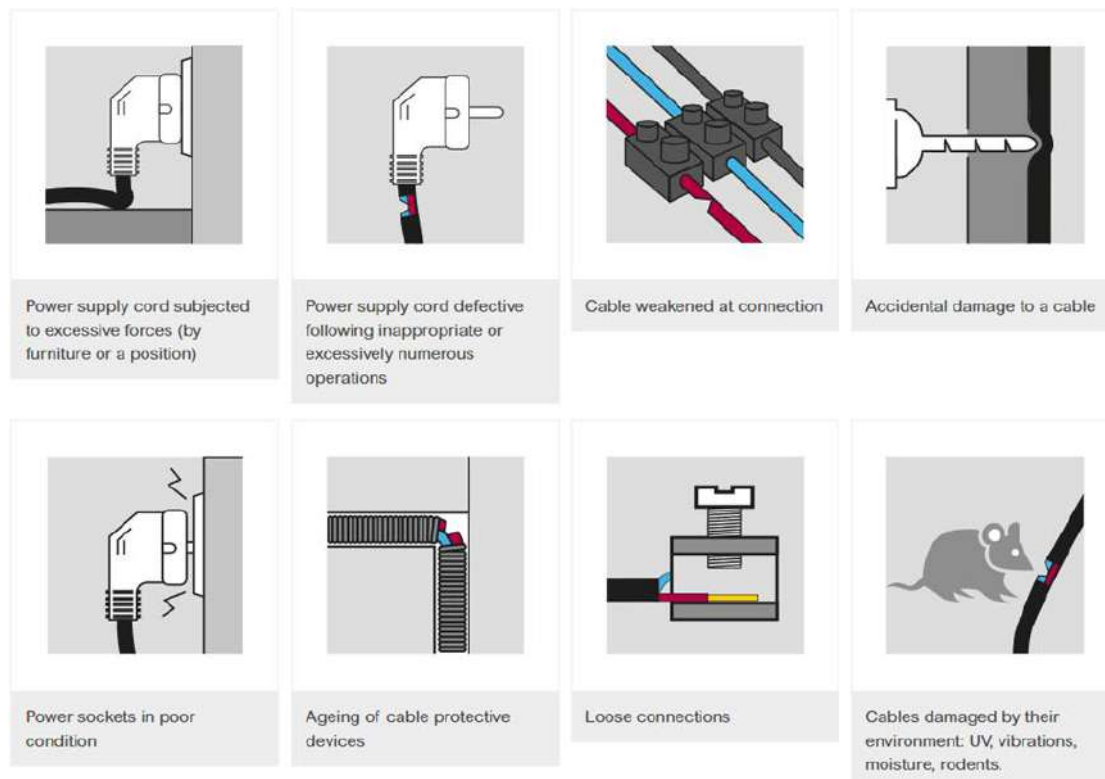


Figura 7 cause possibili generazione arc fault

Si procede ora all'analisi dettagliata della forma d'onda associata a un arco di tipo serie. In Figura 8 è riportato l'andamento temporale della corrente assorbita da un carico di natura puramente resistiva, alimentato alla tensione di rete. Il comportamento caratteristico di un guasto di questo tipo è contraddistinto dalla presenza di interruzioni intermittenti nel flusso di corrente, dalla formazione di scintille ripetute e dalla comparsa di micro-transienti ad alta frequenza sovrapposti alla componente fondamentale della corrente di carico.

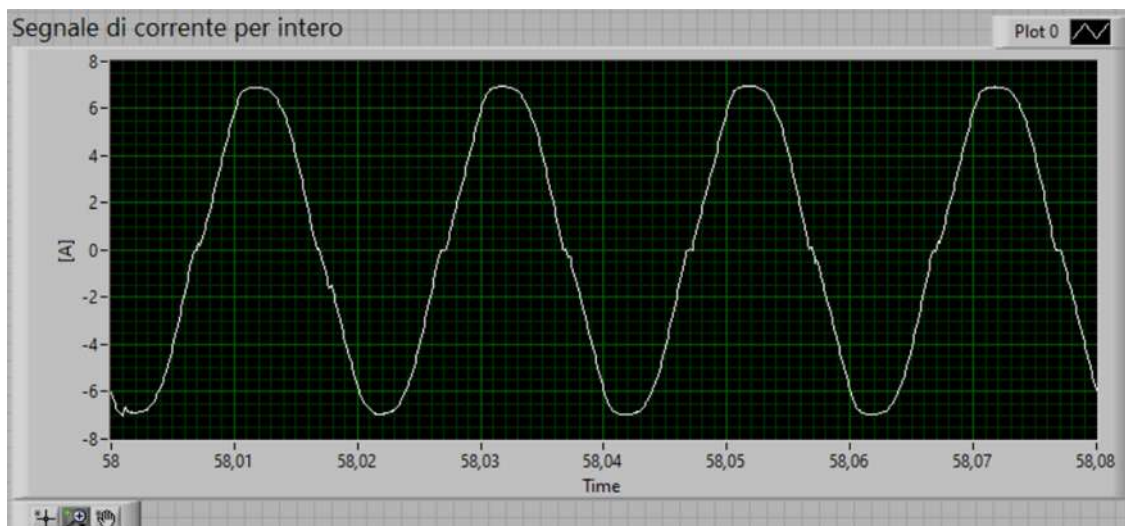


Figura 8 Esempio corrente carico resistivo durante l'arcing

In figura `riportata la tipica forma di corrente durante la manifestazione di un arco di tipo serie. Essa presenta le classiche “spalle” (in inglese letteralmente shoulders) in prossimità dell’attraversamento dello zero. Tale fenomeno non è casuale: in corrispondenza di tali istanti, la tensione applicata risulta insufficiente a sostenere la scarica, determinando l’estinzione temporanea dell’arco e originando così il comportamento intermittente caratteristico. L’arco poi si “riaccenderà” dopo che la tensione inizierà nuovamente ad aumentare in modulo; ci ritroveremo una spalla ogni semiperiodo.

Sebbene la presenza delle spalle rappresenti una peculiarità distintiva dell’arco serie, essa non costituisce la caratteristica più significativa per l’elaborazione di una strategia di rilevazione efficace. Infatti, in tali condizioni, ampiezza e fase della componente fondamentale della sinusoide di corrente restano pressoché invariate, limitando la rilevanza di questo indicatore nelle analisi automatizzate. Tuttavia, l’osservazione diretta delle spalle può risultare utile come evidenza qualitativa della presenza dell’arco.

È ben più utile sapere che l’arco di tipo serie è accompagnato da un rumore di fondo (noise floor) e dalla presenza di armoniche che si generano proprio in concomitanza al fenomeno.

Dalla figura sottostante possiamo notare subito che oltre l’armonica fondamentale (a 50 Hz) durante l’arco si manifestano chiaramente altre armoniche, in particolare vediamo i picchi della seconda della quarta e della sesta.

La presenza di queste tre armoniche sarà per noi un'informazione fondamentale al fine di discriminare la condizione di arco.

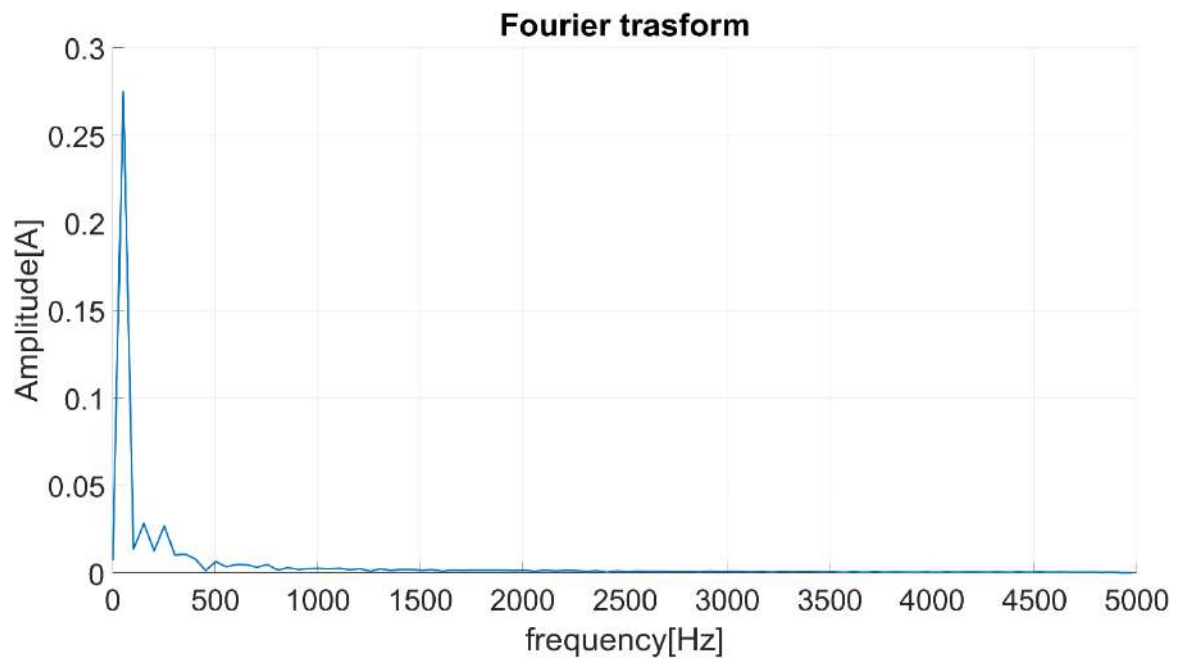


Figura 9 analisi armonica in un periodo di corrente durante l'arcing

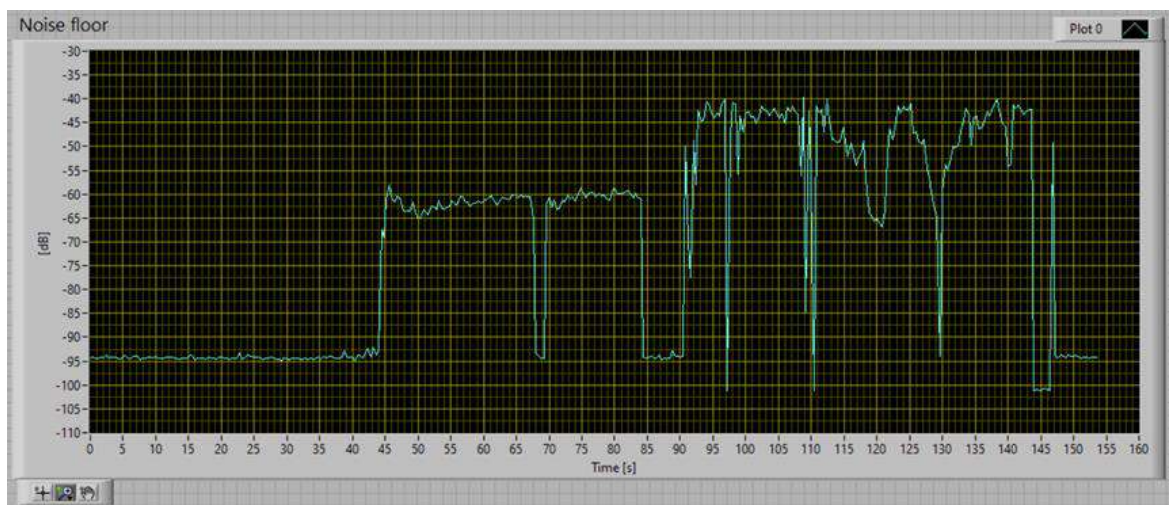


Figura 10 noise floor di una prova di 152 secondi con un carico resistivo

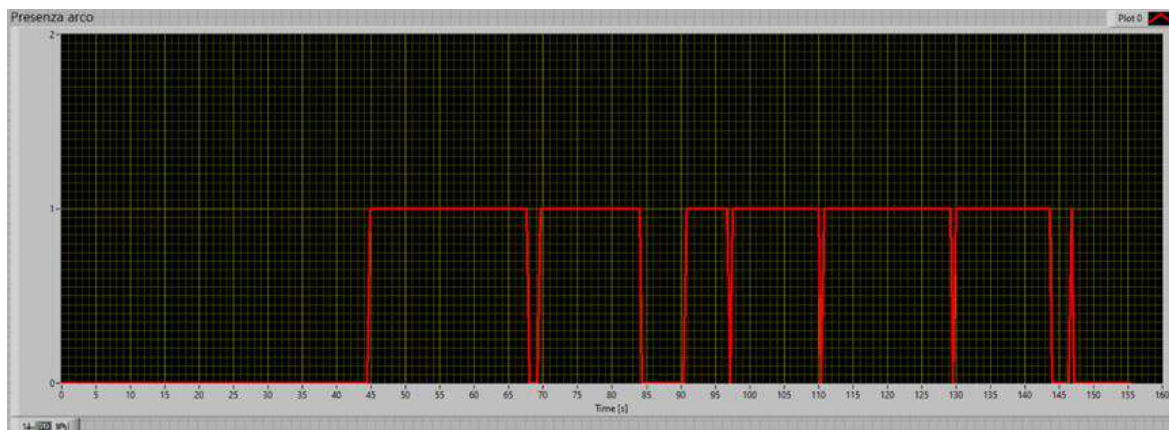


Figura 11 presenza arco nel test verificata con fotodiodo vicino allo scaricatore

In Figura 10 è riportato l'andamento del noise floor rilevato durante il fenomeno di arcing, mentre in Figura 11 è rappresentata la condizione logica associata alla presenza dell'arco, ove il valore "1" indica l'evento attivo. Dall'analisi dei dati emerge un marcato incremento del livello di rumore in corrispondenza della manifestazione dell'arco, evidenziando la stretta correlazione tra l'innalzamento della componente di fondo e l'insorgere della scarica elettrica.

I dati analizzati sono inerenti ad una simulazione di durata 155 secondi ed in particolare ad ogni campione della foto sopra corrisponde la media del noise floor ogni 4096 campioni (calcolati applicando la FFT al segnale di corrente ed eliminando le armoniche del segnale).

Queste caratteristiche rendono il guasto di tipo serie particolarmente insidioso: può persistere per tempi significativi, generando calore localizzato sufficiente a degradare l'isolamento dei conduttori e a innescare processi di carbonizzazione, senza che vi sia un intervento immediato delle protezioni.

In sintesi, mentre l'arco parallelo si configura come un evento ad alta energia e ad alto impatto immediato, l'arco serie rappresenta una minaccia più silenziosa ma non meno pericolosa, richiedendo strumenti di diagnosi e rilevazione sofisticati che vadano oltre le protezioni elettriche convenzionali.

1.3.3 Arc fault in AC ed in DC.

La strategia per l'individuazione dell'arco AC è sicuramente influenzata dalla condizione del segnale di partenza e dalle sue caratteristiche peculiari.

In seguito, vedremo come ogni carico presenterà una forma d'onda unica e spesso distorta rispetto ad una normale sinusoidale.

Come abbiamo visto precedentemente, il confronto tra il contenuto armonico del segnale di partenza ed il segnale affetto da arco ci può dare molte informazioni. tuttavia, nella pratica applicativa, il segnale di partenza non è quasi mai una sinusoidale perfetta e le armoniche già presenti possono essere sconosciute a priori, complicando l'analisi comparativa.

D'altro canto, i guasti in DC serie o parallelo che siano spesso coinvolgono sistemi in cui è richiesta la massima sicurezza: aerei, navi, automobili dove se non individuati in tempi brevissimi il surriscaldamento o il possibile incendio potrebbe allargarsi ad altre parti del mezzo stesso compromettendolo irreparabilmente.

Un settore particolarmente esposto al rischio di arco elettrico in DC è quello degli impianti fotovoltaici [37] in virtù dell'elevata estensione delle linee di cablaggio necessarie per l'interconnessione dei moduli stessi. Tali sistemi, possono essere installati sia su edifici residenziali o pubblici, con conseguente incremento del rischio di incendio per le strutture ospitanti, sia in impianti dedicati alla sola produzione di energia.

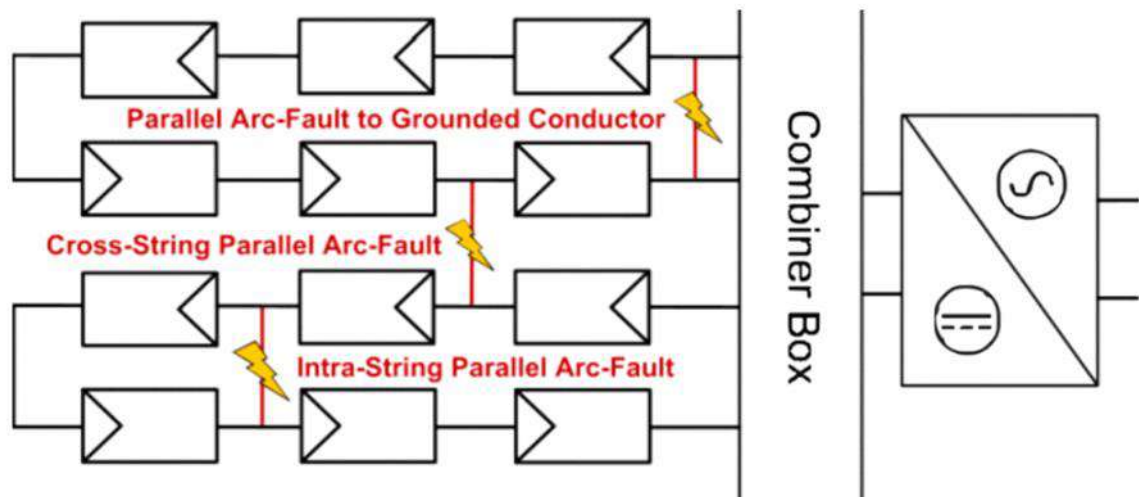


Figura 12 esempio arco elettrico in un impianto fotovoltaico

Come si può vedere in figura i pannelli fotovoltaici sono collegati tra loro in array poi i vari array sono ulteriormente collegati tra loro; l'energia di tutti verrà successivamente trasmessa in rete.

Nel momento in cui un arco elettrico dovesse compromettere il cablaggio tra due pannelli fotovoltaici allora l'intero array smetterà di funzionare essendo connessi in serie.

Infine, anche i pannelli fotovoltaici stessi rischiano di essere distrutti (come si vede nella figura 4) a causa degli enormi aumenti della temperatura.



Figura 13 danneggiamento di un pannello dovuto all'arc fault

Sebbene si possa ipotizzare che il riconoscimento di un arco in un sistema fotovoltaico sia agevolato dalla natura in continua del segnale — privo, in teoria, di armoniche —, la realtà operativa è più complessa: fenomeni quali il rumore generato dall'inverter (armonica di commutazione) o il cross-talk elettromagnetico possono interagire con il segnale d'arco, mascherandone le componenti caratteristiche e rendendo più difficile la rilevazione.

Confrontando le durate delle due tipologie di arco AC e DC possiamo sicuramente affermare che è statisticamente più bassa la durata degli archi in alternata per il fenomeno visto prima dovuto allo zero crossing. Al contrario, in DC non esiste un motivo intrinseco per cui l'arco debba interrompersi ciclicamente, il che lo rende potenzialmente più persistente e pericoloso.

In questa trattazione noi ci concentreremo sul caso AC ed è dunque doveroso specificare le caratteristiche di un arco in questa specifica condizione:

1. In ogni semiperiodo, la corrente d'arco si estingue al passaggio per lo zero (zero crossing) per poi ripartire con un certo delay, originando la tipica forma d'onda con le spalle dell'arco (fig. 9).
2. I fronti di salita della corrente dell'arco sono solitamente più ripidi rispetto alla normale corrente in assenza dello stesso.
3. L'entità della corrente d'arco risulta essere solitamente inferiore (anche se di poco) rispetto al normale
4. È presente un rumore a banda larga ad alta frequenza (broadband noise) che in qualche modo caratterizza le forme d'onda di corrente e tensione affette da arco.
5. l'arco si verifica in modo aleatorio, dunque è assolutamente imprevedibile.
6. Durante l'arcing si manifestano specificatamente le tre armoniche descritte in precedenza

1.3.4 Arc Fault Detection Device

Un AFDD (Arc Fault Detection Device) è un dispositivo di protezione elettrica progettato per rilevare e interrompere i guasti da arco elettrico, prevenendo potenziali incendi.

La storia dei dispositivi di rilevazione di arco elettrico inizia negli anni 70, in cui diverse aziende iniziarono a sperimentare metodi di rilevazione di arc fault, concentrandosi sull'identificazione di archi, ad esempio, in alta tensione e nei generatori.

Nel 1975, ad esempio, è stato pubblicato il brevetto US3911323A "ground fault protector with arcing fault indicator"[14] che introduce un dispositivo in grado di rilevare i guasti verso terra e di dare un'indicazione specifica per i guasti ad arco (parallelo). Nel 1979 con le prime ricerche sul monitoraggio di "rumore" RF nei generatori dovuti agli archi elettrici è stato pubblicato il brevetto US4156846A "Detection of arcing faults in generator windings"[15].

Negli anni 90 ed in particolare nell'anno 1993, viene pubblicato il brevetto US5224006A[16] considerabile una pietra miliare nello sviluppo dei dispositivi AFDD; questo brevetto introduceva un dispositivo capace di rilevare la firma caratteristica di un arco elettrico nei circuiti a bassa tensione ed interromperlo.

Una svolta avviene nel 1999 (in vigore dal 2002), anno in cui la NEC (national electrical code) ha iniziato a prescrivere l'uso degli AFCI (Arc Fault Circuit Interrupter) identificati come: "un dispositivo destinato a fornire protezione dagli effetti dei guasti dell'arco riconoscendo le caratteristiche uniche dell'arco e funzionando per diseccitare il circuito quando viene rilevato un guasto dell'arco". Questi dispositivi agiscono direttamente sull'impianto elettrico (disarmando l'impianto analogamente ad un salva vita) qualora si presentasse un arco. Sfortunatamente questi dispositivi hanno però la capacità di identificare efficacemente solo archi di tipo parallelo che, come vedremo, portano grosse variazioni nell'ampiezza della corrente.

Nel tempo anche in Italia arrivarono le prime norme riguardanti la sicurezza degli impianti elettrici contro il fenomeno dell'arc-fault, in particolare, nel 2014 la norma CEI EN 62606. Successivamente nel 2017 la norma CEI 64-8 V3 impone l'obbligo di impiego di dispositivi per la prevenzione di guasti ad arco nei luoghi ad alto rischio di incendio o di interesse artistico.

Così nascono gli AFDD, la soluzione adeguata al riconoscimento degli archi di tipo parallelo e serie al fine di accrescere notevolmente la sicurezza di abitazioni ed impianti industriali.

La norma EN 62606 ci chiarisce quali sono le caratteristiche che deve possedere un AFDD, innanzitutto, deve essere un dispositivo capace di rilevare correttamente archi elettrici verso terra, in parallelo ed in serie ed inoltre, capace di interrompere la corrente in situazioni di rischio. Ogni AFDD avrà inoltre, tutte le caratteristiche che si richiedono ad un dispositivo atto ad essere installato in un quadro elettrico: corrente nominale, tensione nominale, frequenza nominale, potere nominale di chiusura e di interruzione, grado di protezione ecc. In Italia tali valori sono abbastanza standardizzati, per la tensione avremo un valore compreso tra 220 V e 240 V, per la corrente da un minimo di 6 A ad un massimo di circa 63 A e come frequenza 50 Hz (vedi sezione 5 CEI 62606).

	Marcatura o elementi delle informazioni	Posizione della marcatura o delle informazioni		
		Visibile quando il prodotto è installato	Sul prodotto	Nel foglio di istruzioni
a	il nome del costruttore o il suo marchio commerciale;		X	X
b	la designazione di tipo, il numero di catalogo o quello di serie;		X	X
c	la o le tensioni nominali;	X		X
d	la frequenza nominale; gli AFDD con più frequenze nominali (ad esempio 50/60 Hz) devono essere marcati di conseguenza;		X	X
e	la corrente nominale;	X		X
f	il potere di chiusura e di interruzione nominale;		X	X
g	la posizione di impiego, se necessario;			X
h	il grado di protezione (solo se diverso da IP20);			X
i	lo schema del cablaggio;		X	X
j	i riferimenti normativi;		X	X

Figura 14 tabella estratta dalla norma CEI 62606

Tutte le caratteristiche principali di un AFDD commerciale saranno comunque sempre riportate sia sul prodotto che sul foglio di istruzioni come si può vedere nella tabella 5 della norma già menzionata.

Per concludere, gli *Arc Fault Detection Device* rappresentano una significativa evoluzione nel campo della protezione elettrica, rispondendo alla crescente necessità di prevenire incendi e danni materiali causati dai guasti ad arco, sia di tipo serie che parallelo. L'evoluzione normativa e tecnologica, a partire dagli anni '70 fino alle recenti prescrizioni CEI, ha consentito lo sviluppo di dispositivi sempre più sofisticati. Nonostante le difficoltà ancora presenti nella rilevazione degli archi di tipo serie, l'adozione diffusa degli AFDD rappresenta oggi un elemento chiave per il miglioramento della sicurezza degli impianti elettrici civili e industriali, ponendo le basi per futuri sviluppi tecnologici e per una più ampia applicazione nelle normative di settore.

2. METODOLOGIE DI IDENTIFICAZIONE DELL'ARCO ELETTRICO ED ASPETTI NORMATIVI

Il capitolo 2 fornirà una panoramica dello stato dell'arte riguardante i metodi di rilevamento dell'arco di tipo serie e illustrerà in modo approfondito il quadro normativo, con particolare attenzione alle norme UL1699 e CEI EN 62606.

L'arc fault, come detto in precedenza, è un fenomeno di natura aleatoria; pertanto, il segnale di corrente presenta caratteristiche di non stazionarietà.

È opportuno sottolineare che il fenomeno in questione è ancora oggi molto dibattuto in quanto ancora non è stata trovata una soluzione che riesca ad avere una percentuale di successo sufficientemente alta in tutte le possibili condizioni e che sia integrabile facilmente nelle abitazioni a basso costo. Tutto ciò ha portato i ricercatori ad elaborare tantissimi metodi di rilevazione differenti come vedremo di seguito.

2.1 Metodi di rilevamento

2.1.1 Algoritmi basati su analisi spettrale

La maggioranza degli articoli oggi presenti in letteratura adotta algoritmi basati sull'analisi dello spettro della corrente, sfruttando il fatto che l'arco elettrico lascia una traccia ben riconoscibile nel dominio delle frequenze. Tuttavia, la non stazionarietà del fenomeno causa normalmente l'impossibilità di utilizzare in modo immediato algoritmi di analisi armonica classici come FFT e DFT che si possono applicare esclusivamente a segnali stazionari. Inoltre, l'arco è caratterizzato dalla presenza di rumore ad alta frequenza [56] e dalla comparsa di armoniche in bande dove normalmente non dovrebbero essere presenti, elementi che costituiscono firme spettrali tipiche e potenzialmente utili ai fini del rilevamento.

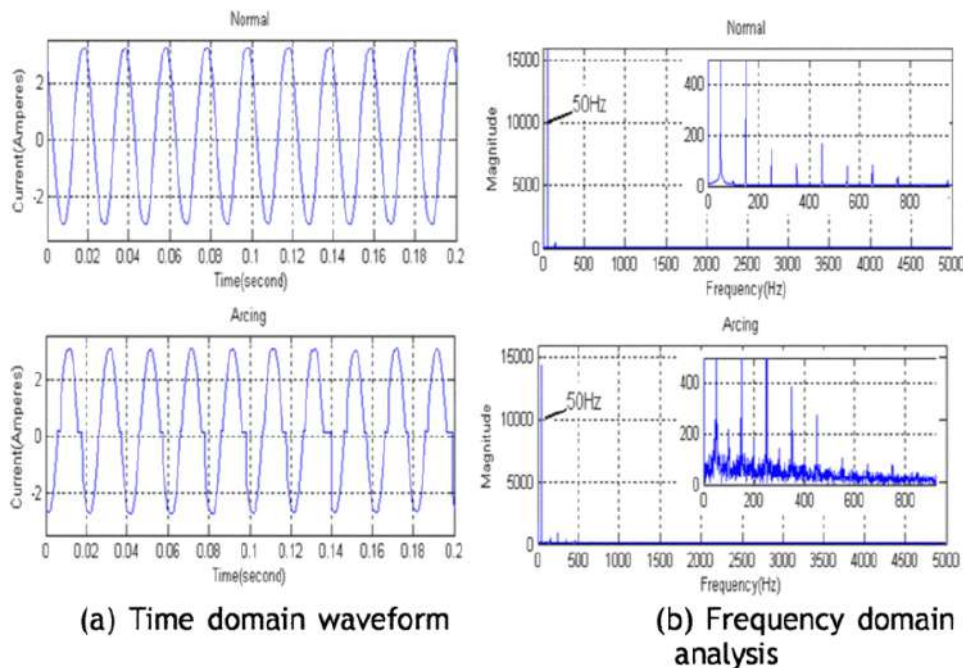


Figura 15 confronto analisi in frequenza tratto da [56]

Come primo passo, analizziamo uno dei parametri più semplici da ottenere, calcolabile anche mediante un semplice filtro analogico passa-alto [40], [56], ovvero il rumore ad alta frequenza. Possiamo affermare che, quando si presenterà un arco, in uscita dal filtro ci sarà sicuramente un picco che, se unito ad altri parametri potrebbe senz'altro essere una utile metrica di riconoscimento del fenomeno.

Uno dei principali strumenti utilizzati per eseguire l'analisi spettrale in questo contesto (sia in DC che in AC) è senza dubbio la trasformata Wavelet [41] - [45], [59]. Essa rappresenta uno strumento molto potente nel caso di segnale non stazionario in quanto, a differenza delle altre trasformate (CZT, DFT, FFT ecc....) consente di mantenere l'informazione temporale del fenomeno pur fornendo al contempo una descrizione nel dominio della frequenza. Tuttavia, prevede l'impiego di un'enorme mole di informazioni e non è possibile avere contemporaneamente un'alta risoluzione temporale e una elevata risoluzione in frequenza (le due risoluzioni sono inversamente proporzionali).

Infine, tra gli strumenti impiegati per l'analisi armonica del segnale di corrente si annoverano la trasformata di Fourier e le sue varianti tempo-frequenza, quali DFT, FFT, STFT e HT [46] - [49], [62] e [63], spesso utilizzate in combinazione con altri parametri. L'impiego di queste tecniche richiede tuttavia particolare cautela, poiché la natura non stazionaria del fenomeno può limitare l'affidabilità delle informazioni ottenute.

In sintesi, l'analisi spettrale rappresenta uno strumento chiave per lo studio e il riconoscimento dei guasti ad arco, permettendo di estrarre alcune delle caratteristiche tipiche dell'arco. Tra le diverse metodologie, la trasformata Wavelet offre il vantaggio di mantenere simultaneamente informazione temporale e frequenziale, ma richiede un'elevata capacità di calcolo e la gestione di grandi quantità di dati, rendendone complessa l'integrazione in soluzioni a basso costo pensate per applicazioni residenziali. Analogamente, le trasformate classiche (Fourier, DFT, FFT, STFT), pur essendo consolidate, presentano limitazioni dovute sia alla perdita di localizzazione temporale sia alla necessità di un'elaborazione non trascurabile, che ne riduce l'idoneità in scenari real-time e a risorse limitate. Di contro, parametri più semplici, come l'analisi del rumore ad alta frequenza tramite filtri analogici, garantiscono un approccio immediato e computazionalmente leggero, soprattutto se combinati con altre metriche. Nel complesso, l'integrazione di tecniche avanzate con metodi a basso costo rappresenta la strada più promettente per sviluppare sistemi affidabili e allo stesso tempo accessibili per la rilevazione degli arc fault in ambito domestico e/o industriale.

2.1.2 Algoritmi basati sull'analisi della corrente

Tra le principali analisi svolte direttamente sulla corrente, integrazione e derivazione sono sicuramente le più ben volute grazie alla loro semplicità di calcolo.

Partiamo dall'integrazione della corrente [40]. L'integrazione del segnale di corrente in un intervallo di tempo definito consente di calcolare la carica totale trasferita in quel periodo. In condizioni normali (senza arco), la forma d'onda della corrente è regolare e simmetrica: l'integrale della corrente su un semiperiodo o su più cicli rimane coerente con il valore atteso, strettamente legato alla potenza e al tipo di carico connesso. Quando invece si manifesterà l'arco appariranno le tipiche deformazioni ed asimmetrie (come spalle, rumore, ecc....) che porteranno un brusco cambiamento del valore dell'integrale stesso.

$$Q = \int I dt$$

Calcolando il contenuto di carica di ogni mezzo ciclo di forma d'onda e confrontando ogni risultato con i precedenti, avremo due possibilità: in assenza di arco saranno uguali ed in presenza dello stesso ci sarà una differenza nel valore finale dell'integrale che farà da indicatore della presenza di un arco. Questo parametro unito ad un'analisi del rumore ad alta frequenza darà una capacità di rilevamento affidabile.

In figura è riportato l'andamento dell'integrale della corrente di un carico puramente resistivo, campionato a 10 kHz. La curva rossa rappresenta il valore dell'integrale calcolato nel tempo, mentre la curva blu indica la presenza dell'arco elettrico, rilevato mediante un fotodiode posto in prossimità dello scaricatore.

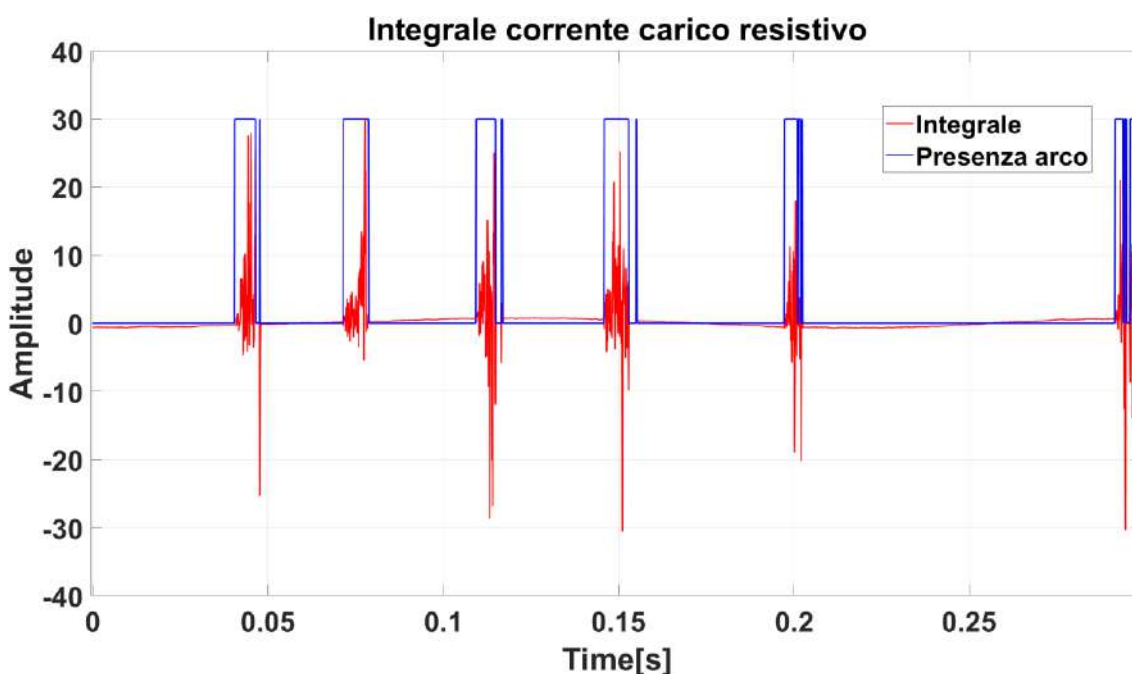


Figura 16 integrale della corrente calcolato su un carico resistivo

Anche l'utilizzo della derivata è molto comune in questo tipo di analisi. Essa può essere calcolata numericamente mediante diversi algoritmi, come le differenze finite in avanti o all'indietro, oppure ottenuta in modo diretto attraverso dispositivi analogici. Un esempio tipico è rappresentato dalla bobina di Rogowski, il cui principio di funzionamento si basa sulla legge di Ampère e sulla legge di induzione di Faraday: tale sensore fornisce infatti una tensione proporzionale alla derivata della corrente che lo attraversa. In figura vediamo un'illustrazione di una bobina di Rogowski: al centro è presente il conduttore principale, la cui corrente sarà differenziata, mentre intorno ad esso è avvolta la bobina stessa. Quando la corrente sul cavo di fase cambia a causa dell'arco, anche il campo magnetico

cambierà di conseguenza, e tutto ciò causerà una tensione indotta nella bobina; questo è il principio di funzionamento della bobina di Rogowski.

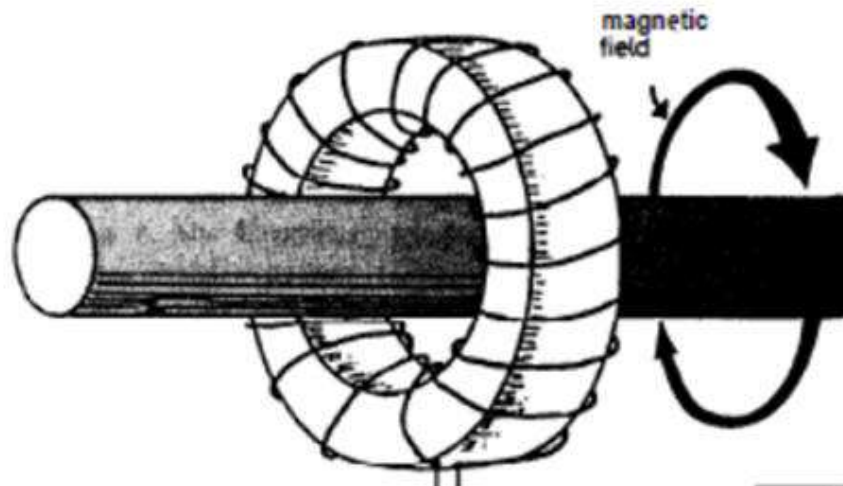


Figura 17 illustrazione bobina di Rogowski

Proprio questa bobina viene utilizzata [50] per misurare la velocità di variazione della corrente al posto del calcolo numerico raggiungendo lo stesso risultato.

La derivata della corrente in qualche modo, possiamo dire che “amplifica i sintomi dell’arco” e nelle due figure sottostanti possiamo capire in che modo.

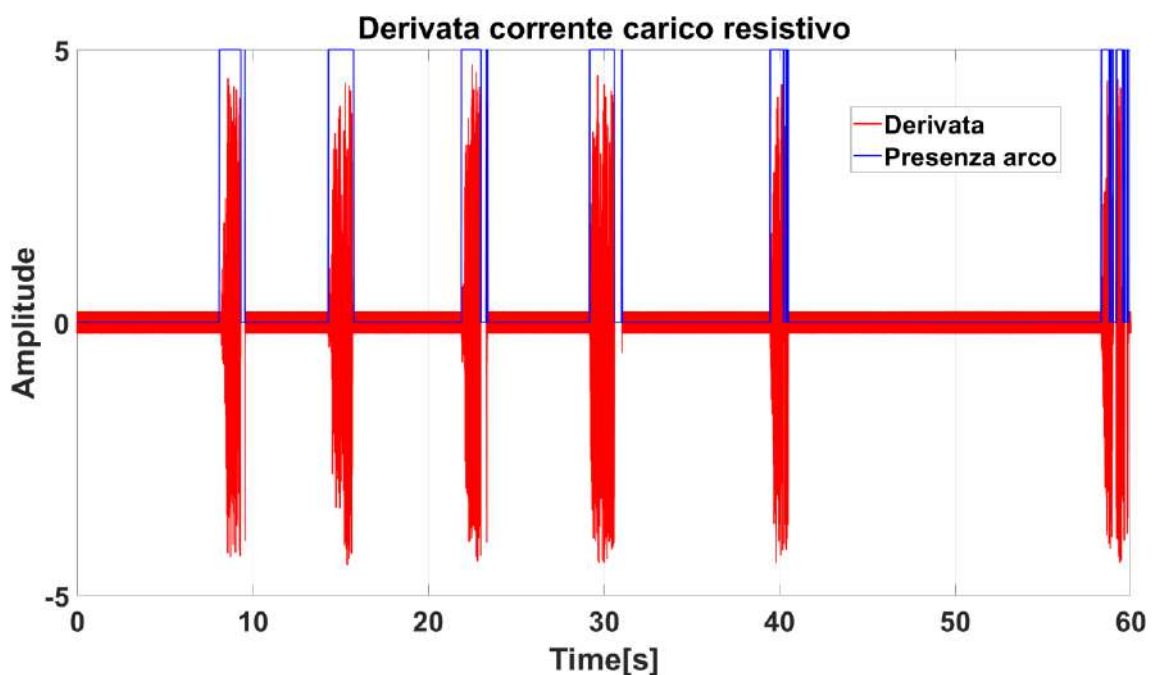


Figura 18 derivata della corrente calcolata su un test con carico resistivo

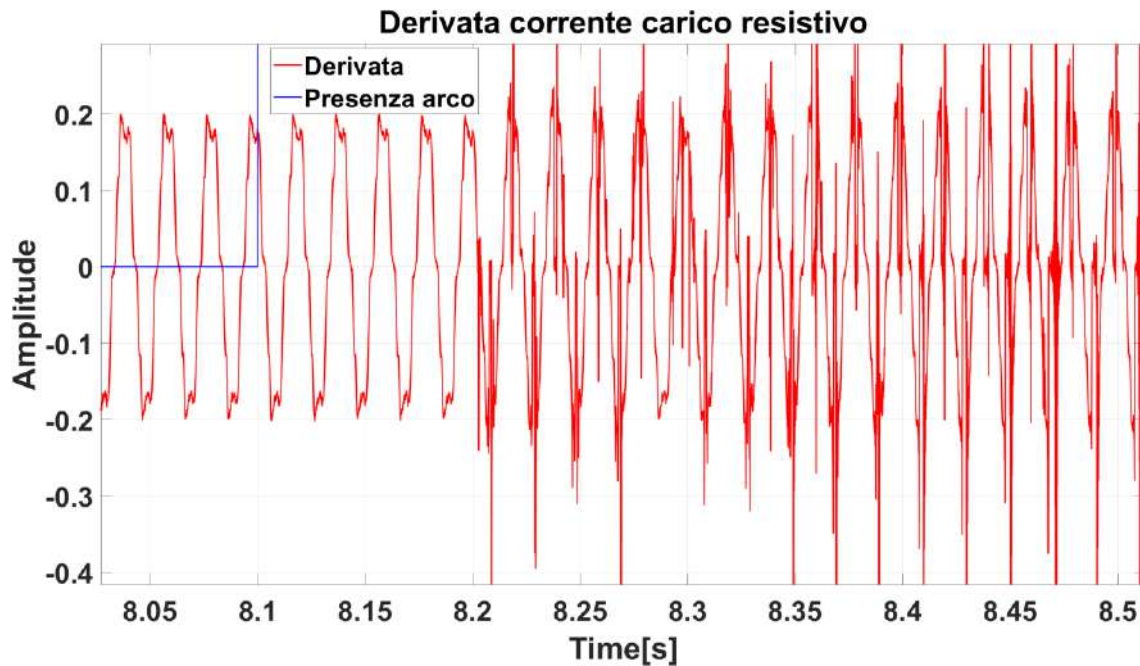


Figura 19 zoom figura precedente

L'arco elettrico provoca brusche variazioni di corrente; grazie a questo semplice espediente, è possibile rilevare l'innescio di un arco osservando l'aumento della derivata della corrente, generato dalle distorsioni introdotte dall'arcing stesso. Va però sottolineato un limite di questo approccio: si basa esclusivamente su un unico parametro. Come vedremo, tuttavia, combinato con altre metriche, esso diventa uno strumento fondamentale per l'identificazione dell'arco.

Partendo dall'analisi della corrente nel dominio del tempo, è possibile estrarre un'ampia varietà di parametri. Ad esempio, si possono individuare le discontinuità o le “spalle” generate dal fenomeno dell'arco, oppure valutare l'andamento del valore efficace (RMS) della corrente. In letteratura sono stati proposti numerosi approcci basati su questa prospettiva. Nel presente lavoro verrà presentato anche un algoritmo fondato sull'analisi nel dominio del tempo, in grado di identificare l'arco elettrico in qualsiasi condizione operativa.

2.1.3 Algoritmi basati su AI

Il deep learning rappresenta sicuramente uno dei metodi più recenti, caratterizzati da un approccio meno elettronico e più informatico.

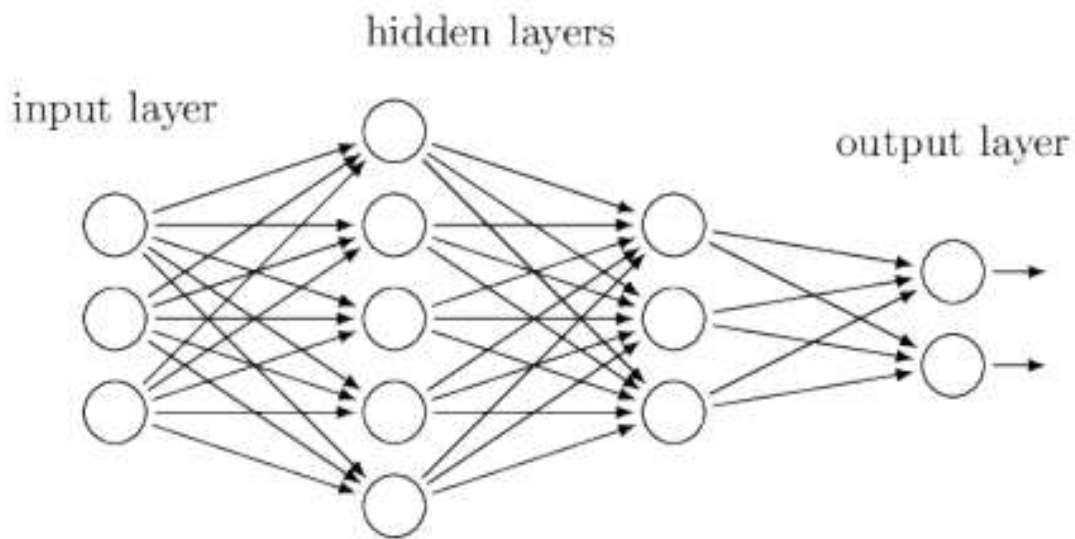


Figura 20 illustrazione rete neurale

Sono molteplici le metodologie utilizzanti reti neurali[60], ad esempio, prendendo come riferimento dei parametri (coefficienti di Fourier ed altre caratteristiche) si può istruire una rete neurale a riconoscere determinati tratti distintivi dell'arco con precisione anche del 99%.

Un esempio lo vediamo in [51] dove prendendo come parametri la DFT la DWT ed MFCC (cepstrum a frequenza di mel) ed utilizzando una rete a 3 strati di neuroni il sistema è capace, avendo sufficienti dati, di riconoscere virtualmente queste tre caratteristiche di arco qualora si presentassero. Potenzialmente queste reti sono universalmente ottimizzabili nel tempo aumentando la quantità di dati a loro disposizione.

Anche in DC, in particolare nel settore energetico, vi sono varie soluzioni basate sul deep learning, ad esempio, in [52] tramite l'utilizzo di 5 parametri diversi un'intelligenza artificiale decide se è presente un arco oppure no.

Infine, come ultimo algoritmo inerente alle intelligenze artificiali [53] propone un metodo che identifica i guasti ad arco adottando un criterio di selezione delle caratteristiche utili basato sulla Random forest (foresta casuale) (RF) per determinare i set di funzionalità specifici in base alla riduzione dell'impurità di Gini, avendo precedentemente selezionato dieci caratteristiche inserite di default in un DNN (rete neurale profonda).

Sicuramente gli algoritmi basati su reti neurali hanno una marcia in più rispetto all'efficienza a lungo termine in quanto queste reti migliorano nel tempo.

Il loro principale svantaggio è senza dubbio l'infrastruttura richiesta per il suo funzionamento che risulta essere molto costosa e poco integrabile in sistemi già esistenti.

Questa tipologia di soluzioni, come riportato in letteratura, ha mostrato elevate percentuali di successo nei test sperimentali. Tuttavia, la loro applicazione in ambito residenziale presenta alcune criticità: in un'abitazione, infatti, la varietà di carichi e di possibili tipologie di arco è pressoché illimitata, rendendo necessario l'addestramento delle reti neurali con quantità di dati estremamente estese. Inoltre, risulta particolarmente complesso realizzare uno strumento stand-alone capace di operare in maniera affidabile e continua (24/7) in un contesto domestico.

2.1.4 Altri metodi

Oltre ai metodi precedentemente descritti, la letteratura riporta numerosi altri approcci, seppur con minore frequenza di utilizzo. In [54] viene ad esempio proposto un algoritmo basato su una rete di memoria a lungo termine denominata TDV-LSTM (Temporal Domain Visualization Long Short-Term Memory Network). Tale implementazione, analoga a un modello di rete neurale, utilizza segnali tipici di arco memorizzati per confrontarli con il segnale corrente; in particolare, l'algoritmo suddivide il mezzo ciclo del segnale in ingresso in dieci classi, ognuna associata a una probabilità di presenza dell'arco.

Un'ulteriore categoria di metodi per l'identificazione dell'arco si basa sull'osservazione diretta delle manifestazioni fisiche del fenomeno, quali l'arc flash (emissione luminosa associata alla scarica) o il rumore acustico generato durante l'evento stesso[57]. In aggiunta, in [58] e [61] viene riportato anche l'impiego di antenne dedicate per la rilevazione delle radiazioni elettromagnetiche generate dall'arco elettrico, fornendo così un'ulteriore modalità di identificazione basata sulle proprietà fisiche del fenomeno.

Infine, merita menzione anche un approccio ibrido, presentato in [55], che combina l'utilizzo di un filtro di Kalman con la logica fuzzy (una logica non binaria in cui le proposizioni non sono semplicemente vere o false), con l'obiettivo di migliorare la capacità di rilevamento in condizioni operative variabili.

In conclusione, la letteratura propone un'ampia varietà di strategie per l'identificazione dei guasti da arco, che spaziano dall'analisi nel dominio del tempo e della frequenza, fino

a metodi più avanzati basati su intelligenza artificiale e sull'osservazione diretta delle manifestazioni fisiche del fenomeno. Sebbene ciascun approccio presenti specifici punti di forza e limiti applicativi, è evidente come il tema sia stato ampiamente studiato e resti di grande attualità. Nel capitolo successivo verrà analizzato il quadro normativo di riferimento, indispensabile per comprendere come in questo lavoro siano stati eseguiti i test di validazione.

2.2 Quadro normativo nazionale ed internazionale

Il settore elettrico ed elettrotecnico è regolamentato da un complesso framework normativo internazionale, sviluppato per garantire sicurezza, interoperabilità, efficienza energetica e sostenibilità. Tale sistema si articola su più livelli (internazionale, regionale, nazionale), con enti di standardizzazione, organismi di regolamentazione e istituzioni legislative che collaborano in modo sinergico.

Quando viene emesso uno standard internazionale solitamente, mediante un processo complesso e strutturato, viene adattato prima a livello regionale ed infine nazionale. Ad esempio, la IEC (International Electrotechnical Commission) emette uno standard, a quel punto il CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization) lavora per armonizzare lo standard a livello europeo eseguendo una revisione tecnica ed amministrativa verificando la compatibilità con le esigenze dei paesi europei. Infine, un ente come il CEI (comitato elettrotecnico italiano), nel caso dell'Italia, si occuperà di tradurre e revisionare la norma per applicarla a livello nazionale. Ogni Nazione ha il suo ente corrispettivo al CEI, ad esempio la Spagna possiede l'AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación), la Germania il DKE (Deutsche Kommission Elektrotechnik), La Francia l'UTE ecc... Infine, chiaramente ogni regione come America, Asia ed africa possiede i suoi enti normatori.

La protezione contro i guasti da arco elettrico (Arc Fault) costituisce un ambito normativo estremamente articolato, caratterizzato da un mosaico di standard internazionali, regionali e settoriali, ciascuno rispondente a specifiche esigenze tecniche, geografiche e applicative. Lo standard IEC 62606[3], sviluppato dalla Commissione Elettrotecnica Internazionale, rappresenta il pilastro globale per i dispositivi di rilevamento degli archi (AFDD – Arc Fault Detection Devices), definendo non solo i requisiti minimi di sicurezza

come la capacità di discriminare tra archi pericolosi (es. causati da cavi danneggiati o connessioni ossidate) e fenomeni transitori benigni (es. commutazione di carichi induttivi o accensione di motori), ma anche protocolli di test rigorosi per archi in serie e parallelo in sistemi a bassa tensione (fino a 440 V AC). La sua adozione in Europa come EN 62606, ne estende l'applicabilità a tutti gli Stati membri dell'UE. Successivamente, gli enti normativi nazionali, come il CEI in Italia, recepiscono la norma, rendendola operativa al livello nazionale, così nasce la CEI 62606[4].

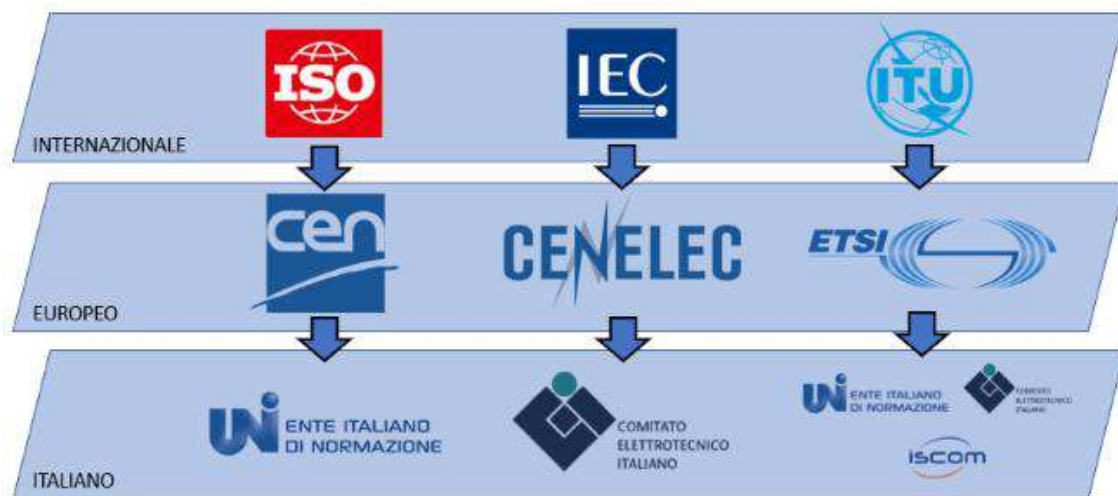


Figura 21 <https://masterblob.com/quali-sono-gli-organismi-di-normazione>

Il panorama nordamericano segue un approccio divergente: utilizzando uno standard sviluppato da UL (Underwriters Laboratories) un ente privato che opera principalmente in America. Gli AFCI (Arc-Fault Circuit Interrupters), regolati dallo standard UL 1699[1], sono progettati per operare in reti a 120/240 V tipiche del residenziale statunitense, con un'enfasi particolare sulla protezione contro archi in parallelo (più comuni in contesti domestici). La variante UL 1699B[2] ("Combination AFCI"), ad esempio, combina tecniche di rilevamento a frequenza fissa con analisi di pattern temporali per identificare sia archi in serie (associati a interruzioni parziali del conduttore) che in parallelo (dovuti a cortocircuiti tra fase e neutro), riflettendo una filosofia progettuale orientata alla massima ridondanza. L'obbligatorietà degli AFCI, sancita dall'Articolo 210.12 del National Electrical Code [5] (NEC una raccolta di standard statunitensi per la progettazione e l'installazione sicura degli impianti elettrici. È sviluppato dalla NFPA) e dalla Sezione 26-658 del Canadian Electrical Code (CEC)[6], sottolinea una differenza fondamentale rispetto al contesto europeo: mentre in Nord

America l'adozione è vincolante per nuove costruzioni e ristrutturazioni, in Europa l'implementazione degli AFDD rimane su base volontaria, sebbene incoraggiata per gli edifici a rischio incendio elevato. Ulteriori divergenze emergono nella definizione degli scenari di rischio: la IEC 62606 classifica gli archi in base alla loro energia e alla stabilità del plasma, richiedendo tempi di intervento calibrati su varie soglie, mentre UL 1699 adotta criteri basati sulla morfologia dell'arco (es. durata, cadenza degli impulsi) e sulla correlazione con la corrente di carico, con tempi di intervento più rapidi per prevenire l'innescio di incendi in materiali combustibili. Un ulteriore livello di complessità risiede nella distinzione concettuale tra arc fault (guasti da arco in bassa tensione, associati a imperfezioni dell'impianto) e arc flash (fenomeni esplosivi in media/alta tensione, regolati da IEEE 1584 e NFPA 70E), quest'ultimi rilevanti in ambito industriale e trattati come rischio per la sicurezza dei lavoratori più che come causa di incendio. La normativa cinese, incarnata dallo standard GB/T 31143 [7], pur basandosi sulla IEC 62606, introduce adattamenti significativi, come tolleranze maggiori per le fluttuazioni di tensione tipiche delle reti locali e requisiti aggiuntivi per la resistenza agli ambienti umidi, riflettendo le peculiarità infrastrutturali del Paese. In Giappone si pone alta attenzione al rischio incendio, ma l'utilizzo di AFDD è molto limitato in ambito domestico ed inoltre non esiste uno standard loro ma seguono invece lo standard IEC 62606. Australia e Nuova Zelanda hanno adottato la norma IEC emanando dunque la AS/NZS 62606:2022 – "General requirements for arc fault detection devices"; inoltre nella norma AS/NZS 3000:2018 – "Electrical installations (known as the Australian/New Zealand Wiring Rules)" sono presenti riferimenti all'utilizzo di dispositivi AFDD. In Brasile nella norma: NBR 5410 – "Instalações elétricas de baixa tensão" raccomandano l'utilizzo di AFDD senza obbligarne l'uso. Infine, in Africa la norma SANS 10142-1 – "The wiring of premises – Part 1: Low-Voltage installations" come negli altri casi prescrive l'utilizzo di AFDD ma non ne obbliga l'impiego. Possiamo dire che in tutto il mondo anche dal punto di vista normativo si pone grande attenzione in merito ai rischi generati dall'arc fault.

Parallelamente, standard trasversali come la IEC 60364-4-42[8] integrano linee guida per la protezione da archi negli impianti fissi, raccomandando l'uso di AFDD in combinazione con differenziali (RCD) e termomagnetici, ma senza renderli obbligatori se non in giurisdizioni specifiche. Le recenti evoluzioni normative, come il NEC 2023 – che estende gli AFCI agli ambienti commerciali leggeri (es. uffici e scuole) – e

l'aggiornamento dello IEC 62606:2022, che introduce test per archi in presenza di energie rinnovabili (fotovoltaico e storage), evidenziano una tendenza verso l'universalizzazione della protezione, sebbene permangano sfide irrisolte: l'eterogeneità delle reti elettriche globali, la mancanza di un framework unificato per la validazione degli algoritmi di detection e i costi di implementazione, spesso proibitivi per i Paesi in via di sviluppo. Questa frammentazione normativa impone ai progettisti un bilanciamento delicato tra compliance locale, efficacia tecnica e sostenibilità economica, stimolando ricerca interdisciplinare in ambito di sensoristica avanzata (es. rilevamento ottico tramite fibre), modelli predittivi basati sull'intelligenza artificiale e materiali autorigeneranti per ridurre l'insorgenza di archi. In sintesi, lo studio comparativo degli standard rivela non solo una pluralità di approcci ingegneristici, ma anche un dialogo continuo tra innovazione tecnologica, politiche di sicurezza e dinamiche di mercato, rendendo l'arc fault un caso emblematico di come la standardizzazione elettrotecnica rifletta e plasmi simultaneamente il progresso delle società industrializzate.

In molti paesi come Germania, Inghilterra, USA, Canada ecc.... le norme prescrivono l'obbligatorietà di installazione di AFDD in alcune circostanze come, ad esempio, luoghi in cui è presente un forte rischio di incendio. Concludendo gli AFDD sono sempre e comunque sono fortemente raccomandati in tutte le norme e paesi.

Ora vedremo più nel dettaglio la norma CEI 62606 che ha fortemente influenzato il lavoro svolto in questi anni.

2.2.1 CEI 62606 Internazionale



La norma CEI 62606: “Requisiti generali per dispositivi di rilevamento guasto per arco elettrico”, pubblicata nel 2014 è una norma tecnica italiana emanata appunto dal Comitato Elettrotecnico Italiano.

Fondata nel 1909, è l'associazione, riconosciuta dall'Italia e dall'Europa preposta all'emanazione ed armonizzazione di documenti normativi di buona tecnica inerenti agli impianti elettrici. La norma in questione, come specificato nel documento stesso, è identica alla norma EN 62606 (2013) che a sua volta deriva dalla norma internazionale

IEC 62606: “General requirements for arc fault detection devices” elaborata tenendo in considerazione gli studi sugli incendi, esperienze normative come la UL1699 e definisce gli standard per la costruzione e la prova degli AFDD. Quest’ultima è anche collegata alla IEC 60364 [10]: “Low-Voltage electrical installations” che è la norma internazionale che definisce le prescrizioni per la realizzazione degli impianti elettrici a bassa tensione negli edifici, sia civili che industriali e che trova la sua armonizzazione in Italia con la norma CEI 64-8 (2024) [9]: “Impianti elettrici a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua”, già nella sua prima parte dice “L’impianto elettrico deve essere realizzato in modo che non ci sia, in servizio ordinario, pericolo di innesco dei materiali combustibili o infiammabili a causa di temperature elevate o di archi elettrici” mostrando grande attenzione alla problematica in esame. Come da testo, nella parte 4.22.7 della 64-8:”Nei luoghi a maggior rischio in caso di incendio di cui alla Sezione 751 e nei luoghi soggetti a vincolo artistico/monumentale e/o destinati alla custodia di beni insostituibili devono essere adottati provvedimenti contro il pericolo di “guasto serie”...“Per i circuiti a corrente alternata, l’utilizzo di dispositivi di rilevazione di guasti d’arco (AFDD) costituisce una misura adeguata per la protezione dai guasti arco serie in accordo con la Norma di prodotto CEI EN 62606.” , infine, sempre nella sezione 4 è presente l’allegato A come approfondimento riguardo agli AFDD. La parte 5 fornisce le prescrizioni relative alla scelta ed alla installazione dei componenti elettrici necessari per l’attuazione delle misure di protezione trattate nella Parte 4 specificando che. “gli AFDD devono essere installati all’origine dei circuiti finali (terminali) da proteggere e nei circuiti monofase o bifase in c.a. non superiori a 240 V. Gli AFDD devono essere conformi alla Norma CEI EN 62606.” Dunque, questo mette in mostra come in un impianto realizzato a regola d'arte è assolutamente consigliato se non prescritto l’impiego di AFDD.

La Norma CEI 62606 ha lo scopo di indicare i requisiti necessari e le procedure di prova per i dispositivi AFDD, previsti per essere installati da personale addestrato, in ambienti domestici e per impieghi similari, allo scopo di ridurre il rischio di incendio dovuto a cause di natura elettrica a valle del dispositivo. Un AFDD è progettato dal costruttore: “come un singolo dispositivo dotato di mezzi apertura, in grado di aprire il circuito protetto in condizioni specificate; oppure come un dispositivo singolo che integra un dispositivo di protezione; oppure come un’unità separata, conforme all'Allegato D,

assemblata in sito insieme a un dispositivo di protezione dichiarato.” Questo dispositivo deve dunque avere potere interrompente e deve essere conforme alla norma IEC 60898-1: Electrical accessories - Circuit-breakers for overcurrent protection for household and similar installations oppure deve potere pilotare un RCD (residual-current device) conforme ad una delle norme IEC 61008-1, IEC 61009-1 o alla IEC 62423 al fine di contenere realmente il rischio di incendio.

La norma CEI EN 62606 presenta una variante emanata nel mese di luglio dell’anno 2018, ed è attualmente in corso di validità. Le principali modifiche introdotte dalla variante sono inerenti alla sezione 1 dove vengono modificati i valori dei massimi di tensione e corrente alternata. Sono state apportate modifiche anche alla sezione nuova aggiungendo nuove prove ed anche elaborando quelle per i sistemi trifase aggiungendo anche le modifiche da fare al banco di prova nel caso trifase. Infine, vengono aggiunte alcune immagini più esplicative (ad esempio per la costruzione dell’elemento carbonizzato per generare l’arco elettrico) e sono state modificate ed aggiunte altre informazioni non inerenti alle caratteristiche di intervento di un AFDD.

2.2.1.1 Caratteristiche degli AFDD

Si procede ora ad esaminare nel dettaglio i requisiti minimi stabiliti dalla normativa per i dispositivi di rilevazione e protezione contro i guasti da arco (AFDD).

La prima e forse più importante caratteristica di un AFDD è il tempo di intervento. Ovviamente quanto più basso è il valore della corrente tanto più è difficile identificare la presenza del fenomeno e quanto più alta la corrente coinvolta nell’arco tanto maggiore sarà il rischio di incendio. Seguendo questa logica la norma presenta i valori di riferimento per il tempo di massimo di interruzione della corrente elettrica da parte dell’AFDD. I valori non presenti in tabella si otterranno tramite interpolazione.

Corrente d'arco di prova (valori efficaci)	2,5 A	5 A	10 A	16 A	32 A	63 A
Tempo massimo di interruzione	1 s	0,5 s	0,25 s	0,15 s	0,12s	0,12 s

Figura 22 par. 5.3.7.1 norma CEI 62606

È chiaro che queste sono stime eseguite in un contesto nel quale fosse possibile determinare con esattezza quale fosse la corrente coinvolta nella generazione dell’arco

elettrico e ne determinano dunque le condizioni di prova da laboratorio per la messa in commercio di un prodotto, qualora avvenga un arco elettrico serie in un'abitazione non sarà possibile calcolare con esattezza quanta corrente rispetto a quella circolante nell'impianto contribuisca al sostentamento dell'arco elettrico.

Qualora la corrente fosse superiore a 63 A la norma suggerisce un metodo differente per la determinazione del tempo massimo di intervento dell'AFDD, ovvero, il numero massimo di semi-cicli d'arco ammessi.

Corrente d'arco di prova ^(a) (valori efficaci)	75 A	100 A	150 A	200 A	300 A	500 A
N ^(b)	12	10	8	8	8	8
(a) Questa corrente di prova corrisponde alla corrente presunta nel circuito di prova prima della formazione dell'arco.						
(b) N è il numero di semi-cicli alla frequenza nominale.						

Figura 23 5.3.7.2 tabella 3 norma CEI 62606

La tabella è valida sempre per dispositivi con corrente nominale 230 V.

All'interno della norma sono anche presenti le condizioni normali di servizio e di installazione e tutte le prescrizioni costruttive del dispositivo che non saranno trattati in questa tesi mentre ci concentreremo sulle procedure di prova presenti nel capitolo 9 della norma.

2.2.1.2 Procedure di prova

Nel capitolo 9 della norma CEI 62606 sono descritte nel dettaglio le procedure di prova per testare il corretto funzionamento dei dispositivi AFDD, il banco di prova e lo scaricatore sono stati costruiti basandoci sulle informazioni di seguito.

Prova	Paragrafo
– Indelebilità delle marcature	9.3 ^(a)
– Affidabilità delle viti, delle parti che portano corrente e collegamenti	9.4 ^(a)
– Affidabilità dei morsetti per i conduttori esterni	9.5 ^(a)
– Protezione contro la scossa elettrica	9.6 ^(a)
– Proprietà dielettriche	9.7 ^(a)
– Riscaldamento	9.8
– Caratteristiche di intervento	9.9
– Durata meccanica e durata elettrica	9.10 ^(a)
– Comportamenti in condizioni di cortocircuito	9.11
– Resistenza alle scosse meccaniche ed agli urti	9.12 ^(a)
– Resistenza al calore	9.13 ^(a)
– Resistenza al calore anormale ed al fuoco	9.14 ^(a)

Figura 24 Tabella 10 parte 1 norma CEI 62606

– Verifica del meccanismo a scatto libero	9.15
– Prova di resistenza alla ruggine	9.16
– Verifica dei valori limite della corrente di non intervento in condizioni di sovracorrente	9.17
– Comportamento in caso di impulsi di corrente provocati dalla tensione a impulso	9.18
– Verifica dell'affidabilità	9.19
– Verifica dell'invecchiamento dei componenti elettronici	9.20
– Compatibilità elettromagnetica	9.21
– Verifica della protezione dalla sovratensione a seguito di un'interruzione del neutro in un impianto trifase	9.22
(a) Per gli AFDD classificati secondo 4.1.2, queste prove sono comprese nelle prove prescritte dalla corrispondente Norma per gli RCD o per gli interruttori e non devono essere ripetute.	

Figura 25 Tabella 10 parte 2 norma CEI 62606

Nella tabella 10 sono riportate tutte le prove che un dispositivo AFDD da commercializzare deve subire. In questa tesi si tratteranno del dettaglio le prove inerenti al rilevamento dell'arco elettrico tralasciando le altre.

Nella sezione 9.9 della norma si parla della verifica della caratteristica di intervento e, in particolare, delle prove con guasti di arco serie (9.9.2). Per la preparazione del banco di prova è necessaria la costruzione di uno scaricatore ad arco (9.9.2.7) e/o un elemento di filo carbonizzato (9.9.2.6) come indicato nella norma stessa. Successivamente, occorre che serviranno per simulare la condizione di arco elettrico involontario e pericoloso (qualora si usi lo scaricatore i tempi di intervento visti sopra vanno moltiplicati per 2.5). Successivamente occorre montare il circuito presente nella figura successiva in cui S1,

S2, S3 ed S4 sono interruttori, mentre l'elemento centrale è l'elemento carbonizzato prima specificato.

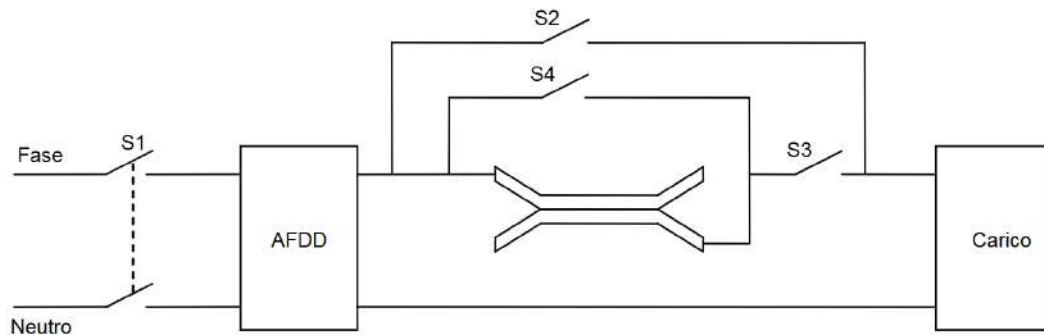


Figura 4 – Circuito per le prove dei guasti d'arco in serie

Figura 26 Figura 4 norma 62606

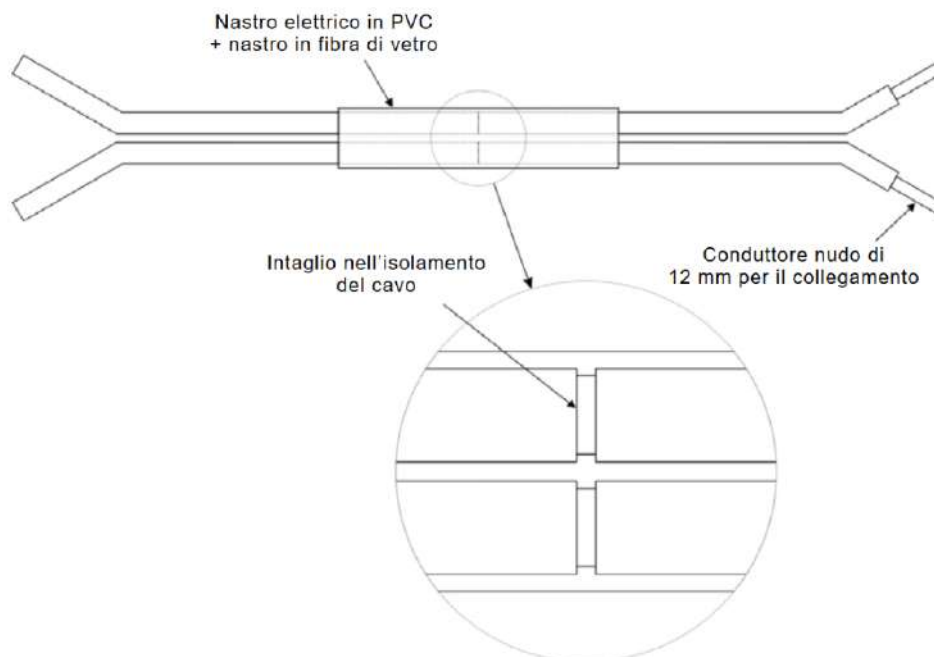


Figura 36 –Preparazione degli esemplari di cavo (9.9.2.6)

Figura 27 figura 35 norma CEI 62606 variante 2018

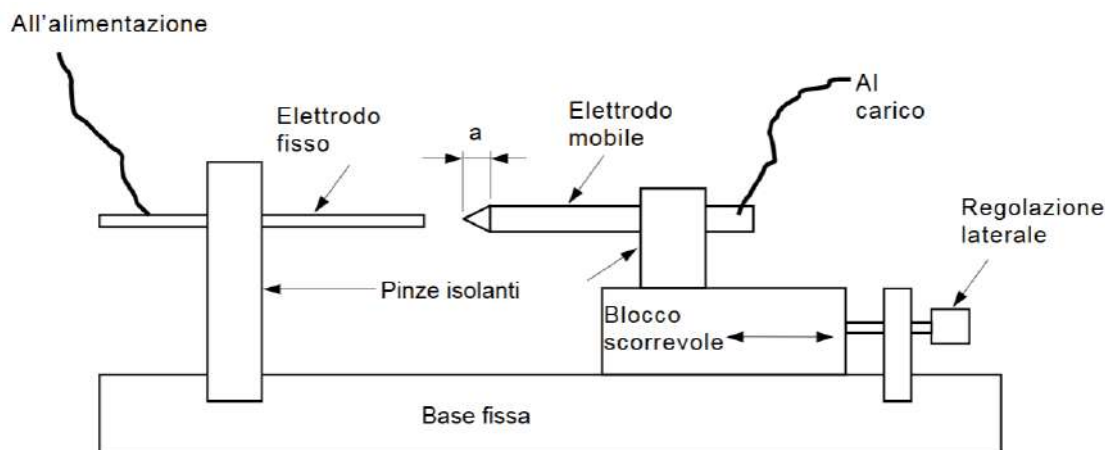


Figura 5 – Generatore d'arco

Figura 28 figura 5 norma CEI 62606

Una volta terminata la preparazione del banco di prova la prima cosa da eseguire secondo la norma è ovviamente la verifica del corretto funzionamento in caso di improvvisa applicazione di archi serie nel circuito. Il test si eseguirà mediante un carico resistivo che regolerà la corrente dal suo valore minimo al valore nominale dell'AFDD, inizialmente con tutti e quattro gli interruttori chiusi e poi, una volta a regime, si apre l'interruttore S2 ed infine si generano archi mediante l'interruttore S4 dando corrente al generatore di arco elettrico, il dispositivo dovrà identificare l'arco nei tempi prescritti dalla tabella vista precedentemente.

Terminata la prima prova si procederà, con i test di mascheratura con carichi di inibizione seguendo lo schema seguente.

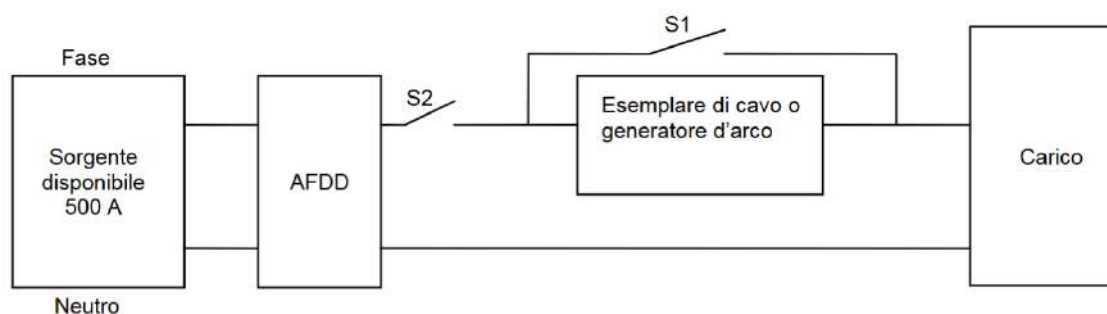


Figura 10 – Circuito per le prove di mascheramento (carichi di inibizione e disturbo)

Figura 29 figura 10 norma CEI 62606

Un aspiratore con un motore universale con corrente nominale da 5 A fino a 7 A, nel caso di un AFDD con tensione nominale di 230 V
Una o più alimentazioni a commutazione elettronica, con una corrente totale di carico di almeno 2,5 A per un AFDD con tensione nominale di 230 V.
Un motore con avviamento tramite condensatore (del tipo dotato di compressore d'aria) di 2,2 kW.
Un variatore elettronico per lampada (del tipo a tiristore) da 600 W con una bobina di filtro che controlla un carico di 600 W costituito da una lampada al tungsteno.
Due lampade fluorescenti da 40 W insieme ad un carico resistivo aggiuntivo di 5 A.
Lampade alogene da 12 V alimentate con un trasformatore elettronico con una potenza totale di almeno 300 W, oltre ad un carico resistivo aggiuntivo di 5 A.
Un utensile elettrico, come un trapano, con una potenza di almeno 600 W.

Le prove da eseguire in questo caso sono varie. Innanzitutto, nella tabella sopra sono mostrati tutti i carichi che saranno presi singolarmente per effettuare i test. Ogni carico verrà prima testato solo con il dispositivo AFDD a monte. Successivamente, verrà aggiunto un carico resistivo in parallelo e, infine, l'AFDD verrà posto tra i due carichi. Dopo di ciò verranno eseguite le prove di mascheratura con il filtro EMI e con l'impedenza di linea concludendo con delle prove in assenza di arco elettrico per verificare che il dispositivo non intervenga in casi in cui non è necessario. Ciascun AFDD deve essere provato tre volte per ciascuna configurazione di carico.

Con l'analisi del quadro normativo, si conclude la sezione della tesi dedicata alla comprensione del fenomeno degli arc fault e alla loro gestione a livello globale. Questo approfondimento ha permesso di delineare le principali normative e le pratiche adottate nei diversi paesi, evidenziando le sfide e le soluzioni proposte per affrontare questo problema.

2.2.2 Norma americana UL1699



Underwriters Laboratories Inc. (UL) è un'organizzazione preposta all'emanazione di certificazioni di sicurezza. Fondata nel 1894 è un ente indipendente americana, nel corso della sua storia ha emanato molti standard e test. Per il territorio americano è sicuramente uno dei certificatori più importanti in moltissimi settori dall'elettrico a quello della sicurezza alimentare.

Underwriters Laboratories ha anche emanato un'importante norma inerente ai dispositivi per mitigare gli archi elettrici: la UL1699 “Arc-Fault Circuit-Interrupters”.

è la norma statunitense di sicurezza che definisce i requisiti per la progettazione, le prestazioni (prove) e la conformità dei dispositivi AFCI (Arc-Fault Circuit-Interrupter) usati negli impianti domestici per ridurre il rischio d'incendio dovuto ad archi elettrici. L'edizione principale attuale è la Edition 3 (pubblicata 3 maggio 2017) con ultima revisione: 26 settembre 2023;

per il lavoro svolto in questa tesi inizialmente è stata utilizzata la versione del 2007 per poi aggiornare le prove alla IEC 62606 più inerente all'ambito europeo.

2.3 Problematiche aperte

Se ancora oggi l'arc fault è un tema caldo è perché non è semplice trovare un metodo efficace in ogni situazione, facilmente integrabile ed a basso costo per potere creare un dispositivo AFDD veramente affidabile e commercializzabile.

In letteratura sono state proposte numerose tecniche di identificazione del guasto ad arco: alcune hanno mostrato buoni risultati, ma soltanto in configurazioni con un singolo carico, mentre ben pochi studi hanno testato scenari multi-carico, che invece rappresentano la realtà tipica di un'abitazione o di un impianto. Altre strategie, basate ad esempio sull'impiego di reti neurali o di algoritmi avanzati come le trasformate wavelet,

richiedono un addestramento complesso e un notevole sforzo computazionale. Ciò comporta un inevitabile aumento dei costi dei dispositivi, oltre al rischio di non garantire comunque un livello di affidabilità sufficiente in tutte le condizioni operative.

L'arco elettrico costituisce un pericolo concreto per la sicurezza delle persone e degli ambienti abitativi, e la ricerca di una soluzione tecnica ottimale rimane quindi ancora aperta. Ogni metodologia proposta fino ad oggi presenta infatti specifici limiti di applicabilità o di implementazione, che ne ostacolano la diffusione su larga scala. Nonostante ciò, sul mercato sono già disponibili dispositivi di mitigazione dell'arco di varie marche, la cui efficacia è stata verificata, nell'ambito di questo lavoro di ricerca, anche mediante prove sperimentali condotte con l'ausilio di uno scaricatore di arco realizzato secondo quanto previsto dalla normativa di riferimento. Di questi dispositivi ne sono stati testati due in laboratorio.

La capacità di interruzione della corrente in presenza di arco elettrico è stata testata tramite un apposito set up in cui erano presenti i seguenti elementi.

1. Scaricatore di arco elettrico costruito secondo la norma IEC 62606 / UL 1699
2. Carico serie allo scaricatore (stufa elettrica da 2 kW)
3. Lampadina alogena come carico parallelo ad arco e stufa
4. Trapano elettrico come carico disturbante inserito in parallelo al circuito dello scaricatore.

I test sono stati eseguiti accendendo i dispositivi AFDD in assenza di arco ed in presenza dei carichi resistivi in funzionamento (stufa e lampadina).

Per prima cosa è stato acceso il carico disturbante per verificare che i dispositivi di intervento fossero progettati adeguatamente, evitando la generazione errata di "eventi di arco".

Successivamente con il carico disturbante spento, mediante lo scaricatore, sono stati generati archi elettrici.

Tutti i dispositivi AFDD sono stati alimentati mediante spina collegata alla presa elettrica. In tutti è stato verificato il corretto posizionamento della fase.

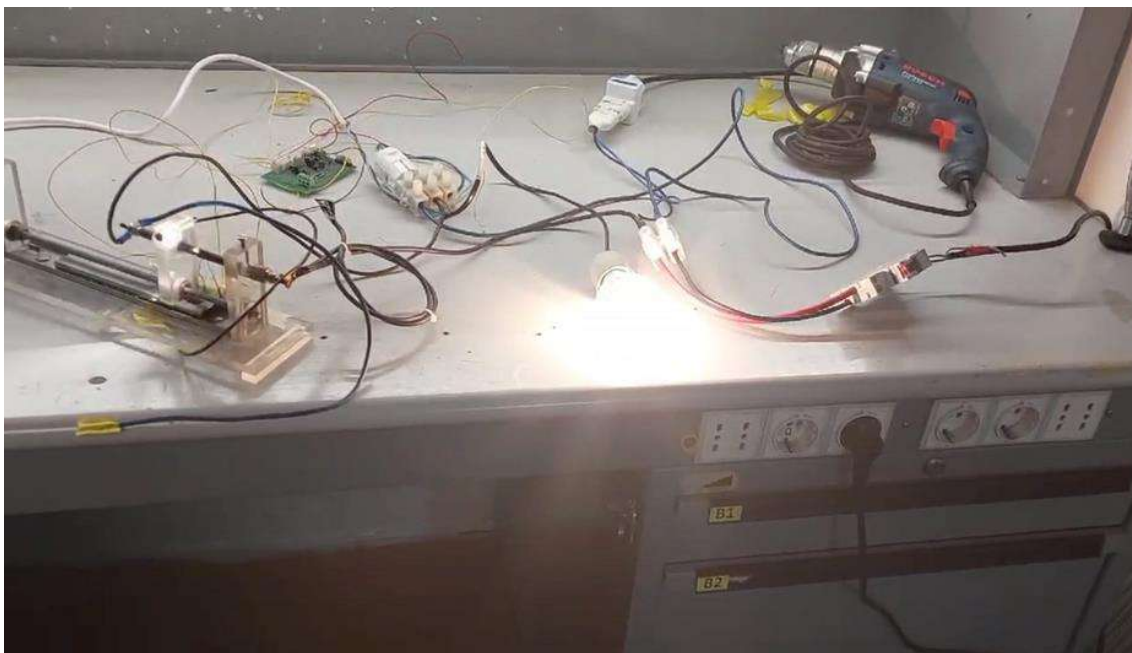


Figura 30 set up test dispositivo uno.

Il dispositivo uno ha fallito il test non intervenendo in presenza del guasto.

La generazione dell'arco elettrico è stata prolungata ed intensa, il dispositivo ha ignorato totalmente l'evento facendo continuare la circolazione di corrente nell'impianto. Il dispositivo presentava il led rosso acceso, indicante condizione di operatività corretta secondo manuale.

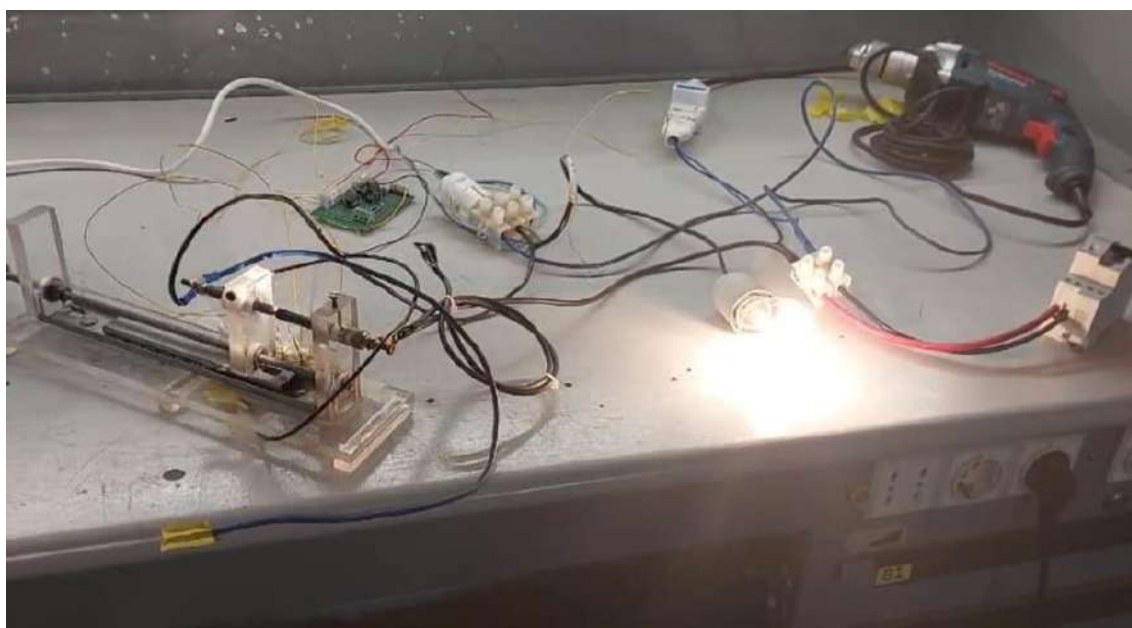


Figura 31 set up test dispositivo due.

Il dispositivo due si è comportato come il dispositivo uno, nessun intervento anche in presenza di arco.

Avendo ora una panoramica completa rispetto allo stato dell'arte, ai dispositivi in commercio ed alle normative vigenti entriamo ora nel clou della tesi parlando di come è stato svolto il lavoro sperimentale diviso tra università ed azienda.

3. AFFD REAL TIME CON ALGORITMO DI ANALISI ARMONICA A BASSA FREQUENZA

Il fenomeno d'arco, come detto, è non stazionario. Pertanto, non sarebbe possibile utilizzare algoritmi di analisi armonica classici poiché un requisito necessario allo svolgimento di qualsiasi tipo di trasformata discreta di Fourier prevede che il segnale sia stazionario. L'osservazione sperimentale del fenomeno ha permesso di considerare che, entro intervalli temporali relativamente brevi, circa 80ms, nonostante sia presente un guato d'arco, il segnale mantenga ancora caratteristiche di quasi-stazionarietà. Questo consente di applicare algoritmi di analisi armonica classici. Un algoritmo che consente una buona risoluzione spettrale con una finestra di osservazione relativamente stretta è la CZT (cfr. par. 3.1.2), ed è stata oggetto di studio da parte del gruppo di ricerca di misure elettriche ed elettroniche dell'Università di Palermo per l'implementazione della strategia di rilevamento di arc fault. Infatti, la risoluzione della CZT non dipende dalla finestra di osservazione, eliminando così la criticità della non stazionarietà del segnale.

Questo studio, che ha prodotto un brevetto internazionale con STMicroelectronics [64], ha portato all'identificazione di un insieme adeguato di indicatori che possono essere utilizzati per il rilevamento dei guasti dell'arco; tali indicatori possono essere ottenuti mediante un'analisi armonica ad alta risoluzione effettuata sulla corrente mediante la CZT (chirp Z-transform).

Se confrontato con altri approcci, il metodo proposto può consentire di affrontare meglio alcuni problemi legati all'acquisizione e all'elaborazione del segnale, in termini di frequenza di campionamento ed in termini di scelta della lunghezza della finestra di osservazione.

Come detto in precedenza l'analisi armonica classica a banda larga è utilizzata anche se ciò comporta l'impiego di soluzioni analogiche basate principalmente sul filtraggio.

Per quanto riguarda l'analisi a bassa frequenza spesso viene applicata sul segnale di corrente derivato e viene impiegata per la determinazione di alcune soglie che distinguono la condizione di arco dalla normalità.

In altri casi, l'analisi a bassa frequenza viene utilizzata per confrontare il contenuto armonico del segnale entrante con delle bande di segnale di riferimento predeterminate,

che rappresentano carichi comuni. Ciò richiede una conoscenza preliminare del circuito elettrico, in ogni singola condizione di lavoro, al fine di determinare le bande di segnale di riferimento, che rappresentano tutte le possibili configurazioni di carico.

Le soluzioni che prevedono l'analisi spettrale viste in precedenza di solito fanno riferimento ad algoritmi tradizionali, come FFT, che richiedono un segnale stazionario e un'ampia finestra di osservazione al fine di ottenere un'adeguata risoluzione spettrale. Questi requisiti potrebbero non essere soddisfatti per l'analisi dei segnali corrotti da arco, che sono tipicamente non stazionari, specialmente se l'acquisizione del segnale da trasformare ha durata relativamente lunga.

Un altro problema è che le soluzioni hardware richiederebbero l'impiego di sofisticati sistemi di elaborazione del segnale, con elevate velocità di elaborazione e/o frequenze di campionamento, specialmente quando sono coinvolte misurazioni a banda larga.

D'altra parte, la possibilità di focalizzare l'attenzione sull'analisi spettrale a bassa frequenza sarebbe vantaggiosa poiché la misurazione di componenti del segnale nel range 50-500 Hz comporterebbe anche un abbassamento dei requisiti di frequenza di campionamento richiesti.

La principale criticità associata all'utilizzo di un simile algoritmo riguarda la sua implementazione in tempo reale su microcontrollori a basso costo, caratterizzati da risorse computazionali e di memoria limitate. In questo capitolo si tratterà dell'implementazione della strategia basata sulla CZT e proposta dal gruppo di Palermo e di tutte le difficoltà che derivano dalla sua implementazione sia dal punto di vista della scelta dell'hardware sia dal punto di vista della stesura del codice funzionante che dovrà rispettare tutte le specifiche temporali richieste per fare in modo che il tutto funzioni online (ovvero di pari passo con il sistema reale) senza mai rischiare di perdere dati in ingresso.

3.1 Algoritmo basato su analisi armonica a bassa frequenza

In questo capitolo ci concentreremo sull'analisi armonica a bassa frequenza del segnale di corrente mediante un algoritmo sviluppato dal gruppo misure dell'università di Palermo [49]. Per studiare efficacemente le suddette caratteristiche dell'arco è stato necessario progettare un adeguato algoritmo di analisi spettrale capace di garantire una alta risoluzione a bassa frequenza anche con breve finestra di osservazione. Infatti, la CZT

garantisce una risoluzione dipendente esclusivamente dal numero di punti e dalla banda in frequenza che si intende analizzare.

Come sappiamo però, per garantire che il segnale mantenga caratteristiche di quasi-stazionarietà, è necessario tenere stretta la finestra di osservazione (tipicamente non oltre gli 80ms). Con algoritmi come DFT e FFT non possiamo ottenere una buona risoluzione poiché essa è pari all'inverso della finestra di osservazione. Ad esempio, per un segnale di corrente a 50 Hz, una frequenza di campionamento $f_s=10$ kHz ed una finestra di osservazione è di 0,08 s ($N=800$) porta ad una risoluzione spettrale di $500/800=0,625$ Hz, nella banda di frequenza $fw= [0-500]$ Hz. Con le stesse impostazioni, la risoluzione spettrale del DFT sarebbe $\Delta f_{czt} = \frac{f_s}{N} = 12.5$ Hz.

Rispetto alla DFT o alla FFT, la CZT consente di eseguire analisi spettrali in una banda di frequenza più piccola. fw (frequency window) e con una migliore risoluzione spettrale, $\Delta f_{czt} = \frac{fw}{N}$ (essendo N il numero di campioni di segnale)

In questo caso notiamo che la CZT ha una risoluzione 20 volte superiore rispetto alla DFT.

Identifichiamo ora gli indicatori identificati per la nostra strategia:

- $diff_czt$: valore medio delle differenze tra il N campioni (S_n) di due spettri a bassa frequenza della corrente, misurati in due finestre di osservazione successive.

$$diff_czt = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |S_{n_T}(k) - S_{n_T}(k-1)|.$$

Figura 32 Formula parametro Diff_CZT

- $diff_II_arm$, $diff_IV_arm$, and $diff_VI_arm$: ovvero la differenza tra i valori di picco delle rispettive armoniche (seconda, quarta, sesta) al passo k ed al passo $k-1$.

$$\begin{aligned} diff_IIarm &= \frac{\left| \max \left[S_{n_T(k)} \right]_{n(f_{2_min})}^{n(f_{2_max})} - \max \left[S_{n_T(k-1)} \right]_{n(f_{2_min})}^{n(f_{2_max})} \right|}{\max \left[S_{n_T(k-1)} \right]_{n(f_{2_min})}^{n(f_{2_max})}} \cdot 100 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} diff_IVarm &= \frac{\left| \max \left[S_{n_T(k)} \right]_{n(f_{4_min})}^{n(f_{4_max})} - \max \left[S_{n_T(k-1)} \right]_{n(f_{4_min})}^{n(f_{4_max})} \right|}{\max \left[S_{n_T(k-1)} \right]_{n(f_{4_min})}^{n(f_{4_max})}} \cdot 100 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} diff_VIarm &= \frac{\left| \max \left[S_{n_T(k)} \right]_{n(f_{6_min})}^{n(f_{6_max})} - \max \left[S_{n_T(k-1)} \right]_{n(f_{6_min})}^{n(f_{6_max})} \right|}{\max \left[S_{n_T(k-1)} \right]_{n(f_{6_min})}^{n(f_{6_max})}} \cdot 100. \end{aligned}$$

Figura 33 Formule parametri sulle armoniche pari

- NF: Noise floor, valutato come valore medio del N' campioni di spettro di corrente, che si ottengono senza considerare i campioni dei lobi di spettro di frequenze armoniche sia dispari che pari (che possono essere presenti sia in condizioni di arco che di non arco), è dato da:

$$NF = \frac{1}{N'} \sum_{n \in N} S_{n_T(n)}$$

- diff_i: Il valore medio della differenza tra il N campioni di corrente acquisiti in due finestre di osservazione successive.

$$diff_i = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |i_{n_T(k)} - i_{n_T(k-1)}|.$$

Figura 34 Formula Diff_i

Passiamo ora alla strategia vera e propria: è stato dimostrato che il comportamento dei suddetti indicatori è sintomatico del verificarsi di condizioni di arco. Ad esempio, nella transizione in cui si passa dalle condizioni normali a quelle che si verificano a causa dell'arco, il noise floor aumenta e le armoniche (seconda, quarta e sesta) sorgono (generalmente sono assenti per la maggior parte dei carichi); la corrente non è stazionaria, le sue caratteristiche presentano variazioni significative nelle successive finestre di

osservazione; inoltre, il RMS (Root Mean Square) della corrente diminuisce a causa della caduta di tensione ai capi dell'arco.

Nel caso di un carico resistivo semplice, tali indicatori risultano accurati al 100%; ma sfortunatamente, in presenza di carichi mascheranti, le caratteristiche dell'arco sono parzialmente nascoste da condizioni particolari dipendenti dal carico stesso, come la presenza di armoniche oltre la fondamentale durante il normale funzionamento del dispositivo. In tali casi, le condizioni dell'arco possono essere meglio rilevate mediante il monitoraggio simultaneo di più indicatori confrontati in finestre di osservazione successive.

A grandi linee, questa strategia si basa sul monitoraggio continuo degli indicatori presentati che, se opportunamente osservati in “n” finestre di osservazione successive e confrontati con soglie e relativi limiti di variazione daranno un'ottima efficacia di rilevamento. I valori delle soglie vengono aggiornati in funzione delle effettive condizioni operative, che possono variare nel tempo, a seconda delle condizioni di carico (ad esempio, nelle unità abitative, quando gli apparecchi sono spenti / accesi).

Nella figura seguente riportiamo il diagramma di flusso della strategia che ora verrà spiegato nel dettaglio

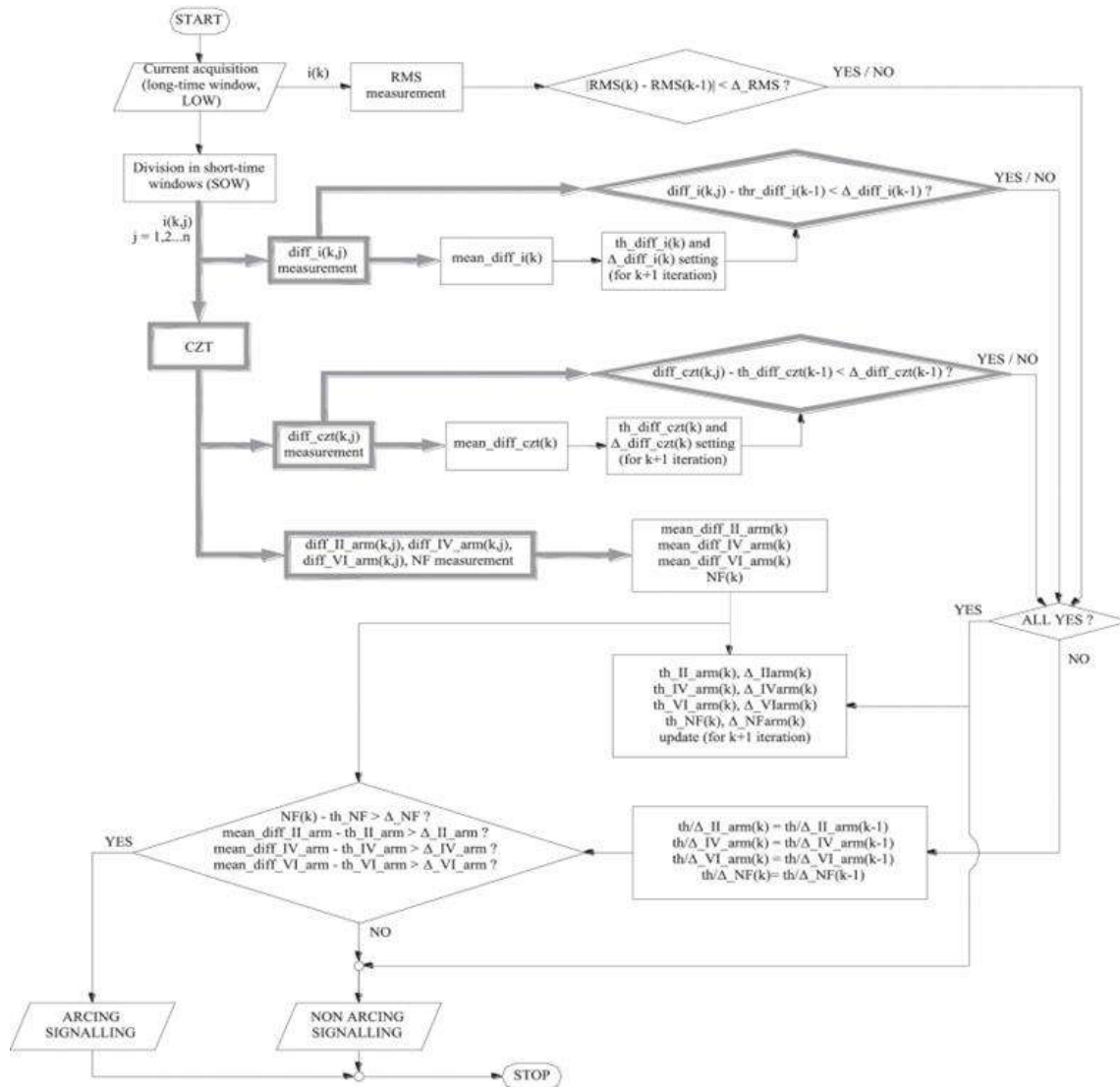


Figura 35 Diagramma di flusso funzionamento strategia

Il metodo si avvale di due finestre di osservazione, una breve ed una lunga, per la misurazione degli indicatori, ovvero: root mean square, la differenza nei campioni di ingresso in finestre successive, la differenza della CZT dei campioni in finestre successive, il noise floor e l'evidenza delle armoniche II, IV e VI.

La finestra breve SOW (short observation window) nel nostro caso ha una durata di 80 ms e la finestra lunga LOW (long observation window) la prendiamo come un multiplo intero della SOW nello specifico in questa trattazione $LOW=5 \cdot SOW$ ovvero 400 ms.

Nel diagramma di flusso in alto possiamo distinguere le linee sottili da quelle spesse che indicano rispettivamente le operazioni delle finestre LOW e SOW.

Per ogni finestra di osservazione lunga, vengono effettuate misurazioni (una per ogni SOW) ed il valore medio delle “ n ” misure viene utilizzato per fissare le soglie (Th) e Δ (limiti di variazione o tolleranze); in questo modo, th (soglie) e Δ sono determinati dinamicamente in funzione dei valori medi misurati per ciascun indicatore. In ogni LOW, l'aggiornamento dei valori di th e Δ dipende dai risultati dei confronti tra gli indicatori attuali e le relative soglie, determinati durante la precedente LOW ovvero se nel blocco “all yes” anche uno dei parametri di ingresso (RMS, $diff_i$ e $diff_czt$) non dovesse essere rispettato non si passerà all'aggiornamento delle soglie e rispettive tolleranze ma si passerà ad analizzare ulteriori parametri per verificare se ci sia veramente arco oppure no.

Dunque, per ogni LOW, dopo l'acquisizione dei campioni, viene misurato l'RMS (per la LOW stessa) poi vengono calcolati gli altri indicatori per ogni SOW.

Si effettua dunque una prima serie di confronti, che coinvolge RMS, $diff_i$ e $diff_czt$. Per $diff_i$ e $diff_czt$, vengono calcolati i valori medi delle misurazioni in ciascuna SOW.

I relativi valori di th e Δ sono calcolati in funzione dei suddetti valori medi e vengono memorizzati per l'iterazione successiva (il loro aggiornamento dipende dai risultati del confronto tra RMS, $diff_i(k, j)$, e $diff_czt(k, j)$ e le relative soglie).

Andando più in dettaglio i valori di th e Δ dell'iterazione precedente vengono aggiornati se e solo se i parametri non superano il delta impostato (ovvero condizione in cui si verifica un arco) altrimenti resteranno ai valori precedenti che indicano la condizione di assenza di arco successivamente si esegue un altro giro di misure e se di nuovo i valori risultano alterati da un arco elettrico allora viene ufficialmente segnalato e si agisce di conseguenza.

Può venire spontanea la domanda: ma al primo giro non avendo i dati degli indicatori del giro precedente come posso fare funzionare l'algoritmo? Per la prima iterazione, th e Δ sono impostati su valori predefiniti che ci evitano di avere una conoscenza a priori della rete con cui ci stiamo interfacciando.

Al fine di potere raggiungere l'obiettivo prefissato di far funzionare la strategia in modalità real-time senza mai perdere il sincronismo con la rete elettrica, a cui sarà connesso il dispositivo di rilevamento, dobbiamo fare in modo che ogni giro della strategia duri sempre meno della velocità alla quale stiamo prendendo i campioni.

Supponendo di campionare alla velocità di 10 kSps e supponendo di volere almeno 4 periodi interi di segnale in ingresso per ogni SOW e sapendo che il segnale di ingresso è sicuramente a 50Hz otteniamo che tutta la strategia dovrà essere eseguita in meno di 80 ms (avendo che un periodo di segnale dura 20 ms se ne volessimo considerare 4 arriveremmo ad 80 ms).

Se la strategia dovesse impiegare più di 80 ms sicuramente perderemmo dei campioni di ingresso, rischiando di compromettere la possibilità di identificare l'arco qualora si manifestasse.

Il campionamento stesso degli 800 campioni ogni finestra breve verrà eseguito anche durante l'esecuzione dell'algoritmo contribuendo così anch'essi al computo del tempo totale dell'esecuzione della strategia.

Fatta questa premessa addentriamoci un po' nell'analisi matematica di alcune parti dell'algoritmo.

3.1.1 Analisi CZT

Analizzeremo la funzione più onerosa dal punto di vista computazionale ovvero la CZT che sarà confrontata con la FFT anch'essa utilizzata nella strategia per il calcolo del noise floor. Verrà spiegato il modo in cui l'algoritmo è stato scritto per essere più facilmente implementato su MCU.

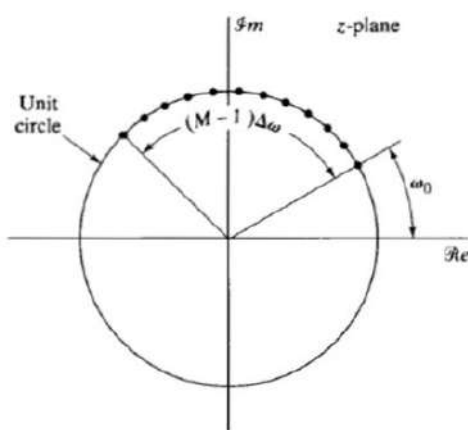


Figura 36 cerchio goniometrico

La CZT è un algoritmo che, a differenza della FFT, prevede l'utilizzo di una porzione del cerchio goniometrico (anziché tutto). Deriva dalla DFT e risulta efficace per diverse applicazioni.

Presa in considerazione una sequenza di campioni di ingresso $x[n]$ composta da N elementi, e $X(e^{j\omega})$ la sua trasformata di Fourier.

Supponiamo di considerare M elementi fra gli $X(e^{j\omega})$ i quali sono equispaziati in radianti nel cerchio goniometrico di raggio unitario, ovvero Ogni punto sul cerchio è equidistante dal successivo. A tale proposito occorre fare

una precisazione, prima di affrontare i calcoli che ci porteranno all'espressione finale, in cui si evidenzia come i punti distanti $\Delta\omega$ giacciono tutti sul cerchio goniometrico di raggio unitario. In realtà nell'algoritmo CZT non è necessario che i punti si trovino sul cerchio: a seconda del tipo di analisi da svolgere, può risultare utile scegliere un percorso differente, ad esempio di tipo “a spirale”, come illustrato nella figura seguente.

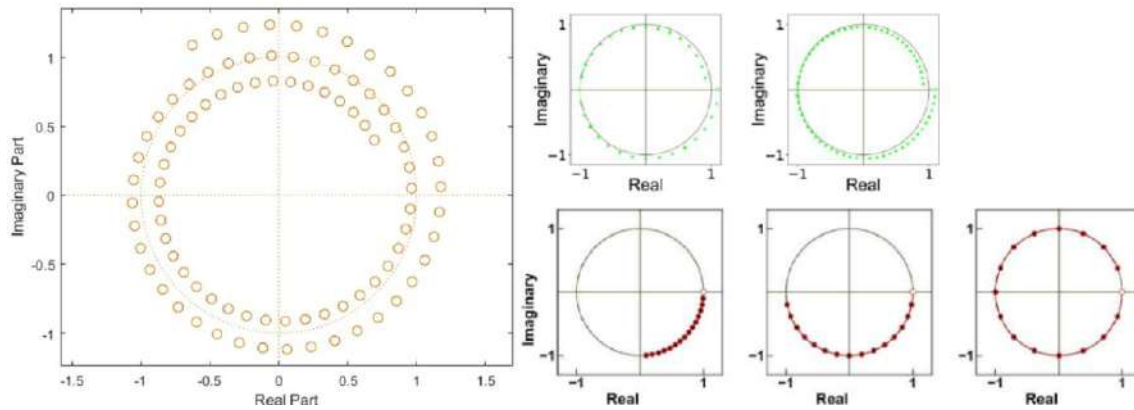


Figura 37 approfondimento CZT

3.1.2 Confronto CZT ed FFT

Normalmente per tenere conto della posizione iniziale sul cerchio goniometrico, si aggiunge un termine $A = A_0 e^{j\theta_0}$ che sarà posto pari a 1 in quanto partiremo dal punto di coordinate (1;0) sul piano complesso.

Definiamo inoltre

$$\omega_k = \omega_0 + k\Delta\omega \text{ (con } k = 0, 1, \dots, M - 1)$$

Dove ω_0 è la frequenza iniziale e $\Delta\omega$ è l'incremento scelto arbitrariamente. Nel caso della DFT, $\omega_0=0$, $M = N$, $\Delta\omega=2\pi/N$.

Scriviamo la trasformata di Fourier come:

$$X(e^{j\omega_k}) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\omega_k n}$$

Definiamo W che caratterizzerà il percorso della trasformata come:

$$W = e^{-j\Delta\omega}$$

Se volessimo ottenere un percorso di raggio variabile (a spirale ad esempio) riscriveremmo la formula in questo mod: $W = W_0 e^{-j\Delta\omega}$, supponendo quindi modulo di W diverso da 1.

Scriviamo infine la CZT completa:

$$(e^{j\omega_k}) = \left(\sum_{n=0}^{N-1} g[n] W^{-(n-k)^2/2} \right) W^{k^2/2}$$

In cui $g[n] = x[n] e^{-j\omega_0 n} W^{n^2/2}$.

Possiamo notare come la CZT corrisponda alla convoluzione tra i campioni di $g[n]$ ed i vari $W^{-(n-k)^2/2}$; il risultato di tale convoluzione verrà successivamente moltiplicato per i fattori $W^{k^2/2}$.

Dopo questa premessa, che introduce la matematica alla base della trasformata, è utile svolgere un'analisi qualitativa delle sue potenzialità.

Analogamente alla DFT (o più generalmente FFT) la CZT permette di passare dal dominio del tempo al dominio della frequenza e viene anche utilizzata per fare l'analisi spettrale di un segnale, analizzandone armoniche e toni. A differenza della DFT, tuttavia, la CZT ha una risoluzione regolabile ed in generale più alta, e permette inoltre di impostare a piacere la larghezza di banda da analizzare.

Per chiarire meglio le differenze tra i due algoritmi, consideriamo un esempio pratico che mostri il loro comportamento nelle medesime condizioni.

La Fast Fourier Transform come sappiamo analizza un range di frequenza costante ed uguale all'intervallo che intercorre tra 0Hz e la frequenza di campionamento con una distanza sempre uguale tra due campioni successivi con una risoluzione risultante di $(1/TW)$.

Dunque, la domanda da porsi è: cosa accadrebbe se nel segnale di ingresso che stiamo analizzando ci fossero due armoniche abbastanza vicine tra loro?

La risposta è che si correrebbe il rischio di non distinguerle affatto, visualizzando un unico picco a causa della risoluzione non adeguata, come possiamo vedere in figura sotto:

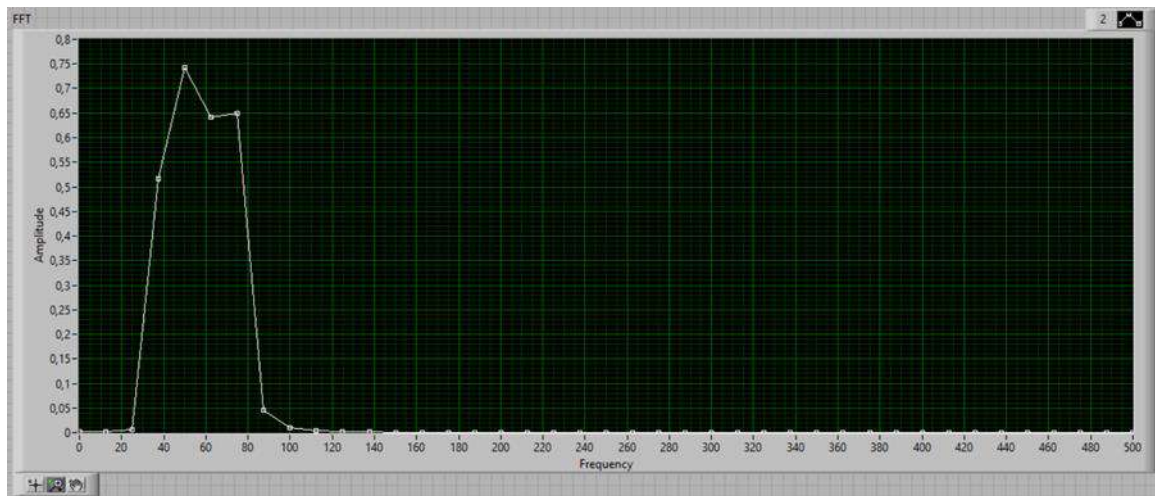


Figura 38 FFT segnale con armoniche vicine

L'unico modo che abbiamo nella FFT per aumentare la risoluzione è aumentare il numero di punti del segnale di partenza cosa che non sempre è possibile o per mancanza di dati, di hardware (RAM) o anche nel caso di un segnale molto veloce ed aleatorio (come nel caso appunto di utilizzo in un algoritmo utilizzato per l'identificazione dell'arco fault).

Proprio qua la CZT viene ad essere uno strumento molto potente; infatti, nella CZT avendo la possibilità di restringere la banda da osservare, possiamo aumentare notevolmente la risoluzione anche mantenendo costante il numero di campioni in nostro possesso.

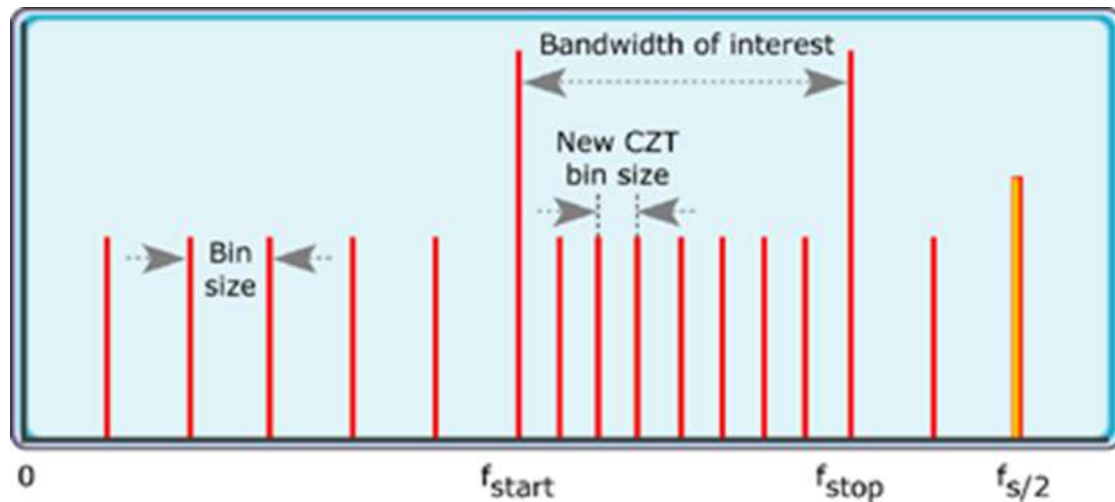


Figura 39 illustrazione CZT

Dunque, possiamo dire che a parità di punti campionati grazie alla CZT possiamo ottenere una risoluzione spettrale di gran lunga migliore potendo così discriminare agevolmente anche righe spettrali molto vicine tra loro.

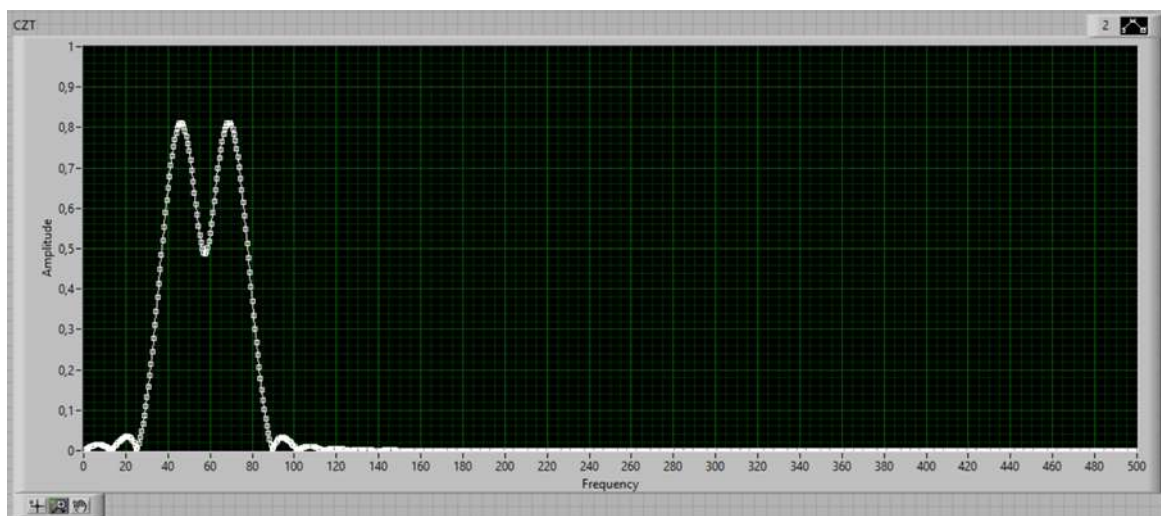


Figura 40 CZT segnale con armoniche vicine

Come mostrato nella figura precedente, in questo caso le frequenze vengono individuate correttamente a differenza di quanto avviene con la FFT, che in uscita restituiva un solo lobo.

Consideriamo ora un esempio numerico: supponendo una frequenza di campionamento di 5kSps avendo 2048 punti otterremo:

- Per la FFT $\frac{5 \cdot 10^3 \text{Hz}}{2048} = 2.44 \text{Hz}$
- Per la CZT $\frac{500 \text{Hz}}{2048} = 0,244 \text{H}$

È quindi evidente, anche dal punto di vista quantitativo, la notevole differenza tra i due algoritmi.

Una volta chiarita la differenza in termini di risoluzione, è opportuno trarre alcune conclusioni riguardo l'impatto che tali algoritmi hanno sul codice. mentre la FFT presenta un costo computazionale di: $N \log_2 N$, la CZT invece, ha un costo computazionale di N^2 .

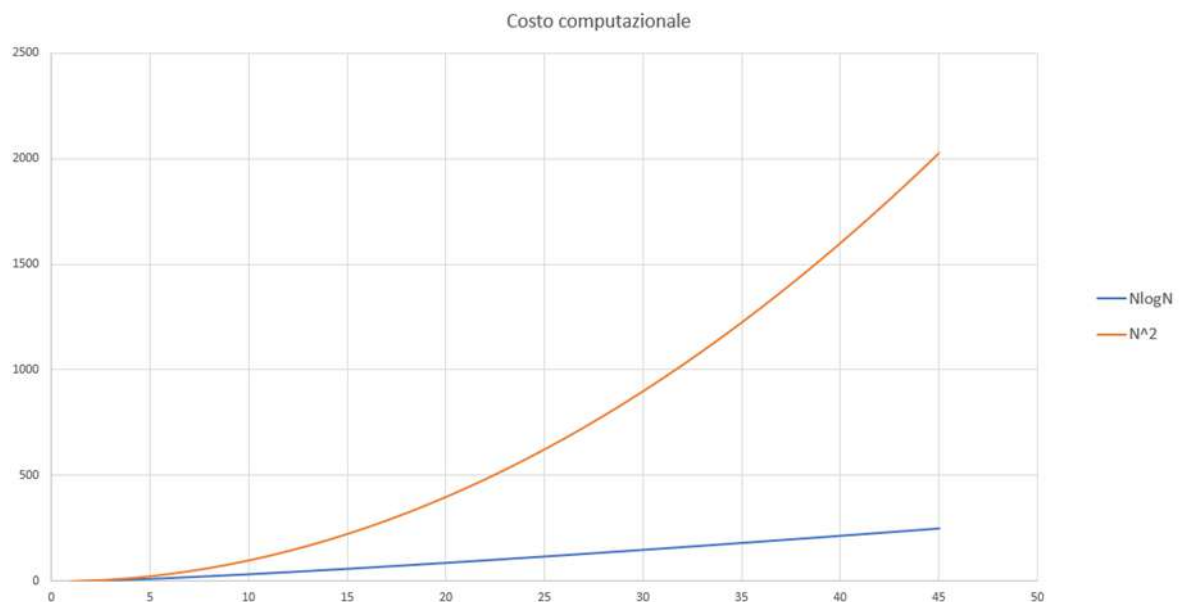


Figura 41 confronto complessità computazionali

Come evidenziato dalla figura soprastante, il costo computazionale è il vero e proprio “tallone di Achille” della CZT che all’aumentare del numero di campioni diventa quasi proibitiva in molte applicazioni soprattutto in termini di tempo di esecuzione.

La corretta implementazione della CZT ha portato via molto tempo nello sviluppo di questo progetto mostrando non poche difficoltà dal punto di vista dell’ottimizzazione.

In conclusione, relativamente al costo computazionale, si può osservare che gli algoritmi utilizzati per il calcolo della media e del valore RMS hanno complessità pari a N . Pertanto,

la parte più onerosa in termini di tempo sarà quella legata esclusivamente alla parte di analisi armonica.

$$x_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

Figura 42 formula RMS

Dunque, il codice finale avrà come costo computazionale N^2 essendo la CZT la funzione computazionalmente più onerosa.

3.2 Requisiti Hardware ed MCU scelto

Dopo aver analizzato gli algoritmi CZT e FFT e identificato i loro limiti, è necessario definire i requisiti hardware per l'esecuzione in real-time. L'intero processo deve essere completato entro 80 ms per evitare la perdita di campioni. Le risorse critiche da considerare sono la memoria RAM e la frequenza di clock, che nei microcontrollori rappresentano i principali vincoli per l'implementazione della strategia online.

La memoria RAM (Random Access Memory), componente di memoria volatile e ad alta velocità, è fondamentale poiché ospita tutti i campioni in ingresso e le relative

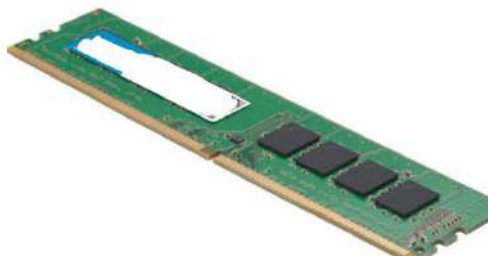


Figura 43 memoria RAM

elaborazioni. Nel caso in esame, considerando 4000 campioni (finestra lunga) in virgola mobile (4 byte ciascuno) e le successive elaborazioni (RMS, CZT, differenze e variabili intermedie), il fabbisogno complessivo risulta di circa 108 kB.

Tenendo conto anche dei dati relativi al giro precedente e dei vettori ausiliari per l'ottimizzazione della CZT, la memoria necessaria è stimata in almeno 128 kB di RAM.

Per quanto riguarda la frequenza di clock, regolata dal componente chiamato oscillatore, deve essere sufficientemente elevata da consentire l'esecuzione dell'algoritmo entro 80



Figura 44 oscillatori

ms. Considerando la CZT con $N=800$, il costo computazionale è pari a circa 640.000 moltiplicazioni, che corrispondono a 8,32 milioni di cicli macchina, basandoci sulla tabella nella figura sotto. Per completare tali operazioni in 50 ms è necessaria una frequenza di clock superiore a 160 MHz, lasciando i restanti 30 ms alle

elaborazioni meno onerose. Questa stima consente di orientare la scelta verso microcontrollori con le specifiche hardware adeguate.

Operation	Description	Assembler	Cycle
Absolute value	of float	VABS.F32	1
Negate	float	VNEG.F32	1
	and multiply float	VNMUL.F32	1
Addition	floating point	VADD.F32	1
Subtract	float	VSUB.F32	1
	float	VMUL.F32	1
	then accumulate float	VMLA.F32	3
	then subtract float	VMLS.F32	3
	then accumulate then negate float	VNMLA.F32	3
	the subtract the negate float	VNMLS.F32	3
	then accumulate float	VFMA.F32	3
	then subtract float	VFMS.F32	3
	then accumulate then negate float	VFNMA.F32	3
	then subtract then negate float	VFNMS.F32	3
Divide	float	VDIV.F32	14
Square-root	of float	VSQRT.F32	14

Figura 45 tabella costo operazioni espresso in cicli macchina

Per l'implementazione della strategia è infine necessario disporre di alcune periferiche fondamentali: un ADC per l'acquisizione dei segnali e timer per la gestione accurata delle routine.

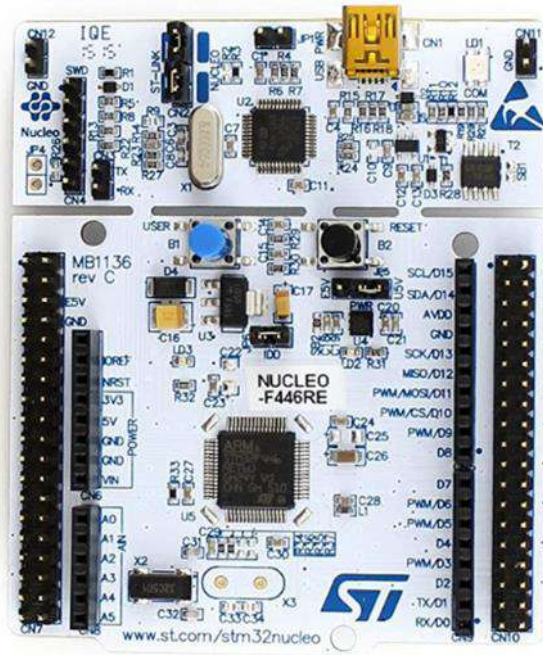


Figura 46 foto scheda nucleo

bipolare.

Un vantaggio rilevante della scheda è il supporto alle istruzioni DSP, che consentono un'elaborazione rapida ed efficiente dei segnali campionati, riducendo tempi di esecuzione e consumi. L'integrazione del software pack ST permette di sfruttare tali istruzioni in modo diretto. Inoltre, la presenza del DMA, sebbene non approfondita in questa trattazione, offre margini di miglioramento futuri nella velocità di campionamento.

La Nucleo-F446RE risulta quindi pienamente adeguata ai requisiti di memoria, velocità e periferiche necessari per il corretto funzionamento della strategia di rilevamento proposta.

Al fine di rispettare tutti i requisiti richiesti la scheda scelta è la ST Nucleo-F446RE, basata su ARM Cortex-M4 a 32 bit con architettura RISC, che soddisfa i requisiti hardware stimati: frequenza di clock fino a 180 MHz, 128 kB di SRAM, 512 kB di flash, DSP integrato, più timer a 16/32 bit e tre ADC a 12 bit.

La tensione di I/O è compresa tra 0 e 3.3 V, con pin a 5 V disponibili per alimentazioni esterne. L'ADC, opportunamente scalato, converte i segnali di corrente in campioni a 12 bit, poi riconvertiti nel segnale originale

3.3 Software e Stesura Del Codice

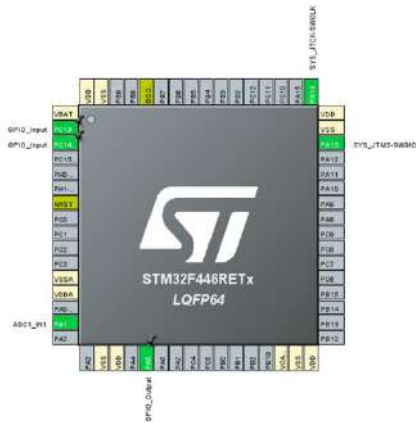


Figura 47 configurazione periferiche cube mx

Per lo sviluppo del progetto è stato utilizzato STM32CubeIDE, ambiente raccomandato da STMicroelectronics per la programmazione della scheda NUCLEO-F446RE. Questo IDE consente, tramite l'interfaccia grafica STM32CubeMX, di configurare in modo semplice le periferiche senza dover agire direttamente sui registri.

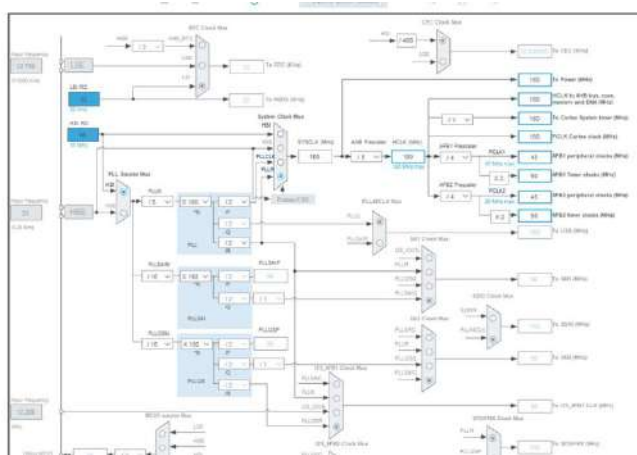


Figura 48 configurazione clock cube mx

La prima operazione è stata la corretta impostazione del clock di sistema, portando l'HCLK a 180 MHz (massimo consentito). Questo valore influisce sui parametri a cascata, in particolare sulla frequenza APB2 (90 MHz), fondamentale per il timer destinato a generare gli interrupt per l'ADC.

È stata quindi abilitata la comunicazione seriale (porta USB) per la stampa e la verifica dei risultati, che comporta l'attivazione automatica dei pin PA14 e PA13 e la generazione del codice necessario al funzionamento.

Per il timer, è stato configurato il Timer 2 con sorgente APB2 (90 MHz). Per ottenere una frequenza di interruzione di 10 kHz è stata utilizzata la formula:

$$f_{INT} = \frac{f_{APB2}/(PRESCALER+1)}{TIM_ARR+1}$$

impostando prescaler = 89 e counter-period (TIM_ARR) = 99. Inoltre, è stato selezionato il trigger event = update event, in modo da generare un evento ogni volta che scatta un'interruzione, necessario per sincronizzare l'ADC.

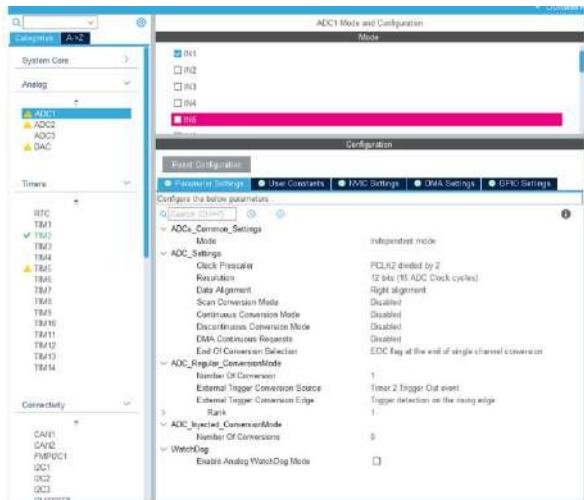


Figura 49 configurazione ADC ST ide

Per quanto riguarda l'ADC, è stato utilizzato l'ADC1 a 12 bit, con come trigger esterno l'evento generato dal Timer 2. Ogni volta che il timer genera un evento, l'ADC attiva un interrupt per il campionamento del segnale. L'attivazione dell'ADC abilita automaticamente il pin PA1 (A1 della scheda) come ingresso analogico.

Sono stati inoltre inizializzati altri pin:

PA5 per fornire un output in caso di rilevamento di arco e due pin aggiuntivi come riserva per possibili esigenze future.

Infine, sono state importate le librerie DSP fornite da ST tramite il pacchetto X-CUBE-ALGOBUILD, che abilita il supporto DSP e include automaticamente tutte le funzioni matematiche necessarie.

Finita la configurazione procediamo ad un'analisi del codice vero e proprio. Dopo

```
19 /* Includes -----
20 #include "main.h"
21
22 /* Private includes -----
23 /* USER CODE BEGIN Includes */
24 #define ARM_MATH_CM4
25 #include "stdio.h"
26 #include "arm_math.h"
```

Figura 50 librerie in uso

l'inizializzazione delle periferiche, il primo passo consiste nell'includere le librerie necessarie. La main.h viene inizializzata automaticamente tramite STM32CubeMX. La scheda supporta le funzioni DSP, fondamentali per la strategia in quanto permettono di operare direttamente sui vettori, evitando cicli manuali

e aumentando l'efficienza rispetto alle normali funzioni C.

Per utilizzare correttamente le librerie DSP, è necessario definire l'architettura in uso

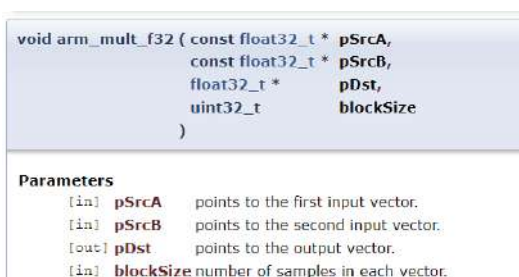


Figura 51 esempio funzione cmsis

(Cortex-M4 per la F446RE) e includere arm_math.h, parte del framework CMSIS (Common Microcontroller Software Interface Standard), che fornisce funzioni generiche ottimizzate per varie architetture ARM. Un esempio tipico è la moltiplicazione elemento-

per-elemento tra vettori, eseguibile con una singola funzione della libreria senza ricorrere a cicli for.

Oltre ad `arm_math.h`, vengono incluse `stdio.h` e `math.h`. La funzione `printf()` non funziona automaticamente; per poter stampare sul monitor seriale è necessario abilitare il SWV (serial wire viewer) e inserire righe di codice dedicate.

```
676 void HAL_ADC_ConvCpltCallback(ADC_HandleTypeDef* hadc)
677 {
678
679     HAL_ADC_PollForConversion(&hadc1, HAL_MAX_DELAY);
680     ingresso[numero_campione]=(HAL_ADC_GetValue(&hadc1)*0.0008)-1.5;
681     if(numero_campione<3999)
682     {
683         numero_campione++;
684     }
685
686     else
687     {
688         numero_campione=0;
689     }
690
691 }
```

Figura 52 routine interrompente campionamento

Dopo aver inizializzato le variabili globali e avviato timer e routine ADC, il programma entra nel ciclo while (1) del main. I campioni vengono acquisiti tramite una routine interrompente dell'ADC, attivata dagli eventi generati dal timer a 10 kHz, garantendo il rispetto della frequenza di campionamento anche durante l'esecuzione di altre istruzioni. La finestra breve (SOW) contiene 800 campioni, raccolti in 80 ms; tutte le istruzioni della strategia devono quindi completarsi entro questo intervallo. In figura possiamo vedere la struttura della routine.

La prima fase della strategia è il calcolo della CZT, l'operazione più onerosa computazionalmente, eseguita principalmente tramite funzioni DSP di `arm_math.h`, tranne per la conversione in decibel, effettuata con `log10` di `math.h`.

```

-----INIZIA LA CZT-----

arm_copy_f32(&ingresso[800*giro],campioni,N); //PRENDO 800 CAMPIONI DAL BUFFER
arm_mult_f32(HANNING,campioni,INPUTxHANNING,N); //FACCIO HANNING

tao=1; //variabile per misurare il tempo con data-trace

arm_cmplx_mult_real_f32(Cxroyxroy,INPUTxHANNING,stage1,N); //STAGE 1

for (k=0; k<N; k++) // STAGE 2
{
    arm_cmplx_dot_prod_f32(&stage1[0],&esponenziale2_rev2[Nx2-(2*k)],k,&reale1,&immagginaria1);
    arm_cmplx_dot_prod_f32(&stage1[2*k],&esponenziale2[0],(N-k),&reale2,&immagginaria2);
    arm_add_f32(&reale1,&reale2,&stage2[2*k],1);
    arm_add_f32(&immagginaria1,&immagginaria2,&stage2[2*k+1],1);
}

arm_cmplx_mult_cmplx_f32(stage2,Cxroyxroy,stage3,N); //STAGE 3

arm_cmplx_mag_f32(&stage3[0],&CZT[0],N); // CALCOLO CZT FINALE
arm_scale_f32(&CZT[0],0.005,&CZT[0],N);

for (k=0; k<N; k++) //conversione in db nuova
{
    log10(CZT[k]);
}
arm_scale_f32(&CZT[0],20,&CZT[0],N);

```

Figura 53 esecuzione CZT

L'algoritmo segue quattro blocchi come schematizzato sotto:

1. finestrata di Hanning.
2. Moltiplicazione dei campioni per i termini moltiplicativi.
3. Somma dei termini complessi.
4. Moltiplicazione finale, calcolo del modulo dei numeri complessi e conversione in dB ($20 \cdot \log_{10}$).

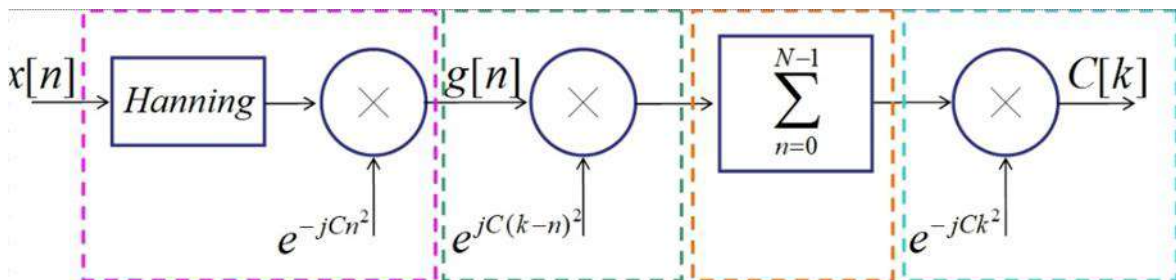


Figura 54 schema a blocchi CZT

Dopo avere eseguito queste operazioni per il calcolo della CZT, si calcolano le differenze tra gli elementi del vettore corrente campionati del giro attuale e quelli del precedente, ne viene preso il valore assoluto e calcolata la media, divenendo uno dei parametri principali basato sulla corrente in ingresso. Operazioni analoghe vengono effettuate anche sul vettore della CZT.

Le informazioni sulle armonie II, IV e VI vengono estratte dalla CZT, poiché la loro presenza indica la manifestazione dell'arco. La posizione delle armoniche nel vettore rimane costante, facilitandone l'estrazione. Questi parametri vengono confrontati tra un giro e quello precedente.

Questo è tutto quello che viene eseguito dalla strategia ogni SOW per quanto riguarda la LOW, ogni cinque giri verranno calcolati:

1. RMS (root mean square), semplificato tramite DSP.
2. Noise floor (NF), calcolato tramite FFT privata dei picchi armonici.

L'ultima parte della strategia ed anche la più importante è quella inerente all'utilizzo di tutti questi dati per potere decretare se ci sia arco o meno.

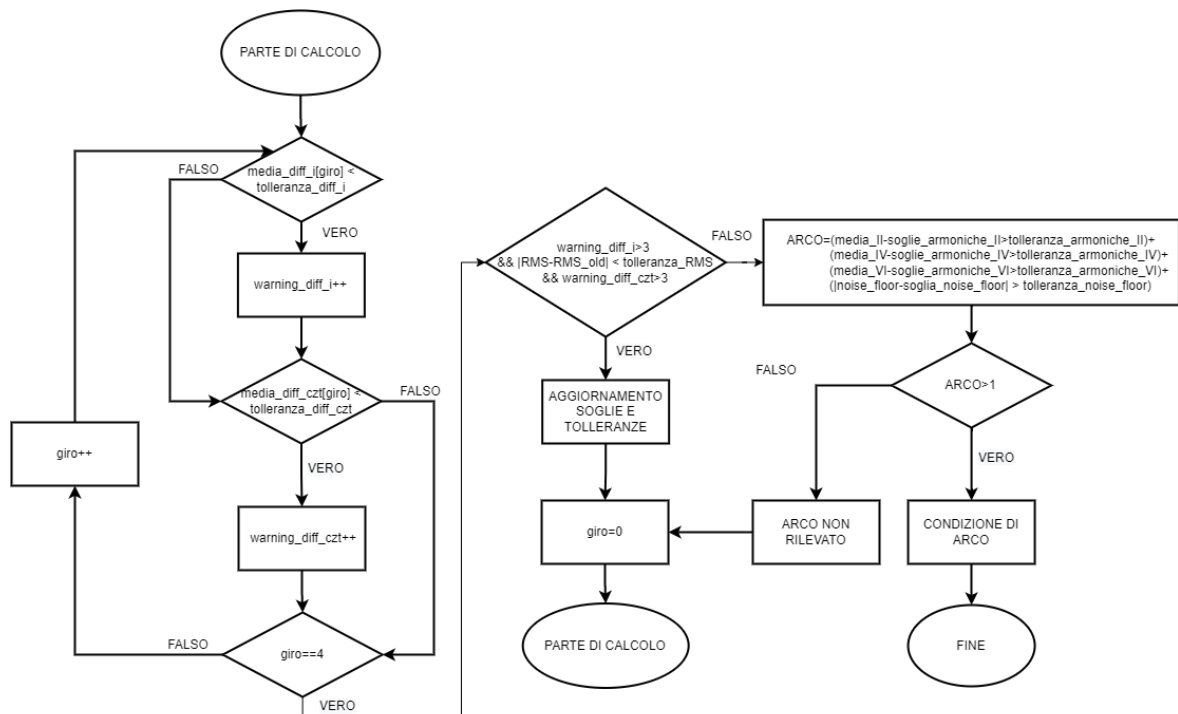


Figura 55 schema a blocchi strategia

La decisione sulla presenza di arco avviene seguendo un diagramma di flusso su cinque giri:

1. **Giri 0-3** – Analisi solo delle differenze tra vettori di corrente e CZT.

2. **Giro 4** – Controllo di tutte le metriche precedenti più RMS; se nessun parametro indica arco, vengono aggiornate le soglie.
3. Se uno o più parametri superano le soglie, si procede al controllo delle armoniche e del noise floor.
4. Se due o più parametri risultano fuori scala, si segnala la presenza di arco tramite un **pin digitale di output**.

Tutte le operazioni principali (CZT, differenze, RMS, NF) vengono eseguite entro i vincoli temporali imposti dalla finestra di campionamento, garantendo il corretto funzionamento della strategia in **real-time**.

3.4 Strumenti e Banco di prova 1

L'obiettivo di questa prima parte del lavoro è stato validare una strategia di rilevamento di *arc fault* di tipo serie in corrente alternata, inizialmente sviluppata in ambiente LabVIEW (dal gruppo misure), su una piattaforma a microcontrollore. A tal fine, il fenomeno è stato riprodotto sperimentalmente mediante un generatore di forma d'onda, alimentato con segnali reali precedentemente acquisiti in laboratorio tramite una scheda NI USB-9239 con frequenza di campionamento di 10 kHz. Tali segnali sono stati quindi inviati al microcontrollore per la validazione della strategia. Nel seguito vengono presentati gli strumenti e i software impiegati, le modalità di utilizzo e i risultati sperimentali ottenuti.

Il banco di prova con cui sono stati acquisiti i segnali d'arco verrà spiegato in seguito nel dettaglio.

Oltre alla già nota ST-Nucleo F466RE vari sono stati gli strumenti utilizzati in questo progetto in particolare:

3.4.1 Generatore di forma d'onda: AFG31152 Tektronix

Per la validazione sperimentale è stato impiegato un generatore d'onda, scelto per la sua



Figura 56 generatore di forma d'onda

capacità di caricare forme d'onda personalizzate precedentemente acquisite, requisito fondamentale per riprodurre fedelmente le condizioni di test. Lo strumento consente il caricamento fino a 132.000 campioni, riprodotti ciclicamente in modalità basic, mentre in modalità advanced permette di

gestire sequenze di fino a 256 forme d'onda diverse.

Il dispositivo offre ampie possibilità di configurazione del segnale: regolazione della

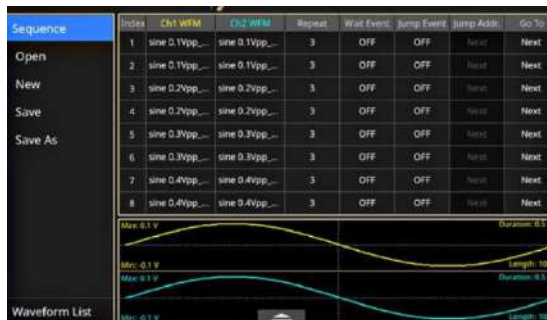


Figura 57 display generatore di forma d'onda

frequenza, offset e ampiezza (compatibili con il range richiesto dal microcontrollore STM32 Nucleo-F446RE, 0–3.3 V), oltre a modalità operative avanzate come Sweep, Burst e modulazioni AM, FM, PM, FSK e PWM. Tra le specifiche principali si annoverano: due canali di uscita, intervallo di ampiezza da 1 mVP-P a 10 VP-P,

frequenza di campionamento fino a 2 GSa/s, risoluzione verticale a 14 bit, protezioni integrate contro sovratensione, sovracorrente e cortocircuito.

Un ulteriore vantaggio è dato dal display da nove pollici con tecnologia InstaView, che consente la visualizzazione in tempo reale del segnale generato senza necessità di oscilloscopio esterno. Le forme d'onda impiegate nei test sono state quelle di corrente campionate in laboratorio secondo le normative di riferimento, con differenti tipologie di carico, al fine di verificare l'affidabilità della strategia in condizioni realistiche.

3.4.2 Oscilloscopio: MSO54 Tektronix

Per l'analisi dei risultati è stato impiegato un oscilloscopio collegato al pin di uscita della scheda a microcontrollore, configurato per rilevare la presenza di arco tramite un segnale

logico alto/basso. Lo strumento dispone di larghezza di banda fino a 2 GHz, quattro canali analogici, risoluzione verticale fino a 16 bit, frequenza di campionamento di 6,25 GS/s e schermo da 15,6". Ogni canale analogico può monitorare anche ingressi digitali, consentendo quindi l'analisi simultanea di segnali logici e analogici; nel caso in esame, non disponendo della sonda dedicata, il segnale digitale della scheda è stato acquisito come un normale segnale analogico.



Figura 58 oscilloscopio utilizzato

L'oscilloscopio integra funzionalità avanzate, tra cui analisi spettrale multicanale, operatori matematici e valutazioni statistiche in tempo reale. Particolarmente utile si è rivelata la trasformata di Fourier per lo studio dei segnali. Infine, così come il generatore d'onda, lo strumento permette il salvataggio dei dati via USB, rendendo possibile un'analisi successiva su PC.

3.4.3 DAQ National Instrument NI6080

Per consentire l'acquisizione simultanea dei segnali sia tramite LabVIEW sia tramite microcontrollore, è stata utilizzata una scheda di acquisizione come interfaccia tra il generatore d'onda e il PC. La scheda campiona il segnale e lo inoltra via USB, permettendo a LabVIEW di eseguire in tempo reale la strategia di arc fault detection.



Figura 59 scheda di acquisizione NI

Le principali caratteristiche includono: quattro ingressi analogici differenziali e otto single-ended, risoluzione di 12 bit (differenziali) e 11 bit (single-ended), frequenza di campionamento massima pari a 10 kS/s, timing resolution di 41,67 ns, range d'ingresso ± 10 V e impedenza di 144 k Ω .

La scheda offre inoltre due uscite analogiche (0–5 V, 12 bit) e la possibilità di acquisire segnali digitali, funzione utile per confrontare in tempo reale la strategia implementata su PC e quella sul microcontrollore.

Nei test sperimentali, il segnale del generatore d'onda è stato acquisito in modalità differenziale, con riferimento a massa.

Tramite il confronto tra l'acquisizione tramite NI ed elaborazione tramite il PC abbiamo potuto validare il funzionamento real time della strategia su microcontrollore. (il codice in LabView non funziona real time. Dopo che l'acquisizione termina si procede all'elaborazione).

3.4.4 Banco di prova iniziale

Il primo test eseguito per verificare le capacità del prototipo è stato eseguito inoltrando alla scheda il segnale acquisito a 24 bit dalla scheda NI 9239 mediante il generatore di forma d'onda. Il test è stato eseguito con due carichi.



Figura 60 banco montato

Il collegamento tra gli strumenti è stato realizzato come mostrato in figura. Dal canale 1 del generatore d'onda il segnale è stato sdoppiato: un ramo inviato all'oscilloscopio, per verificarne la correttezza, e l'altro in ingresso alla scheda NI e al microcontrollore Nucleo. L'oscilloscopio è stato configurato con due sonde: sul canale 1 l'uscita della Nucleo e sul canale 2 l'uscita del generatore, in modo da visualizzare i due segnali sovrapposti e confrontare direttamente il comportamento della strategia.

Entrambe le schede sono state collegate al PC tramite USB (figura 66). Il segnale in ingresso alla scheda NI è stato acquisito in modalità differenziale sul canale A0, il cui positivo è stato contemporaneamente inviato all'ADC della Nucleo. L'uscita digitale della Nucleo è stata monitorata tramite sonda differenziale tra i pin D13 e GND. In questo modo è stato possibile confrontare i risultati ottenuti dal microcontrollore con quelli elaborati da LabVIEW sugli stessi campioni di segnale.

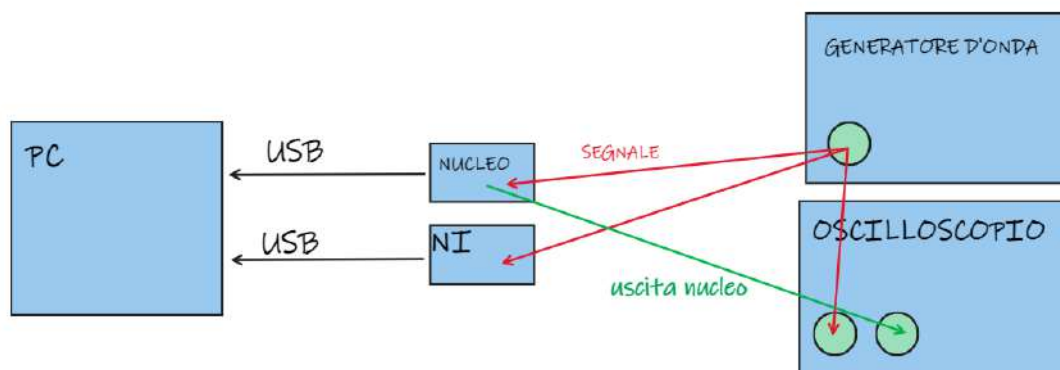


Figura 61 diagramma collegamenti

3.5 Risultati sperimentali primi test

Nella fase conclusiva di questa prima parte del lavoro sono stati analizzati i risultati sperimentali ottenuti confrontando la strategia implementata sul microcontrollore con il riferimento sviluppato in LabVIEW. A tal fine, sono stati utilizzati 13,2 secondi di segnale per due casi rappresentativi: corrente di un carico resistivo e corrente assorbita da un trapano (carico che per sua natura maschera la presenza dell'arco).

Il confronto è stato condotto considerando i principali parametri della strategia e l'output finale, costituito da un array che, ogni 400 ms, riporta una variabile booleana indicante la presenza o meno dell'arco. L'analisi ha riguardato in particolare le armoniche pari (estratte tramite trasformata CZT), il noise floor e il valore RMS, parametri ritenuti fondamentali per caratterizzare il fenomeno a bassa frequenza e aggiornare dinamicamente le soglie decisionali.

Il riferimento in LabVIEW è stato utilizzato per verificare l'accuratezza dei risultati prodotti dalla piattaforma embedded, con attenzione specifica ai valori delle soglie (II, IV e VI armonica) e ai parametri coinvolti nel processo decisionale. Nei paragrafi successivi vengono mostrati i grafici di confronto tra i due ambienti e una valutazione dell'errore assoluto associato a ciascun parametro.

3.5.1 Caso resistivo

Il primo caso analizzato riguarda il carico resistivo, la cui forma d'onda di corrente è riportata nelle due figure successive, rispettivamente in assenza e in presenza di arco.

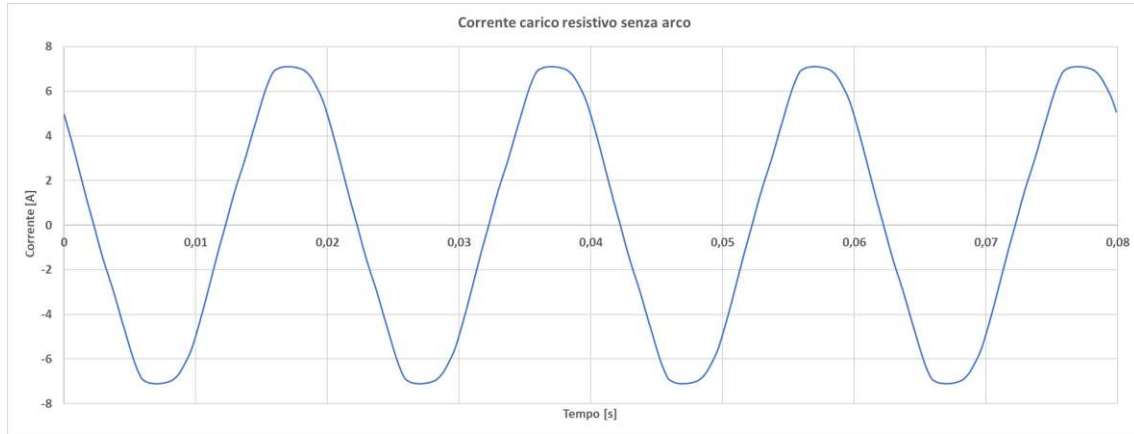


Figura 62 forma d'onda di corrente in assenza di arco

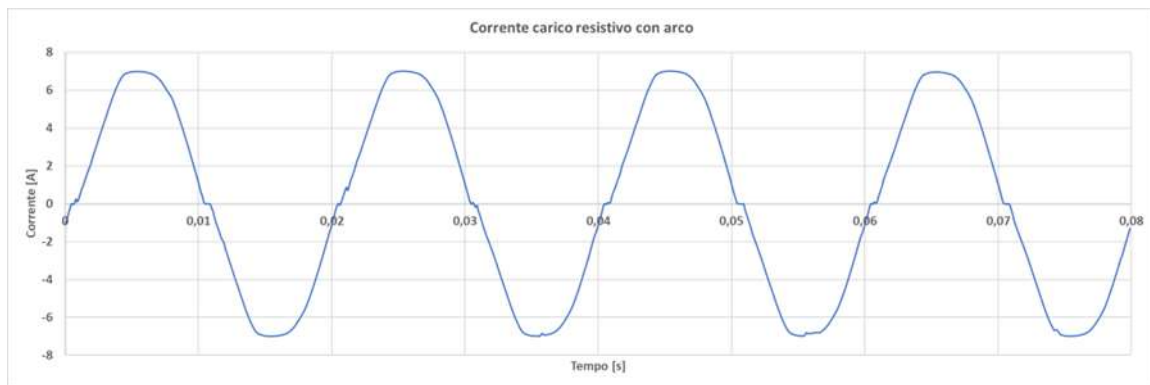


Figura 63 forma d'onda di corrente in presenza di arco

Come atteso, in condizioni nominali la corrente presenta un andamento sinusoidale pressoché ideale, mentre al manifestarsi dell'arco si osservano le tipiche distorsioni descritte nel Capitolo 2.

Nelle successive due figure si mostrano rispettivamente l'andamento della seconda armonica nei due ambienti ed il loro errore relativo percentuale.

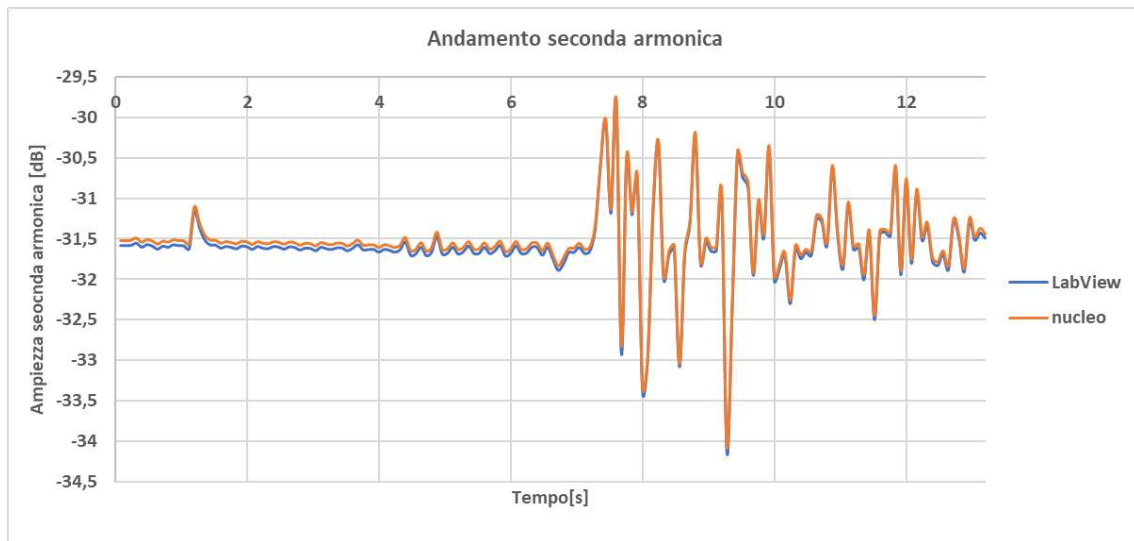


Figura 64 confronto andamento seconda armonica

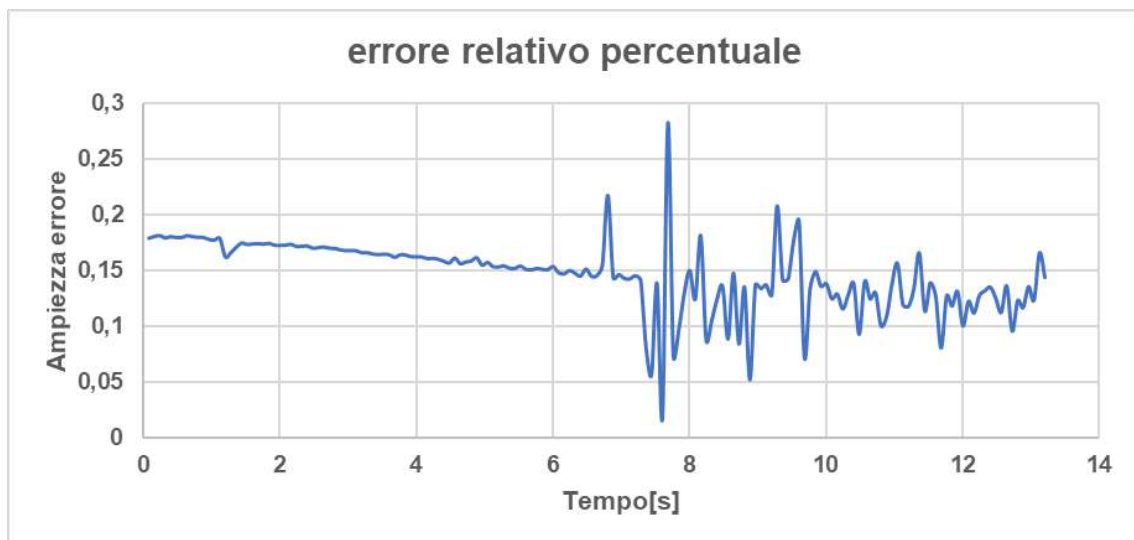


Figura 65 errore relativo percentuale inerente alla seconda armonica

Si evidenzia come l'errore massimo rimanga inferiore allo 0,3%, confermando l'elevata accuratezza della strategia implementata su piattaforma embedded.

Un ulteriore parametro significativo è rappresentato dal noise floor mostrato in figura sotto sempre affiancato dall'errore relativo percentuale commesso dalla scheda a microcontrollore.

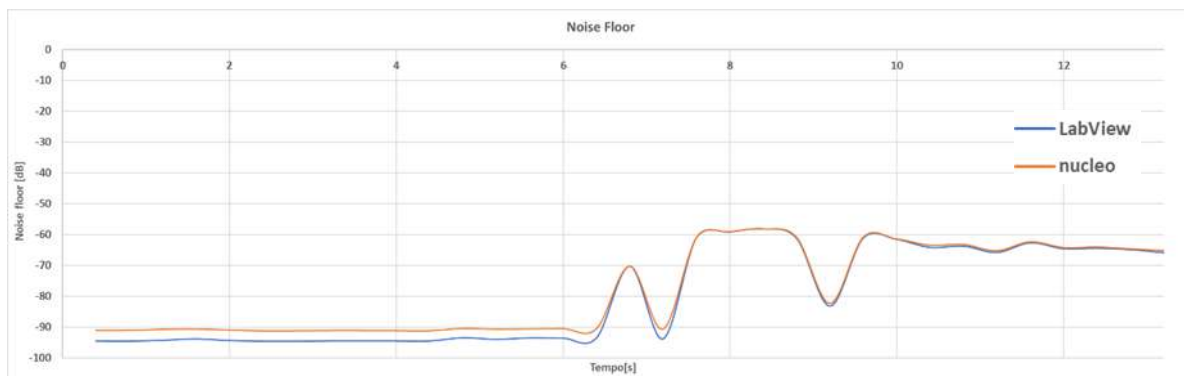


Figura 66 noise floor

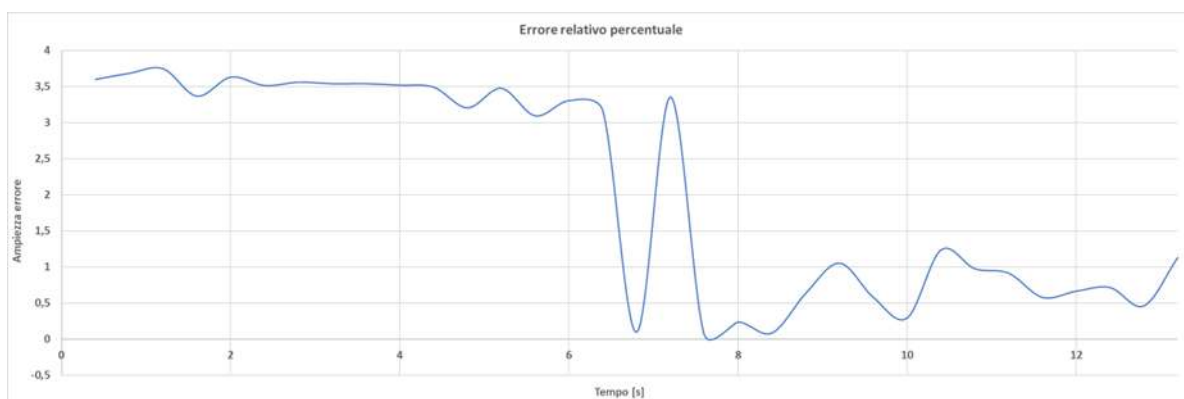


Figura 67 errore relativo percentuale

Nella figura successiva possiamo osservare il confronto tra le uscite dei due sistemi.

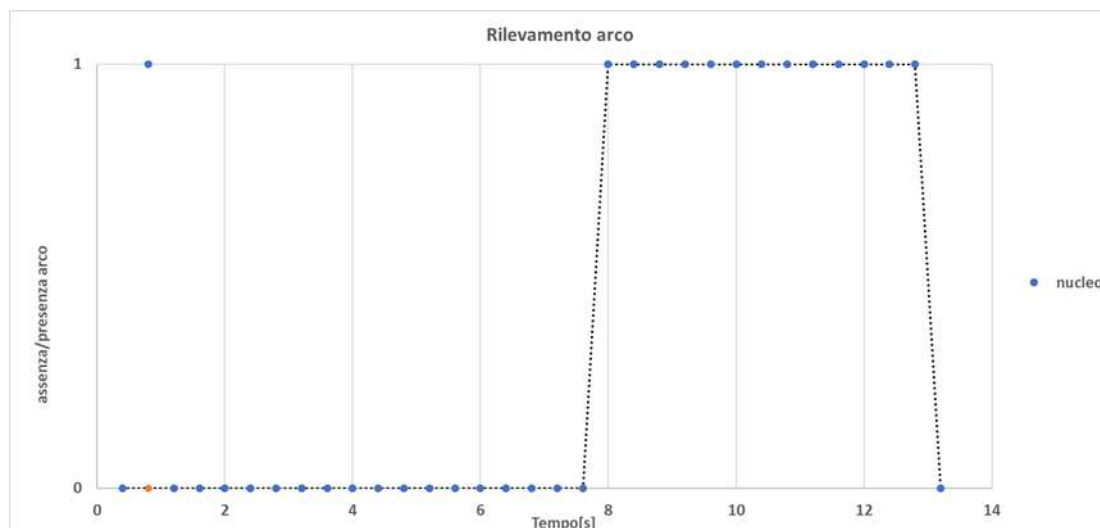


Figura 68 output dei due sistemi

In questo caso si osserva un buon allineamento tra i due ambienti, fatta eccezione per un falso positivo in fase di inizializzazione delle soglie, visibile in figura. Tale fenomeno

non compromette il funzionamento complessivo della strategia, poiché limitato esclusivamente alla fase transitoria iniziale.

Infine, è interessante notare come l'errore relativo associato al *noise floor* tenda a ridursi proprio durante la manifestazione dell'arco, evidenziando la capacità della strategia di seguire in maniera più precisa le variazioni spettrali introdotte dal fenomeno.

3.5.2 Caso carico mascherante, trapano

Si procede ora con l'analisi della forma d'onda di corrente relativa a un trapano, rappresentativo di un carico mascherante.

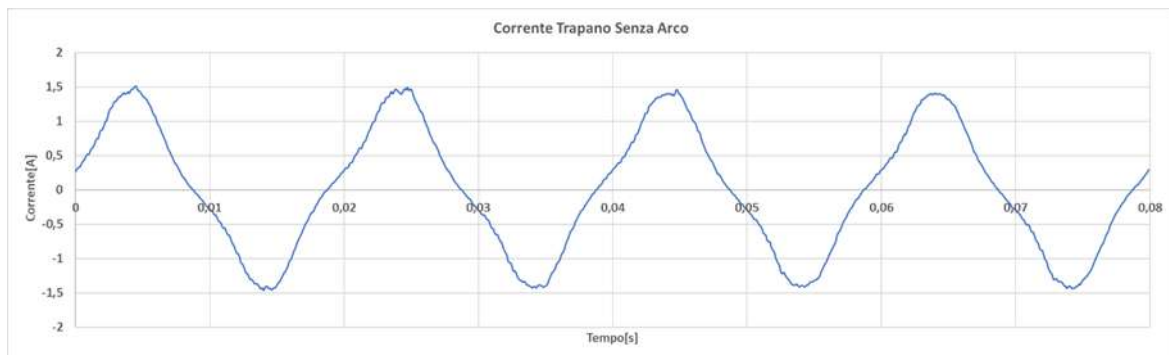


Figura 69 Forma d'onda di corrente in assenza di arco



Figura 70 Forma d'onda di corrente in presenza di arco

È immediatamente evidente come le forme d'onda risultino significativamente distanti da un andamento sinusoidale ideale e come, in tali condizioni, i fenomeni associati alla presenza di arco elettrico si manifestino in maniera più marcata, evidenziandosi in particolare con spalle più accentuate.

Come primo parametro di confronto tra la strategia implementata sul microcontrollore e quella realizzata in ambiente LabVIEW è stata presa in esame la sesta armonica. Tale parametro, considerato rappresentativo della validità dell'algoritmo, mostra come l'errore percentuale tra le due implementazioni rimanga contenuto anche in presenza di un carico non lineare e mascherante.

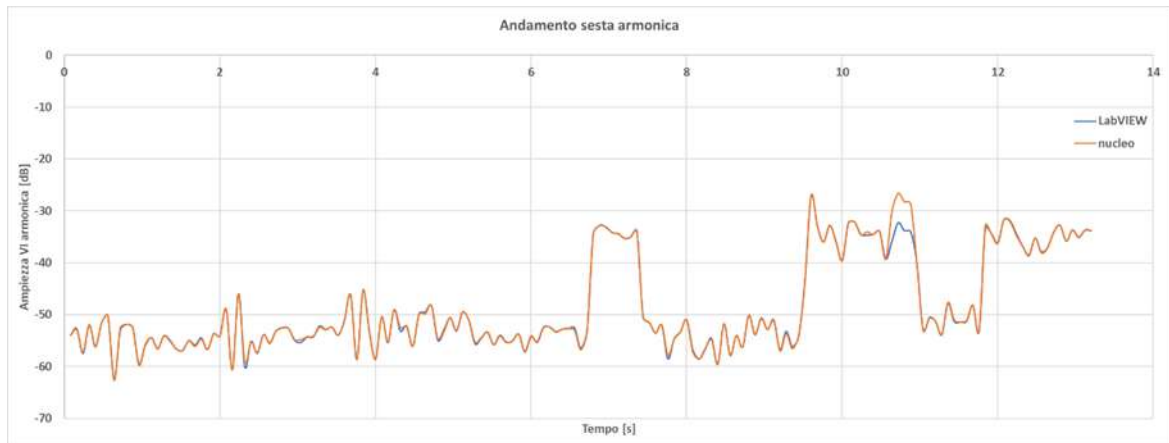


Figura 71 confronto andamento sesta armonica

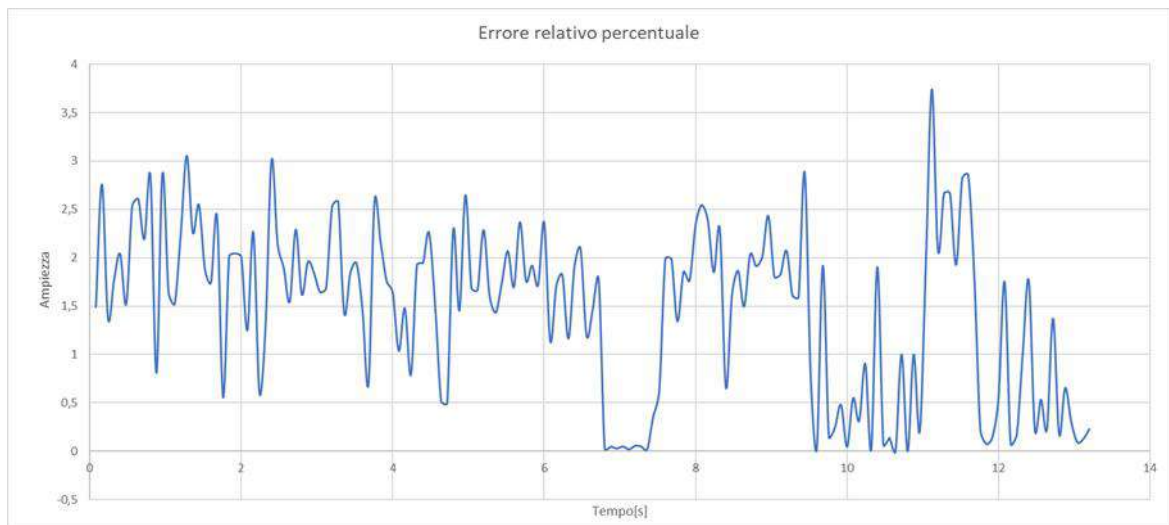


Figura 72 Errore relativo percentuale sul calcolo della sesta armonica tra le due piattaforme

Infine, analogamente a quanto discusso per il carico resistivo, è stato condotto il confronto diretto tra gli output generati dalle due strategie.

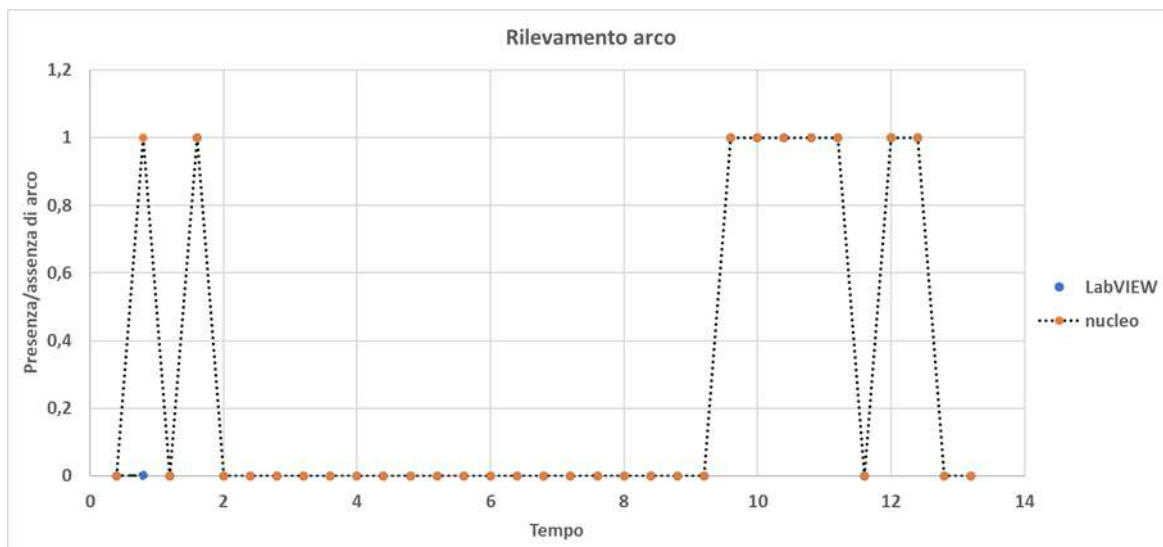


Figura 73 confronto output

Anche in questo caso i risultati confermano che, pur in condizioni più critiche, la strategia implementata su microcontrollore è in grado di rilevare correttamente la presenza di arco elettrico. Ora è necessaria una caratterizzazione dettagliata che possa permetterci di affermare che il dispositivo è robusto e le sue misure siano sempre riproducibili in qualsiasi condizione.

3.6 Caratterizzazione prototipo

Per comprendere al meglio l'efficacia dell'algoritmo è anche stato implementato su un altro modello di scheda microcontrollore nucleo, la STM32-H743ZI2 che possiede un campionatore a 16 bit SAR di gran lunga migliore rispetto a quello della scheda precedente. La scheda in questione ha anche un processore più potente ARM Cortex-M7 a 400 MHz. Dunque, è stato scelto un hardware veramente robusto anche se sempre considerevole a basso costo. lo scopo della continuazione di questo lavoro risiede nella volontà di affermare che il dispositivo è affidabile in qualsiasi condizione di rumore e che ogni misurazione eseguita è sempre ripetibile.

3.6.1 Caratterizzazione ADC

A tal fine è stato allestito un banco di prova con un calibratore Fluke 6100A, un partitore capacitivo Tegam PRT-73 e un generatore Tektronix AFG1062, integrati con un circuito di condizionamento basato su un amplificatore operazionale a basso rumore (AD797). Il circuito permetteva di sfruttare tutta la dinamica dell'ADC ($3,3 V_{pp} + 1,65 V_{DC}$),

fornendo al contempo filtraggio anti-aliasing e disaccoppiamento dei segnali. Il circuito forniva inoltre il filtro anti-aliasing e il disaccoppiamento tra il generatore di segnale e il calibratore, per evitare la circolazione di correnti parassite.

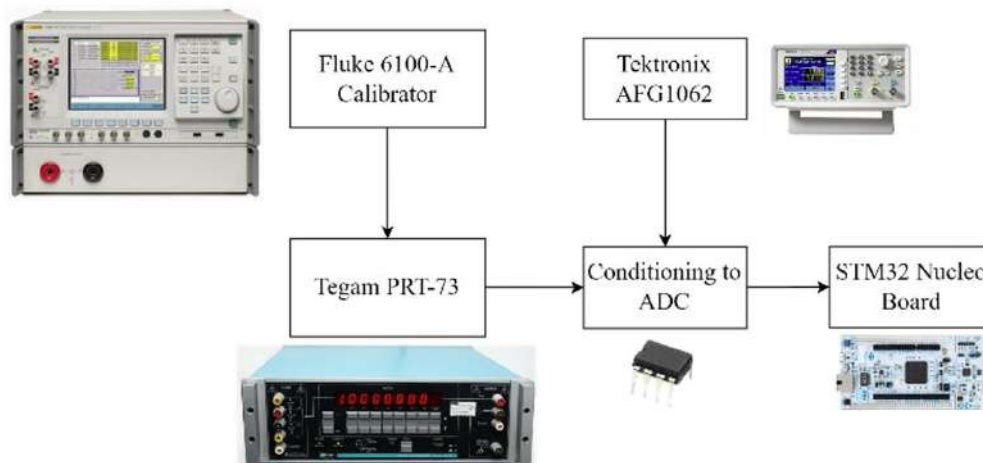


Figura 74 banco di prova per caratterizzare l'ADC della scheda MCU

Il segnale sinusoidale di test (50 Hz) è stato acquisito a 10 kS/s, in condizioni identiche a quelle previste per l'applicazione reale. Sono stati analizzati i parametri dinamici SINAD, THD e SFDR e stimato il numero effettivo di bit (ENOB ≈ 12). I test, ripetuti mille volte, hanno fornito valori medi e deviazioni standard riportati in tabella.

Parameter	Mean value [dB]	Std. Deviation [dB]
THD	-68.9	2.74
SINAD	74.6	0.62
SFDR	63.6	3.87

Figura 75 tabella di caratterizzazione ADC nucleo

Nonostante l'ADC della NUCLEO sia meno performante rispetto a quello che ci si aspettava, i livelli di rumore risultano comunque accettabili: non superiori a quelli prodotti dal normale funzionamento dei carichi e sensibilmente inferiori rispetto al rumore generato in condizioni di arco elettrico. Pertanto, l'ADC integrato risulta adeguato all'implementazione della strategia in tempo reale.

3.6.2 Test offline implementazione strategia sul secondo prototipo

Una volta caratterizzato il campionatore è il momento di vedere se le misure eseguite dall'algoritmo di arc fault detection sono sempre ripetibili o no.

Per prima cosa sono state condotte prove offline, utilizzando un database di forme d'onda acquisite con il banco di test. I campioni di corrente registrati con la scheda NI9239 sono stati caricati nella memoria flash della STM32 e successivamente elaborati dalla strategia. Gli output generati dal microcontrollore (identificazione di condizioni di arco o di normale funzionamento) e le metriche interne alla strategia sono stati quindi confrontati con i risultati ottenuti dallo strumento di riferimento, impiegando gli stessi segnali di ingresso.

Nella tabella seguente è riportato il comportamento di tutte le metriche rispetto al riferimento (pc)

Parameter	Max. error	Mean error	Min. error	Std. Deviation
<i>diff_czt</i> [dB]	0.32	0.06	$1.0 \cdot 10^{-6}$	0.06
<i>diff_II_arm</i> [dB]	0.55	0.07	$6.3 \cdot 10^{-5}$	0.11
<i>diff_IV_arm</i> [dB]	1.6	0.57	$1.3 \cdot 10^{-3}$	0.74
<i>diff_VI_arm</i> [dB]	2.3	0.37	$4.5 \cdot 10^{-4}$	0.44
<i>NF</i> [dB]	1.6	0.99	$1.4 \cdot 10^{-2}$	0.30
<i>diff_i</i> [mA]	$1.0 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-6}$	$3.8 \cdot 10^{-4}$
<i>RMS</i> [mA]	63	13	$9.0 \cdot 10^{-3}$	19

Figura 76 tabella confronto errore percentuale metriche rispetto al riferimento LabVIEW

Ed infine vediamo come l'output nei due sistemi si mantenga il medesimo

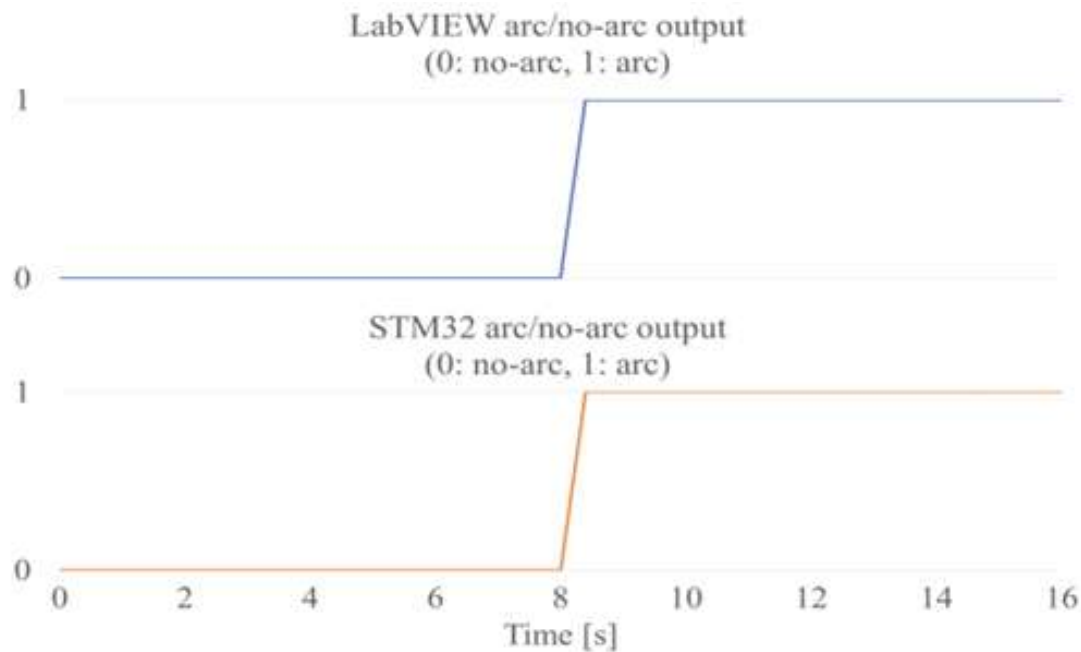


Figura 77 Confronto output strategia offline PC-Nucleo

È stato appositamente scelto un test di 16 secondi che avesse la prima metà priva di arco e nella seconda metà avesse un arco prolungato. In questo modo si può capire la tendenza ai falsi positivi o negativi. Possiamo affermare che offline, senza rumori introdotti dall'esterno dal campionatore la strategia funzioni perfettamente come ci aspettavamo anche grazie al primo prototipo.

3.6.3 Test real time

A questo punto si è scelto di abbandonare definitivamente il riferimento software, rappresentato dall'implementazione della strategia su PC in ambiente LabVIEW, sostituendolo con un riferimento fisico: l'arco elettrico. Quest'ultimo è stato rilevato tramite un fotodiodo posizionato al di sotto dello scaricatore (UL1699), in grado di identificare l'arc flash. In questa nuova fase, il prototipo è stato quindi sottoposto a test in differenti condizioni operative e con vari carichi, ripetendo le misure al fine di verificarne l'affidabilità e l'autonomia.

Come primo passo, è stato allestito il banco di prova riportato in figura sotto.

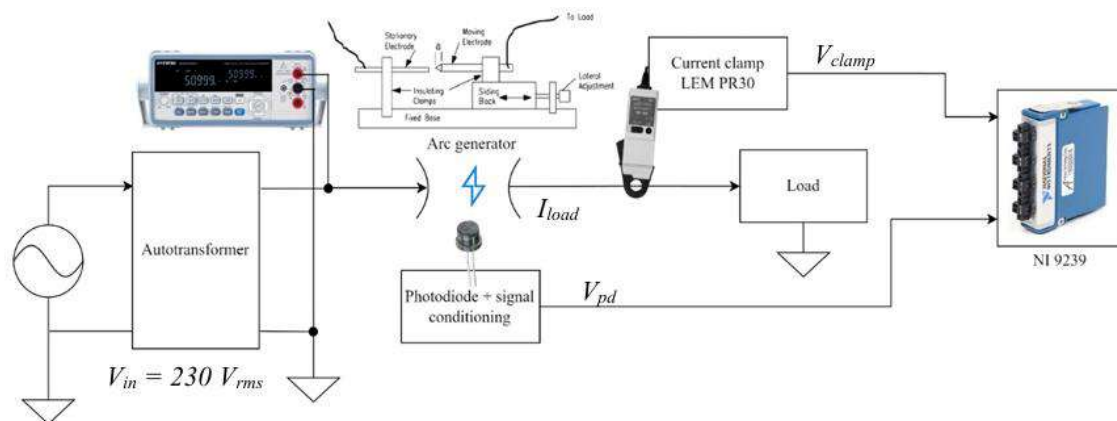


Figura 78 Banco di prova acquisizioni carichi secondo UL1699

Il setup prevedeva l'alimentazione dei carichi direttamente dalla rete elettrica (230 Vrms, 50 Hz), con la possibilità di regolare gradualmente la tensione tramite un autotrasformatore. La misura della tensione ai suoi capi veniva verificata con un multimetro GW Instek 8341, così da garantire la corretta impostazione a 230 Vrms. La corrente assorbita dal carico (Load) era acquisita mediante una pinza amperometrica a effetto Hall (HECT) LEM PR 30, caratterizzata da un range massimo di ± 20 A con costante strumentale di 100 mV/A e banda passante fino a 100 kHz.

L'acquisizione dei segnali era affidata a un sistema PC-based sviluppato in LabVIEW, dotato della scheda DAQ NI USB 9239 (ADC 24 bit, 50 kS/s per canale, filtro anti-aliasing integrato). Attraverso la DAQ venivano registrati sia il segnale di corrente (V_{clamp}) sia la tensione in uscita dal circuito di condizionamento del fotodiodo, utilizzato come riferimento per la presenza di arco segnalando l'arc flash.

Una volta acquisiti i segnali si è passati a costruire un secondo banco di prova

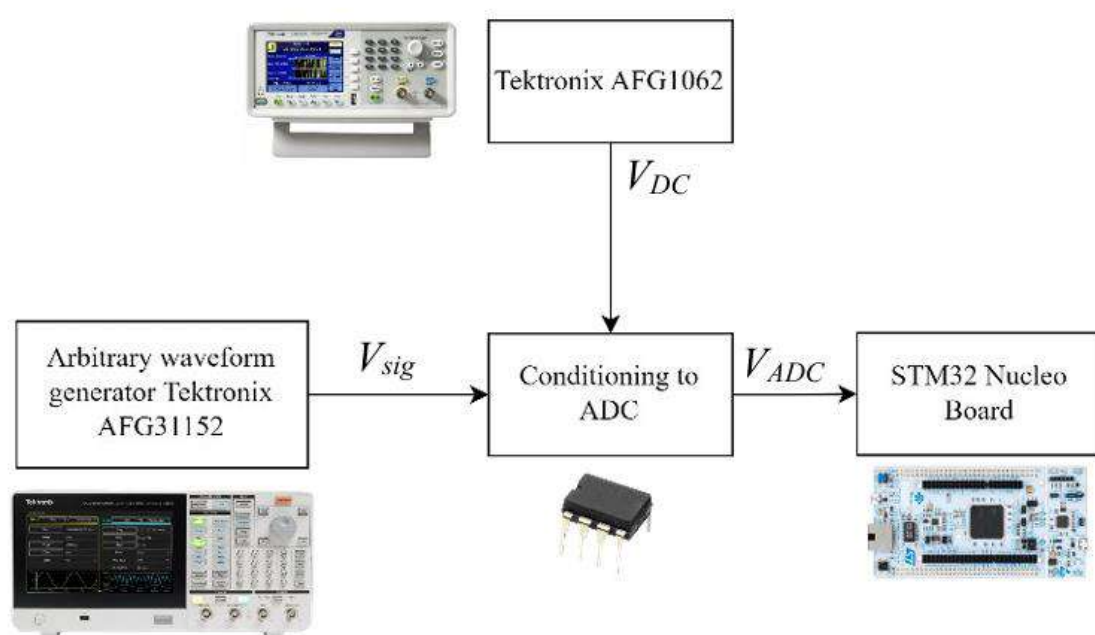


Figura 79 banco di prova ripetibilità

Il secondo banco di prova è stato invece impiegato per i test in tempo reale con la scheda NUCLEO. In questo caso, le forme d'onda di corrente precedentemente acquisite venivano riprodotte da un generatore di segnali arbitrari, in modo da simulare il segnale in uscita dalla HECT. Poiché la dinamica del segnale (± 2 V) non era compatibile con l'intervallo di ingresso della scheda (0–3.3 V), è stato realizzato un circuito di condizionamento costituito da:

- un attenuatore, per ridurre l'ampiezza del segnale;
- un sommatore, per introdurre un offset DC (fornito da un generatore Tektronix AFG1062);
- un filtro passa-basso anti-aliasing, assente a bordo della scheda.

Per garantire precisione e affidabilità, sono stati impiegati componenti ad alta stabilità e operazionali a bassissimo rumore. Il segnale condizionato (V_{ADC}) veniva quindi acquisito dall'ADC del microcontrollore a 10 kS/s.

L'elaborazione digitale veniva eseguita su finestre di 400 ms, al termine delle quali il microcontrollore forniva l'output relativo alla presenza o assenza di arco, insieme ai valori delle grandezze diagnostiche. Tutti i risultati erano memorizzati nella scheda e successivamente esportati in file di testo per l'analisi statistica di ripetibilità.

Le prove sperimentali sono state condotte considerando diversi carichi, selezionati tra quelli previsti dalla norma UL 1699 per i test di “unwanted tripping” e “failure to trip”, ovvero: carichi resistivi, lampade a incandescenza con dimmer, lampade fluorescenti, aspirapolveri ed elettrodomestici portatili.

Per ciascuna condizione di prova sono state eseguite mille acquisizioni, al fine di valutare la ripetibilità delle misure sia in termini di indicatori della strategia implementata, sia per quanto riguarda la capacità di rilevamento dell’arco.

A titolo esemplificativo, i risultati dettagliati sono riportati per il caso di un carico resistivo. La forma d’onda di test e il segnale di riferimento relativo alla presenza degli archi sono mostrati nelle figure successive.

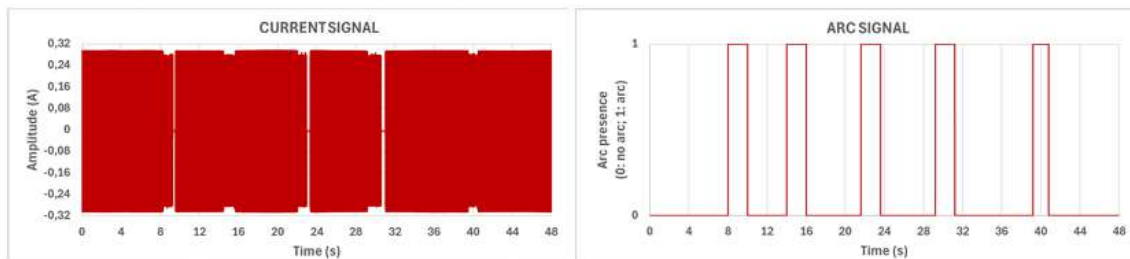


Figura 80 segnale di corrente e riferimento caso resistivo

durante la prova sono stati generati cinque archi, chiaramente evidenziati dal fotodiiodo. I valori degli indicatori calcolati dal microcontrollore sono illustrati nelle figure successive.

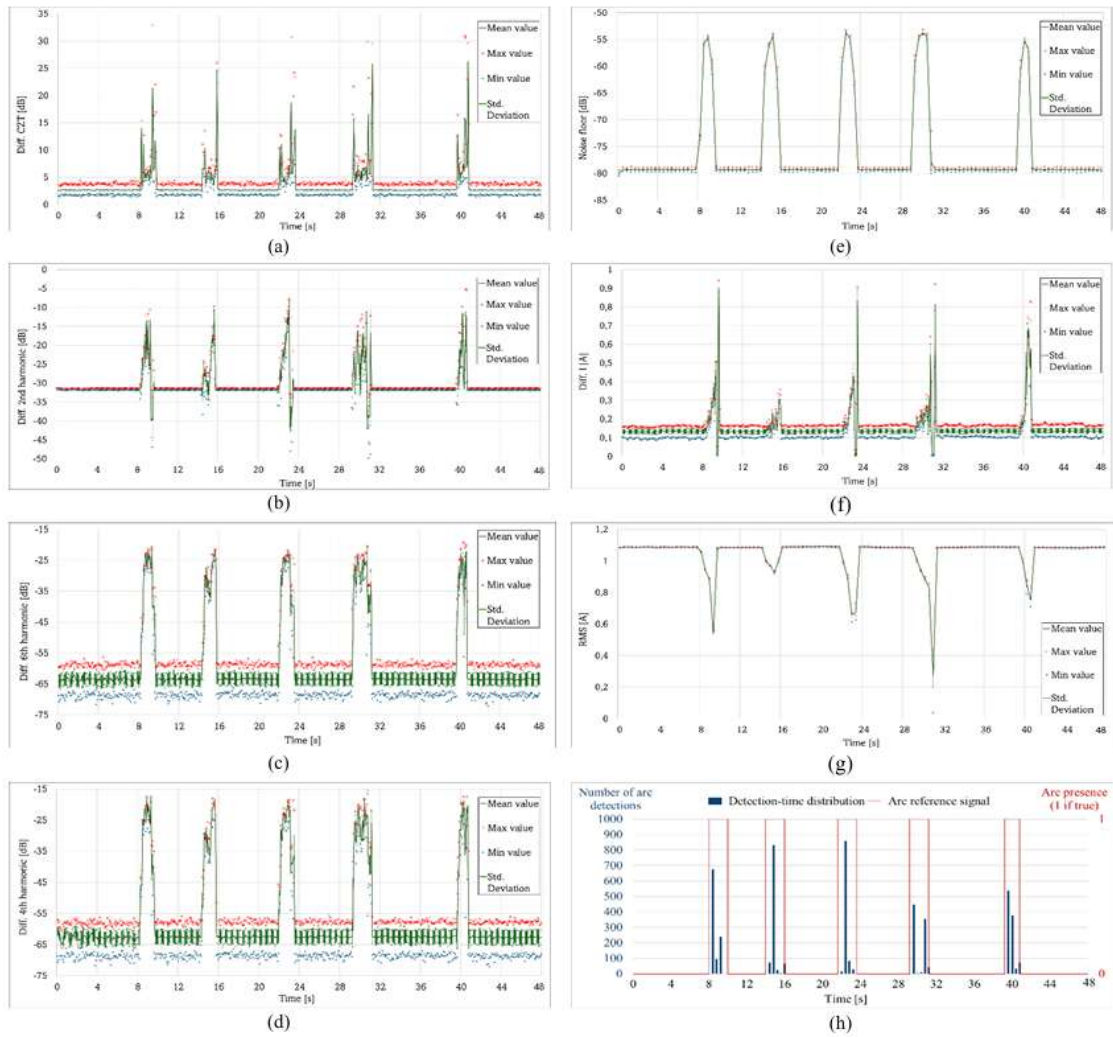


Figura 81 ripetibilità delle misure per il carico resistivo [(a) diff_czt; (b) diff_II_arm; (c) diff_IV_arm; (d) diff_VI_arm; (e) NF (f) diff_i; (g) RMS] ed arc detection times distribution (h).;

Per i parametri calcolati sulla finestra di osservazione più lunga (LOW) è stata osservata una maggiore stabilità dei risultati, grazie all'effetto di media del rumore associato alla non stazionarietà dell'arco o introdotto dal dispositivo. In ogni caso, i valori delle metriche misurate in presenza e assenza di arco risultano nettamente diversi in termini numerici, confermando la validità delle grandezze scelte come indicatori diagnostici.

La variabilità delle metriche si riflette anche sull'efficacia della strategia in termini di tempi di rilevamento. In particolare, la figura (h) mostra l'istogramma dei tempi di riconoscimento degli archi: per ciascun arco generato, le barre rappresentano il numero di rilevamenti al primo istante utile, mentre i valori numerici sono riportati in Tabella successiva riassuntiva di tutti i carichi. Nella maggior parte dei casi, l'arco è stato rilevato entro la prima o seconda finestra di osservazione successiva al suo verificarsi.

Load	Success Rate (%)	Percentage of arc detections vs. detection times (%)				
		0.4 s	0.8 s	1.2 s	1.6 s	≥2 s
Resistive	96.6	25.6	51.7	7.2	2.6	9.5
Fluor. lamps	100	99.1	0.8	0.1	--	--
Dimmer. lamps	100	100	--	--	--	--
Vacuum cleaner	96.8	38.7	41.8	1.0	5.3	10.1

Figura 82 successo identificazione arco e distribuzione temporale di individuazione

Prove analoghe sono state eseguite con gli altri carichi previsti (lampade fluorescenti, lampade a incandescenza con dimmer, aspirapolveri), i cui risultati sono mostrati rispettivamente nelle figure successive. I tassi di successo complessivi sono riassunti nella tabella precedente, calcolati come percentuale di rilevamenti di arco corretti sul numero totale di archi generati. In tutte le condizioni considerate è stata ottenuta una percentuale di successo superiore al 95%.

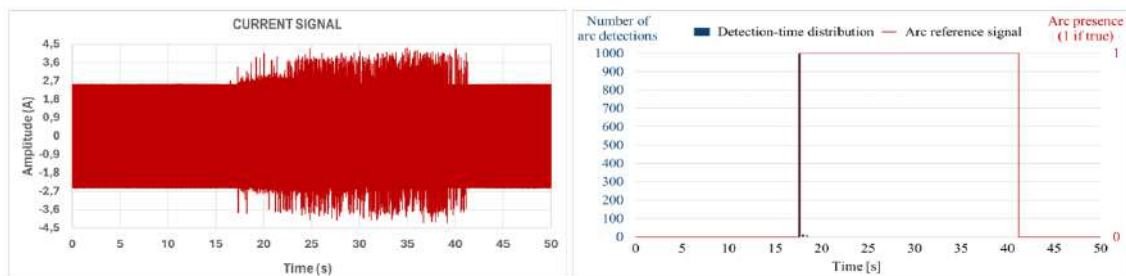


Figura 83 lampade fluorescenti

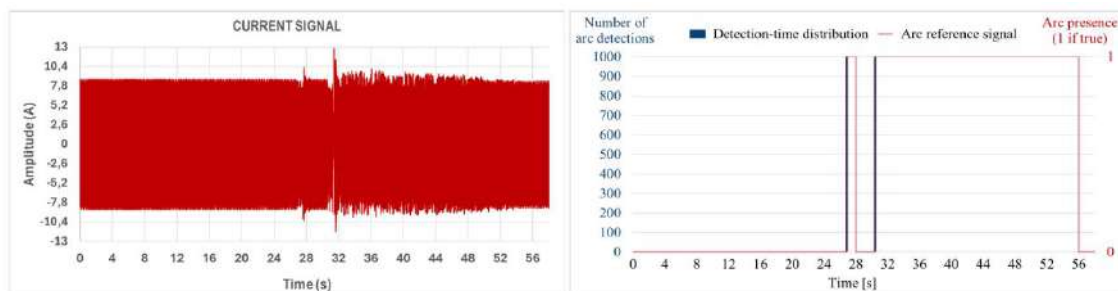


Figura 84 lampada alogena con dimmer

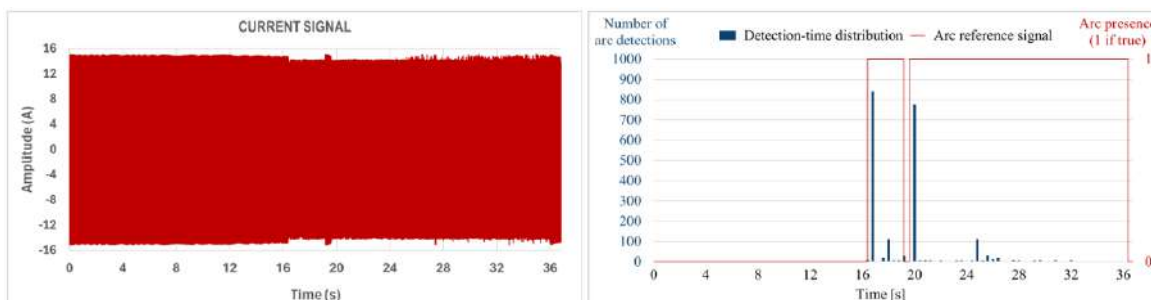


Figura 85 aspirapolvere

3.7 Conclusioni primo algoritmo

L'obiettivo del lavoro è di sviluppare un sistema di prevenzione dei guasti da arco serie in ambito residenziale. In una prima fase è stato analizzato in dettaglio il fenomeno, individuandone le caratteristiche distintive sia nel dominio del tempo (ad esempio la presenza delle spalle in corrispondenza degli attraversamenti dello zero), sia nel dominio della frequenza (comparsa delle armoniche pari e variazioni del noise floor).

A partire da tali osservazioni sono state definite le metriche fondamentali della strategia: l'algoritmo basato su trasformata CZT per l'analisi armonica a bassa frequenza, in grado di mantenere alta la risoluzione spettrale anche con finestre strette di osservazione, e l'algoritmo basato su FFT per la stima del noise floor. Successivamente, tutte le metriche sono state integrate all'interno del microcontrollore insieme al comparto decisionale, alle soglie e alle tolleranze necessarie per discriminare in tempo reale la presenza di arco.

La scelta hardware è ricaduta sulla scheda STM32 Nucleo, che, grazie all'impiego delle librerie DSP, ha consentito un'elaborazione ottimizzata, evitando perdite di campioni e garantendo robustezza in esecuzione online. La validazione sperimentale è stata condotta caratterizzando minuziosamente il nostro dispositivo utilizzando le condizioni imposte dalla norma UL1699.

I risultati ottenuti dal microcontrollore sono stati confrontati con il riferimento sviluppato in LabVIEW e successivamente con il fotodiode.

Nonostante la strategia implementata si sia dimostrata correttamente funzionante, presenta alcuni limiti significativi. In primo luogo, la risposta viene fornita con una frequenza di aggiornamento di soli 0,4 secondi, risultando quindi relativamente lenta. Inoltre, il suo elevato carico computazionale richiede hardware di fascia media dedicato

esclusivamente all'analisi degli arc fault, limitandone l'applicabilità in sistemi embedded a basso costo o multifunzione.

Nel contesto industriale di Prysmian, è stato necessario sviluppare una strategia più leggera, in grado di essere eseguita su un microcontrollore economico e allo stesso tempo di supportare ulteriori misurazioni elettriche senza compromettere le prestazioni complessive. Algoritmi così complessi, pur affidabili, risultano quindi poco pratici per una possibile commercializzazione.

Per questi motivi, la parte successiva della tesi si concentrerà sull'implementazione di metriche semplificate e sulla loro combinazione in una strategia decisionale ottimizzata, con l'obiettivo di ottenere un algoritmo più veloce, computazionalmente leggero e comunque in grado di mantenere un'accurata rilevazione degli arc fault in tempo reale.

4. AFFD CON ALGORITMO DI ANALISI NEL DOMINIO DEL TEMPO

Dopo lo sviluppo di un primo prototipo funzionante, basato su un processore di fascia media in grado di eseguire l'algoritmo con un buon compromesso tra prestazioni e costi, Prysmian ha posto come nuovo requisito la definizione di una strategia ancora più leggera. L'obiettivo era quello di consentire l'implementazione su un processore meno potente, non dedicato esclusivamente alla rilevazione di arc fault, ma destinato anche al monitoraggio complessivo dell'impianto domestico [65]. Per soddisfare tale esigenza, l'analisi è stata orientata verso l'individuazione di parametri interamente nel dominio del tempo, caratterizzati da un carico computazionale ridotto. Tali parametri, opportunamente combinati, permettono non solo di garantire l'efficienza del sistema in tempo reale, ma anche di sviluppare una strategia scalabile e adattabile alle diverse condizioni operative e ai differenti scenari applicativi.

4.1 Perché passare al dominio del tempo

Nel corso della collaborazione con Prysmian (EOSS Palermo) è emersa con chiarezza la necessità di progettare una strategia di identificazione degli arc fault che fosse al tempo stesso affidabile e computazionalmente leggera, così da poter essere integrata all'interno del dispositivo Prycam Home (Omhero), concepito per incrementare la sicurezza e l'efficienza degli impianti elettrici domestici. Considerando che il microcontrollore a bordo del dispositivo è già impegnato nell'esecuzione di numerosi task paralleli, si è reso indispensabile lo sviluppo di un algoritmo capace di mantenere un basso carico computazionale pur garantendo un'adeguata capacità di rilevazione degli eventi di arc fault.



Figura 86 omhero

In una prima fase, in collaborazione con Prysmian, sono stati individuati e sperimentati due parametri di interesse: una metrica basata sull'autocorrelazione e un parametro derivato dal valore RMS del segnale. Sebbene tali parametri non abbiano condotto immediatamente alla definizione di una strategia di rilevazione completa, i test effettuati hanno dimostrato come essi siano strettamente correlati al fenomeno dell'arc fault [66][67], costituendo pertanto un valido punto di partenza per la progettazione di algoritmi leggeri.

Per la validazione delle metriche individuate è stata acquisita una banca dati particolarmente estesa, conforme alla norma IEC 62606, che ha consentito di testare e confrontare le diverse metriche all'interno dell'ambiente MATLAB, come verrà illustrato nei paragrafi successivi.

4.2 Set Up di acquisizione

Per valutare correttamente l'efficacia di una strategia di rilevazione è indispensabile disporre di un riferimento accurato ed assoluto. A tal fine è stato introdotto l'utilizzo di un fotodiodo, impiegato per rilevare l'"arc flash", ossia la radiazione luminosa emessa dall'arco elettrico, universalmente riconosciuta in letteratura come una delle sue manifestazioni più caratteristiche.

Il segnale proveniente dal fotodiodo viene campionato alla stessa frequenza del segnale di corrente, garantendo così una perfetta sincronizzazione con l'elaborazione della strategia in esame. In questo modo è possibile disporre di un riferimento affidabile e direttamente comparabile con l'output della strategia, assicurando una validazione estremamente solida e attendibile.

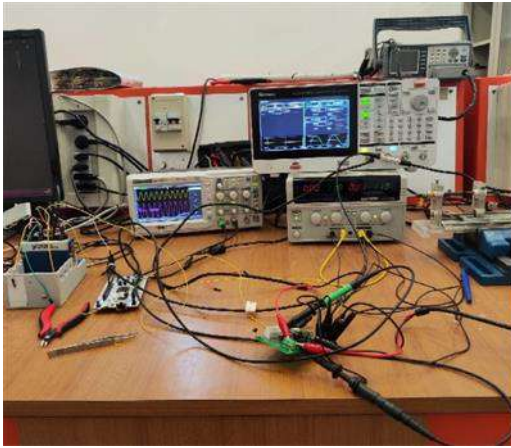


Figura 87 Banco di prova

Al centro del banco di prova è posizionata una scheda di colore verde, alla quale sono collegate diverse sonde: si tratta della scheda di condizionamento del segnale e del fotodiodo. Nella parte superiore si trova il generatore di forme d'onda, che al canale 1 fornisce una tensione continua di 1,65 V, utilizzata come riferimento per la scheda Nucleo, mentre al canale 2 eroga una sinusoide di test. Il generatore in corrente

continua, collocato al di sotto, fornisce invece le tensioni di alimentazione ± 12 V necessarie al funzionamento della scheda di condizionamento.

Quest'ultima ha il compito di adattare i segnali per renderli acquisibili dalla scheda

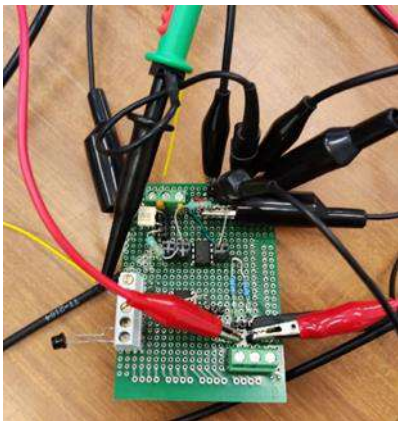


Figura 88 scheda di condizionamento

Nucleo: in particolare, trasla il livello medio della corrente a 1,65 V (valore compatibile con il range di campionamento 0–3,3 V della Nucleo), ne riduce l'ampiezza e amplifica il segnale proveniente dal fotodiodo, altrimenti troppo debole per poter essere utilizzato direttamente. Il campionamento viene effettuato anche mediante la scheda di acquisizione National Instruments NI-9239 a 24 bit, gestita da un programma sviluppato in LabVIEW per questa

applicazione.

La misura della corrente è stata eseguita utilizzando la pinza LEM PR30

Il fotodiodo impiegato per la rilevazione è il modello VTP9812FH.

In figura è riportato il segnale grezzo acquisito, che consente di apprezzare più chiaramente la natura dell'arco in corrente alternata, caratterizzato da un comportamento instabile e intermittente. Le porzioni del grafico in cui si osservano ampie escursioni corrispondono alla presenza dell'arco, mentre nelle zone in cui la corrente si mantiene intorno a 2,2 A l'arco non è presente.

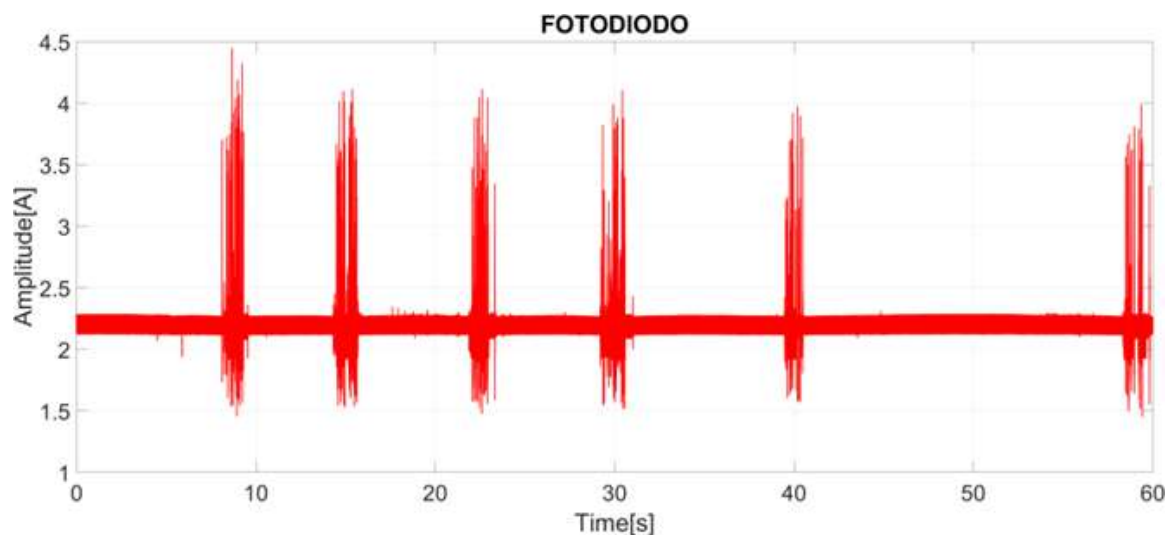


Figura 89 Dati campionati dal fotodiiodo

Per migliorare il riferimento grezzo è stato applicato il valore assoluto al segnale, ottenendo così il risultato mostrato in Figura 90 Output del fotodiiodo , che evidenzia in modo molto più chiaro le zone in cui è presente l'arco.

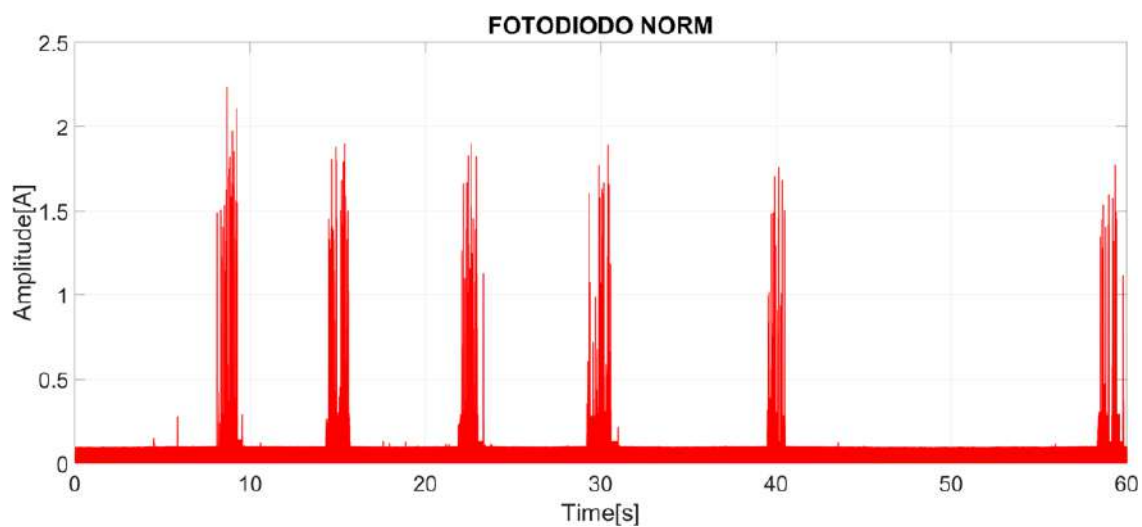


Figura 90 Output del fotodiiodo normalizzato

Successivamente, tali aree vengono selezionate automaticamente, consentendo di ricavare la forma finale del riferimento riportata in Figura 91 Forma finale del riferimento.

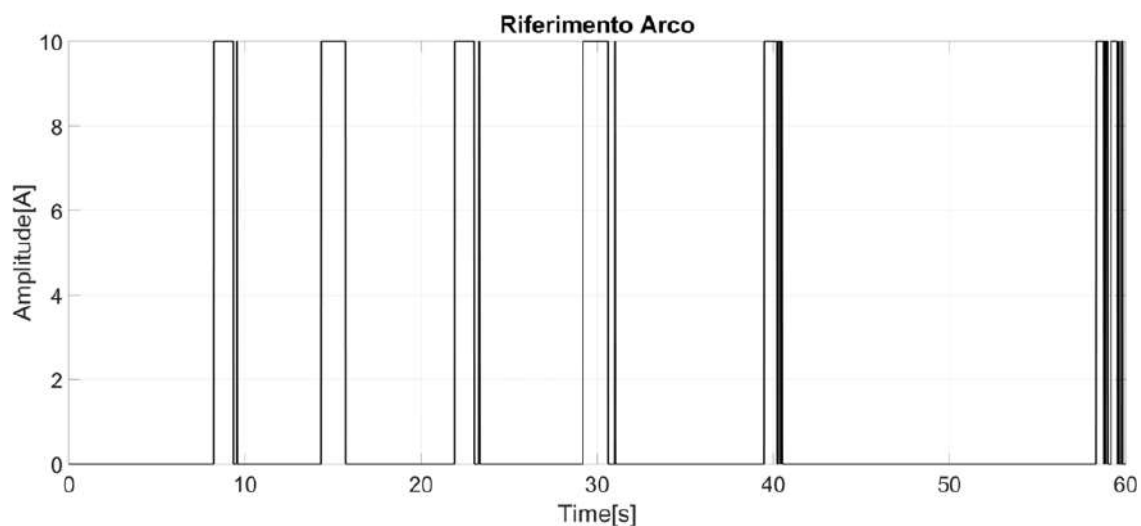


Figura 91 Forma finale del riferimento

Come si può osservare in Figura 92 Confronto riferimento e segnale di corrente, il riferimento così ottenuto risulta estremamente accurato. In Figura 93 Zoom figura precedente è inoltre mostrato uno zoom che permette di apprezzare le prestazioni anche in condizioni particolarmente critiche, quali assenza di segnale, presenza di archi di piccola entità e tratti di segnale pulito. In tutte queste situazioni il metodo si dimostra pienamente efficace, fornendo un risultato robusto e affidabile.

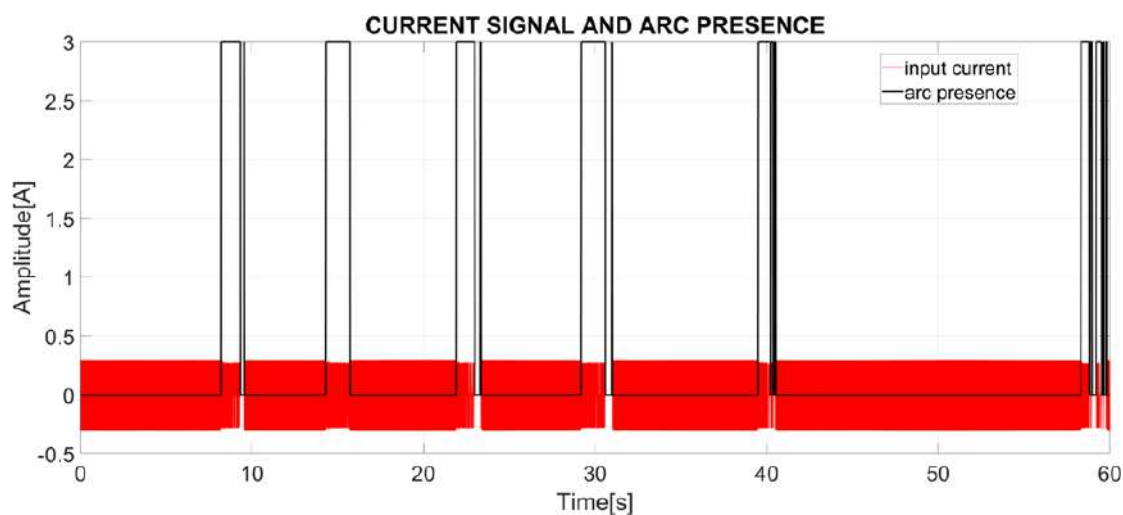


Figura 92 Confronto riferimento e segnale di corrente

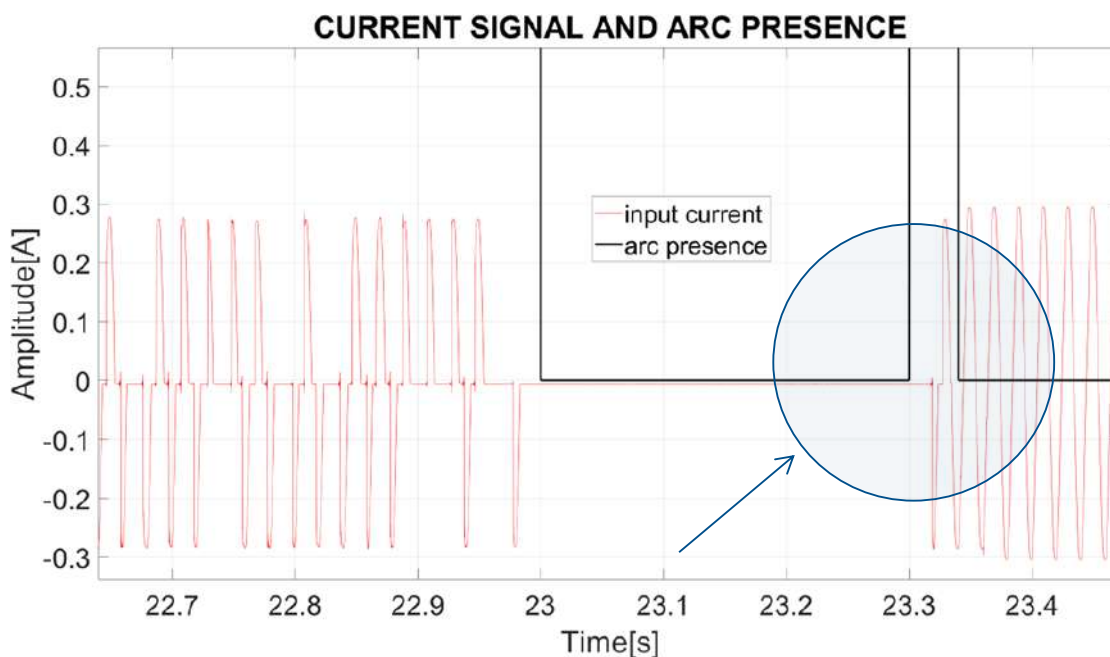


Figura 93 Zoom figura precedente

In tutte le situazioni il metodo si dimostra pienamente efficace, fornendo un riferimento robusto e affidabile come vedremo in seguito.

4.2.1 Presentazione carichi di test

In questa sezione si mostreranno alcuni dei carichi utilizzati durante la ricerca che serviranno a mostrare l'efficacia delle metriche e della strategia. Inizieremo mostrando due carichi "semplici" resistivi. Successivamente saranno mostrati due carichi identificati come mascheranti nelle norme UL1699 e IEC62606.

CARICO RESISTIVO 1

Il carico resistivo rappresenta la tipologia di carico elettrico più "pulita" e prevedibile dal punto di vista elettrico, caratterizzandosi per la totale assenza di componenti reattive (induttive o capacitive). Questa purezza elettrica lo rende il carico ideale per l'identificazione e l'analisi degli archi elettrici, poiché qualsiasi anomalia nella forma d'onda può essere chiaramente attribuita al fenomeno dell'arco stesso. Nelle nostre abitazioni abbiamo vari carichi puramente resistivi: il forno, lo scaldabagno, le lampadine a filamento, tostapane, fornelli elettrici ecc. In un carico puramente resistivo la tensione e la corrente sono perfettamente in fase e seguono perfettamente la legge di Ohm, creando forme d'onda sinusoidali quasi perfette. Ci sono anche alcuni elettrodomestici che, pur

non essendo puramente resistivi posseggono al loro interno una grande componente resistiva, un esempio possono essere la lavatrice e la lavastoviglie che per riscaldare l'acqua utilizzano resistenze elettriche dell'ordine di 20-30 Ohm.

La corrente di guasto è limitata dal carico, questo rende il fenomeno più prevedibile nel caso resistivo rispetto a quando in serie sono connessi carichi reattivi.

Analizzeremo due differenti carichi resistivi, il primo sarà un reostato lineare da banco il secondo una stufa elettrica commerciale.

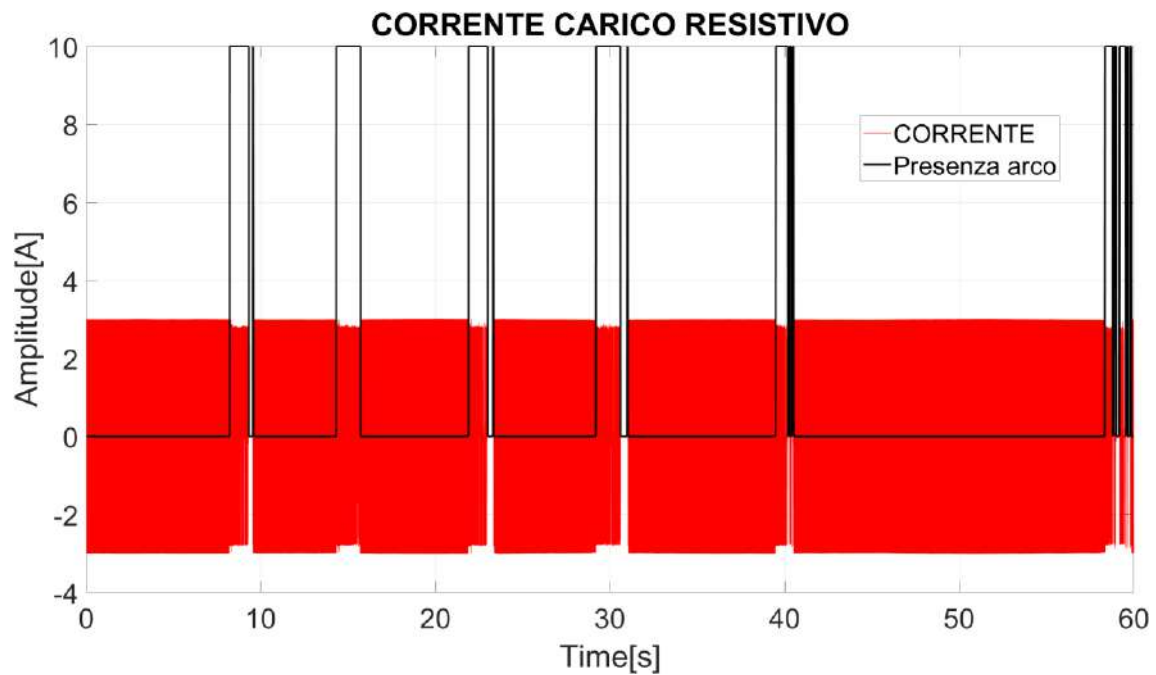


Figura 94 Corrente carico resistivo

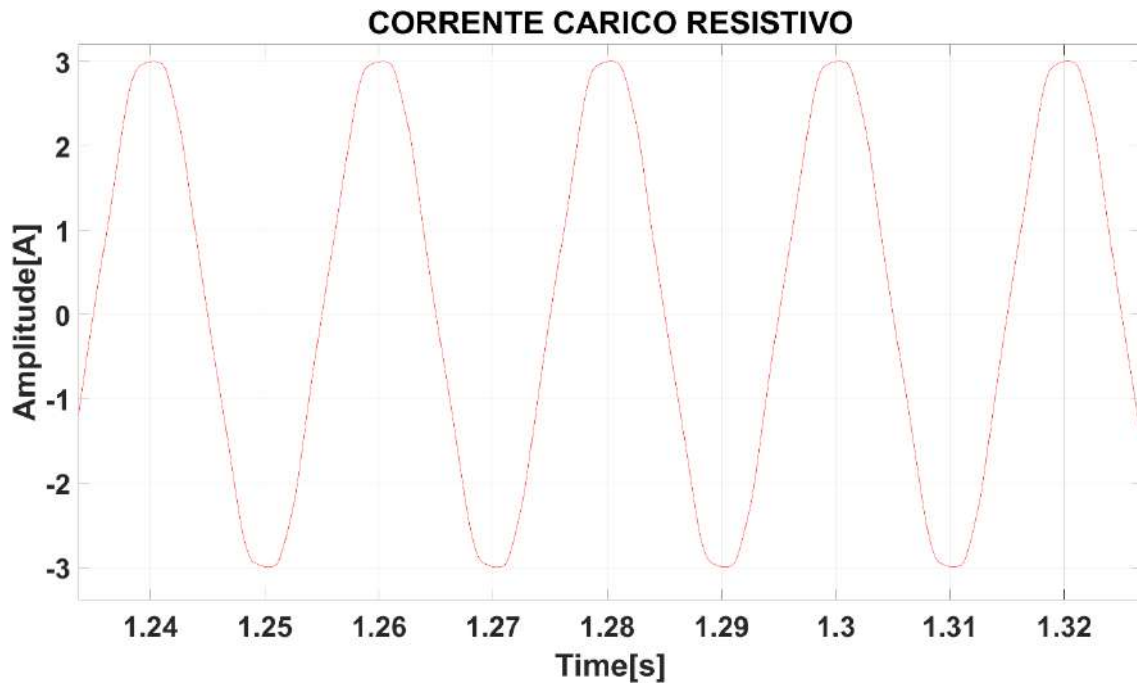


Figura 95 zoom corrente carico resistivo in assenza di arco

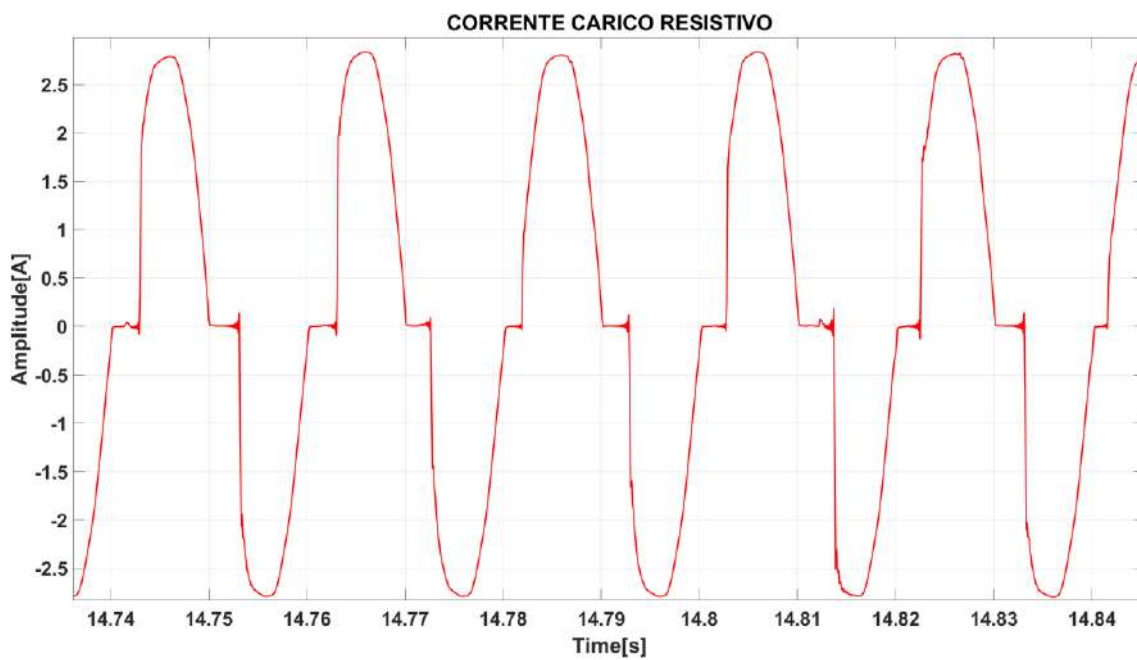


Figura 96 zoom corrente carico resistivo in presenza di arco

Il carico resistivo riportato in Figura 94 è un reostato da laboratorio, rappresentando in assoluto il carico più pulito e prevedibile che si possa avere per la caratterizzazione sperimentale del comportamento degli archi elettrici eliminando le altre variabili disturbanti.



Figura 97 Reostato da banco

I reostati di laboratorio sono dispositivi di precisione. In Figura 97 è mostrato il reostato utilizzato per questo test. È un reostato a filo avvolto progettato per offrire una resistenza variabile e capace di gestire potenza elevata con la possibilità di regolare la quantità di filo resistivo inserita nel circuito mediante il movimento del contatto scorrevole posto

sulla sommità dello strumento.

In Figura 96 mostra le seguenti caratteristiche distintive:

- In assenza di arco si osserverebbe una forma d'onda puramente sinusoidale, perfettamente simmetrica e priva di alterazioni come in Figura 95. Qui, invece, la sinusoide viene “schiacciata” attorno allo zero, evidenziando momenti di interruzione e di scarica.
- Attorno ai punti di inversione di polarità (intorno a 14,75 s, 14,79 s, 14,83 s), si nota una breve interruzione della corrente, seguita da transitori ad alta frequenza (“spike”). Questi fenomeni corrispondono alla estinzione dell’arco quando la corrente scende al di sotto del valore di mantenimento e alla sua riaccensione non appena la tensione supera la tensione di innesco dello scaricatore.
- Nonostante la presenza dell’arco, l’onda mantiene buona simmetria tra semionda positiva e negativa, confermando che il reostato esercita un’azione puramente resistiva, senza introdurre sfasamenti o componenti induttive/capacitive.
- Le rampe di salita e discesa della corrente nei punti di inserzione e di estinzione dell’arco sono più ripide rispetto a quelle di un carico resistivo ideale, e generano componenti armoniche visibili nella forma d’onda. Queste distorsioni sono tipiche degli archi elettrici, che agiscono come resistenze variabili ad alta velocità.
- La corrente raggiunge un plateau di circa $\pm 2,7$ A, anziché 3 A.

CARICO RESISTIVO NUMERO 2

Questo carico è sempre puramente resistivo ma stavolta è una stufa commerciale.

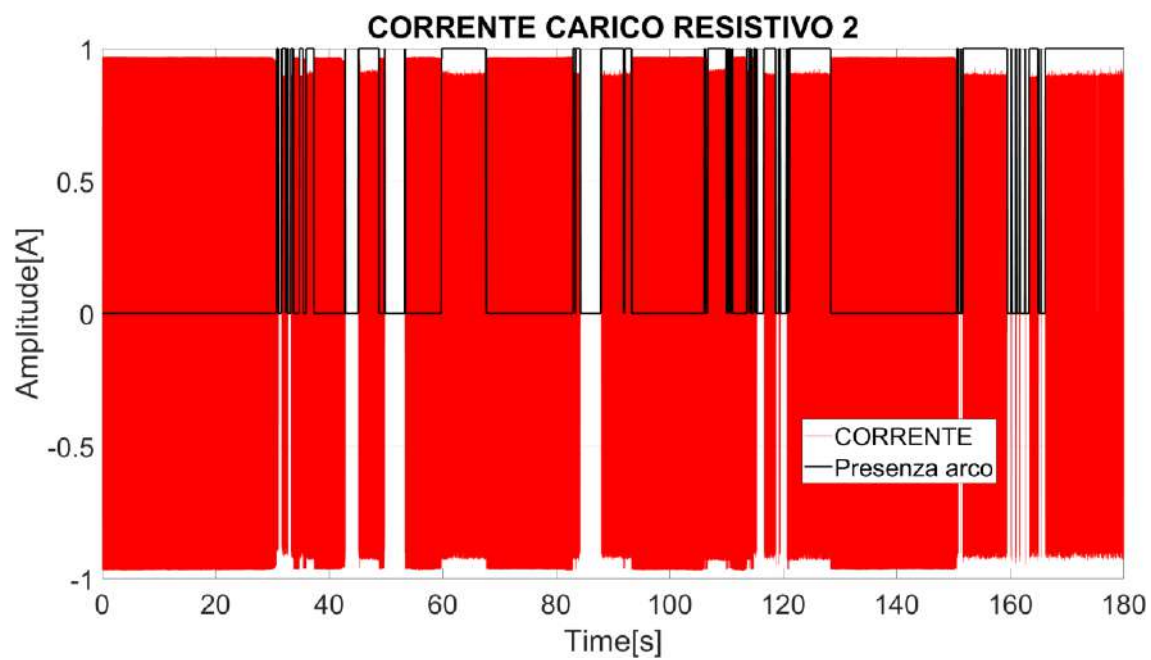


Figura 98 secondo carico resistivo

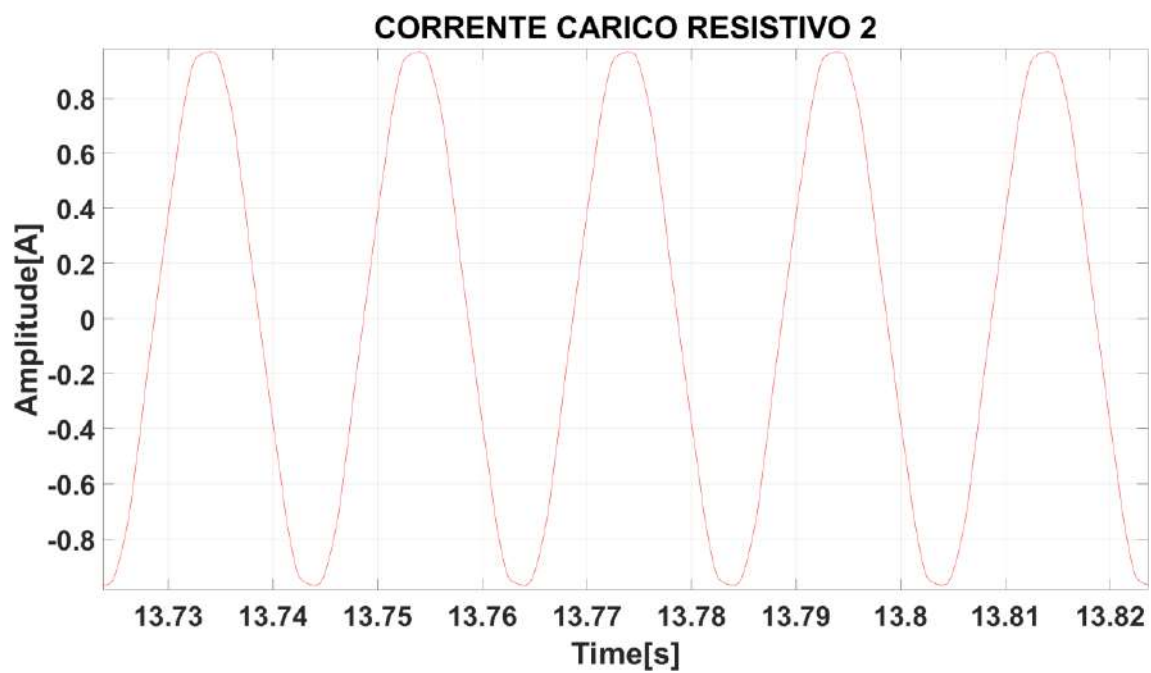


Figura 99 zoom in assenza di arco

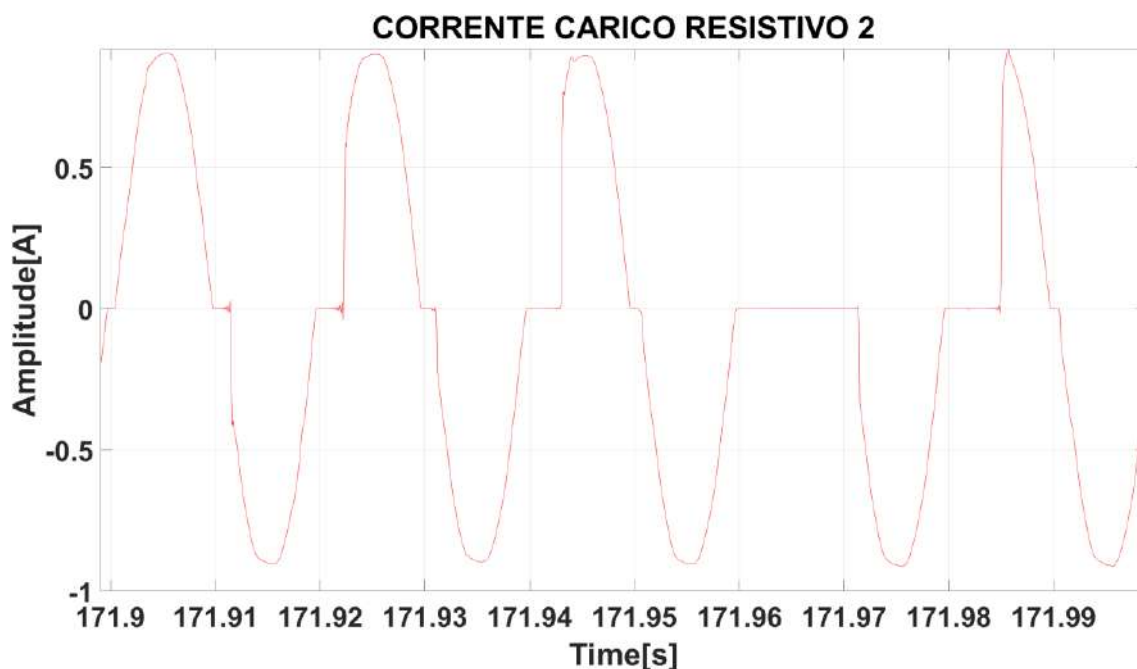


Figura 100 zoom in presenza di arco

Le tre immagini sopra presentano, rispettivamente, la registrazione completa del segnale di corrente, un dettaglio zoom sulla forma d'onda in assenza di arco e un dettaglio zoom durante l'arco, per il carico resistivo costituito da una stufa elettrica.

La Figura 98 mostra l'andamento della corrente sull'intero intervallo di misura di 180 s, si osserva una successione intermittente di archi: fasi prolungate di conduzione resistiva regolare alternate a numerosi eventi di arco, distribuiti in modo non periodico lungo la durata del test per cercare la condizione più sfavorevole possibile pur avendo un carico resistivo.

Tra il grafico Figura 99 e Figura 100 notiamo come, la sinusoide viene significativamente distorta, assumendo tratti quasi piatti con ampiezza limitata a circa $\pm 0,7$ A. Si notano interruzioni nette a ogni zero crossing, seguite da transitori rapidi di ripristino della corrente, analoghi a spike.

I dati inerenti al calcolo delle metriche per questo carico saranno inseriti nell'APPENDICE A per maggiore approfondimento.

CARICO MASCHERANTE 1: TRAPANO

Come primo carico mascherante, mostrato in Figura 101, è stato scelto un trapano Bosch. Il trapano è un carico con una grande componente induttiva a causa delle induttanze dei

circuiti rotorici e statorigli che smussano le variazioni di corrente, attenuando i fronti ripidi associati all'arco. EMI e vibrazioni meccaniche producono disturbi costanti che elevano la soglia di rilevazione di arco mascherando i tipici rumori generati dall'arco. Cambi di velocità e carico meccanico alterano continuamente il profilo di corrente, eliminando pattern stabili. Il trapano per il suo funzionamento produce scintille considerabili “mini archi elettrici”.

In Figura 101 vediamo il segnale completo acquisito, subito si vede come la forma d'onda anche in assenza di arco sia notevolmente più rumorosa rispetto al caso precedente,

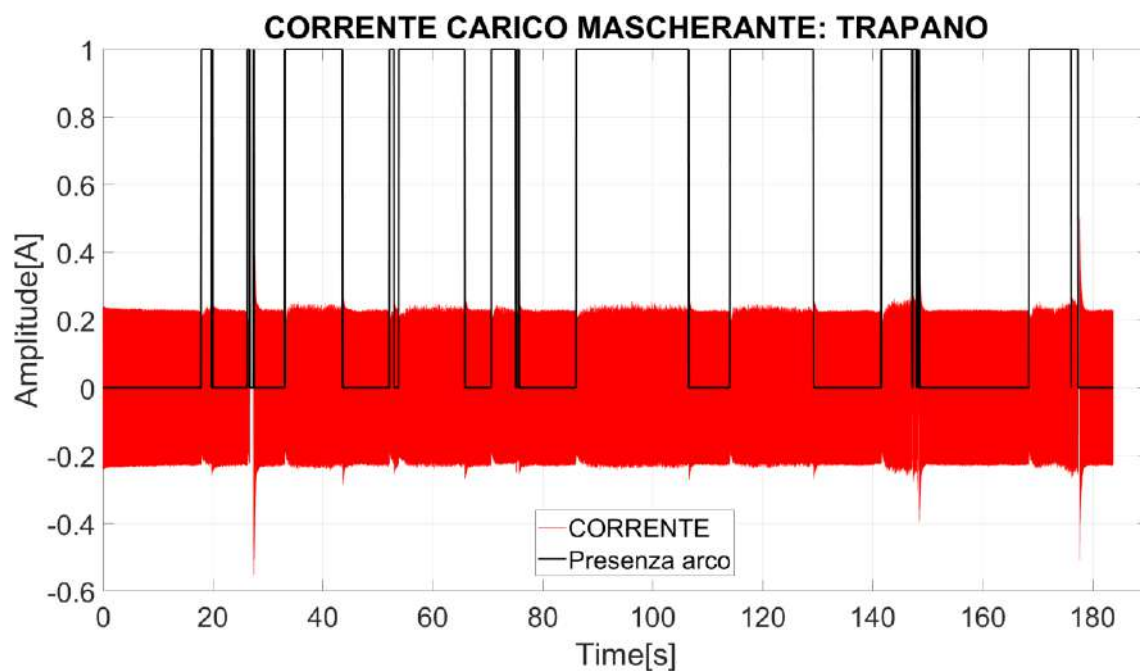


Figura 101 CORRENTE TRAPANO

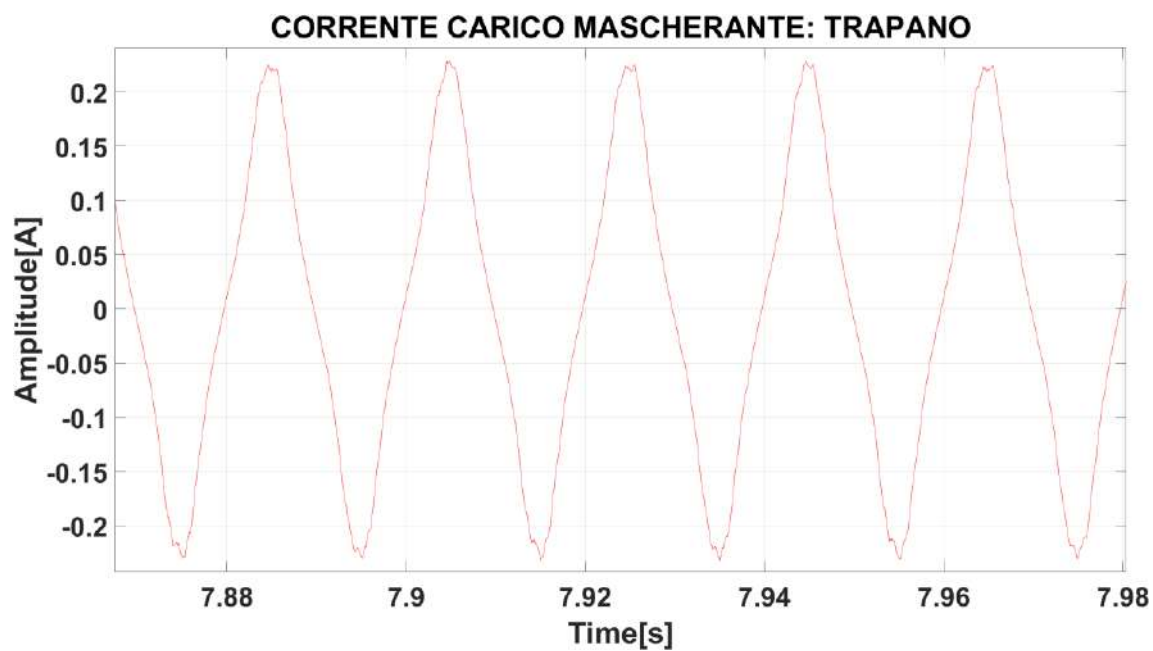


Figura 102 ZOOM in assenza di arco

Per ispezione diretta di nota come un carico di questo genere introduce una forma d'onda è distorta rispetto alla sinusoide ideale con la presenza di impulsi ad alta frequenza ed una forma più assimilabile ad una onda triangolare piuttosto che ad una sinusoide.

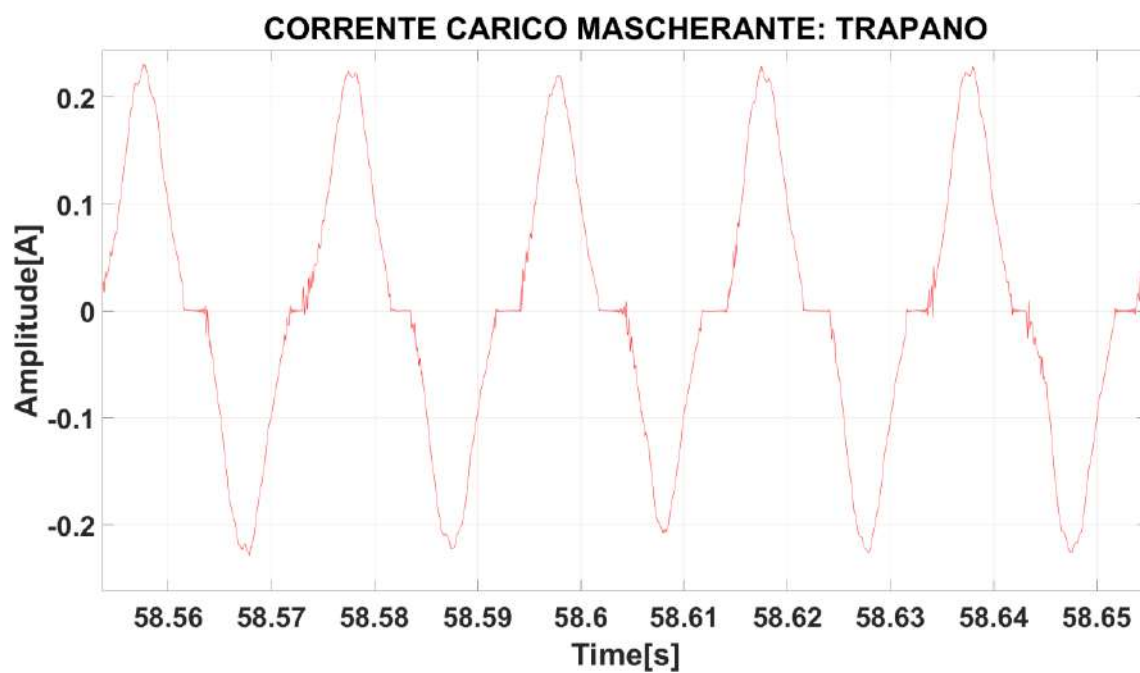


Figura 103 zoom in presenza di arco

In Figura 103 è ancora possibile identificare facilmente la presenza di arco analizzando “ad occhio” la forma d’onda, ma, si nota anche come i “sintomi” siano meno netti rispetto alla situazione precedente. Facendo un’analisi dello spettro risulterà dunque meno evidente la presenza di arco, anche utilizzando le metriche nel dominio del tempo il compito diventerà più complesso da svolgere.

Si rimanda all’ APPENDICE A per osservare lo spettrogramma del trapano.

SECONDO CARICO MASCHERANTE: LAMPADE FLUORESCENTI

Come ultimo esempio di carico mascherante singolo, in questo lavoro viene presentato un portalampe equipaggiato esclusivamente con lampade fluorescenti.

Le lampade fluorescenti con ballast elettronico rappresentano uno dei carichi mascheranti più complessi per la rilevazione di archi elettrici, caratterizzato da fenomeni elettrici che rendono estremamente difficile l’identificazione affidabile degli eventi d’arco. Il ballast elettronico converte la tensione di rete (50 Hz) in alta frequenza (tipicamente 20–100 kHz) mediante MOSFET, producendo impulsi di corrente a elevata frequenza che generano spike e componenti armoniche multiple. Al contrario del trapano le lampade fluorescenti sono un carico capacitivo, La corrente di ingresso passa attraverso un ponte raddrizzatore e condensatori di filtro, creando correnti impulsive non sinusoidali che mostrano forti transitori simili agli spike di arco. Il THD è sempre abbastanza elevato con un contenuto di righe spettrali oltre il decimo ordine. Inoltre, sono state collegate insieme lampade di differenti marche e potenza rendendo ancora più imprevedibile la forma d’onda di corrente.

La forma d’onda di corrente mostrata in Figura 104 ha una durata di 3 minuti e subito saltano all’occhio spike impulsivi fino a circa ± 3 A proprio durante i periodi di arco elettrico.

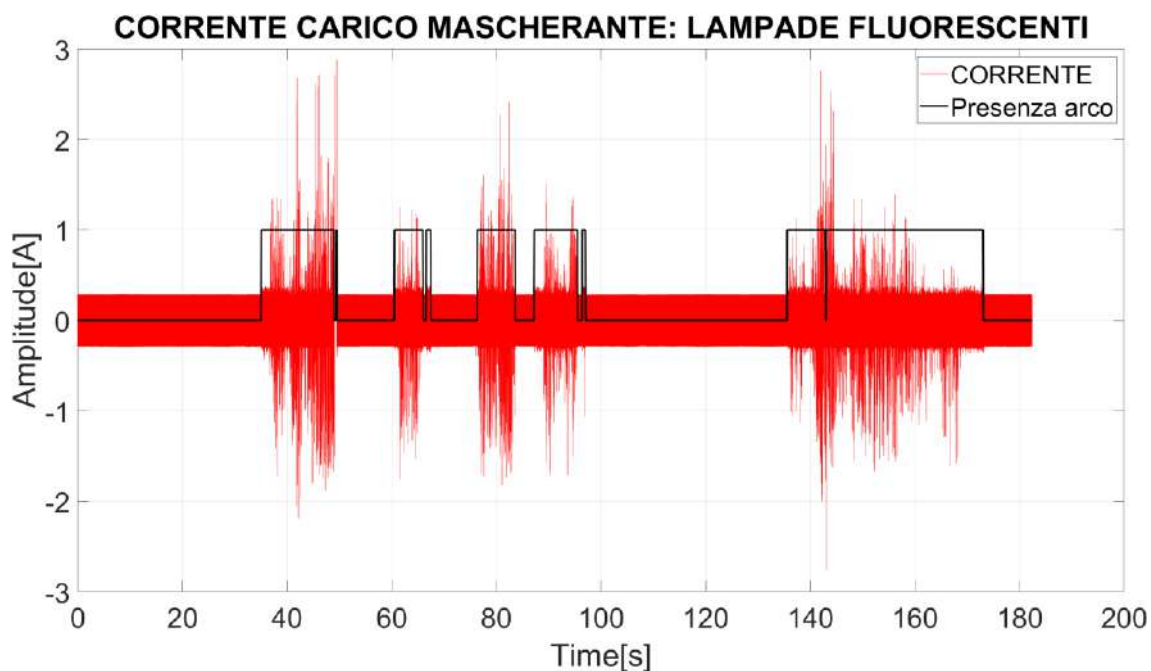


Figura 104 CORRENTE LAMPADE FLUORESCENTI

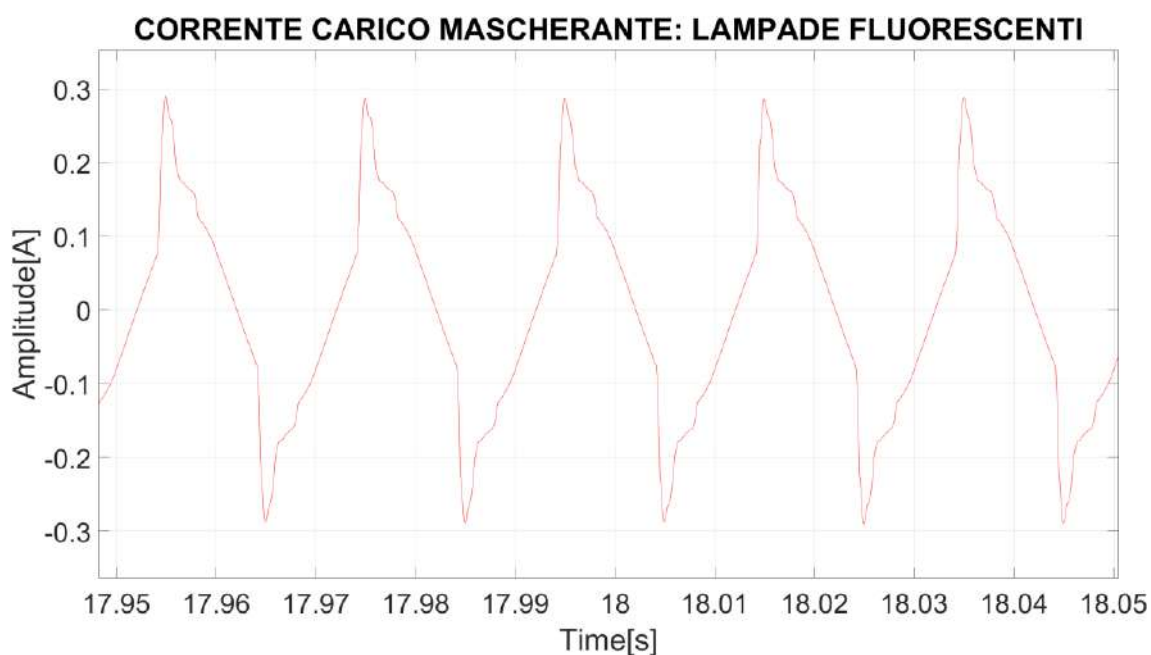


Figura 105 zoom in assenza di arco

Anche questo carico deforma la corrente in ingresso nel circuito in maniera simile al trapano precedentemente visto.

La forma d'onda, pur mantenendo un andamento periodico di base con ampiezza $\pm 0,3$ A, presenta distorsioni significative dovute al funzionamento del ballast elettronico assumendo una forma molto distante da una sinusoide.

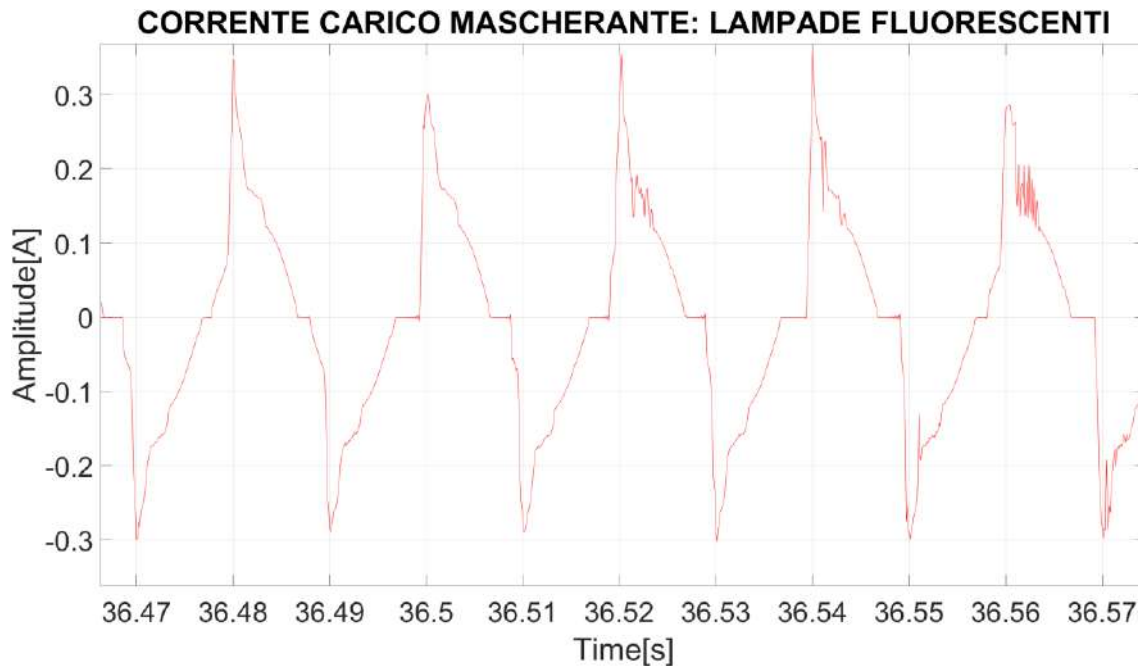


Figura 106zoom in presenza di arco

In condizioni di arco si nota come il rumore aumenti e compaiano le spalle ma sempre rispetto ad una forma d'onda già distorta. Questo carico inoltre avendo un comportamento capacitivo si comporta in maniera differente durante la condizione di arcing rispetto al precedente carico induttivo ed ovviamente anche rispetto al carico resistivo. Questa varietà nel comportamento dell'arco con carichi differenti lo rende complesso da identificare.

Oltre al carico resistivo, che non introduce rumore significativo né comportamenti di tipo induttivo o capacitivo, sono stati considerati due ulteriori tipologie di carichi mascheranti: il trapano elettrico e le lampade fluorescenti con ballast elettronico. Il trapano introduce prevalentemente disturbi a bassa frequenza (nell'intervallo 100–1000 Hz) ed è caratterizzato da un comportamento di tipo induttivo. Le lampade fluorescenti, invece, presentano un comportamento di tipo capacitivo e generano rumore ad alta frequenza (tipicamente nell'intervallo 20–100 kHz). L'analisi congiunta di queste tre categorie di carico ha quindi permesso di coprire un ampio spettro di condizioni, esplorando scenari che vanno da situazioni puramente resistive fino a quelle in cui sono presenti contributi induttivi e capacitivi, con disturbi distribuiti su bande di frequenza differenti.

Tutti i carichi mostrati finora verranno poi utilizzati per mostrare il funzionamento della strategia dopo la sua spiegazione. Ora saranno mostrate nel dettaglio tutte le metriche ed

i risultati per il primo carico resistivo ed il trapano le immagini delle metriche e dei risultati per gli altri due carichi saranno inseriti nell'APPENDICE A.

4.3 Presentazione metriche

Grazie all'impiego di una scheda di acquisizione ad alta fedeltà (NI-9239) e alla disponibilità di un riferimento sperimentale solido, è stato possibile avviare la fase di test di nuove metriche per l'identificazione dell'arco elettrico. I segnali acquisiti, caratterizzati da elevata risoluzione e corretto condizionamento, costituiscono la base sperimentale su cui sono state sviluppate e confrontate tutte le elaborazioni presentate in questo lavoro. La validazione delle metriche è stata effettuata utilizzando i dati sperimentali acquisiti (di cui una parte verrà analizzata nel dettaglio in questo lavoro), in maniera conforme alla norma IEC 62606. Le analisi sono state condotte nell'ambiente MATLAB, come verrà descritto nei paragrafi successivi.

Prima di entrare nel dettaglio delle singole metriche, è opportuno proporre un breve approfondimento riguardo alla derivata applicata all'analisi dell'arco elettrico.

La derivata rappresenta un'operazione di grande interesse: per sua natura essa agisce come un amplificatore di tutte le variazioni presenti in un segnale. Questo effetto risulta vantaggioso in quanto permette di mettere in evidenza i “sintomi” tipici dell'arco elettrico; tuttavia, allo stesso tempo, la derivata amplifica anche il rumore, inclusi i disturbi introdotti dai carichi.

In condizioni sperimentali non rumorose (ad esempio con un semplice carico puramente resistivo) la derivata si dimostra un indicatore estremamente efficace, rendendo ben distinguibili le zone in cui l'arco è presente. Tale comportamento è mostrato in Figura 107 derivata del segnale di corrente, dove viene riportata la derivata ottenuta tramite la BFD applicata al segnale di corrente di un carico resistivo. Come si può osservare, le regioni in cui si manifesta l'arco risultano chiaramente evidenziate (il segnale analizzato è lo stesso presentato in precedenza).

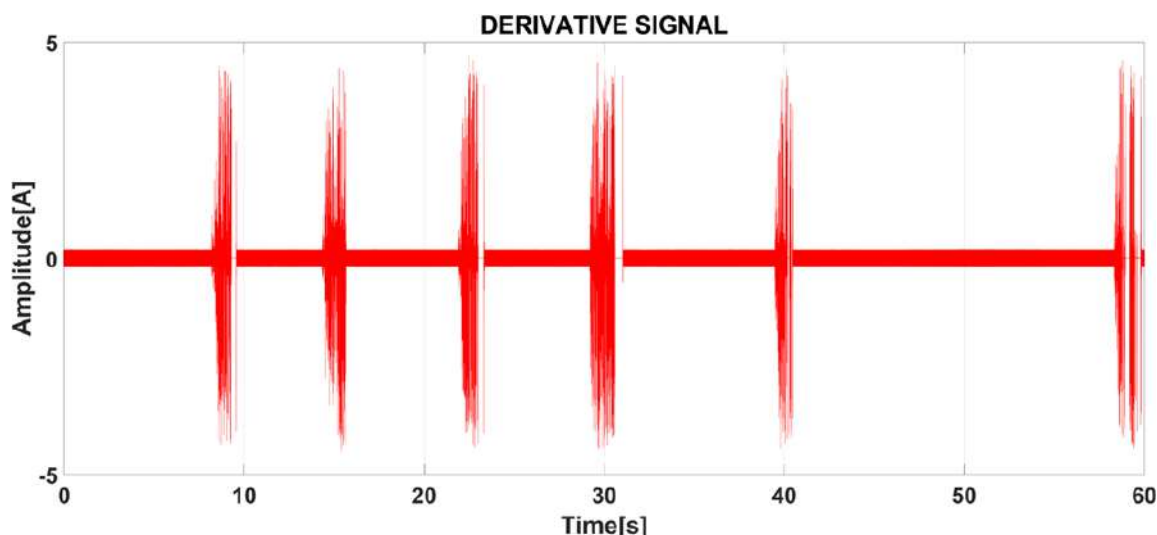


Figura 107 derivata del segnale di corrente

In conclusione, la derivata agisce come un amplificatore delle variazioni del segnale: tutte le transizioni rapide risultano accentuate, rendendo questo operatore particolarmente utile per mettere in evidenza i “sintomi” tipici dell’arco. In condizioni sperimentali a basso la derivata calcolata mediante la BFD si è rivelata un indicatore estremamente efficace: nelle acquisizioni analizzate le regioni in cui si manifesta l’arco risultano chiaramente evidenziate.

Tuttavia, la stessa proprietà che rende la derivata sensibile alle variazioni la rende altresì sensibile al rumore e ai disturbi introdotti dai carichi (carichi non lineari, motori, alimentatori switching, ecc.). In presenza di rumore elevato o di carichi “mascheranti”, la derivata amplifica componenti indesiderate rendendo meno affidabile l’identificazione se usata isolatamente. Per queste ragioni la derivata è considerata una metrica promettente ma non sufficiente da sola in scenari domestici reali.

4.3.1 Autocorrelazione

Il riconoscimento degli archi elettrici nei sistemi in corrente alternata presenta criticità, in quanto diversi carichi, come motori a spazzole, ballast o dispositivi elettronici di vario tipo, generano assorbimenti molto simili a quelli prodotti dal guasto. Per ridurre la complessità computazionale ed i requisiti di memoria, negli ultimi anni sono state investigate tecniche basate su analisi di correlazione, capaci di evidenziare specifiche signature degli archi.

In questo lavoro viene analizzata la possibilità di sfruttare la simmetria del segnale di corrente e della sua derivata, valutando la correlazione incrociata tra finestre di osservazione consecutive (ciascuna corrispondente a un periodo del segnale derivato). L'obiettivo è verificare l'efficacia di tali parametri come indicatori semplici, a basso costo computazionale, facilmente integrabili in piattaforme di smart metering.

I metodi di rilevazione si fondano sul riconoscimento delle firme tipiche del fenomeno di arco.

In condizioni AC, le caratteristiche principali della corrente d'arco sono:

- shoulders, ovvero tratti quasi piatti in corrispondenza degli zeri di corrente, dovuti all'estinzione e alla successiva riaccensione dell'arco;
- maggiore velocità di variazione
- valore RMS inferiore rispetto alla corrente non affetta da arco;
- casualità del segnale dovute a presenza di rumore.

Come mostrato in letteratura e in diversi brevetti, sono state proposte analisi sia nel dominio del tempo che della frequenza. Nel dominio del tempo, le soluzioni tipiche si basano sull'analisi della forma d'onda di corrente e/o della sua derivata prima, per individuare fenomeni quali shoulders, picchi e alti tassi di variazione.

In questo contesto, lo studio presentato in questa tesi si concentra sulla valutazione di indicatori semplici come l'autocorrelazione (CC) calcolata sia sulla corrente sia sulla derivata della corrente. Questa scelta consente di enfatizzare le variazioni del segnale indotte dall'arco. L'idea di fondo è che, mentre in condizioni non di arco il segnale risulta sostanzialmente periodico e stazionario, la presenza dell'arco introduce disturbi e aleatorietà che rompono tale regolarità, riducendo il valore dell'autocorrelazione.

Questa metrica è stata oggetto di un brevetto congiunto con la Prysmian [68].

Analizziamo nel dettaglio i passaggi per calcolare il parametro:

consideriamo un segnale sinusoidale:

$$x(t) = A \sin(2\pi f t + \varphi)$$

dove A , f e φ rappresentano rispettivamente ampiezza, frequenza e fase. La derivata del segnale è una funzione cosinusoidale, che conserva ovviamente la stessa periodicità del segnale originale.

Dal punto di vista del processamento numerico, la derivata può essere calcolata dopo l'acquisizione dei campioni del segnale con frequenza di campionamento fs . Nell'analisi presentata, $fs=10$ kHz, per cui vengono acquisiti 200 campioni per ciascun periodo della rete a 50 Hz. La derivata numerica è stata calcolata con lo schema delle differenze finite all'indietro, mediante post-processing in ambiente MATLAB:

$$y = [x(2) - x(1), x(3) - x(2), \dots, x(n) - x(n-1)]$$

Dove y (1,2, ..., n-1) rappresenta il vettore dei campioni derivati mentre x (1,2, ..., n) sono i campioni della corrente.

La cross-correlazione viene calcolata tra due periodi consecutivi della derivata. Essa misura la somiglianza tra i segnali in funzione dello sfasamento k . Nel caso ideale di periodicità perfetta, il coefficiente di cross-correlazione vale 1; la presenza dell'arco introduce rumore e distorsioni, riducendo tale valore. La cross-correlazione fra due segnali y_1 e y_2 si definisce come.

$$C_{y_1 y_2} = \begin{cases} \frac{1}{T} \sum_{\tau=1}^{T-k} (y_{1,\tau} - \bar{y}_1)(y_{2,\tau+k} - \bar{y}_2); K = 0, 1, 2 \dots \\ \frac{1}{T} \sum_{\tau=1}^{T+k} (y_{2,\tau} - \bar{y}_2)(y_{1,\tau-k} - \bar{y}_1); K = 0, -1, -2 \dots \end{cases}$$

Dove y_1 e y_2 soprassegnati sono i valori medi dei due segnali.

Il coefficiente di cross-correlazione normalizzato è dato da:

$$r_{y_1 y_2}(k) = \frac{C_{y_1 y_2}(K)}{s_{y_1} s_{y_2}}; k = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

Con:

$$s_{yn} = \sqrt{C_{y_n y_n}(0)}$$

Nel caso in esame, l'indicatore CC corrisponde al valore del coefficiente per $k=0$, ossia:

$$\textit{Autocorrelazione} = r_{yiy_{(i+1)}}(0)$$

$k=0$ implica che non è presente “shift” tra i due periodi, ovvero sono perfettamente sovrapposti.

L’autocorrelazione fornisce una misura diretta della similarità (o non similarità) tra due periodi consecutivi del segnale derivato.

Ovviamente gli stessi identici calcoli possono essere eseguiti direttamente sui campioni della corrente e non della derivata. Valuteremo ora entrambi i parametri e valuteremo vantaggi e svantaggi delle due differenti implementazioni.

L’efficacia degli indicatori proposti nel dominio del tempo è stata valutata mediante elaborazioni off-line su segnali di corrente acquisiti sperimentalmente, utilizzando il banco prova per la caratterizzazione degli archi descritto prima

I campioni acquisiti sono stati salvati in file e successivamente elaborati in ambiente MATLAB per il calcolo di tutti gli indicatori. Queste considerazioni sono valide per tutte le metriche presentate in questo lavoro.

Nel seguito vengono riportati i risultati ottenuti per varie differenti condizioni di carico, i dati saranno presentati con il riferimento come nelle figure precedenti delle forme d’onda di corrente per i due carichi resistivi, il trapano e le lampade fluorescenti:

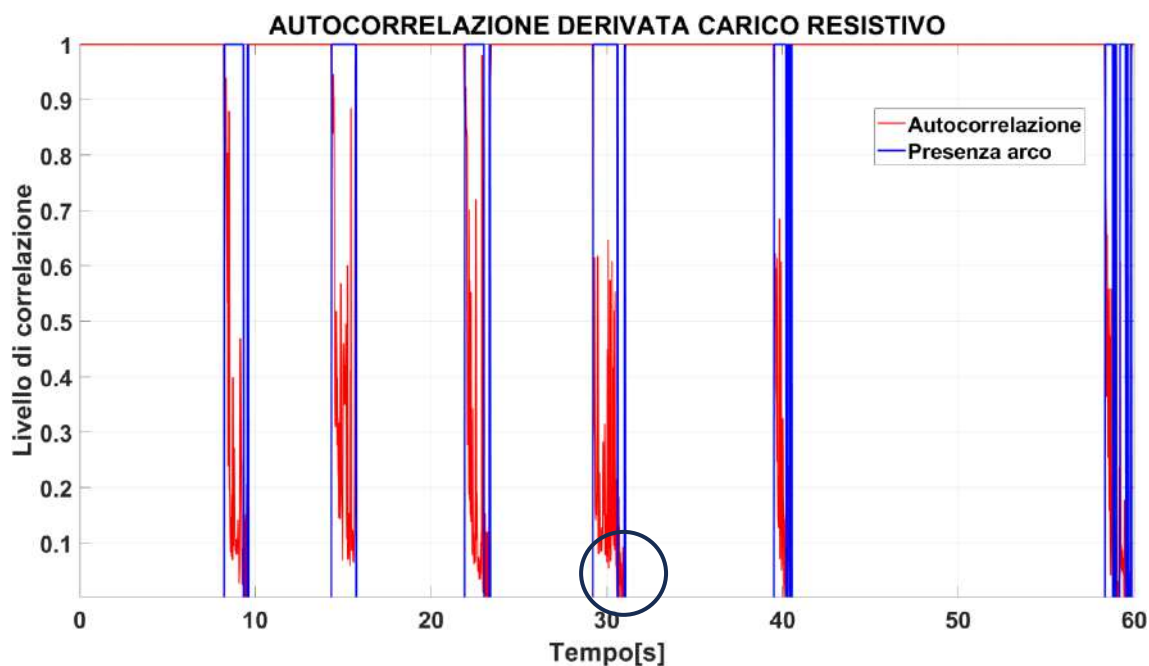


Figura 108 Autocorrelazione della derivata del segnale

Dalla Figura 108 Autocorrelazione della derivata del segnale si può vedere che, quando il segnale è assente, magari a causa di un eccessivo distanziamento degli elettrodi dello scaricatore, la correlazione scende drasticamente. Per ovviare questo problema basta semplicemente fare un controllo sulla presenza del segnale per evitare falsi positivi. La condizione di assenza di segnale è una condizione poco probabile in un'abitazione in cui c'è sempre qualche carico connesso, come il frigo ad esempio. In laboratorio testando i singoli carichi consigliati dalla norma invece è possibile che il segnale si interrompa per qualche istante.

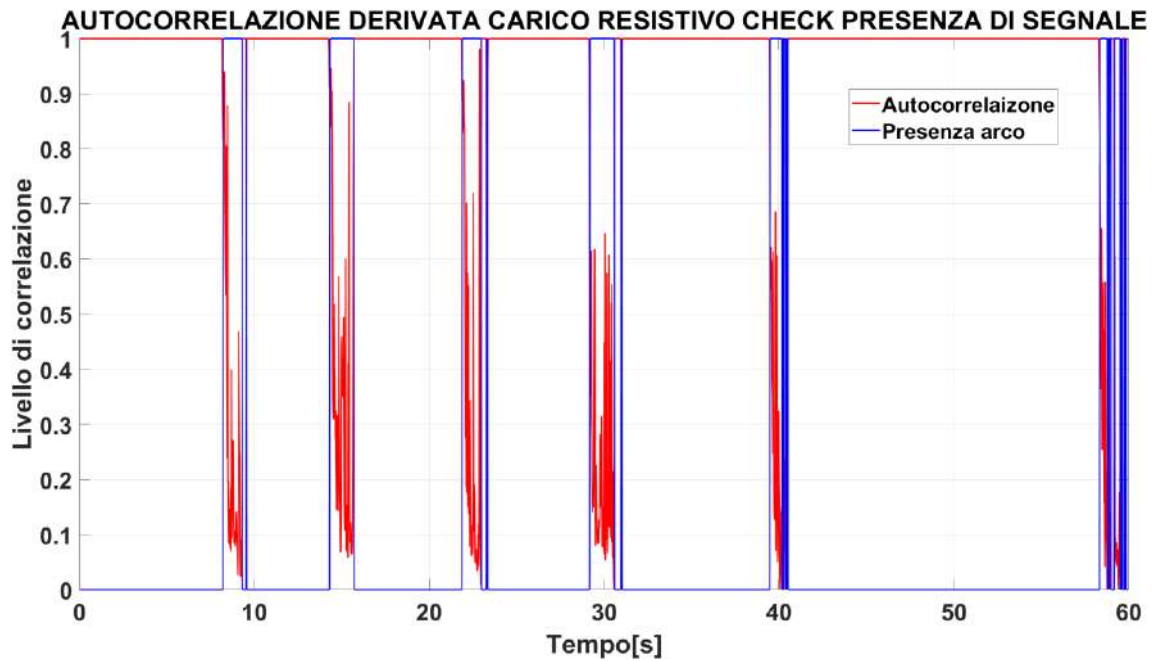


Figura 109 autocorrelazione della derivata del segnale di corrente per il carico resistivo dopo la verifica di presenza segnale

Da ora, dunque, tutti i parametri che vedremo avranno il semplice controllo sulla presenza del segnale. Come nella Figura 109 autocorrelazione della derivata del segnale di corrente per il carico resistivo dopo la verifica di presenza segnale.

Come si può vedere dalla figura soprastante, il parametro segue molto bene la presenza dell'arco mostrando un'escursione decisamente ampia ed evidente in presenza del fenomeno.

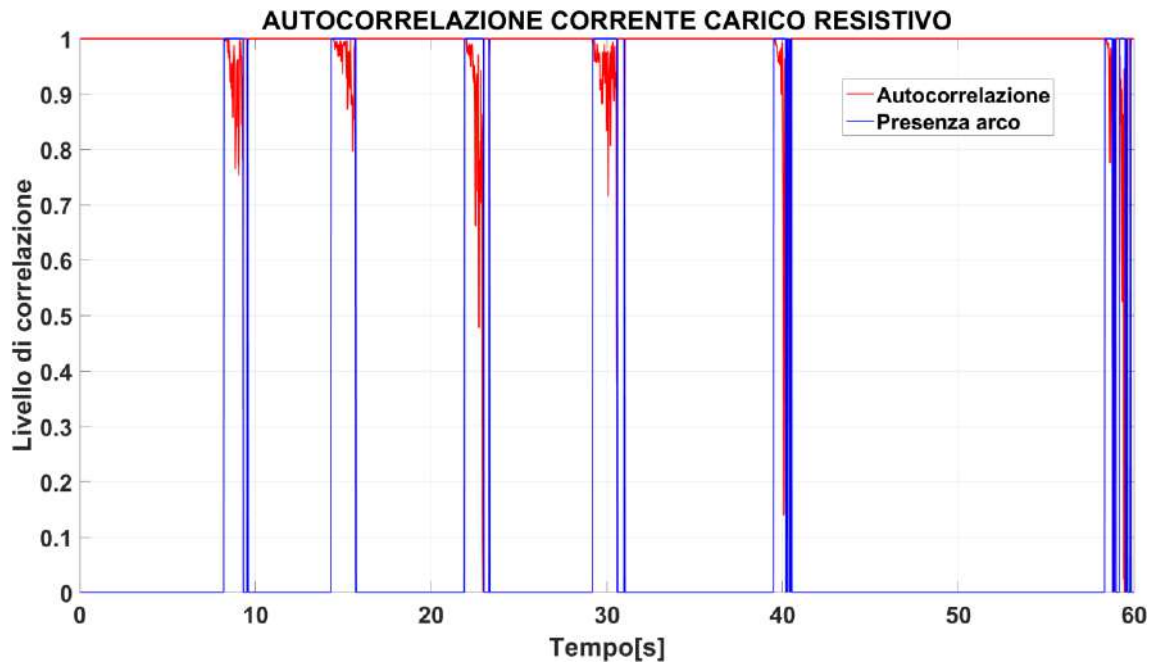


Figura 110 autocorrelazione della corrente per il carico resistivo

In Figura 110 autocorrelazione della corrente per il carico resistivo” possiamo vedere come il parametro continui a seguire perfettamente la presenza dell’arco pur avendo una dinamica minore. La derivata ha un effetto di amplificazione dei “sintomi” dell’arco.

Dunque, più l’indicatore è simile ad uno meno è la probabilità che ci sia un arco, più si abbassa più la probabilità aumenta. I pro di questa metrica sono sicuramente la semplicità di calcolo e la sensibilità.

Vediamo il comportamento con un carico mascherante, ovvero un trapano.

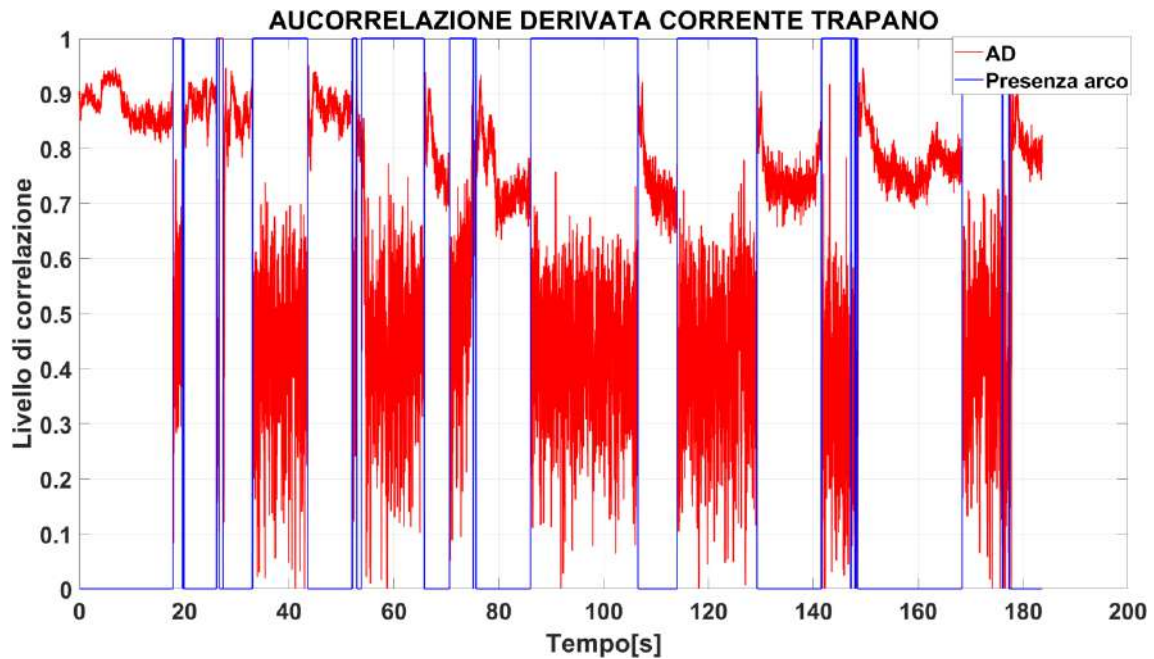


Figura 111 autocorrelazione della derivata della corrente del trapano

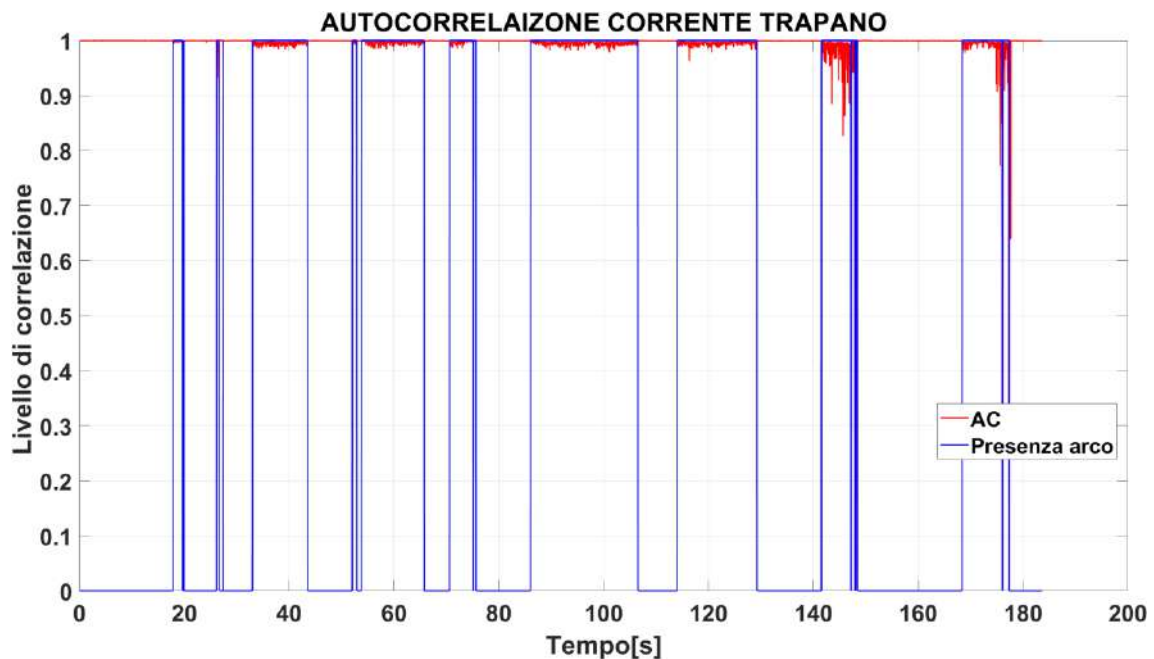


Figura 112 autocorrelazione della corrente del trapano

Confrontando la Figura 111 e la Figura 112 si vede subito qual è il limite principale dell'utilizzo della derivata per calcolare le metriche. La derivata amplifica qualsiasi rumore ed irregolarità quando il carico è di per sé rumoroso si vede come anche in condizioni di assenza di arco la correlazione è abbastanza bassa. Ecco perché questo tipo di carichi viene definito mascherante. In ogni caso anche con un carico molto rumoroso

vediamo come nei momenti in cui è presente l'arco c'è un'ulteriore escursione del parametro verso il basso. Per quanto riguarda invece la metrica calcolata per la corrente vediamo che ha una dinamica inferiore rispetto al caso resistivo, proprio perché questo carico maschera la presenza dell'arco, attenuandone i sintomi e le aleatorietà.

4.3.2 Rectfied sum

Come abbiamo già detto quando l'arco elettrico fa la sua comparsa porta con sé vari fenomeni che portano una sostanziale modifica della forma d'onda della corrente e di conseguenza anche della derivata, la sinusoide non è più una sinusoide perfetta, compaiono le spalle, rumore ecc.... dunque si è pensato proprio di capire cosa succede passando dalla condizione stazionaria a quella di arco facendo una somma della corrente originale dopo averla rettificata come in Figura 113 Raddrizzamento sinusoide" il raddrizzamento eseguito in questo lavoro è sempre il raddrizzamento a doppia semionda.

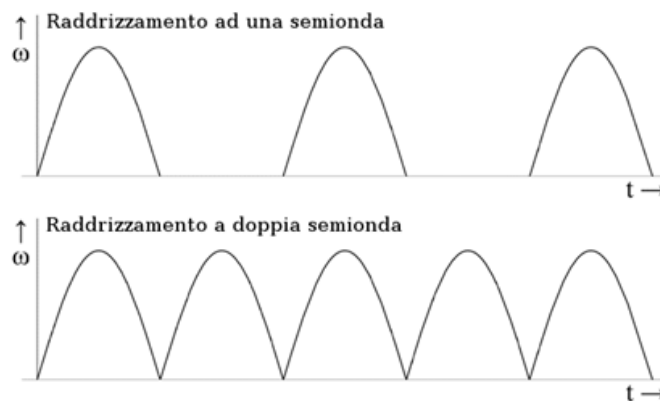


Figura 113 Raddrizzamento sinusoide

L'idea originaria era quella di calcolare l'integrale del segnale ma per semplificare la metrica si è deciso di usare questo parametro.

Facendo il valore assoluto della corrente e sommando tutti i campioni di un periodo come si vede nella formula successiva.

$$RCS = \sum_{I=Pn-1}^{Pn} asb (CORRENTE(I))$$

raggiungiamo il risultato in Figura 114 Rectfied current sum per il carico resistivo.

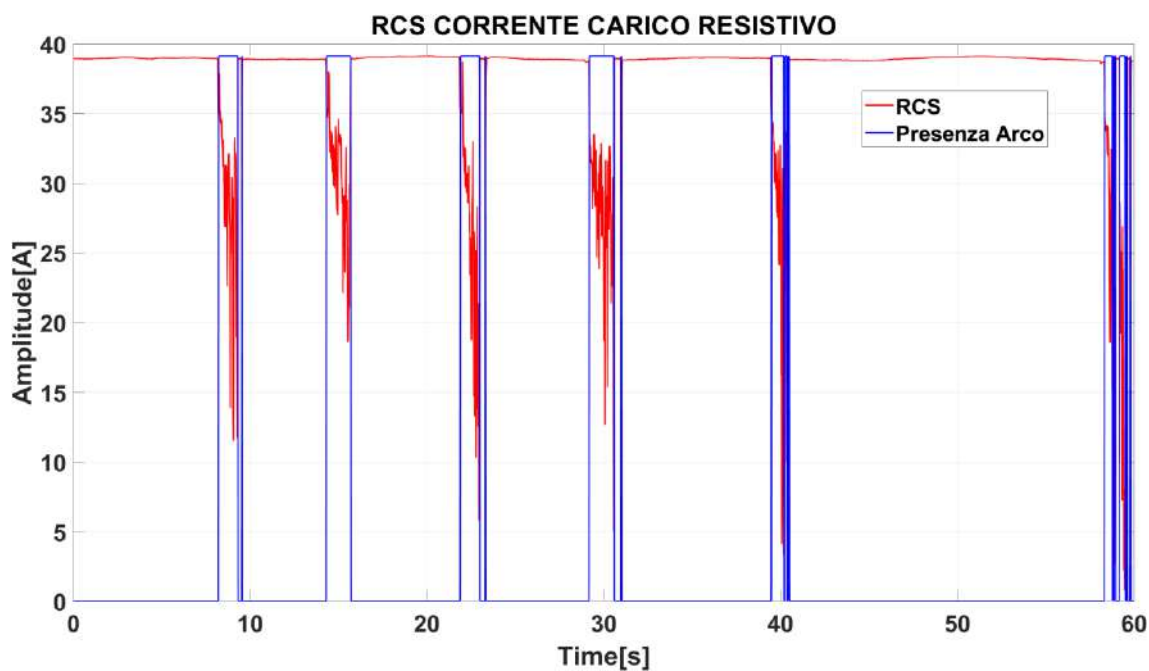


Figura 114 Rectfied current sum per il carico resistivo

Volendo migliorare ulteriormente l'andamento del parametro si può anche normalizzare rispetto al RMS, semplicemente dividendo per esso ogni singola somma ed ottenendo un valore dunque adimensionale. In questo modo si ottiene un andamento più lineare. Analizziamo ora i risultati per il parametro calcolato sia per la corrente che per la derivata del segnale per i vari carichi

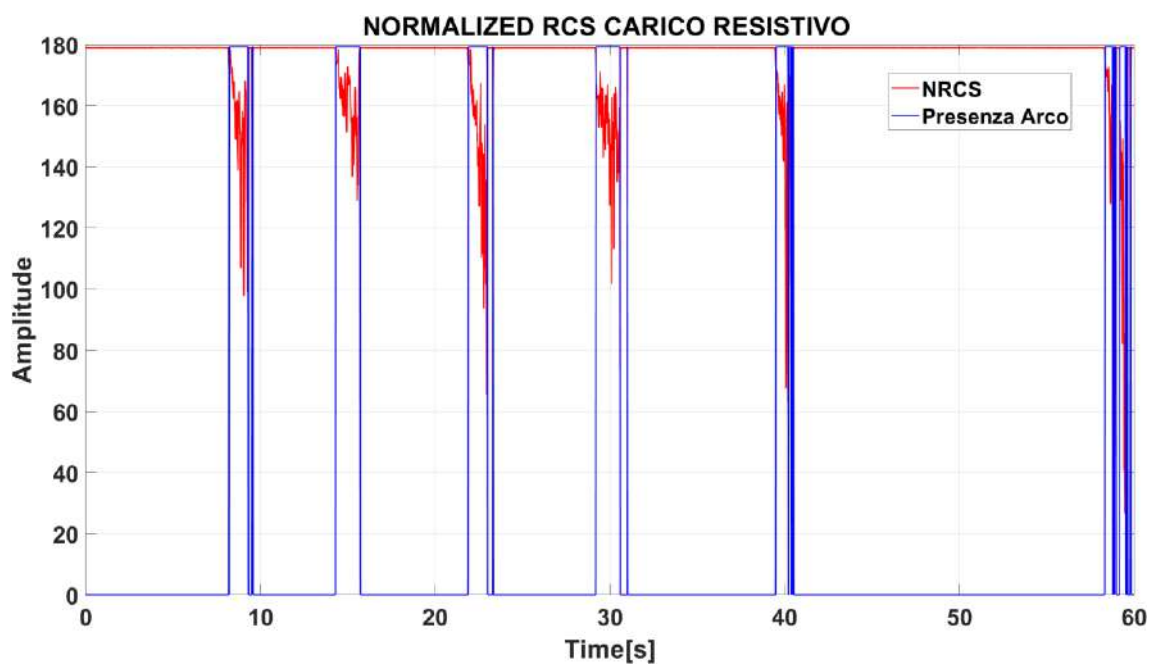


Figura 115 RCS normalizzato con il valore RMS per il carico resistivo

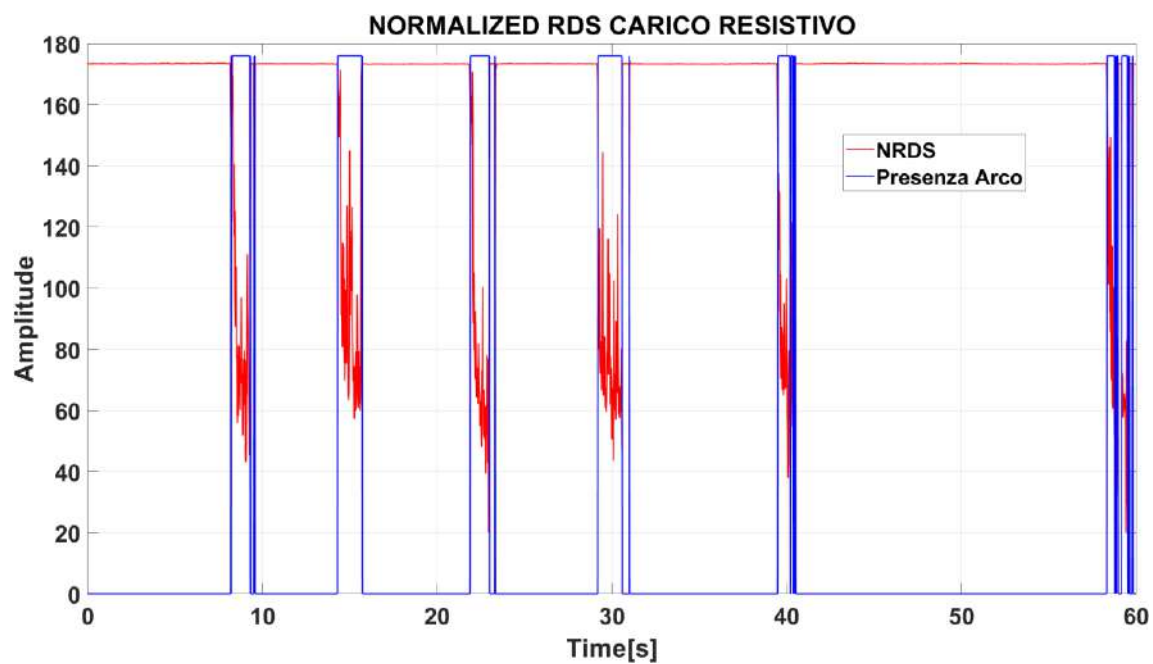


Figura 116 RDS normalizzato con il valore RMS per il carico resistivo

Anche per questa metrica le considerazioni sono simili alla metrica precedente. La derivata aumenta la variazione del parametro dovuto alla presenza dell'arco elettrico.

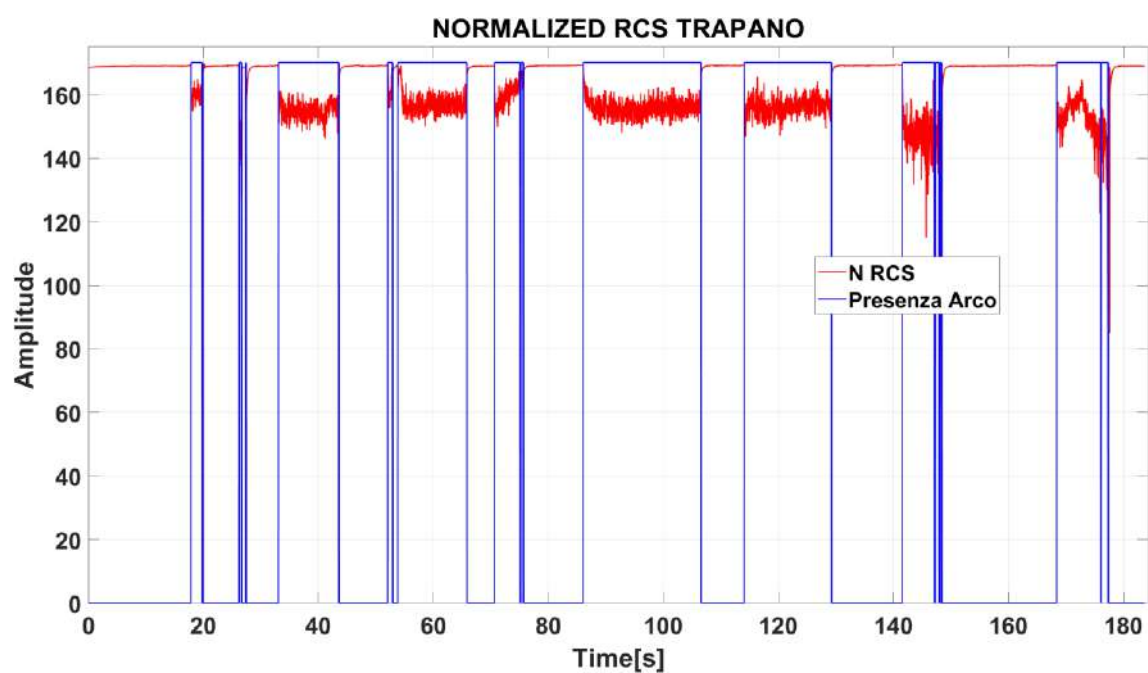


Figura 117 Normalized Rectified current sum calcolato sulla corrente del trapano

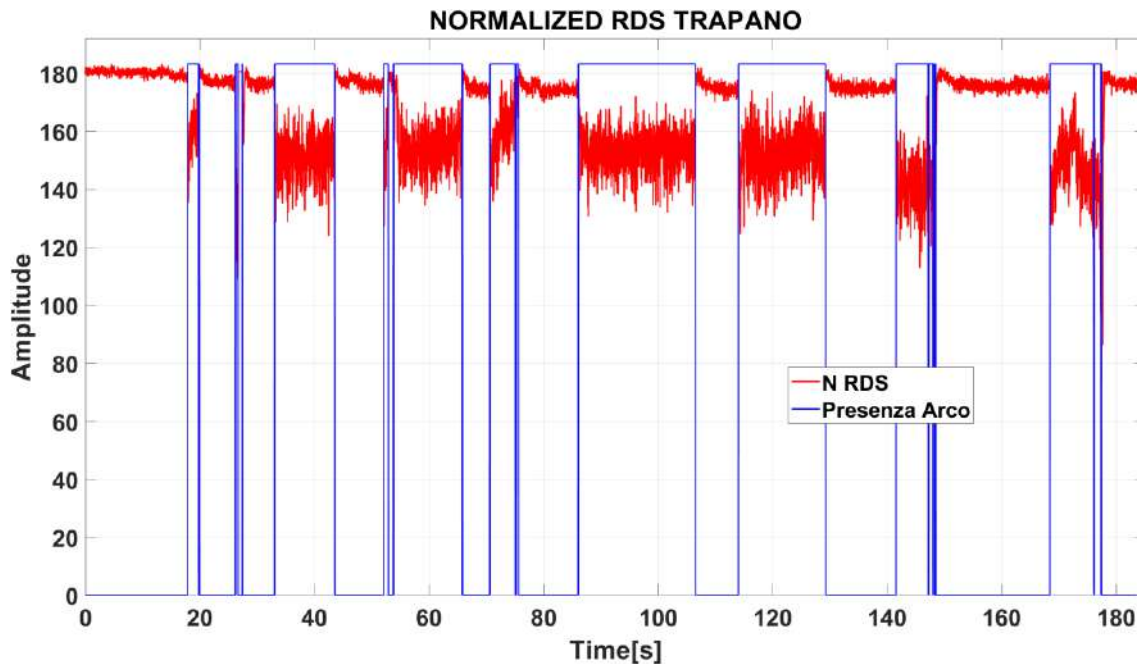


Figura 118 Normalized Rectified derivative sum calcolato sulla derivata del trapano

Analogamente a quanto visto per l'autocorrelazione in presenza di un carico mascherante la derivata accentua tutti i rumori presenti di per sé nel carico e sempre come nel caso precedente l'arco porta comunque modifiche notevoli al parametro dimostrandosi un parametro affidabile anche in presenza di masking load.

Il parametro calcolato sulla corrente risulta più pulito come ci aspettavamo e segue perfettamente l'arco elettrico.

4.3.3 Zeroperiod

Il primo e più evidente sintomo di un arco elettrico sono le spalle intorno allo zero. Queste spalle però non sono perfettamente piatte ma fanno continue transizioni invece, contando queste transizioni possiamo avere un'idea della situazione dell'impianto in quel momento.

Normalmente ogni periodo ci sono tre transizioni attraverso la linea dello zero un numero maggiore può segnalare un'anomalia nel sistema. Il calcolo del parametro si svolge come segue calcolando varie variabili intermedie.

ZERO_trans che sta per "ZERO_TRANSITION" mi dice la distanza tra un attraversamento dello zero ed il successivo. In condizioni normali dovrebbe valere sempre 100 in quanto campionando a 10kHz il segnale abbiamo 200 punti per periodo, dunque,

avremo una transizione di zero ogni 100 elementi. Ovviamente quando si presenta l'arco elettrico si presentano anche le famose spalle dell'arco che andranno a diminuire drasticamente questa distanza. Viceversa, quando manca il segnale il numero di zeri di fila sale esponenzialmente e non c'è attraversamento (motivo per il quale ci sono quei picchi enormi che mi indicano pure la durata dell'interruzione, ma al momento non ci serve).

- **Zerovector = Vettore in cui elementi sono le posizioni dello zero crossing. Lunghezza variabile**
- **Trend = Si calcola eseguendo le sottrazioni successive in zerovector, dunque, andamento sarà intorno a 100. lunghezza variabile**
- **ZERO_trans = vettore TREND riportato alla lunghezza del segnale**
- $$ZP = \left(\frac{\sum_{i=p_n-1}^{pn} ZERO_trans_i}{l_p} \right)$$

Analizziamo nel dettaglio I risultati mediante le seguenti figure

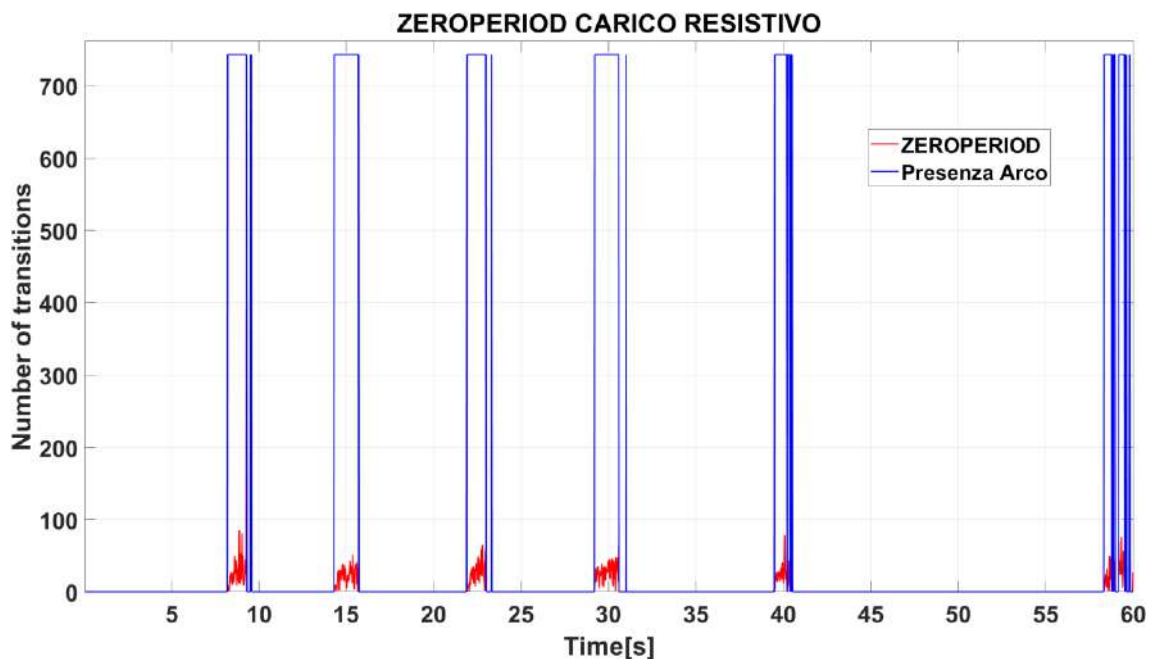


Figura 119 Metrica: zeroperiod

Vediamo come la presenza di arco altera sensibilmente il numero di attraversamenti per lo zero a causa delle spalle che si vanno a generare.

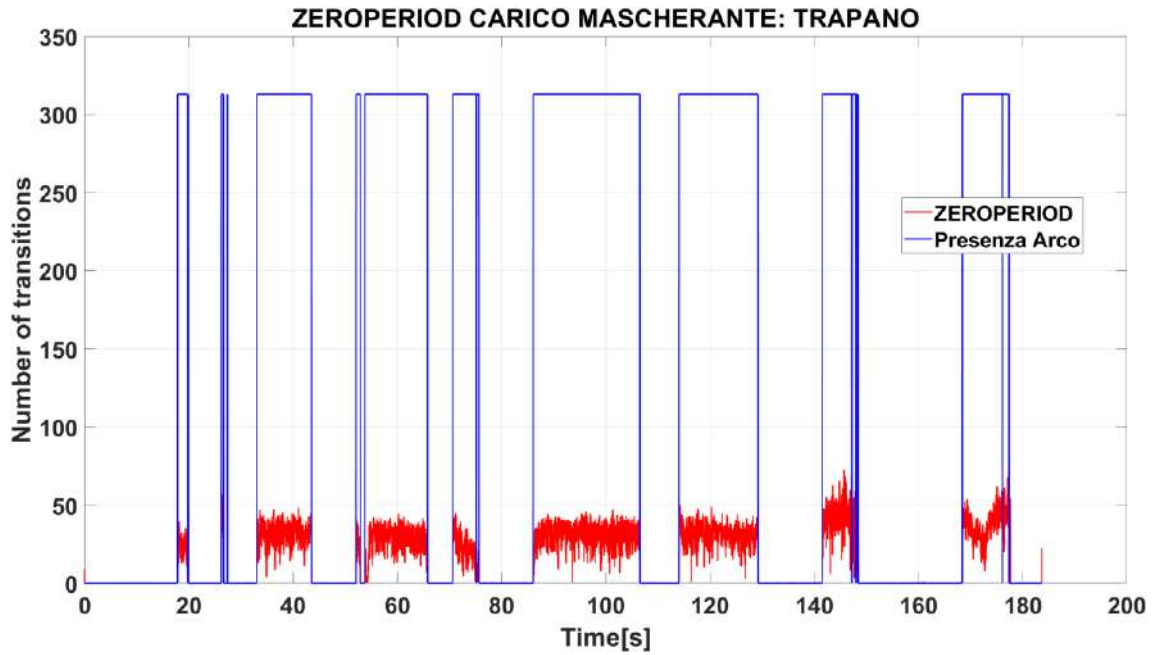


Figura 120 ZEROPERIOD calcolato sulla corrente del trapano

Questa metrica che si concentra solo sulla generazione delle spalle dell'arco sembra essere sufficientemente immune alla presenza di un carico mascherante, mantenendo un'accuratezza invariata rispetto al caso resistivo.

4.3.4 Mean Absolute Value

La media è un indicatore molto semplice da calcolare:

$$\text{MEDIA} = \text{abs} \left(\frac{\sum_{i=pn-1}^{pn} x'_i}{l_p} \right)$$

L'informazione che ci fornisce è molto utile poiché ci parla della simmetria del segnale tra semionda positiva e negativa, in condizioni di normalità la media dovrebbe avere valore nullo essendo le due parti della sinusoide perfettamente uguali, Come vedremo nelle immagini successive. Vedremo il sia la media della corrente che della derivata. Calcolare il valore assoluto della media è fondamentale per avere un parametro che abbia una singola direzione di variazione al fine di semplificare la scelta dinamica di una soglia ottimale. La media verrà calcolata per ogni periodo di segnale, nei seguenti casi dunque, ogni 200 punti.

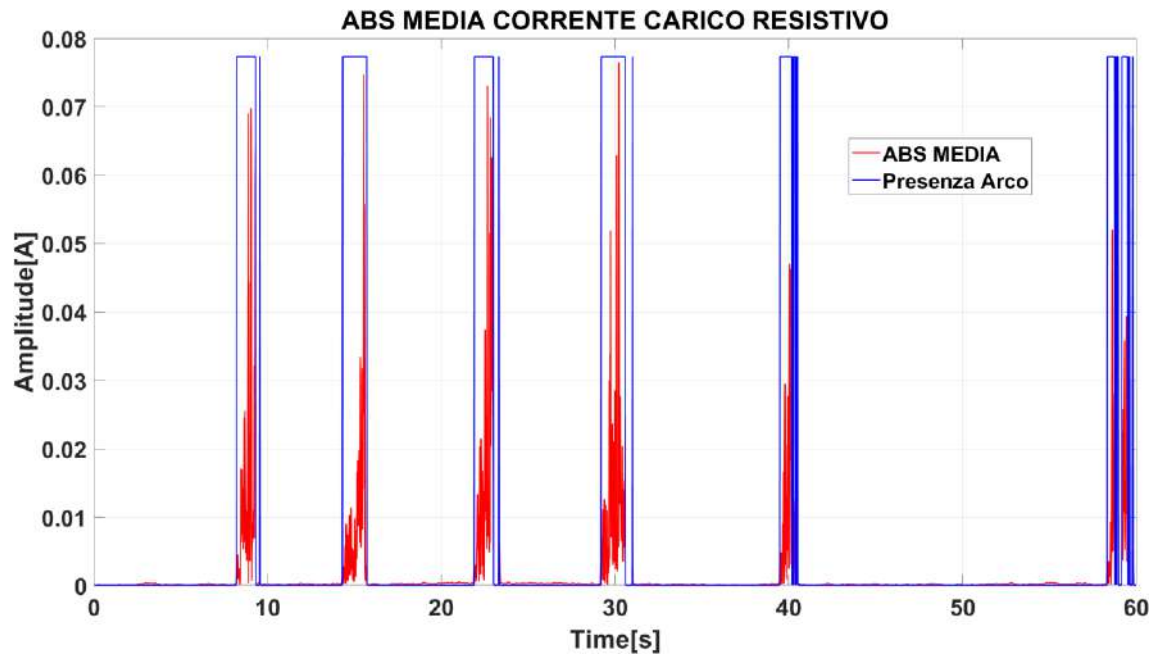


Figura 121 Metrica: valore assoluto della media della corrente ogni periodo

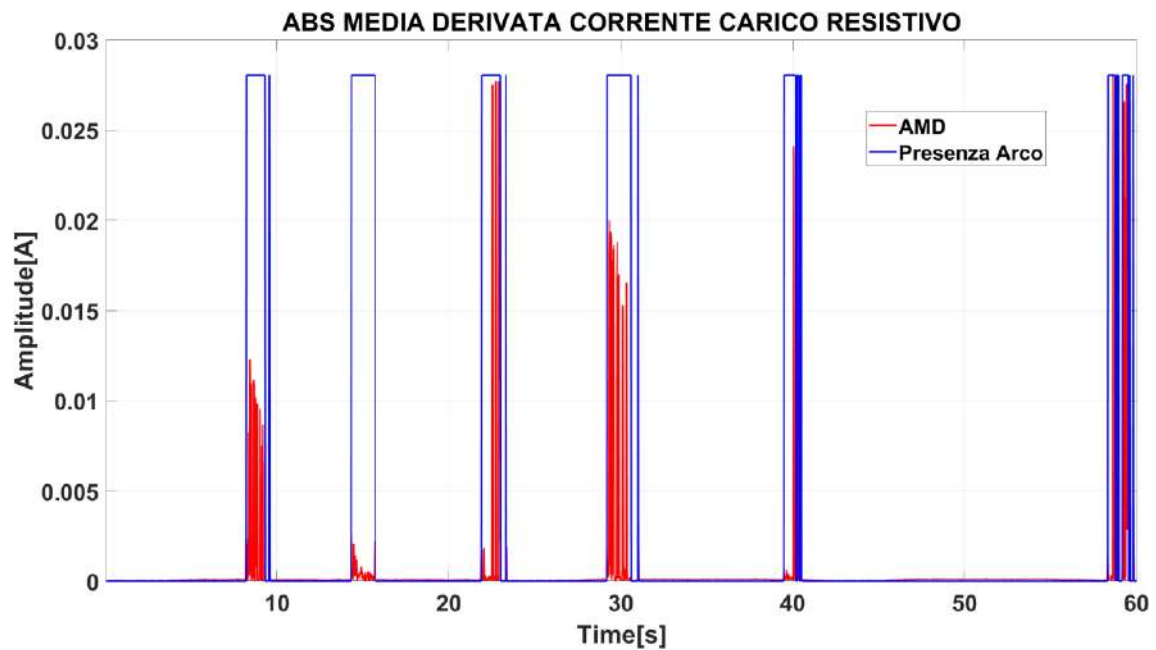


Figura 122 Metrica: valore assoluto della media della derivata ogni periodo

Dalle immagini: Figura 121 Figura 122 possiamo osservare l'efficacia della metrica grazie alla perdita di simmetria del segnale. Questa metrica è semplicissima da calcolare dal punto di vista computazionale.

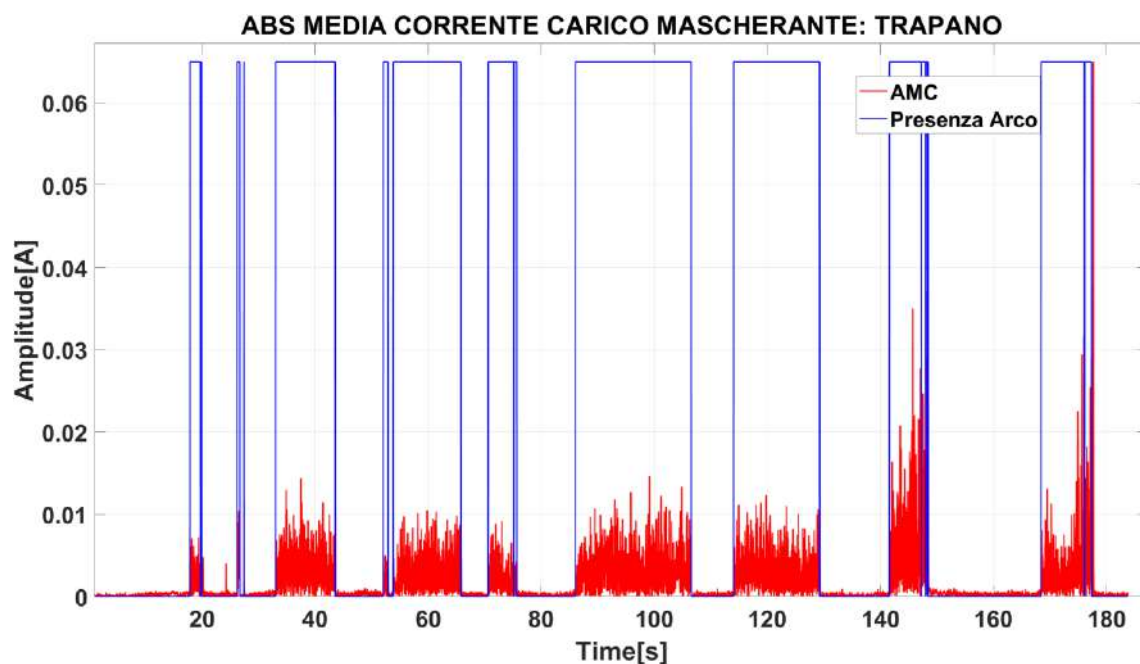


Figura 123 valore assoluto della media della corrente del trapano

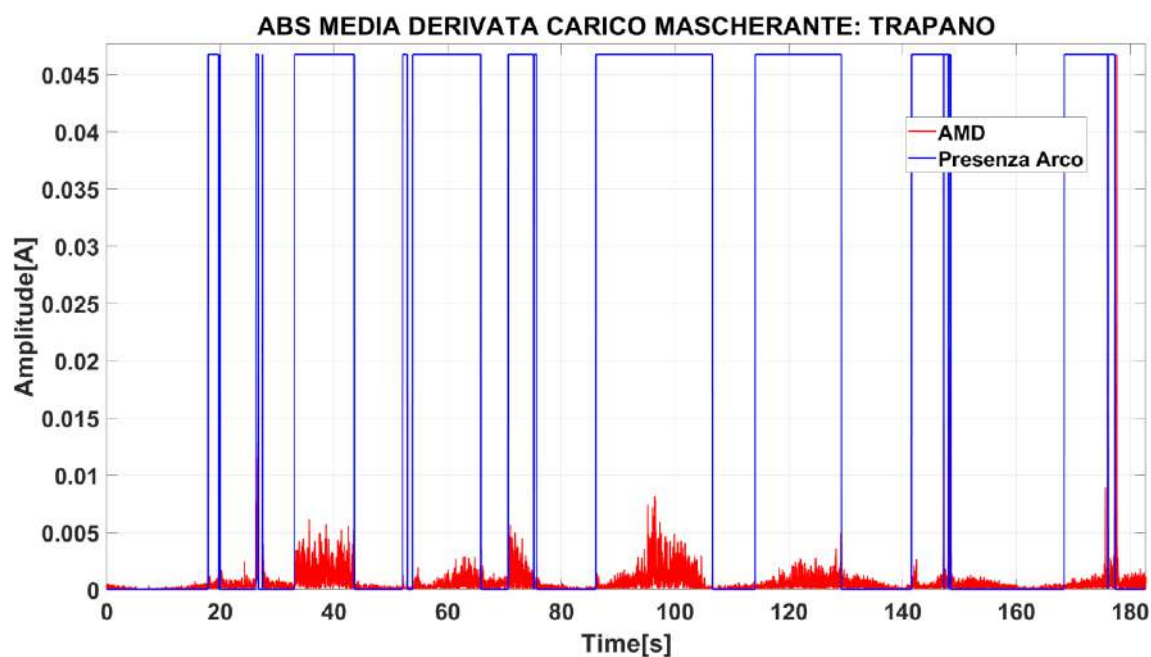


Figura 124 valore assoluto della media calcolata sulla derivata della corrente del trapano

Possiamo osservare come con un carico mascherante il “fondo” della metrica sia più rumoroso ma comunque non inficia il corretto funzionamento del parametro. Quando siamo in presenza di carichi mascheranti quasi sempre le metriche calcolate sulla corrente si comportano meglio a causa del rumore intrinseco generato da suddetti carichi.

4.3.5 RMS

La presenza di un guasto da arco determina variazioni significative del valore efficace (RMS) della corrente, legate al comportamento intrinsecamente instabile e non lineare del fenomeno. L'arco elettrico si comporta infatti come un'impedenza variabile che si accende e si estingue in maniera ciclica, introducendo fluttuazioni nella forma d'onda della corrente. Tali discontinuità si riflettono direttamente sul calcolo del valore RMS.

Nel caso specifico di un guasto d'arco in serie, la corrente risulta limitata sia dall'impedenza dell'arco stesso sia dal carico a valle, con la conseguenza che il valore RMS può ridursi non abbastanza da essere facilmente rilevato da dispositivi non progettati appositamente per fare da AFDD. A ciò si aggiunge la generazione di componenti armoniche e di contributi ad alta frequenza, che modificano ulteriormente il contenuto spettrale della corrente e accentuano la variazione del valore efficace.

Il processo di innesco e di estinzione dell'arco, governato da soglie di tensione e dal passaggio per lo zero della corrente, produce una conduzione pulsante caratterizzata da picchi e cadute improvvise. Questo andamento irregolare incide sul bilancio energetico complessivo e sulla distribuzione temporale della corrente, causando oscillazioni del valore RMS anche marcate durante la persistenza del guasto.

In conclusione, le variazioni dell'RMS in presenza di arco elettrico sono la diretta conseguenza della sua natura discontinua, impulsiva e non lineare, che si traduce in una riduzione e/o in una fluttuazione del valore efficace della corrente rispetto a quella assorbita da un carico in condizioni ordinarie.

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=p_{n-1}+1}^{p_n} (x_i)^2}{l_p}}$$

Osserviamo qualche esempio:

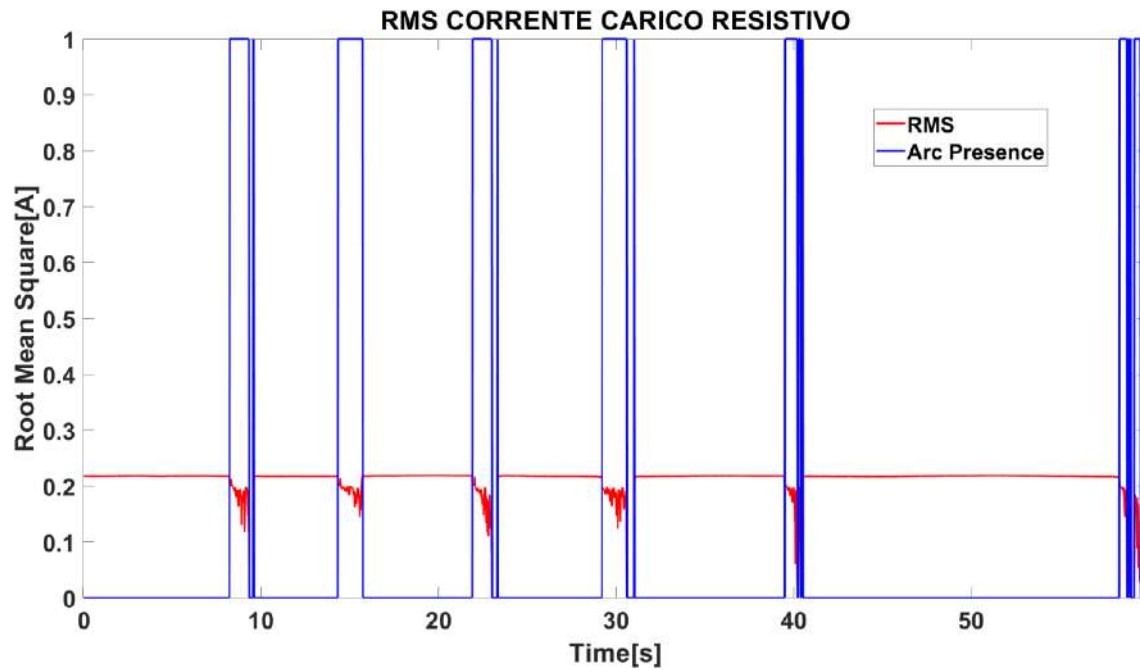


Figura 125 RMS corrente

La derivata di per sé è molto sensibile alle variazioni introdotte dall'arco ma come calcolarne il valore RMS ogni periodo permette di avere una curva più lineare che può essere utilizzato come parametro.

$$\text{RMS_D} = \sqrt{\frac{\sum_{i=p_{n-1}+1}^{p_n} (x'_i)^2}{l_p}}$$

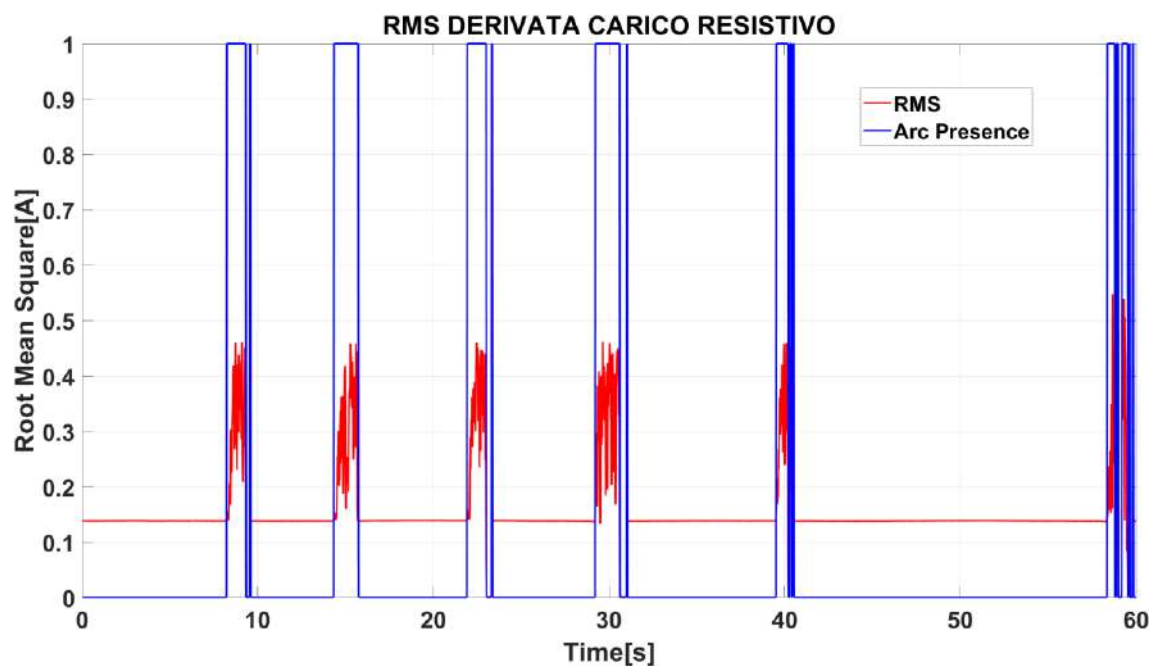


Figura 126 RMS calcolato sulla derivata

Notiamo che nel caso della derivata l'andamento è opposto rispetto al valore RMS calcolato per la corrente. Infatti, il segnale durante l'arco diventa molto variabile, portando un aumento del valore della derivata notevole. Analizziamo gli altri casi.

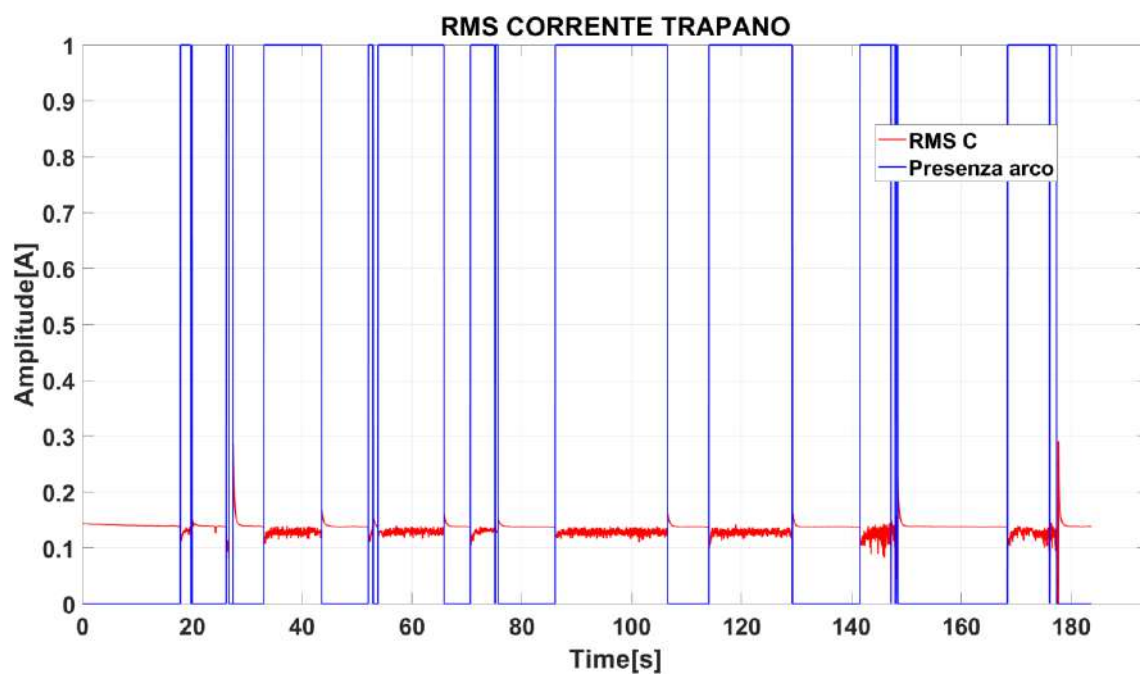


Figura 127 RMS CORRENTE TRAPANO

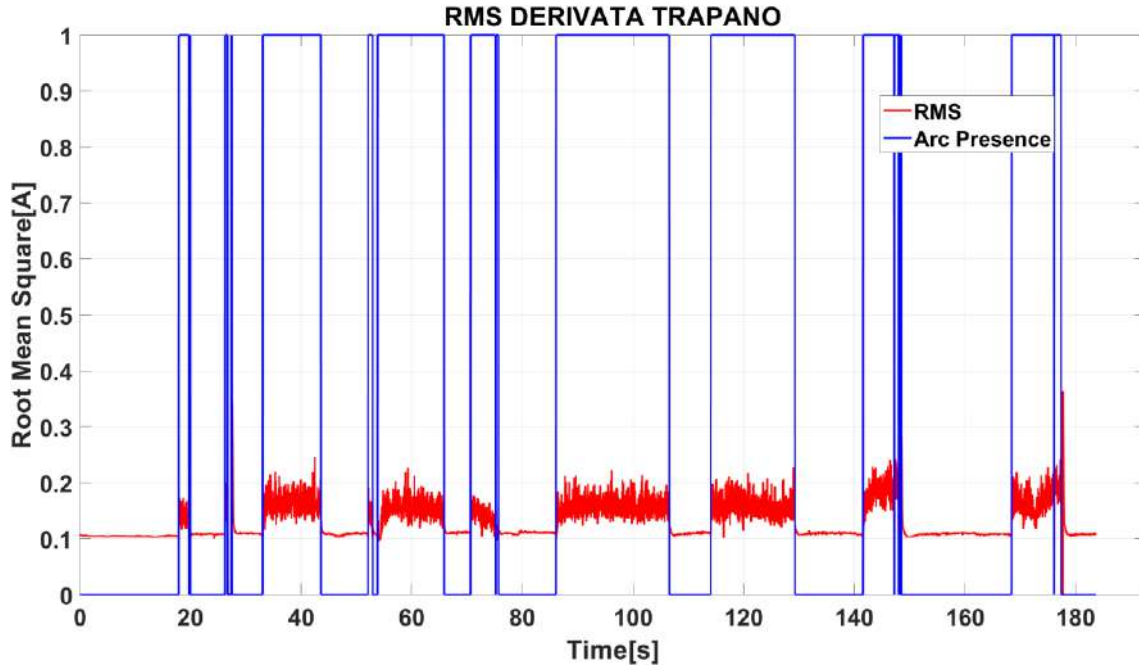


Figura 128 RMS DERIVATA TRAPANO

In Figura 127 possiamo notare come alla fine di ogni arc fault abbiamo uno spike del valore RMS verso l'alto, questo è dovuto al tipo di carico che avendo il motore elettrico ogni ripartenza necessita della sua corrente di spunto. In generale come era previsto l'RMS segue sempre in maniera affidabile la presenza dell'arco anche nel caso di carico mascherante.

4.3.6 RMS Parameter

Quello che in questo lavoro chiamiamo RMS Parameter altro non è che il confronto del valore RMS tra due periodi successivi come si vede in formula:

$$RMS_P = abs \left(\left(\sqrt{\frac{\sum_{i=p_{n-1}+1}^{p_n} x_i^2}{l_p}} \right) - \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=p_n+1}^{p_{n+1}} x_i^2}{l_p}} \right) \right)$$

Il vantaggio del confronto tra due finestre successive anziché la valutazione dell'andamento risiede nel fatto che, quando è presente un arco il segnale non è stazionario ed in questo modo possiamo distinguere più facilmente le variazioni dovute ad un rumore costante del carico e quelle introdotte da un arco elettrico. Anche questo algoritmo verrà eseguito sulla corrente e sulla derivata della corrente.

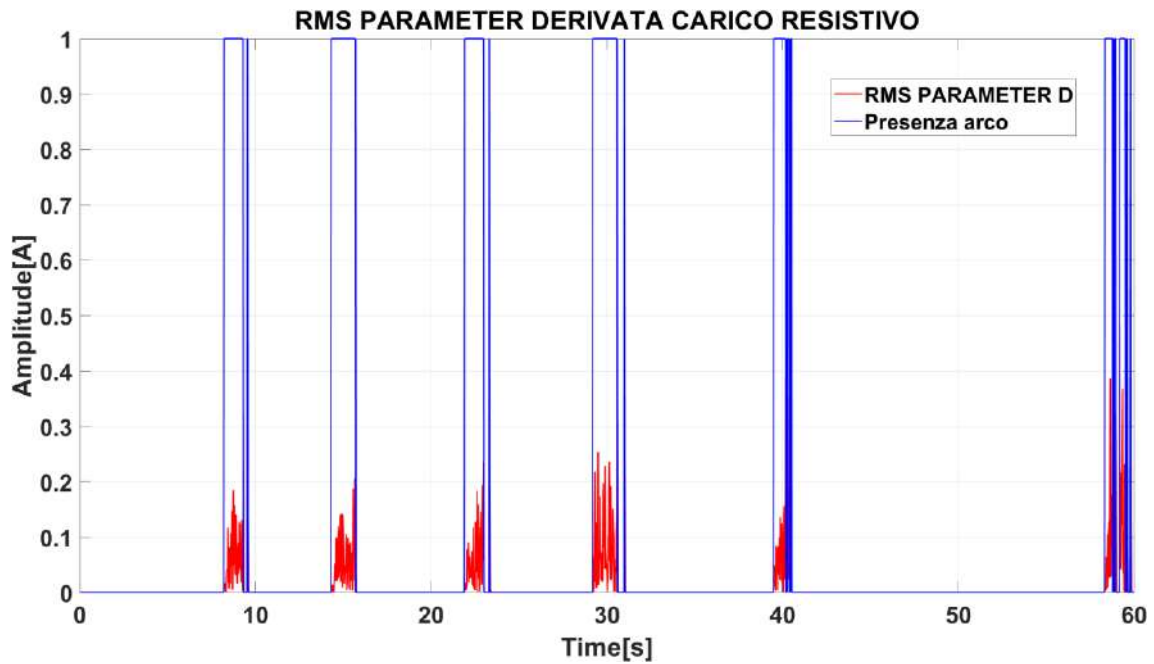


Figura 129 RMS PARAMETER DERIVATA

Confrontando i due grafici calcolati rispettivamente per la derivata e per la corrente possiamo notare come la derivata abbia un'escursione decisamente maggiore rispetto al parametro calcolato sulla corrente in Figura 130 RMS PARAMETER CORRENTE dove l'asse y vediamo arriva ad un massimo di 0.18 per rendere più leggibile il grafico.

In un certo senso questo parametro è la derivata dell'andamento del valore RMS.

Un vantaggio di questo parametro è che in condizioni di stazionarietà del segnale va intorno a zero e varia solo in presenza di anomalie o di cambi di carico e qualora ci sia un cambio carico poi tornerebbe subito a zero dopo due periodi di segnale.

Avendo il valore RMS un output ogni periodo è decisamente più lento rispetto alla derivata della corrente e dunque più stabile e meno suscettibile a rumori. Per questo si ritiene sia meglio osservare questo parametro rispetto ad una semplice derivata del segnale.

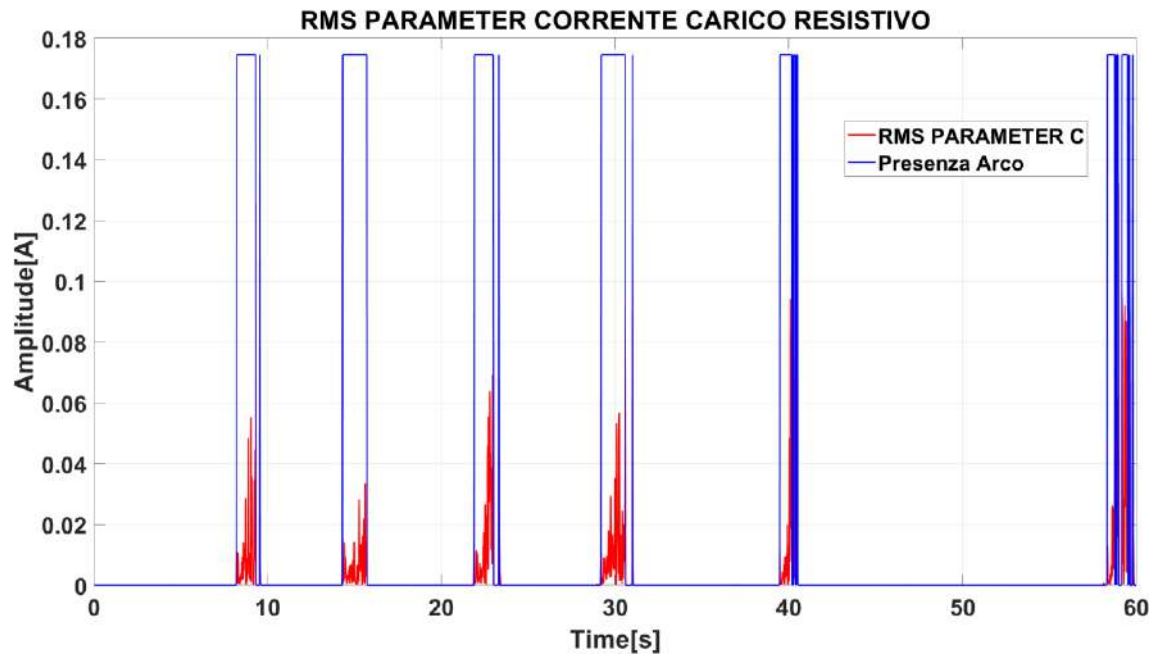


Figura 130 RMS PARAMETER CORRENTE

Osservando ora il risultato ottenuto con la corrente del trapano

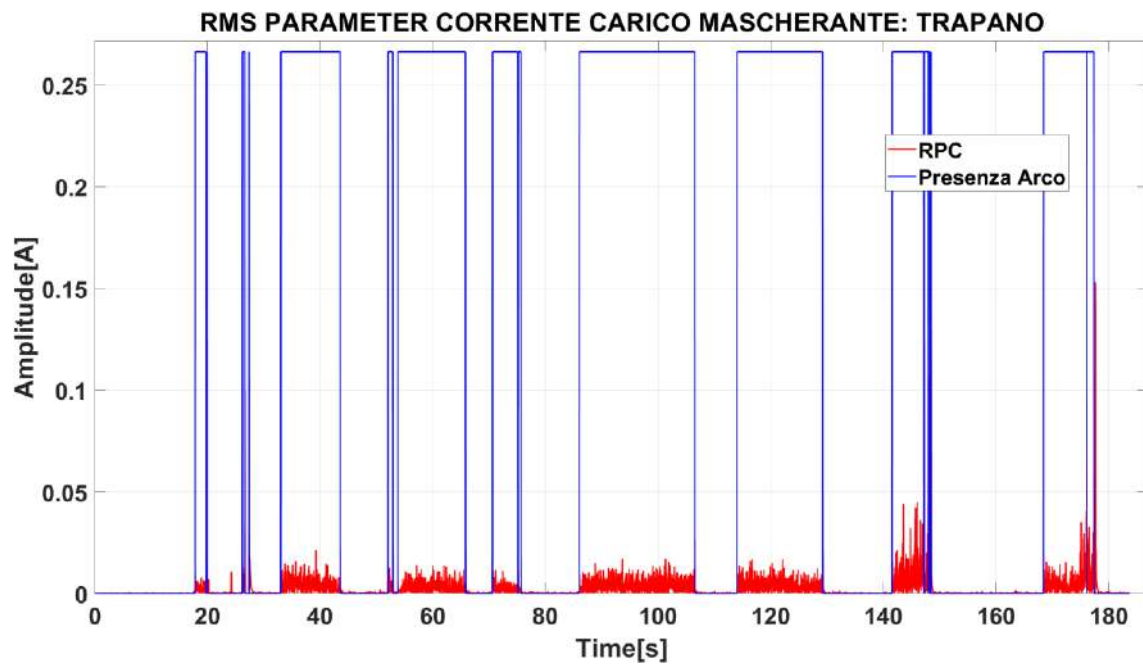


Figura 131 RMS PARAMETER CORRNETE CARRICO MASCHERANTE

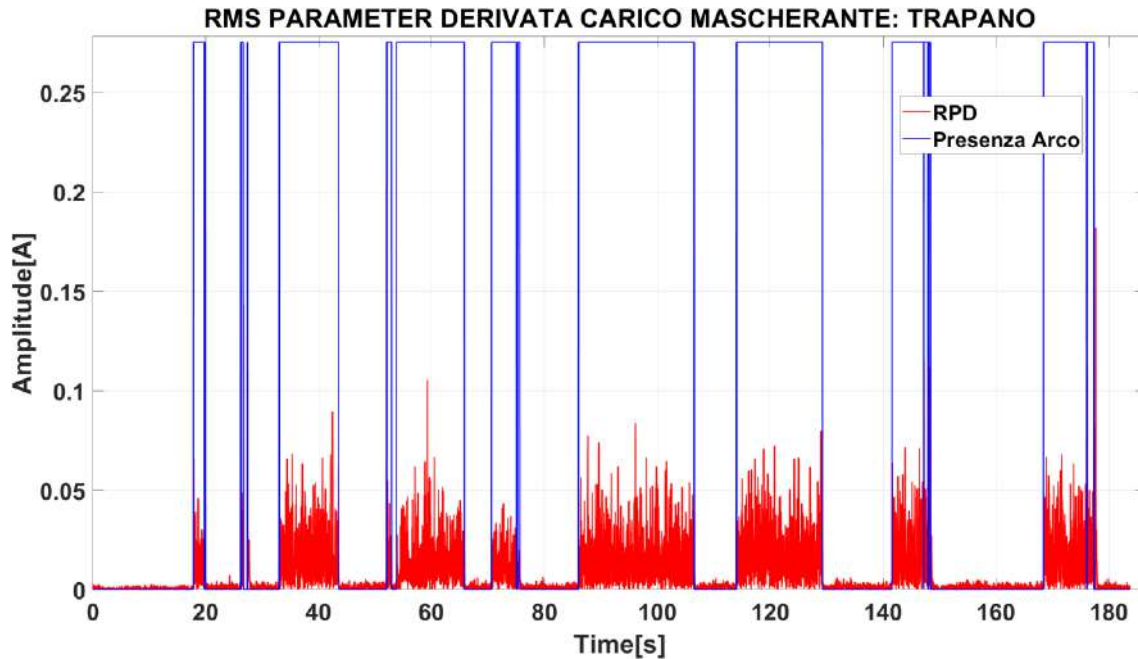


Figura 132 RMS PARAMETER CARICO MASCHERANTE TRAPANO

Questo parametro anche in presenza di un carico mascherante, come il trapano, si dimostra ugualmente efficace mostrando lo stesso comportamento mostrato in presenza del carico resistivo a meno di un po' di rumore di fondo.

Vantaggi importanti di questa metrica rispetto al semplice calcolo del RMS, dunque, sono:

- Rilevazione rapida dei transitori di ampiezza: un'improvvisa variazione dell'RMS tra due periodi consecutivi evidenzia picchi di corrente associati a innesco o spegnimento di un arco.
- Implementazione semplice in tempo reale: il calcolo di RMS su finestre fisse e la differenza fra due valori è computazionalmente leggero e adatto a MCU con risorse limitate.

4.3.7 Entropia

L'entropia è una delle metriche più "innovative", la misura di disordine in un sistema è perfetta per la verifica di presenza di un fenomeno aleatorio come l'arc fault. Il calcolo dell'entropia è meno "basilare" rispetto alle altre medie avendo una sommatoria di logaritmi:

$$H = - \sum P(x_i) \log_{10} P(x_i)$$

In cui $P(i)$ è la probabilità di avere campioni in un determinato intervallo. Avremo “n” intervalli in cui dividiamo l’ampiezza del nostro segnale in ingresso (ad esempio prendendo il massimo ed il minimo di un periodo lo si suddivide in $n=20$ intervalli), poi, contiamo quanti campioni abbiamo per ogni intervallo e dividiamo quel numero per il numero totale di punti. Così otteniamo tutti i $P(i)$. fatto ciò, eseguiamo la sommatoria per ogni $P(i)$. il logaritmo è in base 10, sapendo che la probabilità può variare esclusivamente tra 0 e 1, sappiamo che, ogni valore sarà negativo in quanto, ogni logaritmo di un numero più piccolo della base è sempre negativo. Può capitare, nel caso ci siano troppi intervalli che un intervallo sia vuoto e dunque dia $\log(0)$ che non è calcolabile; dunque, si deve fare attenzione a questo problema. L’entropia si misura in Hartley. Nella teoria dell’informazione quantifica quanto è imprevedibile un insieme di dati o un segnale. Più precisamente, l’entropia misura la media delle informazioni contenute nei possibili risultati di una variabile casuale. Vediamo il risultato dell’applicazione dell’entropia per identificare l’arco elettrico

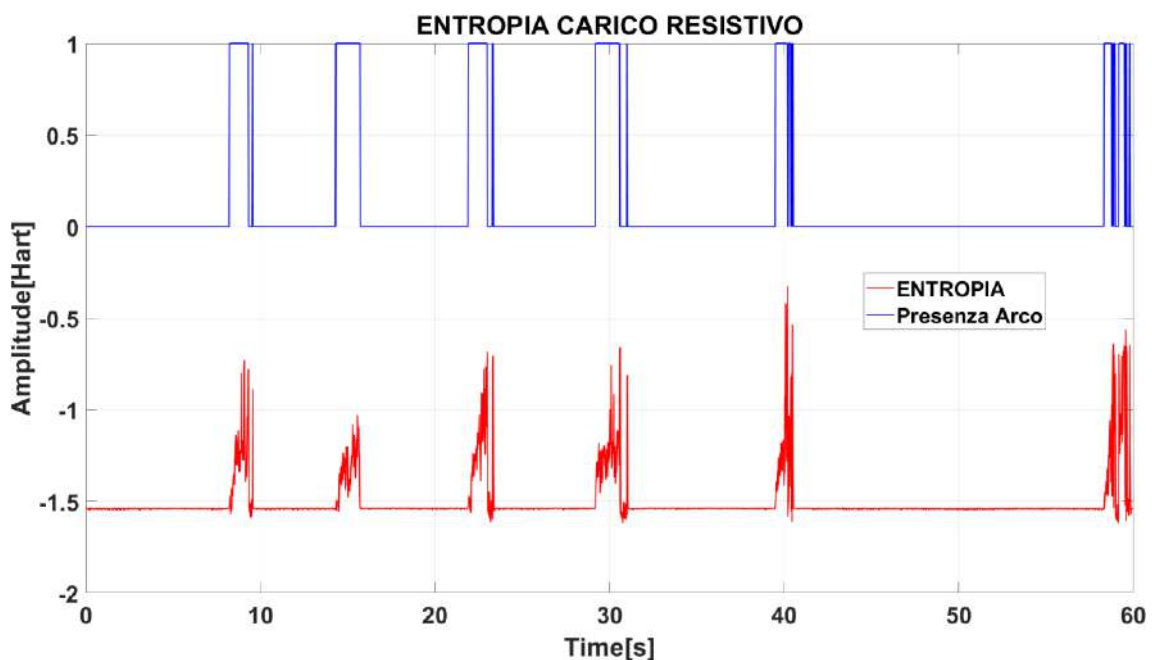


Figura 133 Entropia calcolata sulla corrente

L’entropia ha generalmente un valore negativo, qualora si faccia il valore assoluto abbiamo una inversione del verso della soglia, questo sarebbe uno svantaggio sicuramente. Se invece gli aggiungiamo il suo valore medio in condizioni di non arco abbiamo una metrica intorno allo 0 in condizioni di normalità e che varia verso l’alto in

condizioni di arco, sicuramente il caso migliore. Facendo infine il valore assoluto otteniamo una forma riconducibile a quella degli altri parametri che si presta bene ad essere utilizzato come metrica a cui applicare una soglia dinamica come si vede in Figura 134 entropia rielaborata per essere utilizzata come parametro. Il parametro finale ha un'ottima risposta alla presenza di arco, in seguito vedremo i tassi di successo della metrica al variare di una soglia.

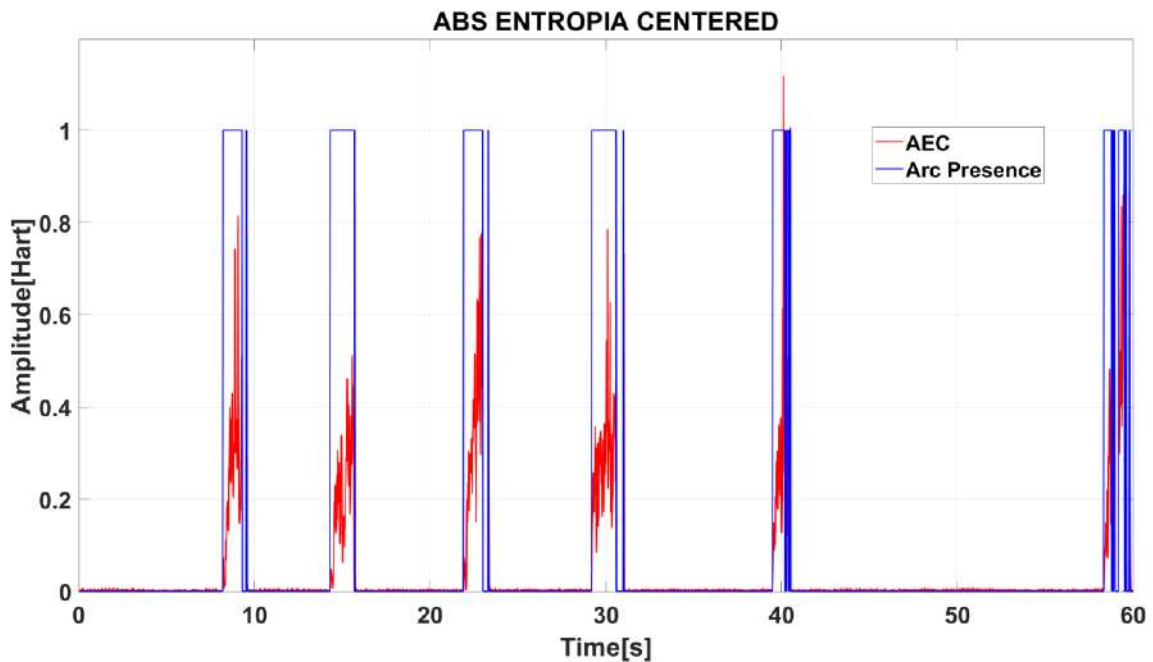


Figura 134 entropia rielaborata per essere utilizzata come parametro

Cercando il disordine nel sistema ha poco senso provare ad usare l'entropia anche con la derivata in quanto amplifica generalmente il caos dunque qualsiasi rumore maschererebbe la caoticità introdotta dell'arco. In Figura 134 vediamo come il parametro si comporti molto bene e segua efficacemente la presenza dell'arco. Per questa metrica però è più interessante il risultato che possiamo osservare in Figura 135 in presenza di un carico mascherante ed apparentemente più rumoroso. Osserviamo come l'arco viene comunque identificato efficacemente anche in presenza di una corrente notevolmente più bassa del carico resistivo e con un carico che di per sé maschera la presenza dell'arco.

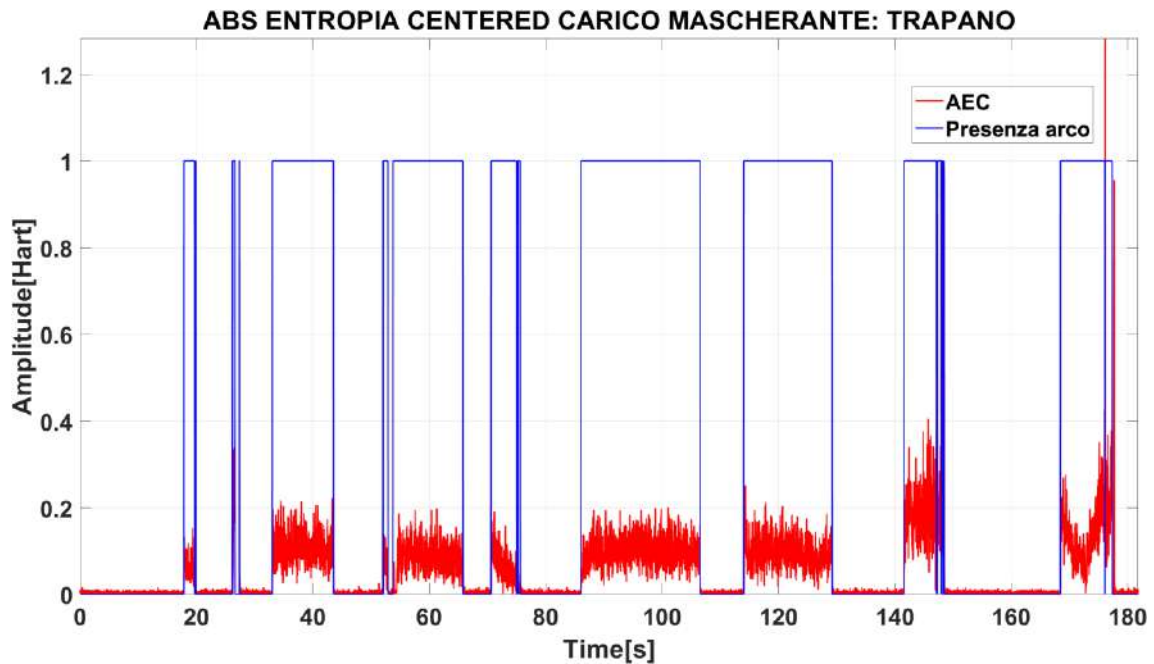


Figura 135 entropia trapano

Solo in condizioni fortemente disturbate l'arco viene parzialmente mascherato, e l'andamento del parametro lo lascia intuire. In generale, però, l'entropia continua a seguire con precisione la presenza del guasto da arco elettrico, confermandosi un indicatore robusto anche in scenari complessi.

4.3.8 Distanza massimo minimo

Un'altra caratteristica dell'arco che abbiamo osservato è che genera una leggera variazione di ampiezza abbassando il massimo del segnale ed alzando il minimo. Il parametro in questione però monitorerà la distanza temporale tra il massimo e minimo che verrà anche essa alterata dalle varie modifiche apportate alla forma d'onda dell'arco.

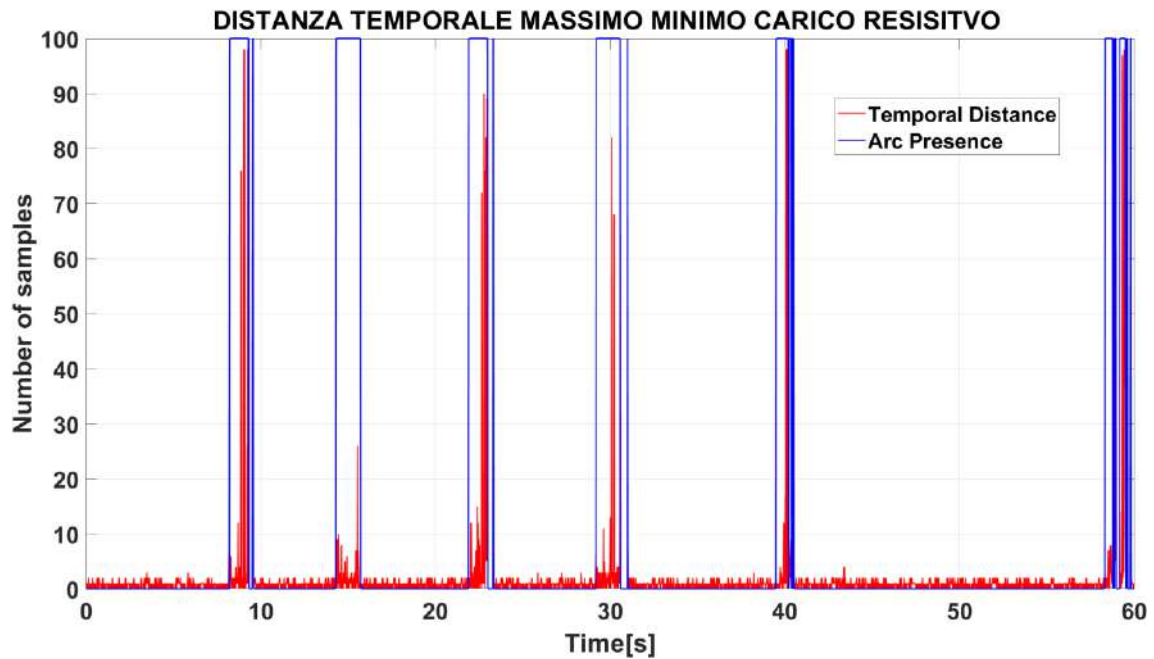


Figura 136 distanza temporale tra massimo e minimo della sinusoide

Questo parametro così visualizzato viene calcolando la differenza tra la posizione del massimo e la posizione del minimo in un periodo di segnale. Poi viene sottratto 100 ovvero la metà dei punti presenti in un periodo campionato a 10 kHz. Questo serve ad avere il parametro intorno a 0 e non dipendente dalla quantità di punti presenti in un periodo.

In figura vediamo che il parametro segue la presenza dell'arco ma è sicuramente meno reattivo degli altri.

A titolo informativo vediamo comunque l'andamento del massimo e del minimo durante la prova.

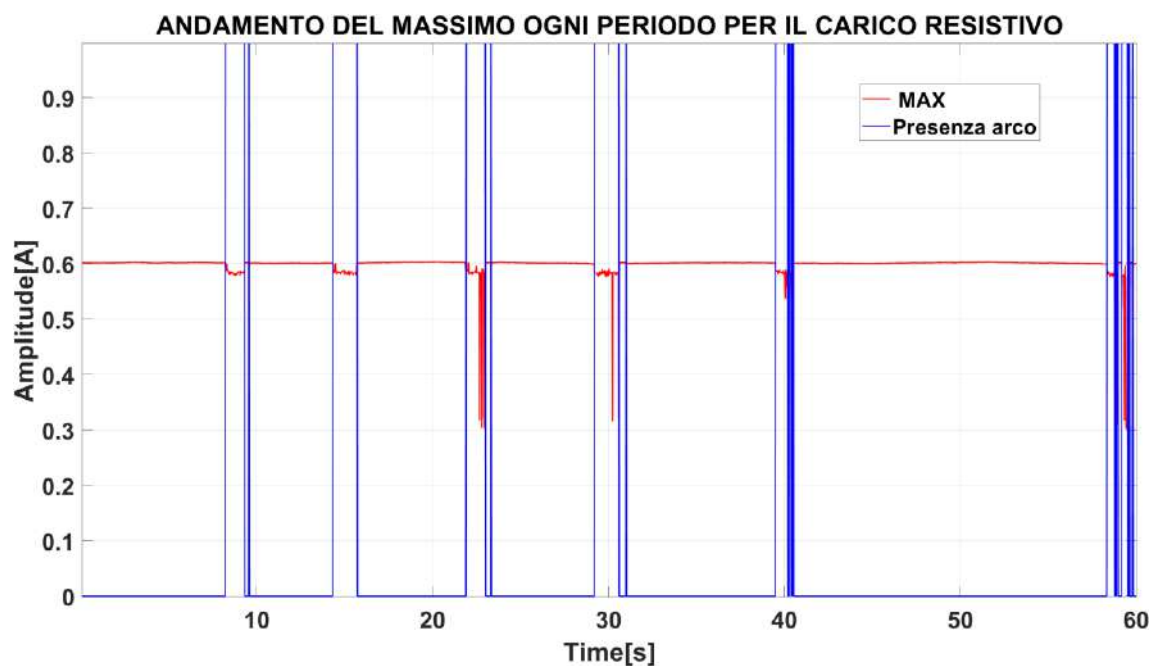


Figura 137 andamento del massimo periodo per periodo della corrente

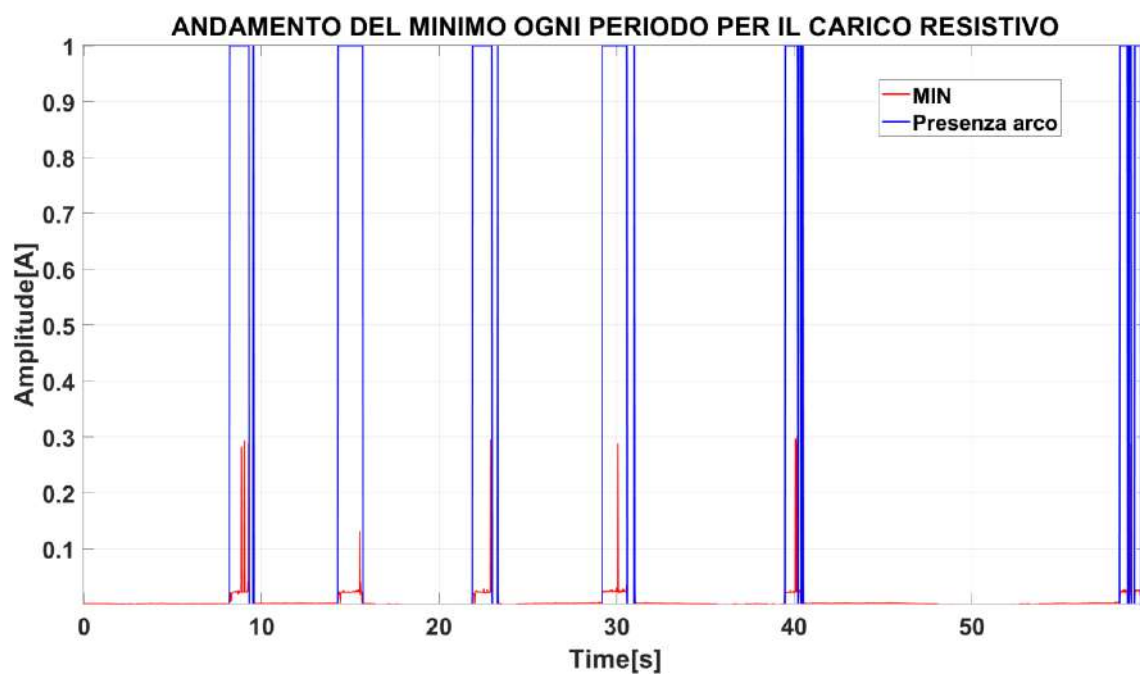


Figura 138 andamento del minimo

Dall'andamento del massimo e del minimo si è ricavata un'altra metrica ovvero il monitoraggio dell'ampiezza periodo per periodo,

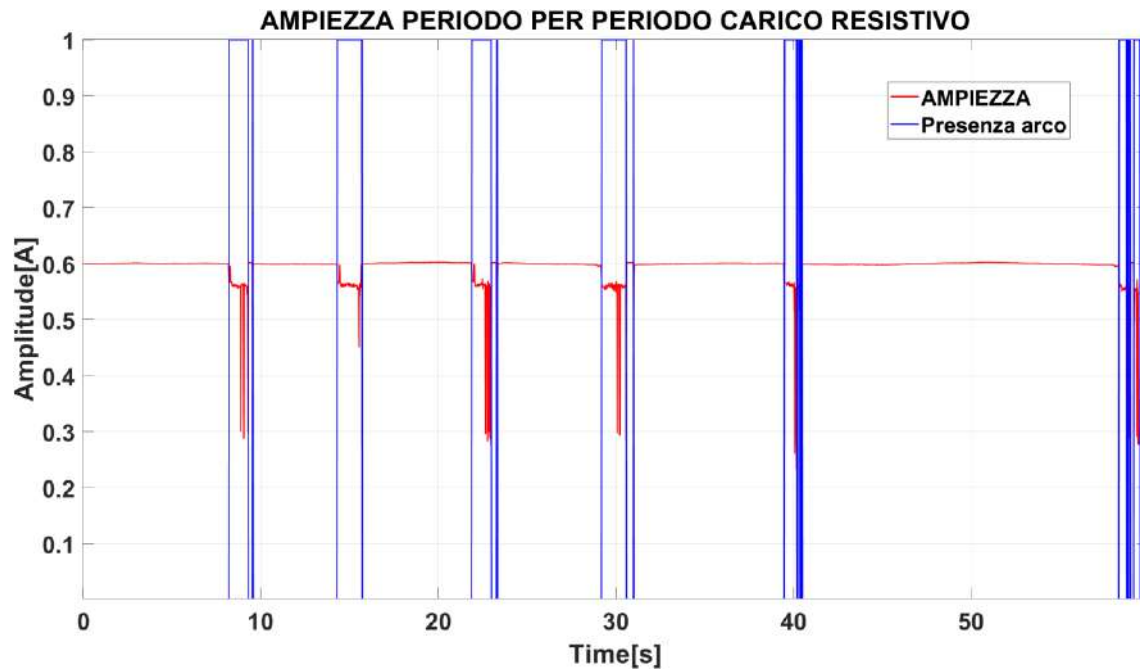


Figura 139 metrica: ampiezza

Dipendente dall'impedenza dell'arco stesso abbiamo una fluttuazione che in condizioni normali non dovremmo avere dunque anche questo è un parametro che descrive il problema e che dunque può essere efficace nell'identificazione. Vediamo i risultati per la condizione più complessa in presenza di un carico mascherante.

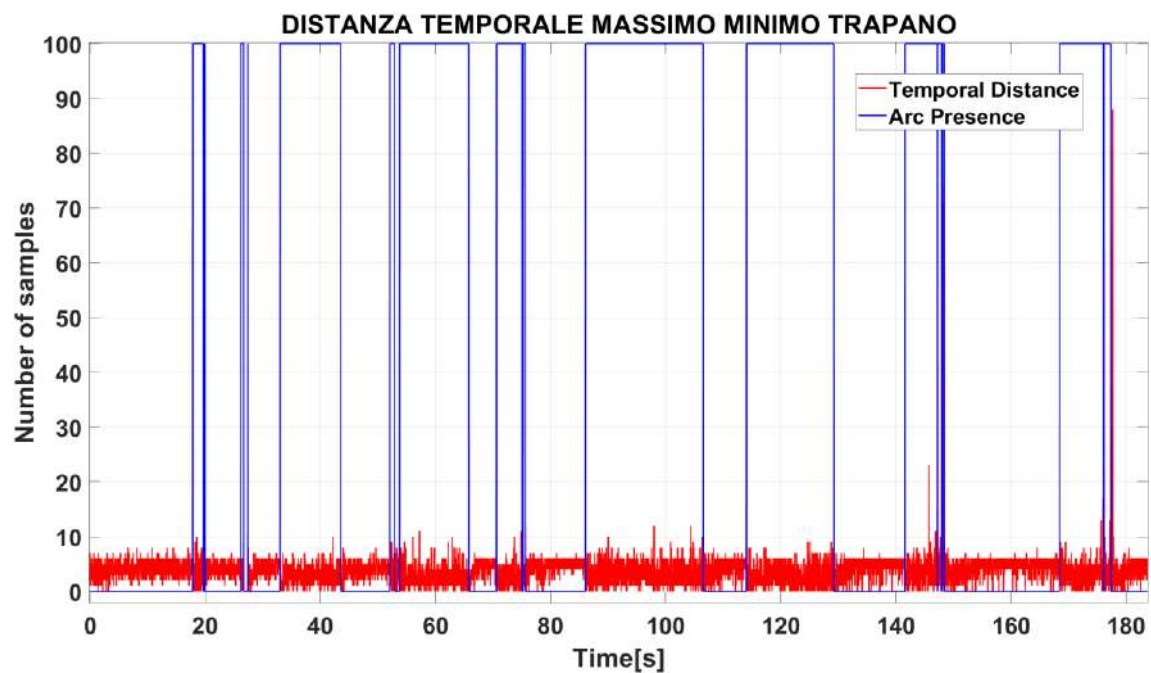


Figura 140 temporal distance trapano

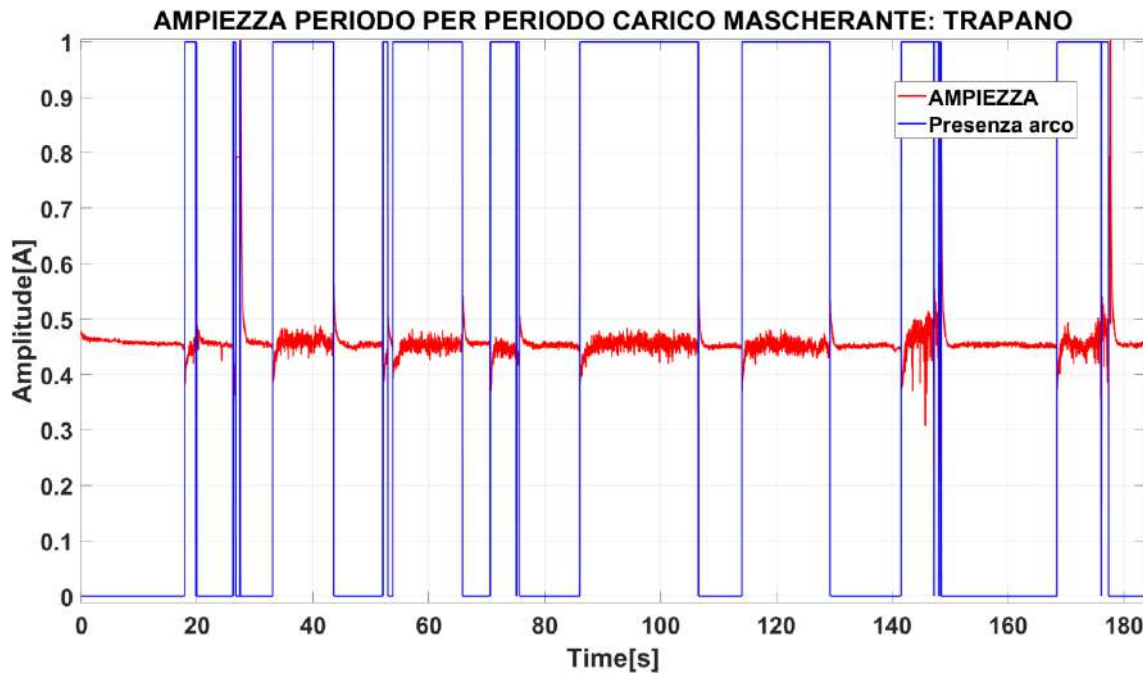


Figura 141 ampiezza forma d'onda corrente trapano.

In questo caso vediamo come in una situazione già rumorosa e “mascherante”, le due metriche viste in questo paragrafo, rimangono pressoché invariate rispetto alla condizione di assenza di arco. Dunque, queste metriche in condizioni di carichi mascheranti diventano drasticamente meno sensibili ma comunque non restituiscono falsi positivi.

4.3.9 Analisi metriche con filtraggio MACD

L’idea prende ispirazione dal MACD: Moving Average Convergence/Divergence. Usato per lo più in borsa per valutare la forza e la direzione delle tendenze e dunque anche per cercare segnali di inversione del mercato. A noi interessa pure un “cambiamento del trend”, dunque, questo indicatore si presta allo scopo.

Come si calcola il parametro per la strategia? Si devono eseguire due filtraggi, entrambi passa basso, uno con frequenza di taglio molto bassa ed uno con frequenza di taglio più alta. Normalmente si usano medie mobili esponenziali (EMA) in questa applicazione noi calcoleremo la media mobile semplice (SMA). La prima finestra più corta e quindi con la frequenza di taglio più alta è stata scelta di 12 campioni. La seconda finestra, quella con la frequenza di taglio più bassa è stata scelta lunga 26 campioni.

La frequenza di taglio delle due finestre effettiva si può approssimare come:

$$f_c \approx \frac{f_s}{N}$$

Dove f_c è la frequenza di taglio, f_s la frequenza di campionamento ed N la lunghezza della finestra.

La loro sottrazione sarà la linea “MACD” ovvero il nostro parametro. La media mobile corta conserva frequenze relativamente più alte, La media mobile lunga conserva solo quelle molto basse, La loro differenza mette in evidenza le variazioni più veloci del segnale (cioè, le componenti che stanno tra le due frequenze di taglio).

Ottenuta la curva che fungerà da parametro ne faremo il valore assoluto per ottenere i grafici di seguito.

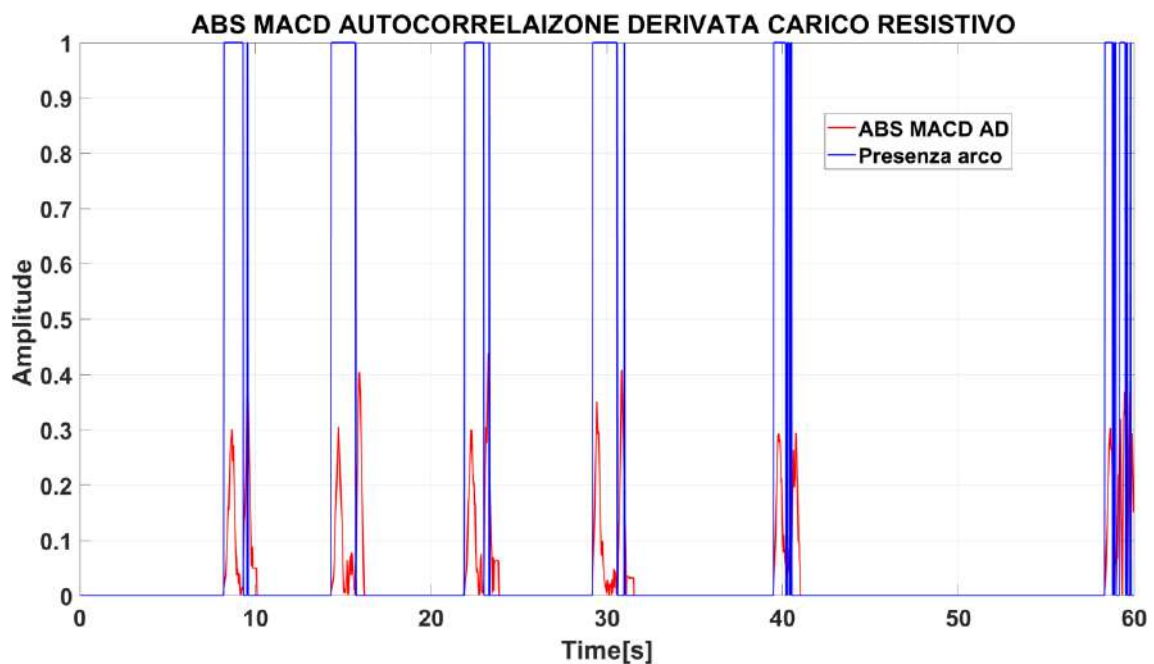


Figura 142 MACD autocorrelazione della derivata

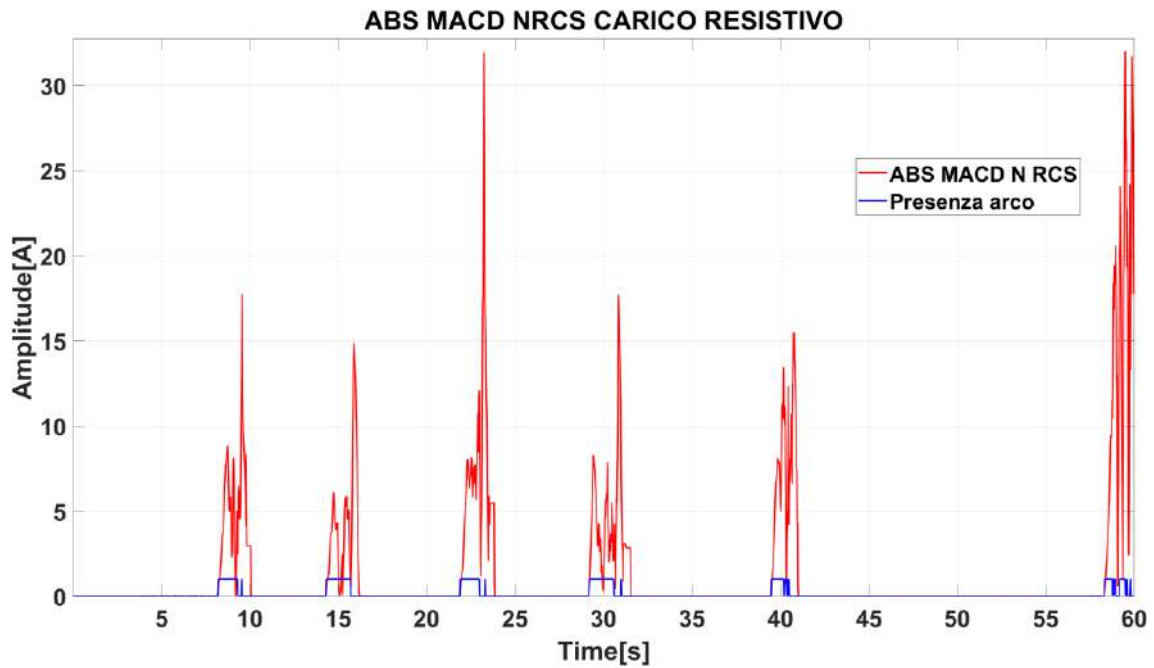


Figura 143 MACD RCS

Usando filtri ovviamente introduciamo anche un ritardo ma essendo una cosa conosciuta in partenza non è un problema insormontabile, soprattutto per realizzare un AFDD che deve intervenire sul circuito appena identificato un arco elettrico.

Questo metodo si può applicare ad ogni metrica volendo e diventerà molto importante quando la frequenza di campionamento comincia a diventare più bassa.

Il principale vantaggio di questa metrica è che si auto assesta quando le condizioni ritornano stazionarie tornando a 0, dunque non si deve avere una scelta dinamica della soglia, praticamente si auto imposta dinamicamente da solo. Non ha senso calcolare la percentuale di corretta identificazione rispetto al riferimento applicando questa metodologia poiché il ritardo introdotto falserebbe il risultato.

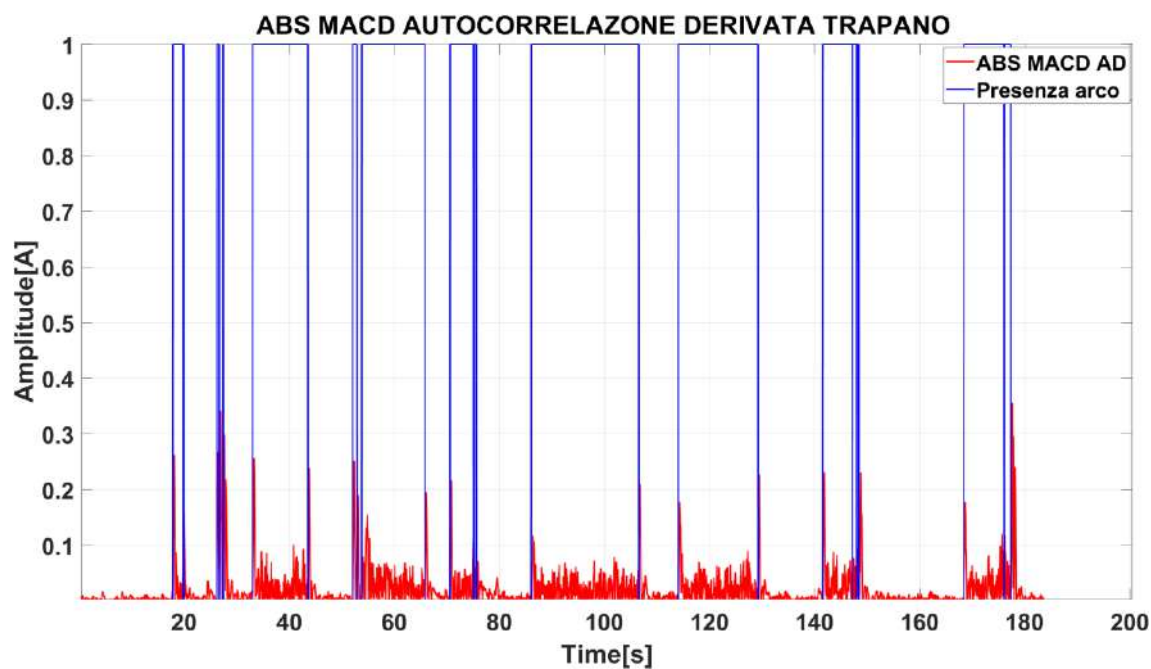


Figura 144 metrica MACD autocorrelazione

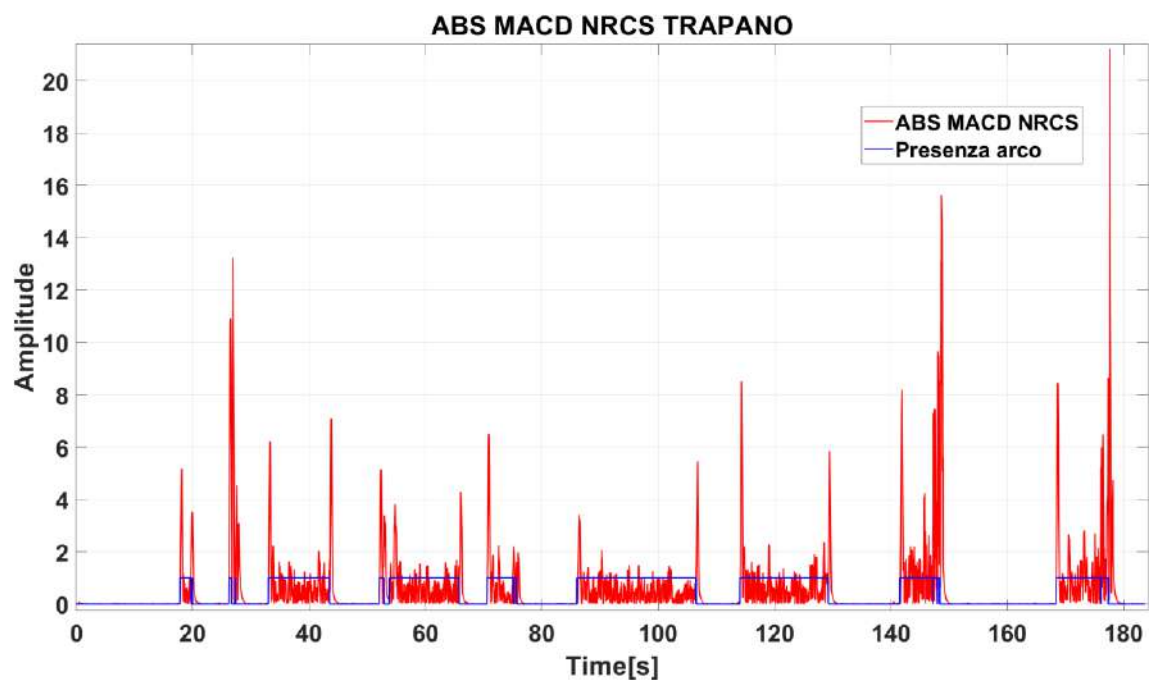


Figura 145 ABS MACD RCS trapano

Osserviamo in Figura 144 come con un carico mascherante la metrica calcolata sulla autocorrelazione della derivata abbia un fondo rumoroso non stazionandosi mai a 0 come dovrebbe. Per quanto riguarda la metrica calcolata invece sul “Rectfied Current Sum”, come si può vedere in Figura 145, la situazione è più pulita, anche qua l’uso della derivata con un carico mascherante peggiora leggermente la situazione.

4.3.10 Spettrogramma e Frequency Sum

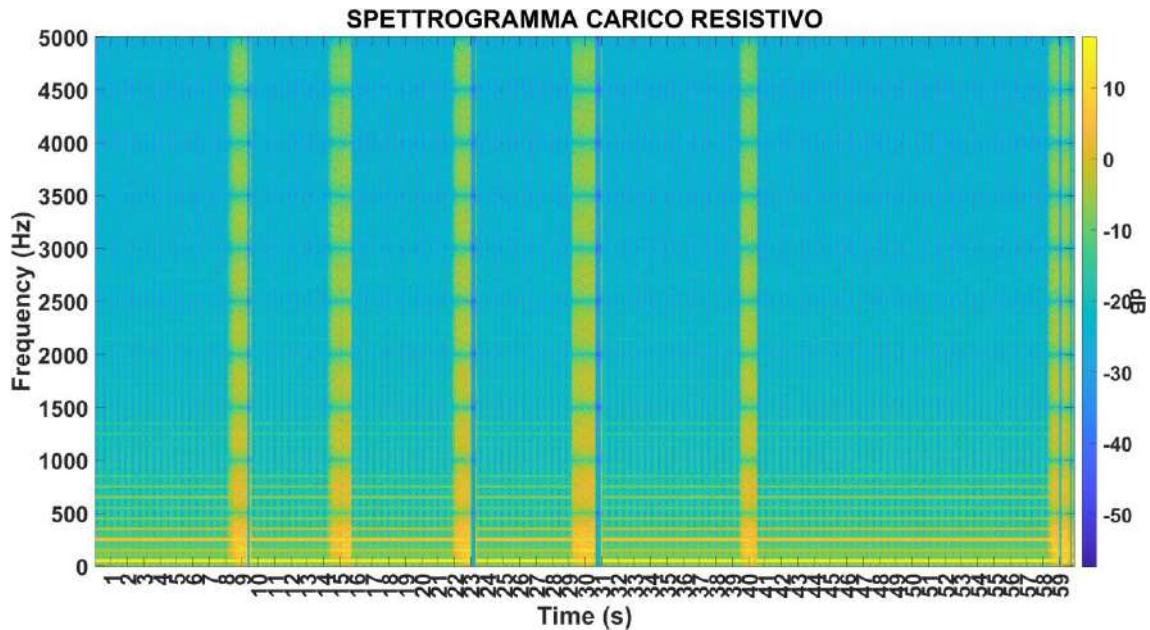


Figura 146 Spettrogramma carico resistivo

Lo spettrogramma non è una vera e propria metrica, né tanto meno è calcolato nel dominio del tempo. Risulta molto interessante come demarchi chiaramente le sezioni in cui è presente l'arco elettrico. Funziona bene sia sulla corrente che sulla derivata. Possiamo dire che si comporta quasi da riferimento.

Fondamentalmente, divide il segnale in segmenti temporali, esegue una Trasformata di Fourier su ciascun segmento, e combina queste informazioni per mostrare come varia la frequenza nel tempo. Vengono combinate utilizzando una finestra di sovrapposizione tra le FFT. In questo caso, abbiamo le FFT su 1024 punti con una finestra di sovrapposizione pari a 512 punti.

Quella matrice di dati può essere ricondotta comunque ad un parametro che in questo lavoro sarà chiamato Frequency sum.

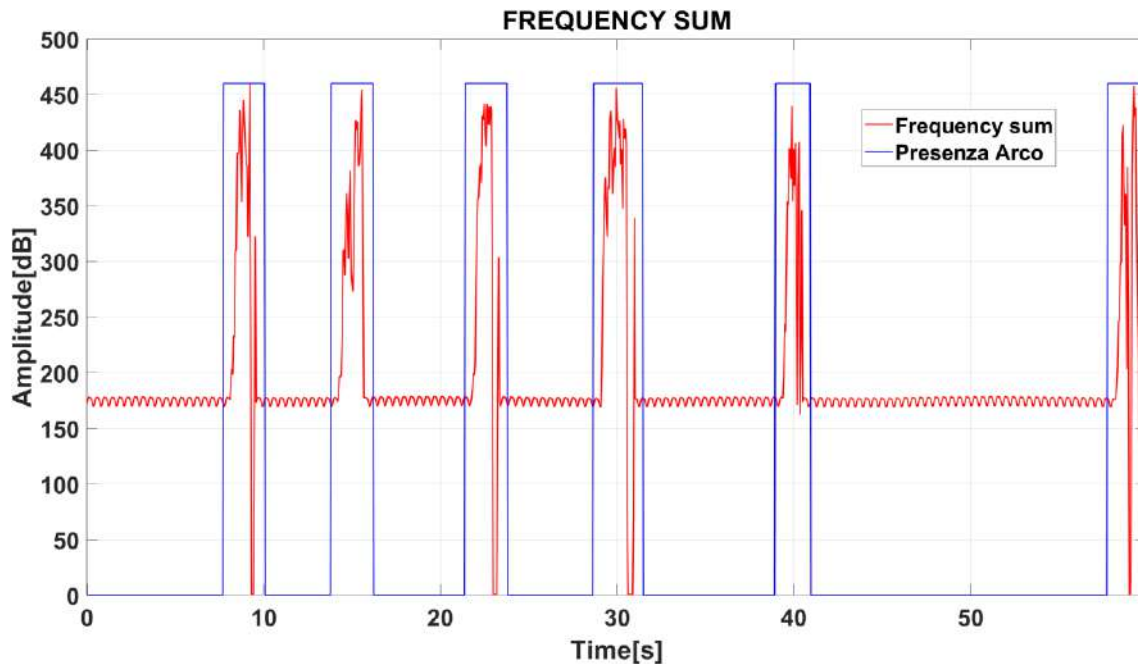


Figura 147 Frequency sum

Una vera e propria metrica deriverà dalla somma del contributo che ogni singola frequenza dà per ognuna delle finestre di sovrapposizione create.

Avremo un output ogni 512 punti dunque, 10 periodi circa. Quindi più lentamente rispetto alle metriche viste finora che forniscono un output ogni periodo di segnale. Per questo motivo il riferimento utilizzato in questo grafico è il fotodiodo ricampionato che però non riesce ad essere accurato come lo è normalmente.

La metrica identifica agilmente i vuoti di segnale ed ha un range di variazione rispetto alla condizione stazionaria molto ampio.

Il metodo di calcolo partendo dallo spettrogramma è molto semplice: prendo la matrice s di uscita che sarà una matrice complessa frutto delle varie FFT eseguite e ne faccio il valore assoluto per ottenere la “Magnitude”.

La matrice sarà grande: $\text{overlap} \times \text{length (FFT)}$ dove, overlap sarà l’asse x . Si sommeranno tutti i 1024 elementi di ogni elemento dell’asse x . Questa metrica non risponde all’obiettivo primario di creare una strategia semplice da implementare su un microcontrollore, inoltre, si distacca dai parametri visti finora nel dominio del tempo, questo potrebbe essere un possibile metodo di identificazione dell’arco nel dominio della

frequenza. In APPENDICE A saranno inseriti gli spettrogrammi di tutti i carichi qualora si volesse approfondire.

4.4 Analisi success rate singole metriche

In questo paragrafo analizzeremo il comportamento di tutte le metriche (eccetto le metriche ottenute mediante filtraggio) viste al variare di una possibile soglia utile a determinare la presenza di arco elettrico mediante le matrici di confusione strutturate tutte nella stessa maniera con la differenziazione di falsi positivi, falsi negativi, veri positivi e veri negativi.

Le matrici di confusione si usano principalmente per valutare le prestazioni di modelli di classificazione nel machine learning. Consentono di confrontare i valori previsti dal modello con quelli reali, mostrando in dettaglio non solo le predizioni corrette ma anche gli errori, come falsi positivi e falsi negativi. Qua anche se non si sta parlando di modelli di machine learning abbiamo comunque algoritmi e riferimenti da confrontare. Altre applicazioni tipiche sono: in medicina, per valutare modelli diagnostici bilanciando falsi positivi e falsi negativi. In marketing, per misurare l'efficacia di campagne pubblicitarie predittive.

In sostanza, la matrice di confusione dà una visione molto più dettagliata rispetto alla sola analisi della percentuale di successo, permettendo analisi approfondite delle prestazioni di classificatori in molti campi applicativi.

Ogni metrica avrà un suo ottimo per ogni carico e questo ci lascia intuire che nella strategia ci deve essere un meccanismo ben collaudato per identificare i cambi carico e determinare in maniera sempre efficace una soglia dinamica.

Analizziamo prima i risultati per il carico resistivo e poi per il carico mascherante.

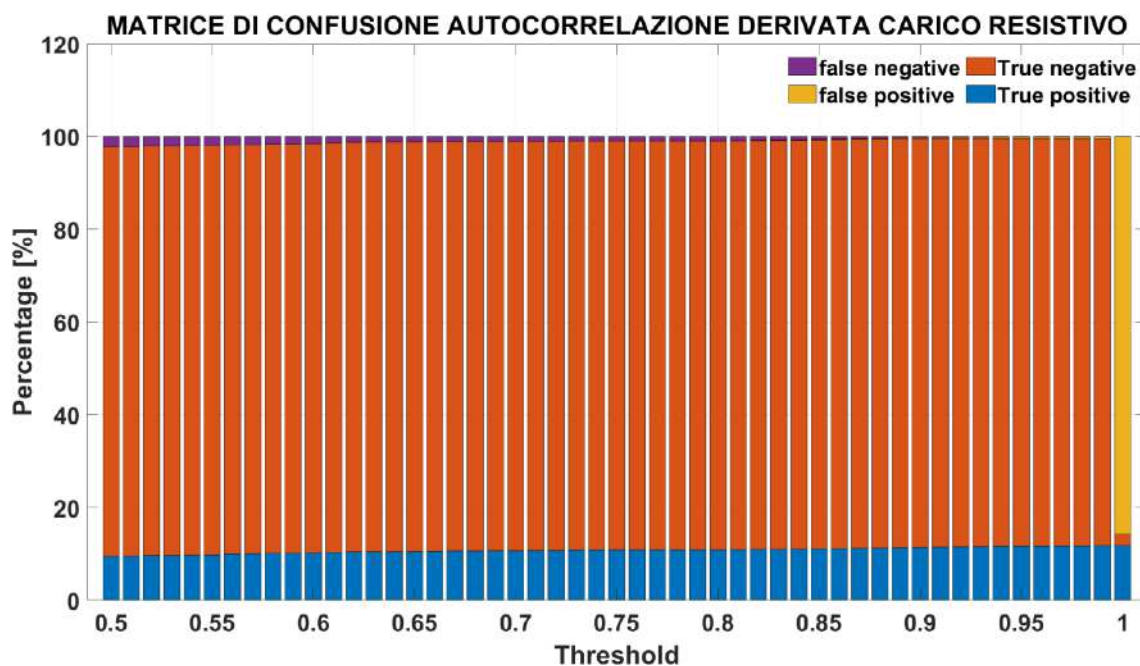


Figura 148 matrice di confusione autocorrelazione derivata per il carico resistivo

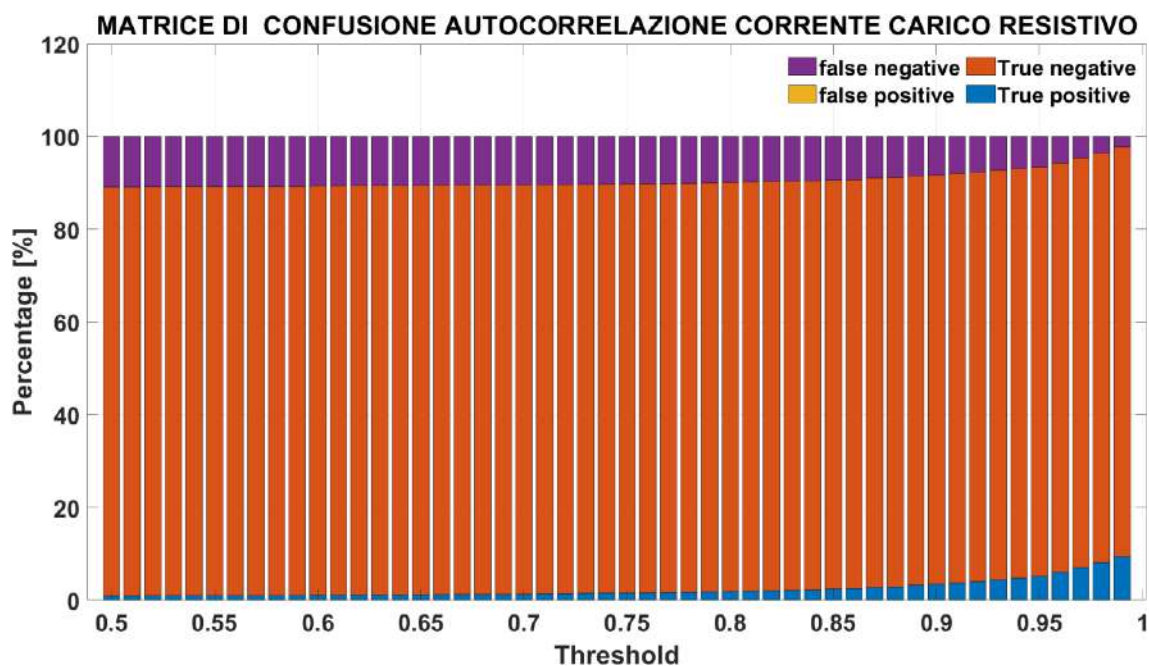


Figura 149 matrice di confusione autocorrelazione corrente

Per l'autocorrelazione vediamo che i risultati nell'ottimo delle soglie sono molto alti, per l'autocorrelazione della derivata addirittura siamo molto vicini al 100%. Osserviamo anche come per la derivata il tasso di successo sia più elevato proprio perché, come detto precedentemente, amplifica i sintomi dell'arco.

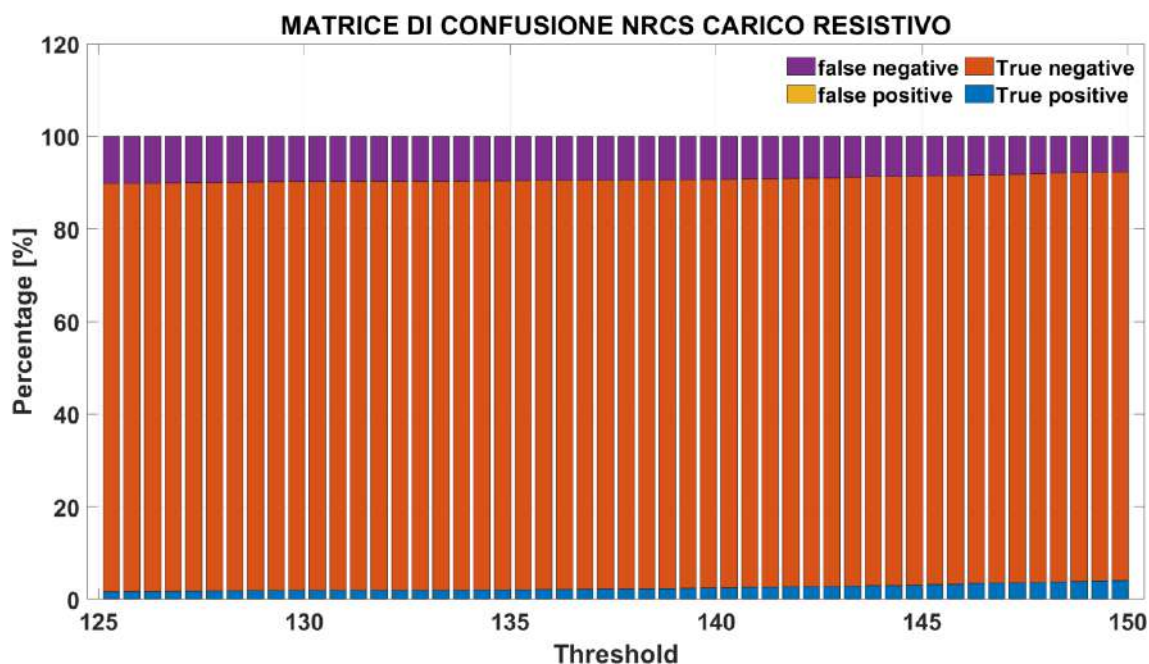


Figura 150 matrice di confusione NRCS

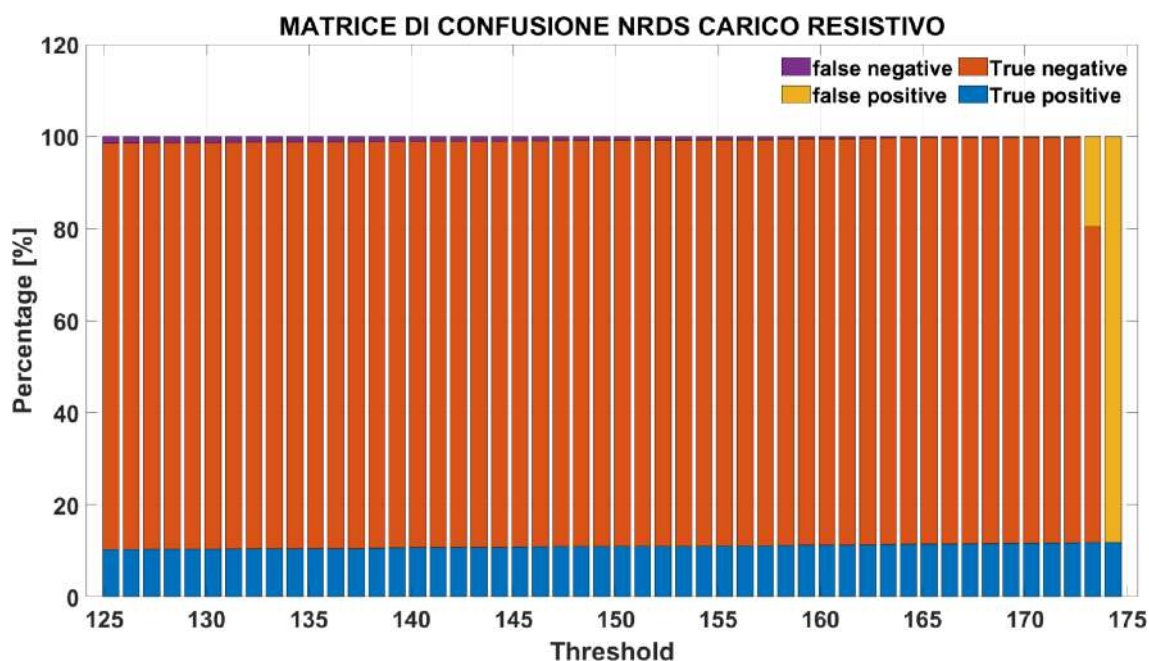


Figura 151 matrice di confusione NRDS

Anche per questa metrica vediamo un tasso di successo nettamente superiore per il calcolo eseguito sulla derivata. Questa differenza di sensibilità, comunque, ci tornerà utile in seguito quando le metriche saranno in combinazione tra di loro.

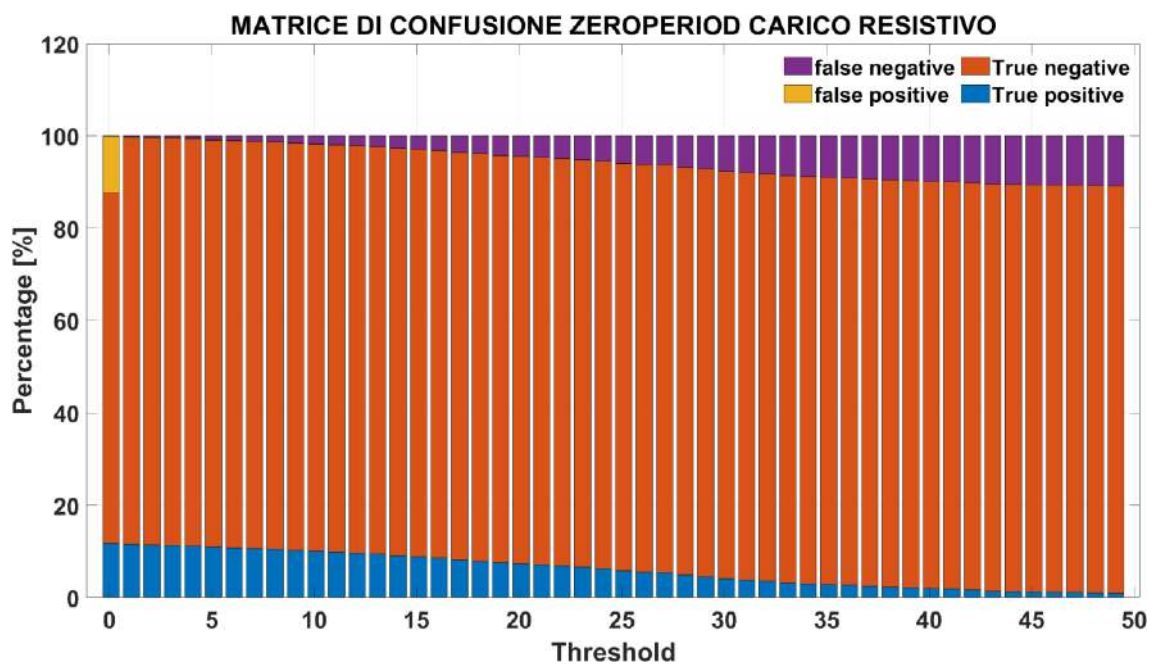


Figura 152 matrice di confusione zero period

In questo contesto anche questa metrica funziona correttamente raggiungendo un tasso di successo prossimo al 100%.

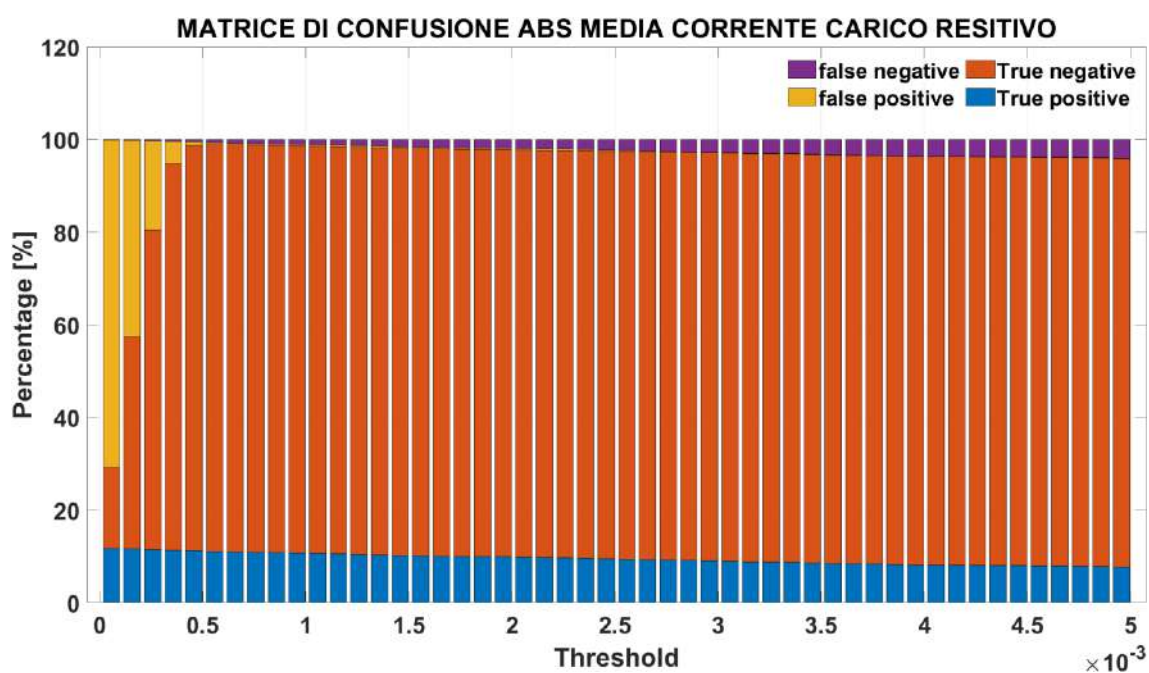


Figura 153 matrice di confusione del valore assoluto della media corrente

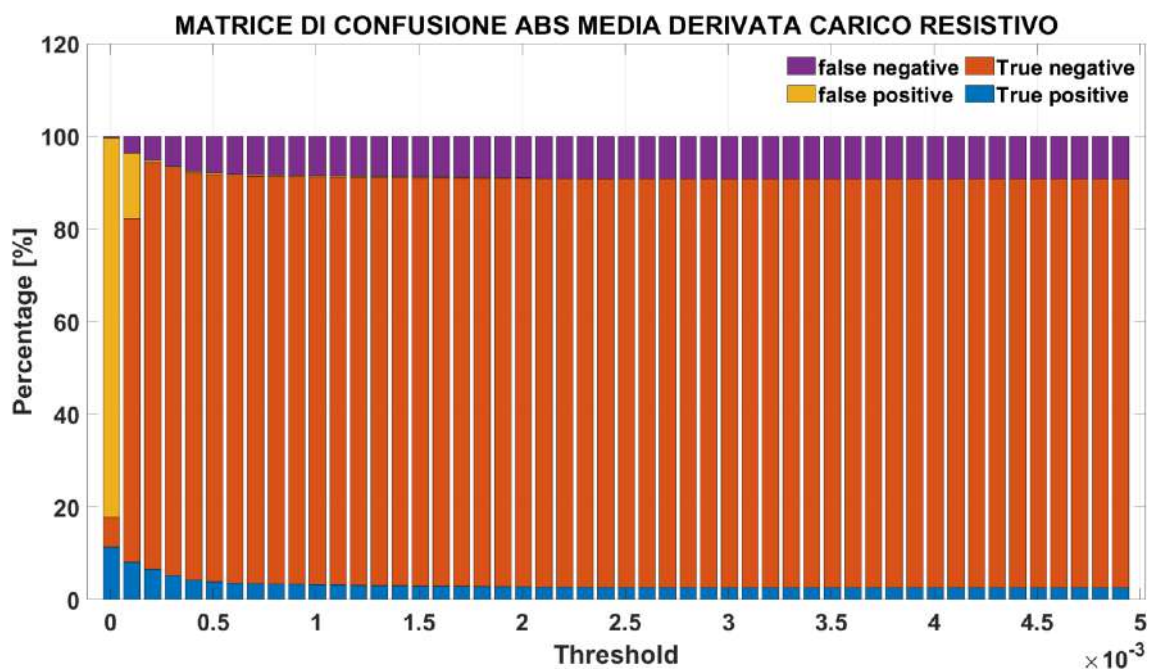


Figura 154 matrice di confusione del valore assoluto della media derivata

Nel caso della media, per ispezione diretta si osserva come la media calcolata sulla corrente sia nettamente più sensibile alla presenza dell'arco e questo non sorprende poiché la derivata amplifica i cambiamenti bruschi ma in un singolo periodo in media i cambiamenti bruschi sono singoli momenti impulsivi e generalmente il valore della derivata è basso dunque anziché monitorare come nel caso della corrente, la simmetria delle semionde con la derivata vado più a vedere gli spike, non si presta bene alla media. Quando fai la media sul segnale di corrente diretto, stai sommando valori che hanno sempre lo stesso ordine di grandezza. Anche piccole fluttuazioni causate da un arco elettrico si sommano e influenzano subito il risultato della media. Quando fai la media sulla derivata, invece, stai mediando valori che possono essere sia positivi che negativi, e che in un arco intermittente spesso oscillano intorno a zero. Quindi le fluttuazioni tendono a “cancellarsi” un po', rendendo la media meno reattiva.

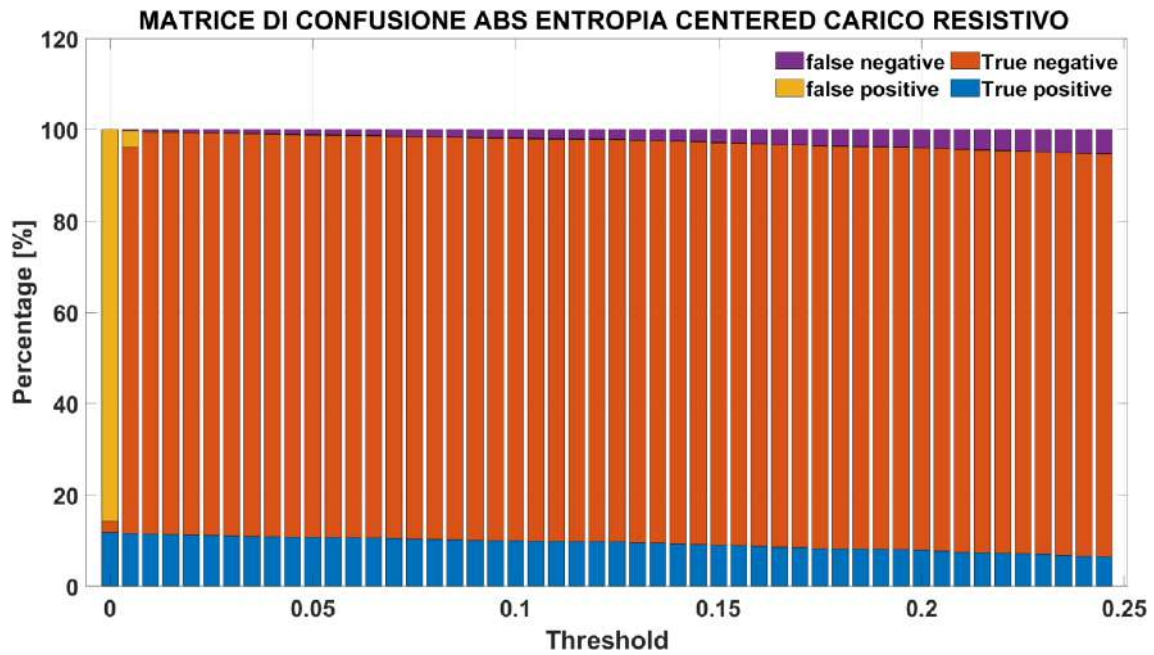


Figura 155 matrice di confusione entropia

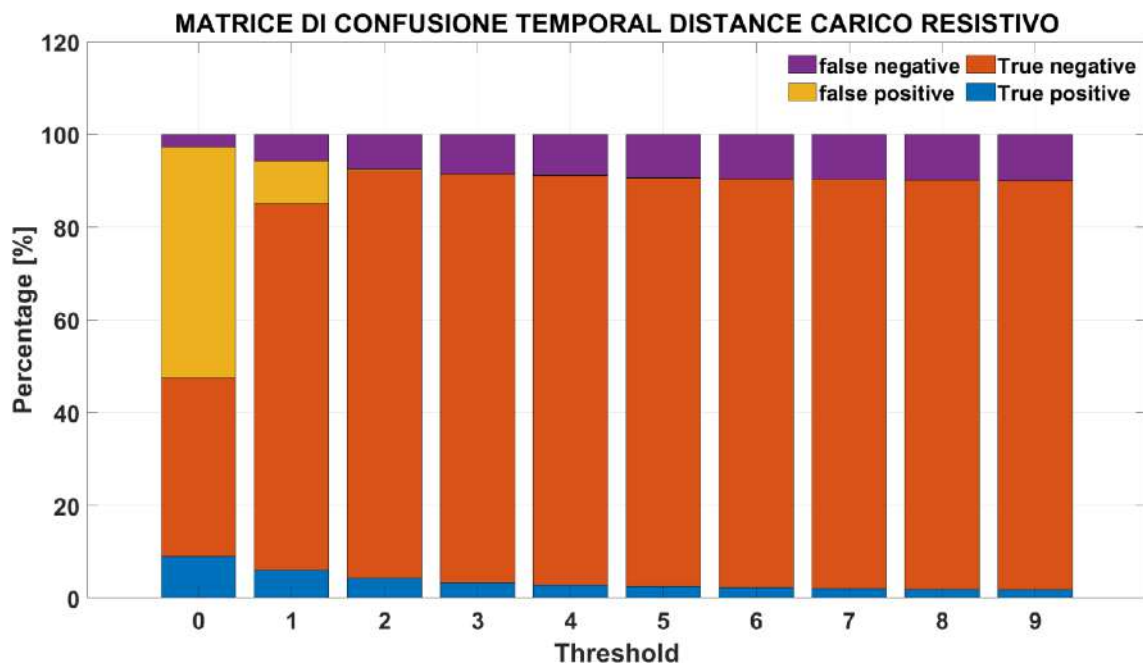


Figura 156 matrice di confusione dista

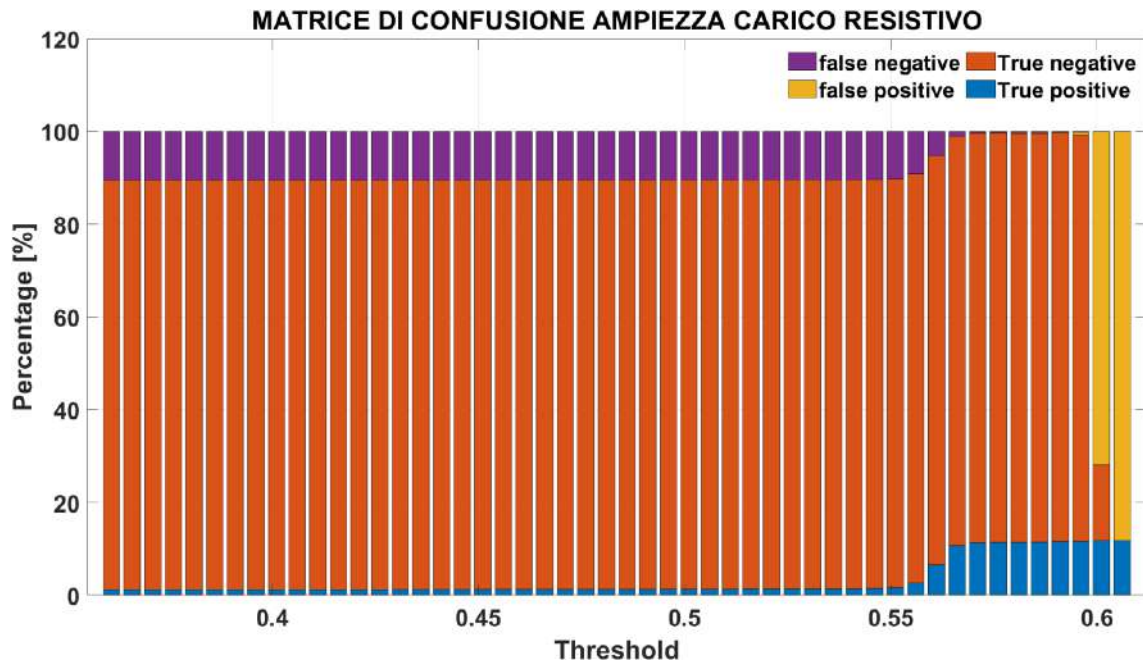


Figura 157 matrice di confusione ampiezza

Entropia ed ampiezza di rivelano essere buoni parametri con risultati di successo per la soglia ottima di oltre il 99%. Temporal Distance ha sicuramente una sensibilità ed un range di variazione inferiore ma comunque è una discreta metrica per l'identificazione dell'arco elettrico.

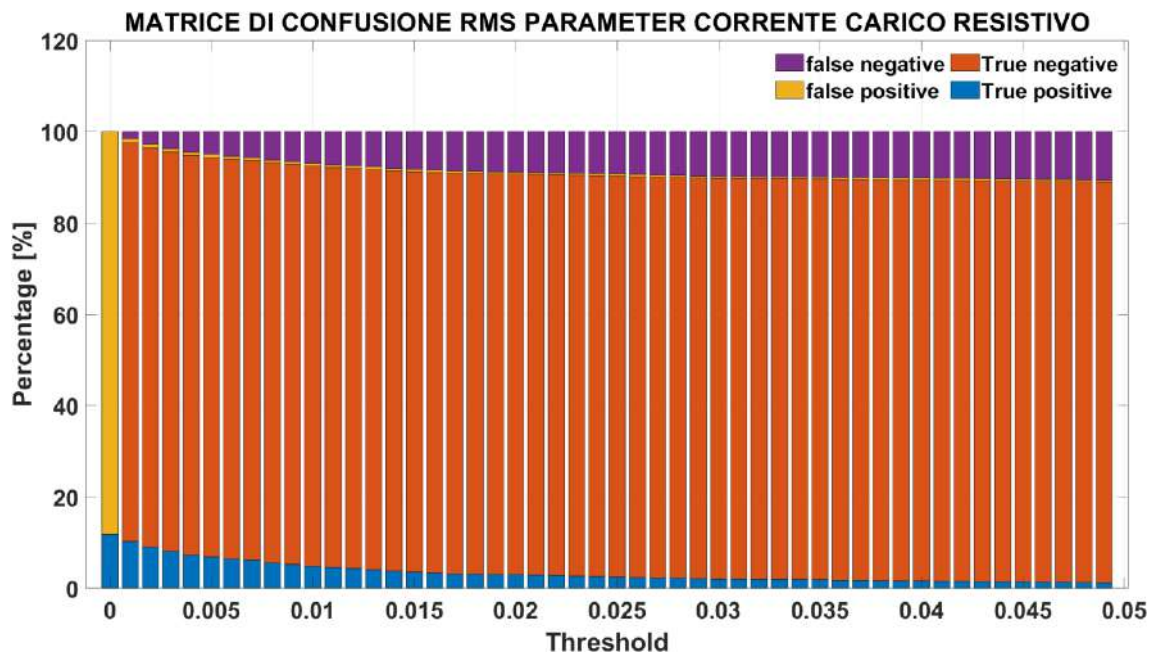


Figura 158 MATRICE DI CONFUSIONE RMS PARAMETER CORRENTE CARICO RESISTIVO

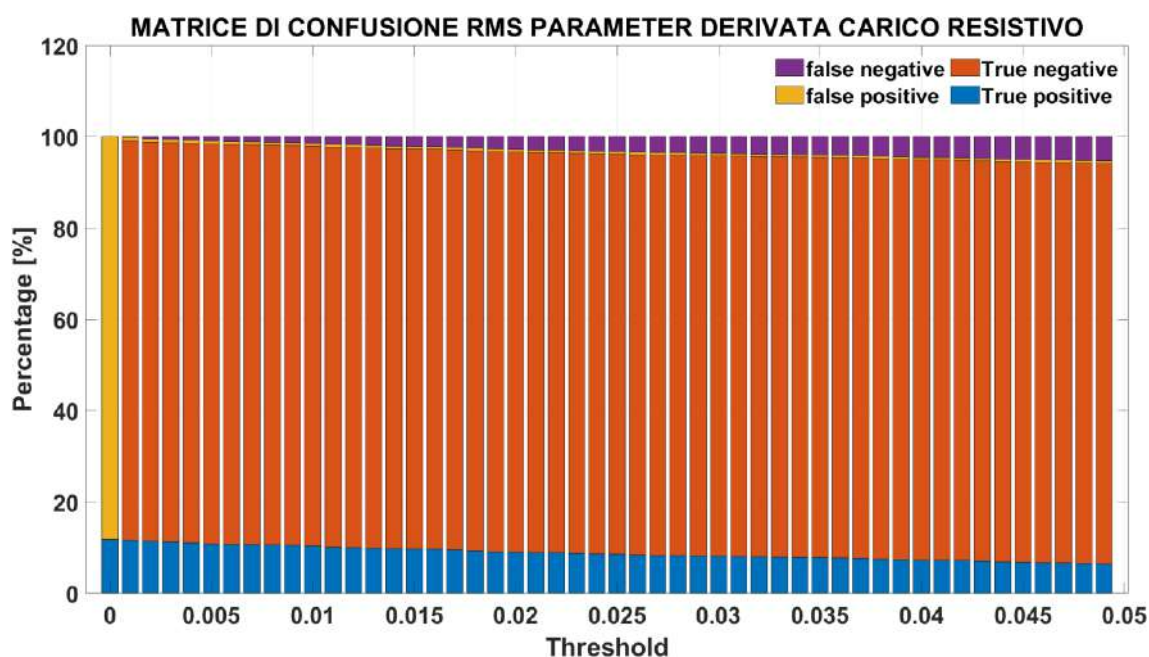


Figura 159 MATRICE DI CONFUSIONE RMS PARAMETER DERIVATA CARICO RESISTIVO

Con queste ultime due metriche concludiamo l'analisi dei risultati inerenti al carico resistivo. Anche le ultime due metriche presentate in Figura 158 MATRICE DI CONFUSIONE RMS PARAMETER CORRENTE CARICO RESISTIVO ed in Figura 159 mostrano tassi di successo elevati come le metriche già esaminate.

Segue un'analisi nel dettaglio dei risultati per un carico evidenziato dalla norma CEI 62606 ed UL1699 come carico mascherante ovvero che maschera la presenza dell'arco.

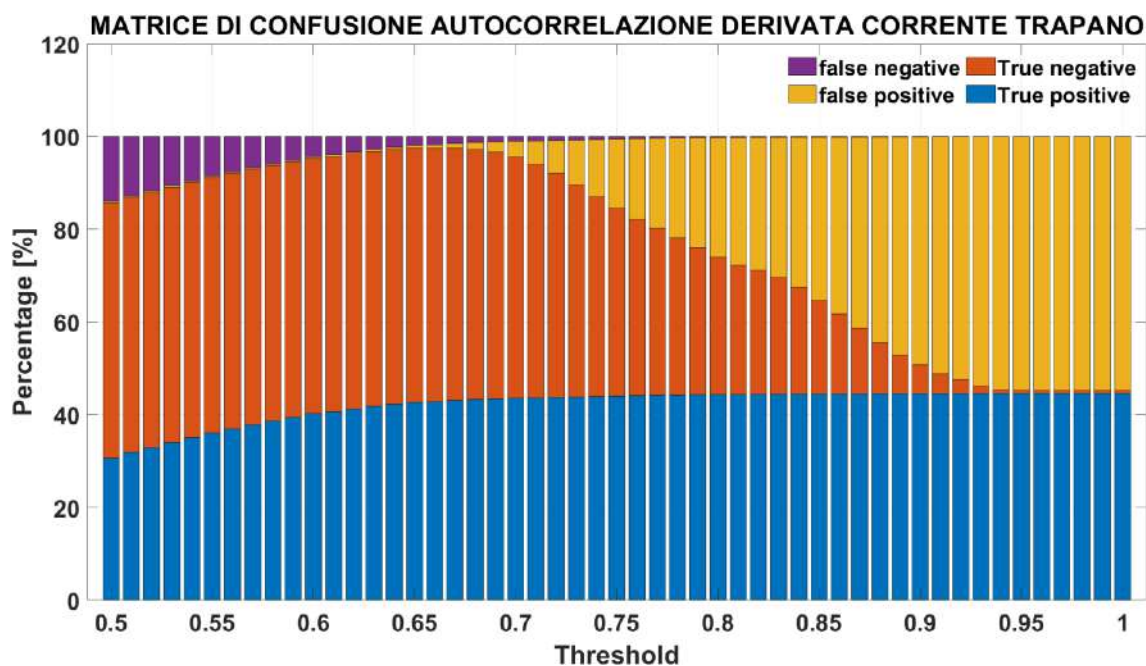


Figura 160 Matrice di confusione autocorrelazione derivata della corrente carico mascherante

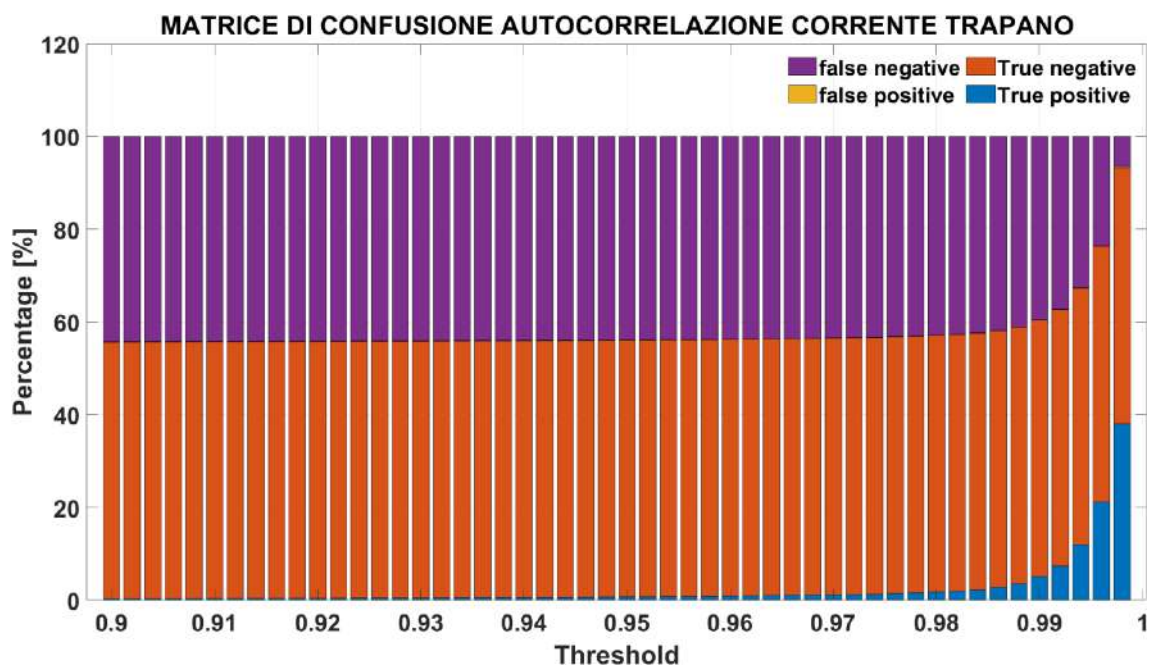


Figura 161 Matrice di confusione autocorrelazione corrente del trapano

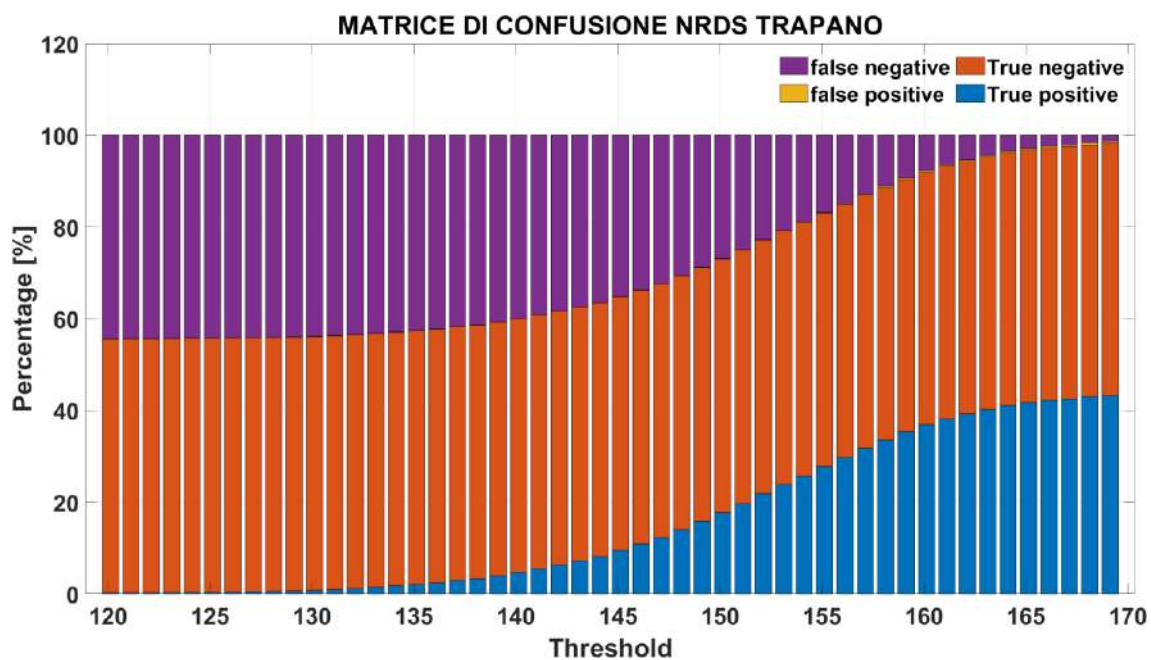


Figura 162 Matrice di confusione Somma della derivata rettificata normalizzata carico mascherante

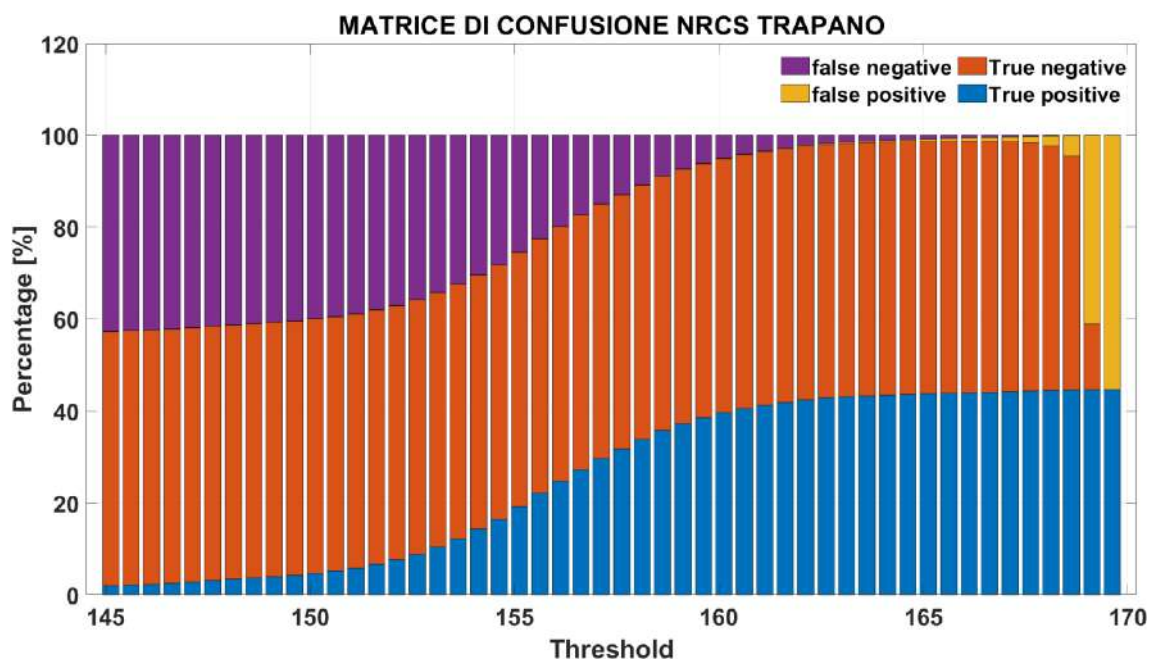


Figura 163 Matrice di confusione Normalized Rectified current sum per il carico mascherante

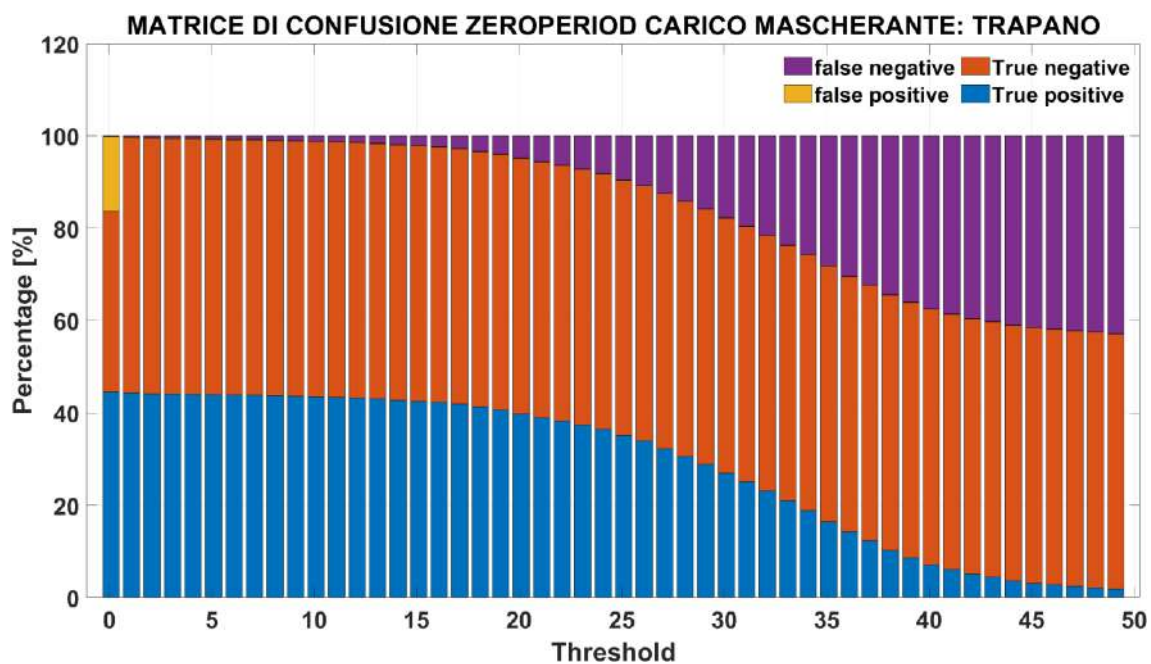


Figura 164 Matrice di confusione Zeroperiod

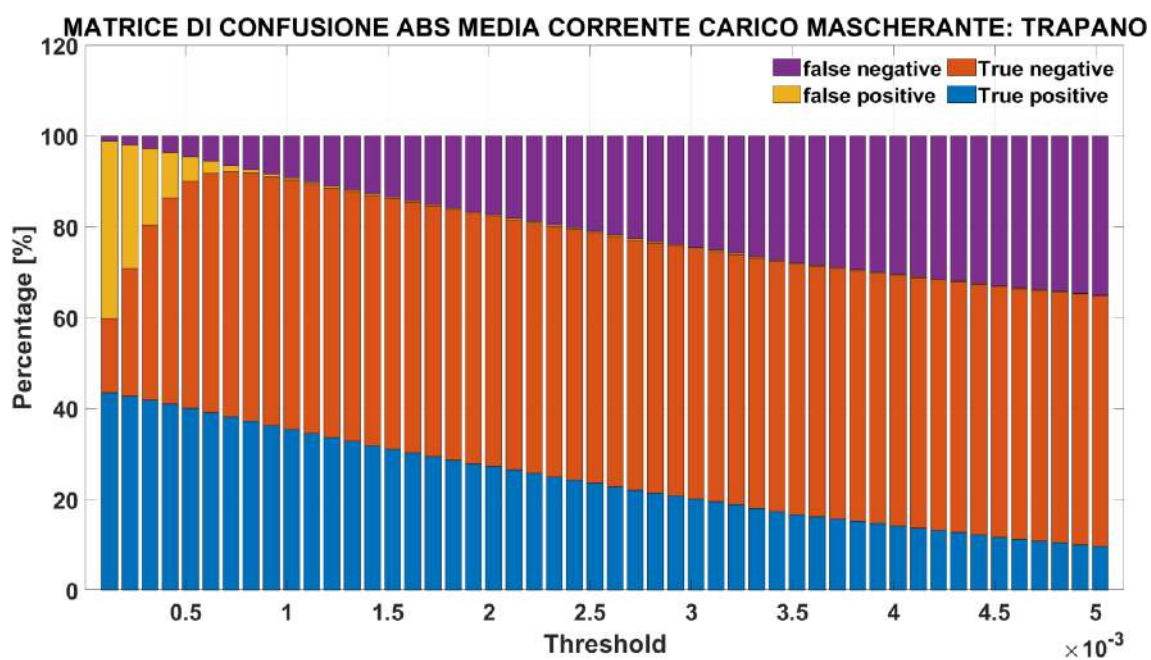


Figura 165 Matrice di confusione valore assoluto della media periodo per periodo carico mascherante

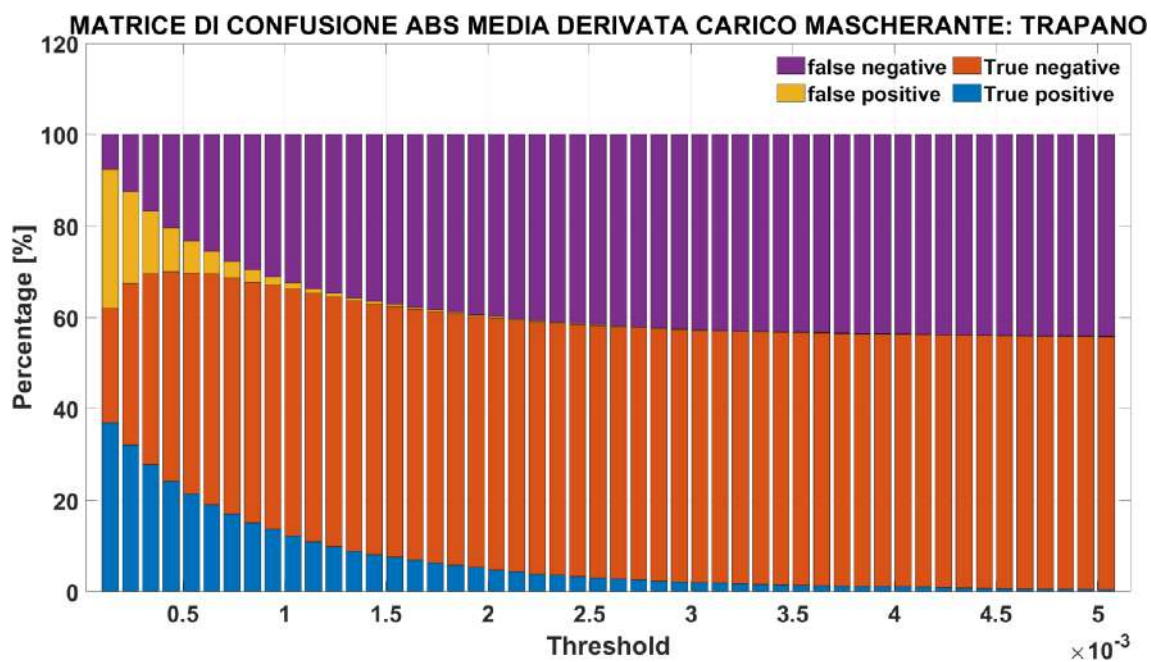


Figura 166 Matrice di confusione valore assoluto della media della derivata calcolata periodo per periodo per il carico mascherante

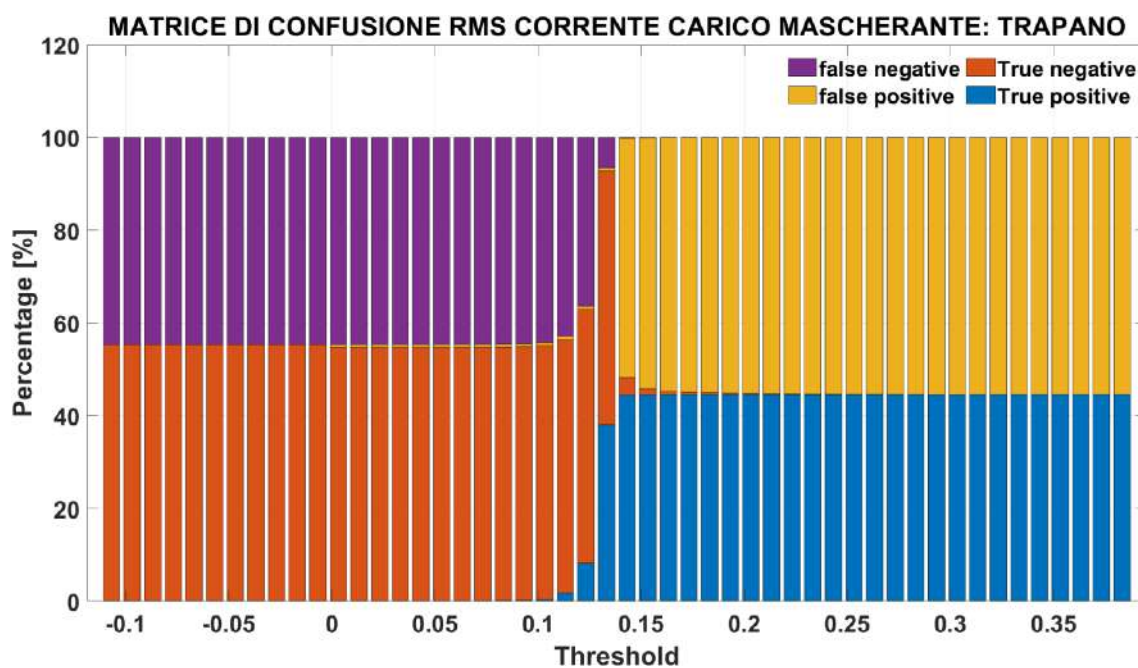


Figura 167 matrice di confusione per il valore RMS del carico mascherante

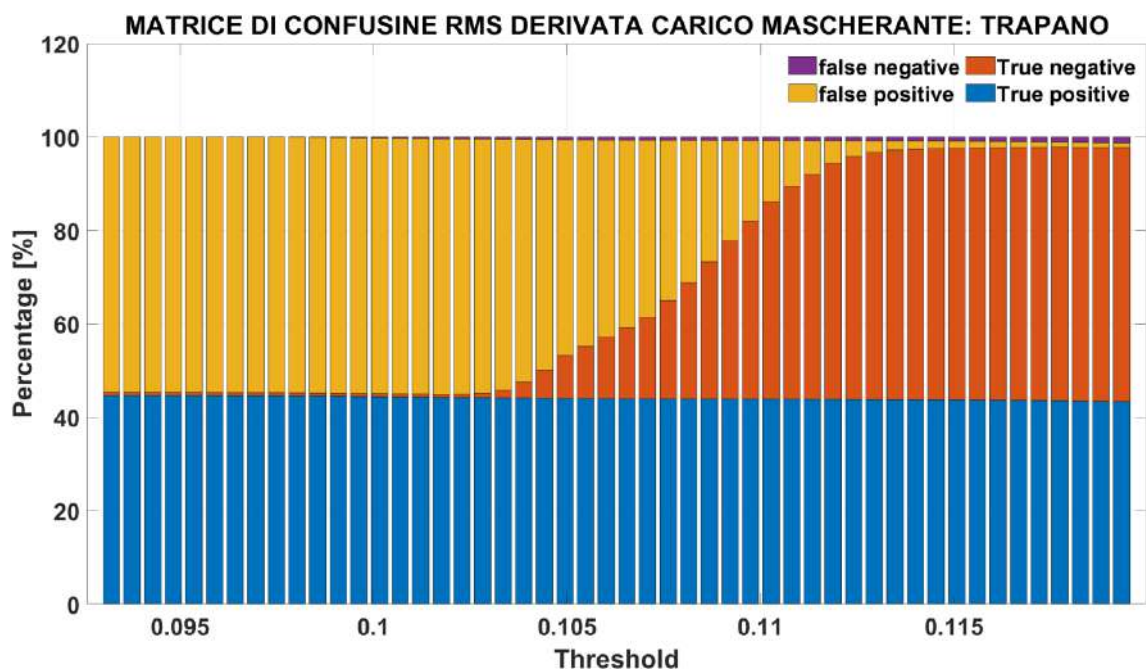


Figura 168 Matrice di confusione valore RMS calcolato sulla derivata della corrente per il carico mascherante

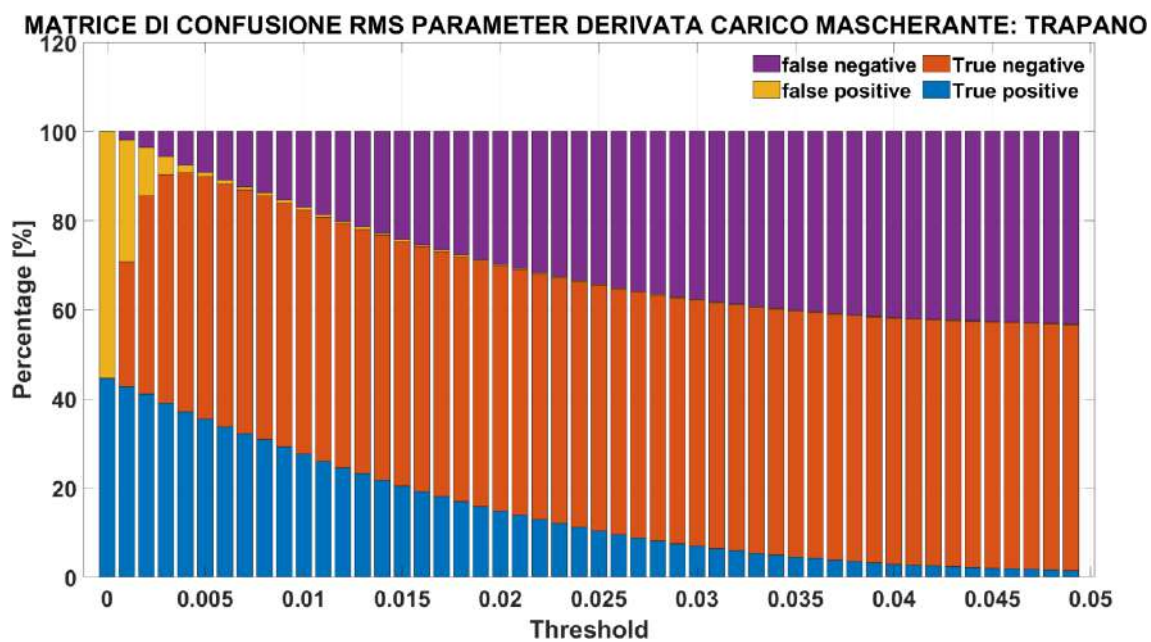


Figura 169 Matrice di confusione RMS Parameter carico mascherante

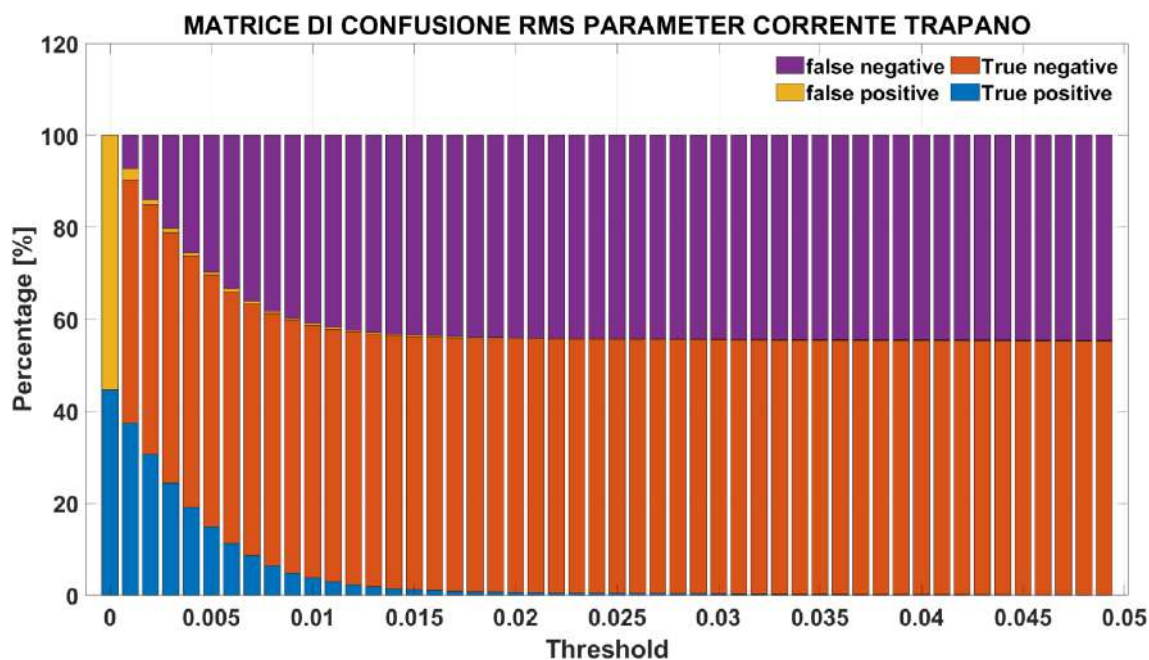


Figura 170 Matrice di confusione RMS PARAMETER corrente carico mascherante

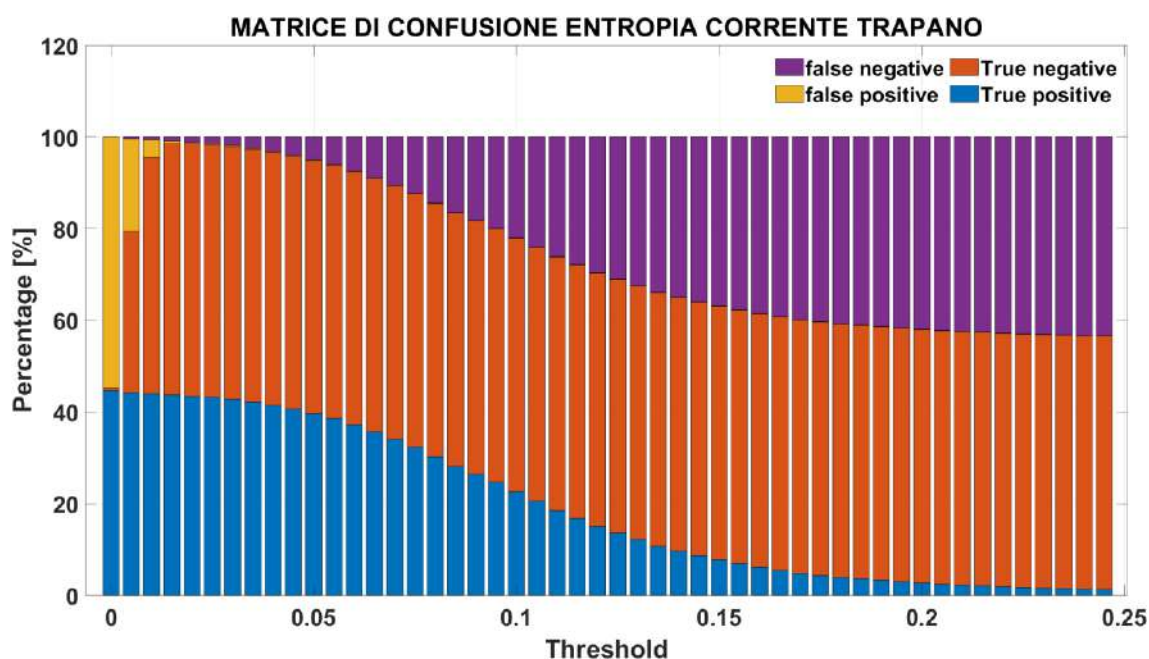


Figura 171 Matrice di confusione entropia calcolata sulla corrente del trapano

Non riporto le matrici di confusione inerenti ai parametri basati sulla distanza temporale tra i picchi della semionda e l'ampiezza in quanto non soddisfacenti.

Per valutare l'efficacia di diverse strategie di rilevazione dell'arco elettrico (Arc Fault), sono state confrontate dodici metriche applicate a due casi sperimentali principali: un carico resistivo puro (reostato da laboratorio) e un carico mascherante (trapano BOSCH).

Le matrici di confusione mostrano chiaramente le caratteristiche di ciascuna metrica nel rilevare l'arc fault sul carico mascherante (trapano).

Generalmente possiamo osservare confrontando per ogni metrica il risultato con il carico resistivo e con il carico mascherante come i tassi di successo diminuiscano in maniera evidente con il carico mascherante. Questo è dovuto alla natura dei carichi in questione. I carichi mascheranti rendono più complessa l'identificazione dell'arc fault perché introducono segnali elettrici che “somigliano” molto a quelli generati da un arco elettrico, riducendo il rapporto segnale/rumore diagnostico. I carichi mascheranti, anche se in misura diversa rispetto all'arc fault generano armoniche, ripple, fluttuazioni aleatorie e distorsioni non lineari della corrente, mascherando la firma stocastica dell'arco elettrico.

Avendo elaborato un set di metriche ed avendo anche osservato i risultati sia nel caso “facile” con il carico resistivo che nel caso “difficile” con un carico mascherante ed avendo visto le limitazioni che comporta ci si è concentrati sulla costruzione di una strategia robusta che riesca a prendere il meglio di ogni metrica in ogni momento avvalendosi di soglie adattive. Nei prossimi paragrafi vedremo l'implementazione di una strategia che racchiude le varie metriche, analizzeremo nel dettaglio i processi decisionali della strategia stessa ed infine vedremo dei grafici per analizzare i risultati.

4.5 Sintesi metriche

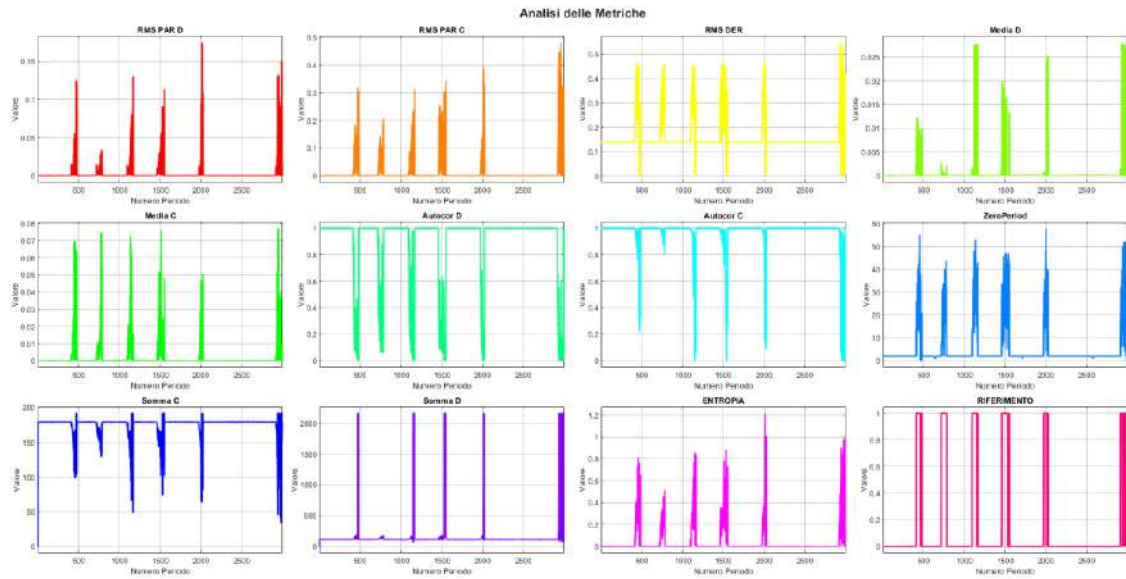


Figura 172 Grafico di sintesi delle metriche viste per il carico resistivo

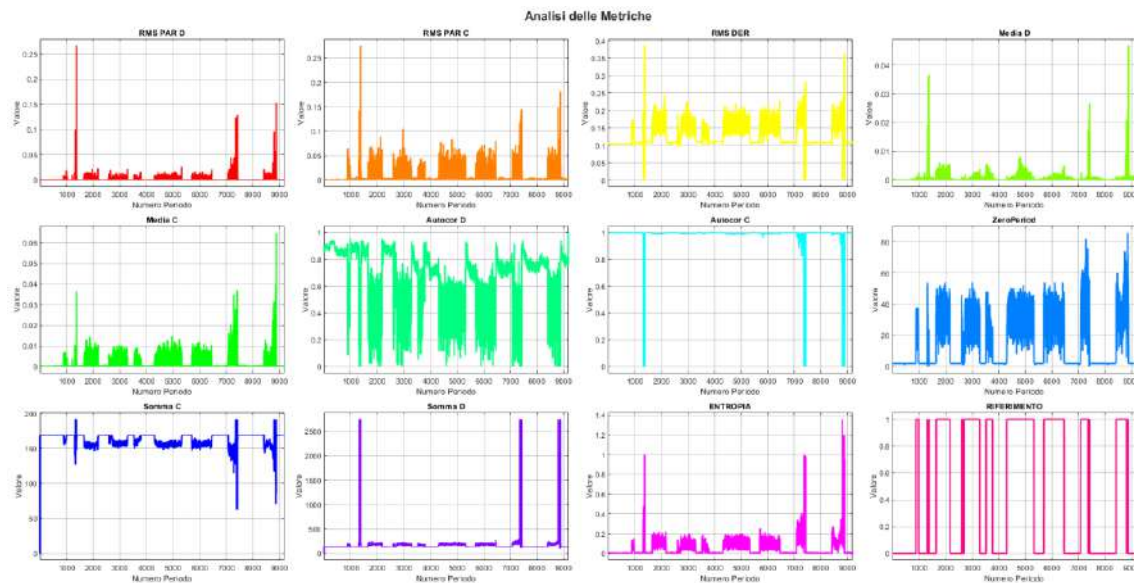


Figura 173 Grafico di sintesi delle metriche viste per il carico resistivo

Facciamo un breve riassunto dei pregi e difetti delle varie metriche in ordine:

- **RMS PARAMETER D:** essendo calcolato sulla derivata della corrente, questo parametro risulta più sensibile al rumore rispetto alla sua controparte definita sulla corrente stessa. Il principale vantaggio è la presenza di una baseline naturalmente centrata intorno allo zero, dovuta all'esecuzione di differenze successive. Di contro, il suo intervallo di variazione non risulta particolarmente ampio.

- L'RMS PARAMETER C: calcolato direttamente sulla corrente, presenta una maggiore immunità al rumore e una dinamica di variazione leggermente superiore rispetto alla versione derivativa.
- RMS: sia nella versione calcolata sulla corrente che su derivata, questa metrica non presenta una baseline fissa, ma dipende dalle condizioni di carico. Tale caratteristica rende più complessa la definizione di una soglia discriminante e l'interpretazione delle variazioni dovute a oscillazioni del carico o alla natura aleatoria dell'arco.
- Media: calcolata su base periodale, mantiene una baseline costante in zero ed è computazionalmente molto semplice. Tuttavia, risulta meno immune al rumore rispetto al valore RMS.
- Autocorrelazione: tra tutte le metriche considerate, quella calcolata sulla derivata si è dimostrata la più performante, tanto da essere stata oggetto di brevetto aziendale insieme all'RMS Parameter D. Essa presenta una baseline pari a 1 e mostra variazioni significative durante la fase di arcing, sia in presenza di carichi resistivi sia di carichi mascheranti. È preferibile alla variante calcolata sulla corrente. Pur non essendo la più leggera dal punto di vista computazionale, rimane comunque di semplice implementazione.
- ZeroPeriod: di estrema semplicità computazionale, presenta una baseline fissa pari a 2, corrispondente al numero normale di attraversamenti dello zero in un periodo di segnale. Mostra ottime prestazioni con qualunque tipologia di carico, migliorando ulteriormente con l'aumentare della frequenza di campionamento.
- Somma: la metrica basata sulla semplice sommatoria si distingue per la sua semplicità ed efficacia. In combinazione con l'RMS fornisce inoltre utili informazioni sul cambiamento di carico prima della normalizzazione, risultando quindi doppiamente utile nel contesto diagnostico.
- Entropia: questa metrica, analogamente allo ZeroPeriod, mostra una sensibilità crescente con l'aumentare della frequenza di campionamento. Segue fedelmente l'andamento dell'arco e presenta una buona dinamica già a frequenze di 10 kHz.

In sintesi, tutte le metriche analizzate mostrano una buona capacità di seguire l'andamento del fenomeno d'arco, pur presentando differenze in termini di sensibilità, robustezza al rumore e complessità computazionale. Le metriche derivate tendono a privilegiare la

sensibilità a scapito dell'immunità al rumore, mentre quelle basate sulla corrente si mostrano più stabili ma leggermente meno reattive. Parallelamente, alcune metriche offrono notevole semplicità di calcolo, risultando però più suscettibili alle condizioni di carico e alla presenza di rumore.

4.6 Combinazione metriche

Quello che è stato fatto finora è stato cercare di tradurre in metriche quello che un occhio umano può notare facilmente affinché anche la “macchina” possa notare ciò che l’uomo vede ma con la meticolosità tipica di un sistema elettronico.

Il primo passo è quello di capire, conoscendo il riferimento, quanto le metriche combinate possano fornire un output affidabile nell’identificazione degli archi elettrici. Questo primo algoritmo, dunque, troverà prima la soglia ottima per ogni metrica mediante un algoritmo di ricerca di intorno utilizzando una funzione di costo, successivamente mediante la medesima funzione di costo si sceglierà la combinazione di metriche migliore per raggiungere la percentuale di successo maggiore possibile.

Il primo passo è trovare la soglia ottima per ogni metrica. Per fare ciò partendo dalla soglia con il tasso di successo maggiore della matrice di confusione si inizia una ricerca di intorno mediante una funzione di costo.

Ho costruito la funzione “ricerca di intorno” che esegue una ricerca stocastica locale (simile a un algoritmo di hill climbing) per ottimizzare una soglia applicata a una metrica. L’algoritmo valuta di volta in volta un indice di costo ed alla fine restituisce il costo massimo ottenuto, la soluzione associata e la soglia ottimale trovata.

La funzione di costo invece, valuta la qualità di una soglia di decisione in merito ad una metrica confrontando la soluzione per la soglia scelta con un vettore di verità (riferimento). Essa premia la precisione dei veri positivi e la sensibilità, ma punisce i falsi positivi. Di seguito è riportata la formula della funzione di costo scelta.

$$f_c = \left(\frac{Vp}{Vp + Fp} + \frac{Vp}{Vp + FN} \right) = (\text{valore predittivo positivo} + \text{sensibilità})$$

Sensibilità e Valore Predittivo Positivo sono metriche derivanti dalla matrice di confusione, uno strumento fondamentale nell’analisi di classificatori binari. Immaginiamo di avere un algoritmo che decide se un evento occorre o meno. Confrontando le sue decisioni con la realtà otteniamo quattro categorie:

Veri Positivi (TP): il caso era effettivamente positivo e l’algoritmo lo ha classificato come tale.

Falsi Positivi (FP): il caso era negativo, ma l'algoritmo lo ha segnalato come positivo.

Falsi Negativi (FN): il caso era positivo, ma l'algoritmo lo ha ignorato (classificato come negativo).

Veri Negativi (TN): il caso era negativo e l'algoritmo lo ha correttamente ignorato.

La sensibilità misura la capacità del modello di catturare i positivi reali, ovvero la frazione di tutti i casi positivi che vengono individuati correttamente. Se su 100 eventi realmente positivi ne rilevo 90, la sensibilità è 90%.

Il Valore Predittivo Positivo quantifica invece l'accuratezza delle previsioni positive: su tutti i casi segnalati come positivi, quanti lo sono davvero. Se l'algoritmo segnala 120 eventi come positivi, ma solo 90 lo sono realmente, il VPP è 75%.

Una sensibilità elevata assicura di perdere pochi positivi, mentre un VPP elevato indica poche segnalazioni false. In molti contesti, per esempio, nel rilevamento di anomalie critiche come un arco elettrico è importante trovare un bilanciamento: vogliamo non perdere i veri eventi e ridurre al minimo le segnalazioni spurie che potrebbero causare allarmi ingiustificati.

La ricerca di intorno inizierà da una soglia iniziale, letta dalla matrice di confusione iniziale. Definisce un intervallo di perturbazione proporzionale all'ampiezza dei dati. Valuterà il costo ogni perturbazione e continuerà ad ottimizzare basandosi sempre sulla soglia migliore scoperta al momento per un numero massimo di tentativi impostato a monte.

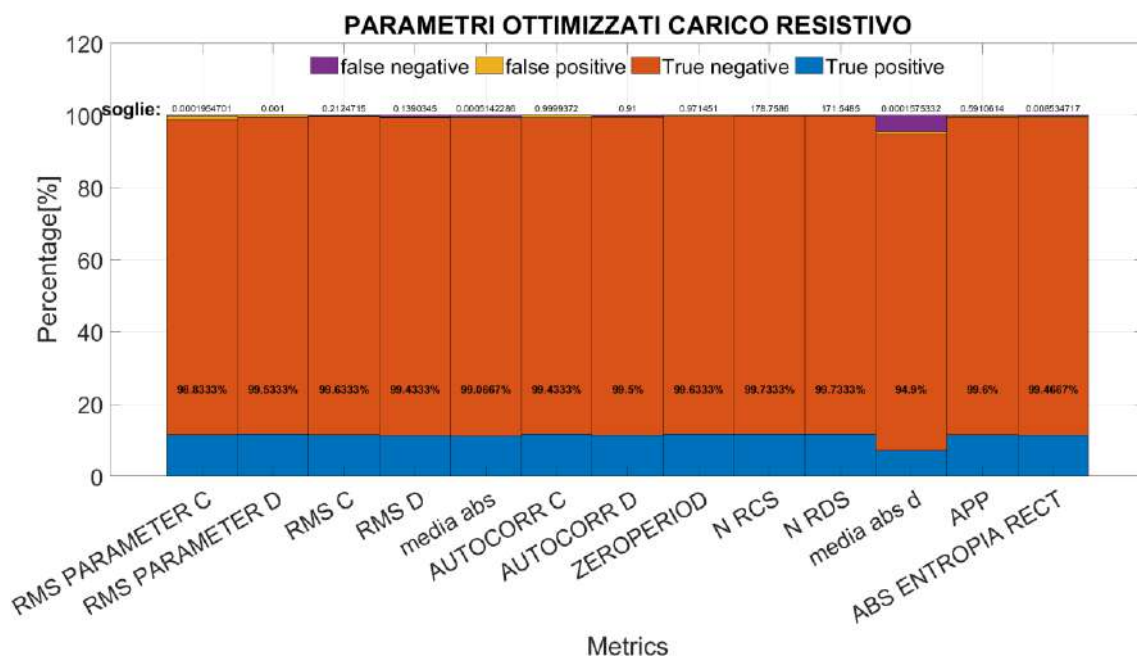


Figura 174 Risultati con soglia ottimale metrica

Mediante l'utilizzo dell'algoritmo di ricerca di intorno abbiamo identificato una possibile soglia ottimizzata. I tassi di successo di tutte le metriche superano il 90% e la maggioranza supera il 99%. La metrica con il peggiore tasso di successo, ovvero il valore assoluto della media calcolata ogni periodo della derivata raggiunge comunque un tasso di successo del 94.9%. la cosa più importante in una strategia di identificazione dell'arco elettrico, oltre ovviamente al tasso di veri positivi, è l'assenza di falsi positivi che porterebbero ad una possibile interruzione della corrente elettrica nell'abitazione senza una reale motivazione.

Nella Figura 175 cerchiamo di comprendere cosa è successo quando le metriche hanno segnalato positivo anche se il riferimento dava assenza di arco

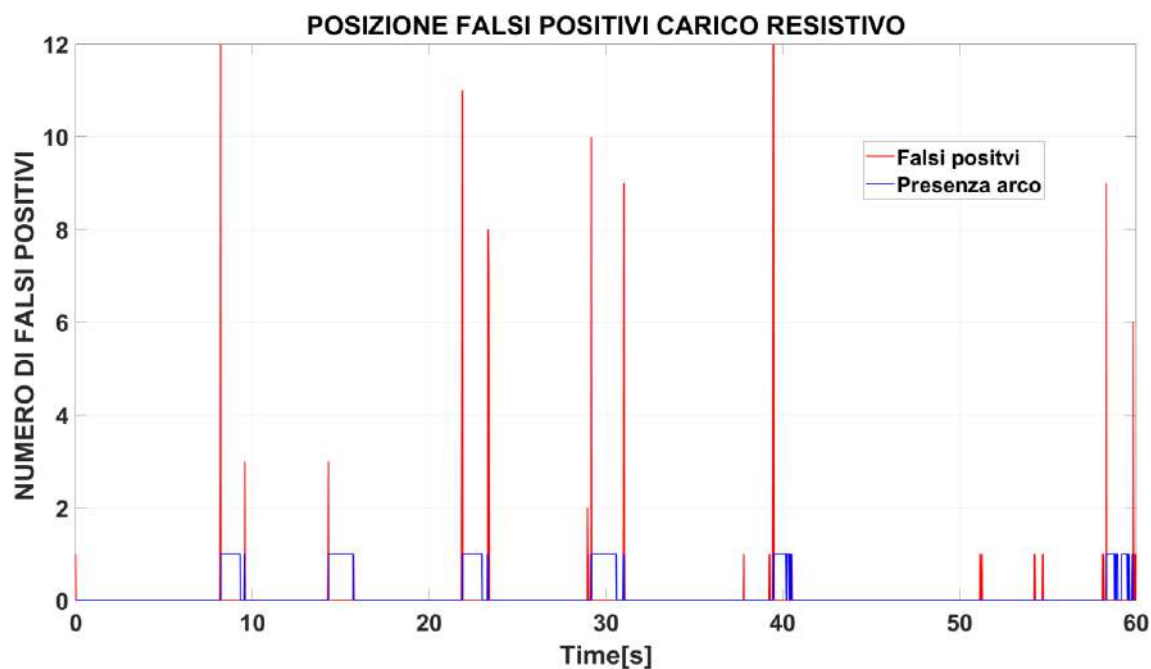


Figura 175 Posizionamento dei falsi positivi

È molto interessante notare come la maggior parte dei falsi positivi sono proprio attaccati all'inizio dell'arco, questo implica che le metriche si rendono conto prima della comparsa dell'arc flash dell'anomalia nel circuito. Dunque, questi falsi positivi non sono realmente “falsi” nella maggior parte dei casi.

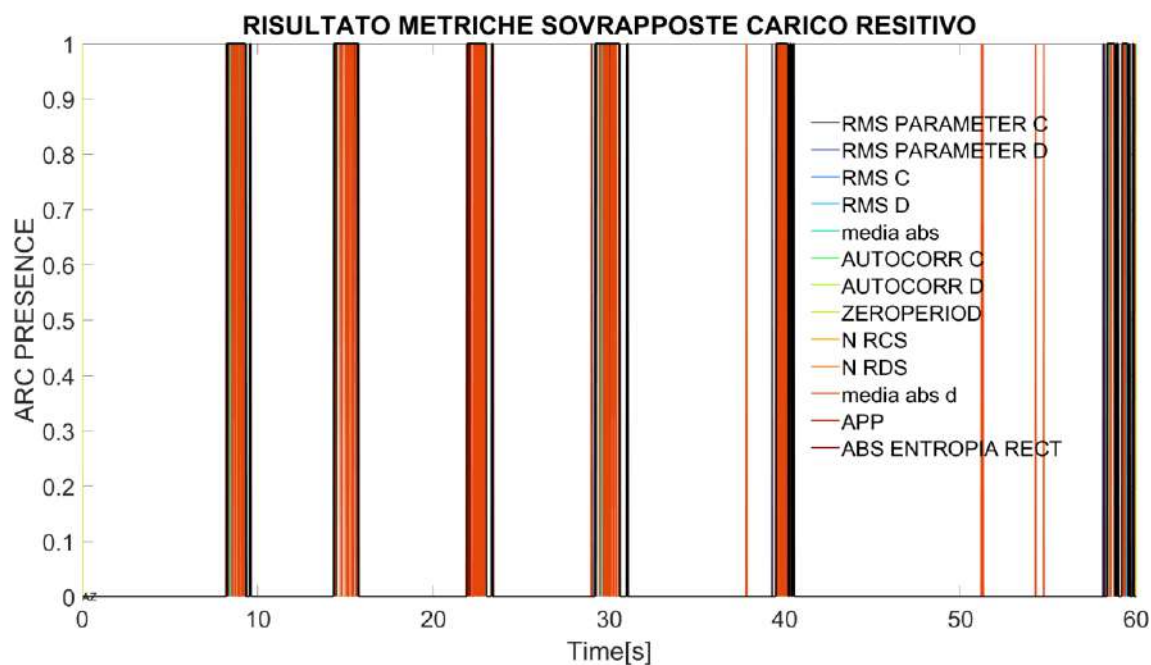


Figura 176 Sovrapposizione risultati metriche

In Figura 176 vediamo i risultati di tutte le metriche sovrapposte e possiamo osservare come le campane fuori dal coro sono poco frequenti e comunque è principalmente una metrica sola.

TRAPANO

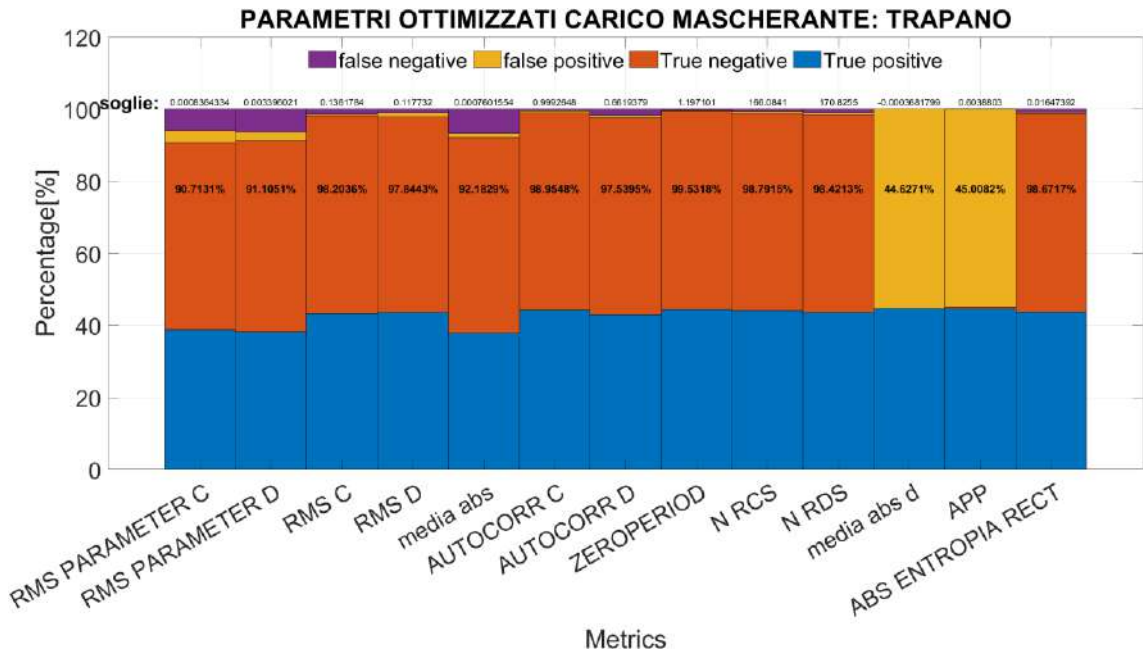


Figura 177 Parametri ottimizzati carico mascherante, trapano

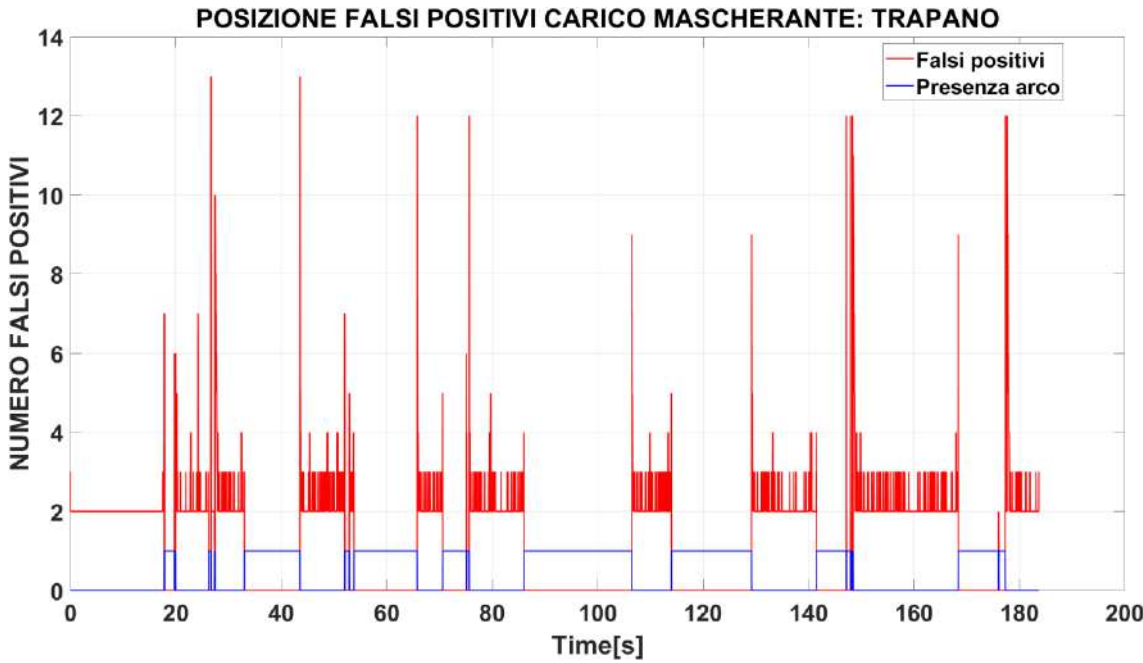


Figura 178 Posizione Falsi Positivi carico mascherante

Passiamo ora a vedere come combinare le metriche.

Per ricercare la migliore combinazione possibile di metriche utilizzeremo sempre una ricerca di intorno basandoci sui risultati ottenuti dalle metriche con la soglia scelta precedentemente sempre con una ricerca di intorno, come abbiamo visto in precedenza.

La funzione “ricerca_di_intorno_combinazione” rappresenta un'evoluzione del precedente algoritmo di ottimizzazione, estendendolo dalla ricerca di soglie ottimali singole alla ricerca di combinazioni ottimali di metriche. Invece di variare una soglia numerica, questa funzione seleziona e ottimizza quali metriche utilizzare contemporaneamente per massimizzare le prestazioni di classificazione. Inoltre, ho previsto in input la variabile “numero metriche” che mi permette di specificare quante metriche massimo può utilizzare contemporaneamente per trovare la soluzione. Questo proprio perché l'obiettivo è quello di costruire una strategia scalabile.

La funzione di costo rimane la medesima di prima e l'algoritmo è basato sempre sulla tecnica di hill climbing stocastico che ad ogni iterazione perturba la soluzione aggiungendo e sottraendo metriche al pool presente all'iterazione precedente. Come prima qualora si trovi una combinazione migliorativa rispetto alla migliore trovata fino a quel momento si mantiene il principio di “accettare e salvare il miglioramento”.

La differenza principale rispetto all'algoritmo di ricerca di intorno precedente è che la variabile da ottimizzare in questo secondo caso è un vettore binario che indica quali metriche sono state scelte e quali no, prima invece erano le soglie, ovvero valori scalari singoli.

Il risultato finale è un subset ottimale di metriche che, utilizzate insieme, massimizzano la capacità di distinguere correttamente tra eventi positivi e negativi, riducendo al minimo falsi allarmi, caratteristica cruciale in sistemi di monitoraggio automatico dove le segnalazioni spurie possono causare interventi non necessari.

Vedremo un esempio dove si è chiesto al sistema di selezionare la combinazione di metriche che secondo la funzione di costo scelta dia il risultato migliore.

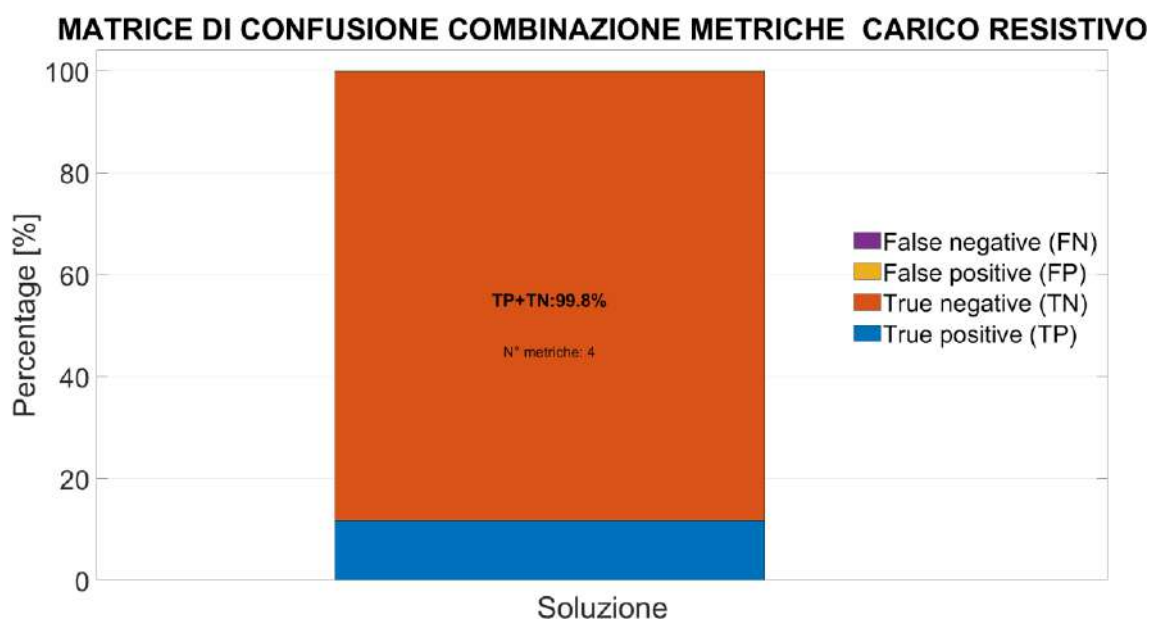


Figura 179 Matrice di confusione soluzione metriche per il carico resistivo

I risultati presentati nella matrice di confusione rivelano performance soddisfacenti del modello sviluppato per la combinazione metrica del carico resistivo. La percentuale di successo complessiva del 99,8% (TP+TN: 99,8%) rappresenta un risultato anche sopra le aspettative.

L'analisi della matrice evidenzia una distribuzione ottimale delle previsioni, con una predominanza di veri negativi (TN) che costituiscono circa l'85% del totale, mentre i veri positivi (TP) rappresentano il restante ~13%. Questo pattern suggerisce che il modello ha dimostrato eccellente capacità discriminativa nel riconoscere correttamente sia le condizioni positive che negative del sistema.

La quasi assenza di falsi positivi e falsi negativi nell'analisi delle quattro metriche considerate testimonia l'elevata precisione e sensibilità del sistema sviluppato.

Fields	successo...	metriche...	nomi_metriche_sel	costo_comb	arco_comb	pos_fp_comb	falsi_pos_co...	numero...	numero_FP	confusione
1	99.7667	1*13 double	'AUTOCORR_C'	198.0289	1*3000 double	1*3000 double	1*3000 double	4	5	[11.7000,88.0667,0.1667,0.0667]
2	99.7667	1*13 double	'AUTOCORR_D'	198.0289	1*3000 double	1*3000 double	1*3000 double	4	5	[11.7000,88.0667,0.1667,0.0667]
3	99.7667	1*13 double	'N_RCS'	198.0289	1*3000 double	1*3000 double	1*3000 double	4	5	[11.7000,88.0667,0.1667,0.0667]
4	99.7667	1*13 double	'N_RDS'	198.0289	1*3000 double	1*3000 double	1*3000 double	4	5	[11.7000,88.0667,0.1667,0.0667]

Figura 180 risultato e metriche utilizzate

Le metriche scelte dall'algoritmo di ricerca di intorno sono: l'autocorrelazione sulla corrente e sulla derivata ed NRCS e NRDS.

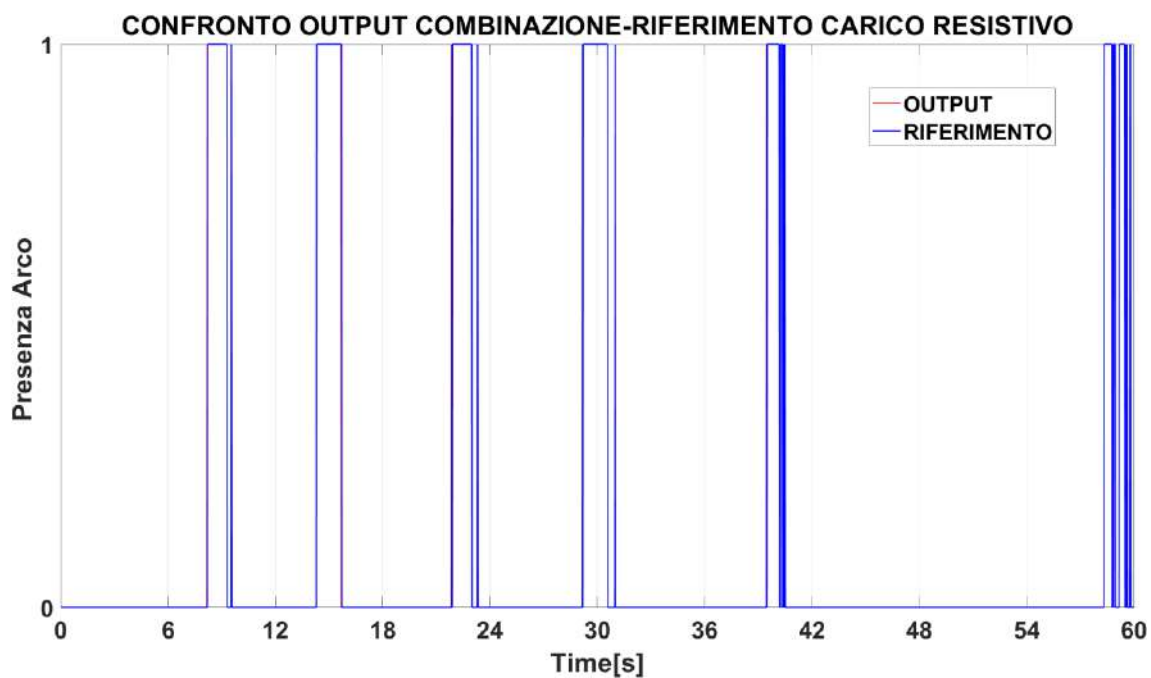


Figura 181 confronto tra soluzione e riferimento

Osservando per ispezione diretta la Figura 182 si nota una quasi completa sovrapposizione tra l'output ed il riferimento, a meno di pochi falsi positivi, che, come possiamo osservare anche dalla figura successiva, sono in prossimità dell'arco, dunque, non sono propriamente falsi positivi. Come detto, le metriche riescono ad anticipare anche il fenomeno dell'arc flash e dunque il riferimento.

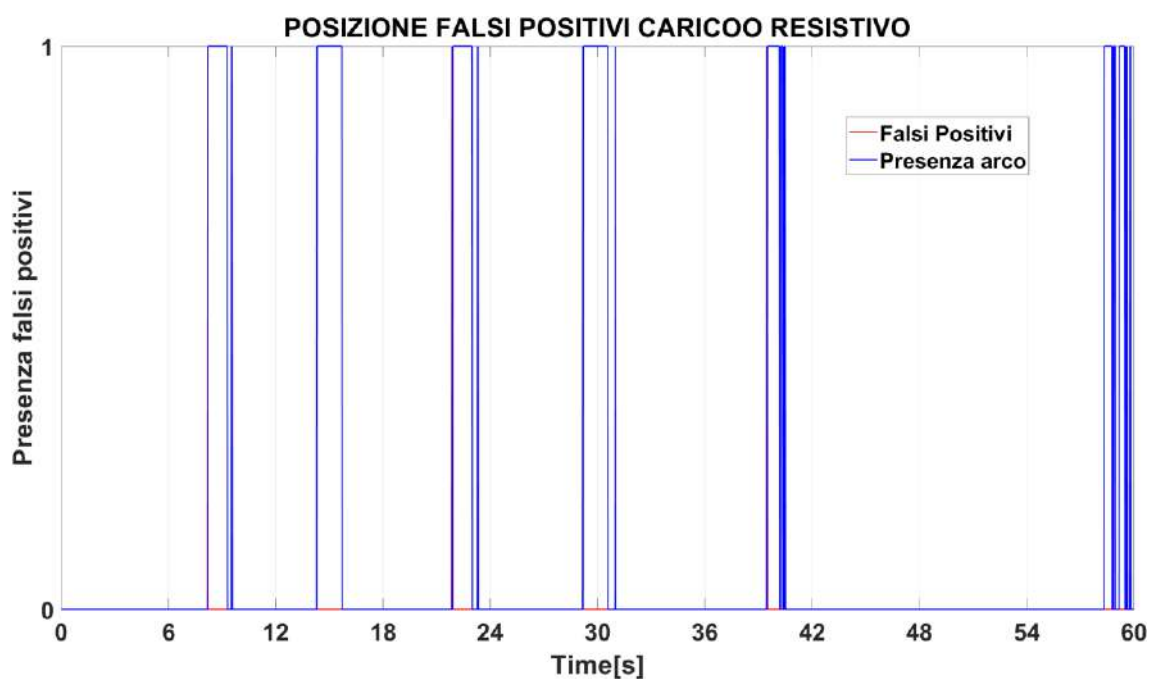


Figura 182 Posizione falsi positivi

È utile osservare ora il carico più ostico, ovvero il carico mascherante induttivo, il trapano.

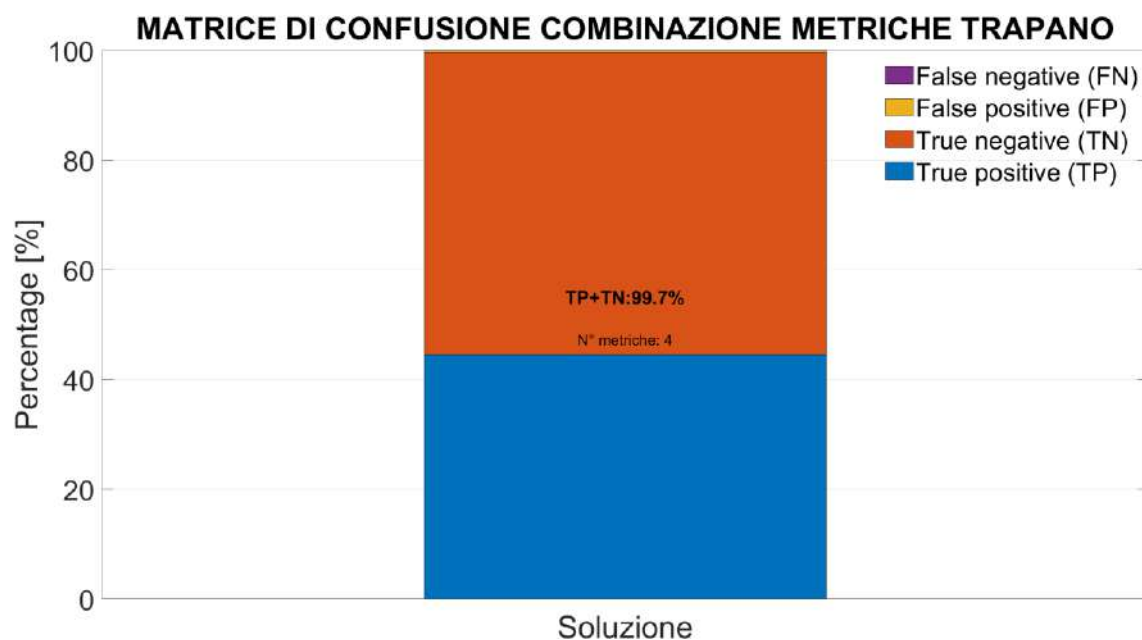


Figura 183 Matrice di confusione soluzione per il carico mascherante

La forma d'onda del trapano dura il triplo (180 s) rispetto a quella del carico resistivo, inoltre la generazione dell'arco rappresenta circa il 45% della forma d'onda; dunque, come abbiamo detto precedentemente è decisamente un segnale molto ostico.

La matrice di confusione presentata mostra risultati accettabili anche per la classificazione del carico mascherante induttivo del trapano, con una percentuale di successo complessiva del 99,7% (TP+TN: 99,7%). Questo rappresenta un risultato di particolare rilevanza nell'ambito della diagnostica dei carichi induttivi.

L'analisi della matrice rivela una distribuzione bilanciata tra veri positivi (TP) che rappresentano circa il 45% del totale e veri negativi (TN) che costituiscono il restante ~53%.

La quasi totale assenza di falsi positivi e falsi negativi testimonia l'ottima capacità nel distinguere tra diverse modalità operative del carico induttivo. Questo è particolarmente significativo considerando la complessità intrinseca dei carichi induttivi, che possono presentare variazioni di comportamento dovute a:

Variazioni di carico meccanico durante l'utilizzo, cambiamenti termici che influenzano la resistenza degli avvolgimenti, transitori di commutazione, presenza della corrente di spunto e fenomeni di fly-back.

Fields	successo_...	metriche_...	nomi_metri...	costo_comb	arco_comb	pos_fp_comb	falsi_pos_co...	numero_...	numero_FP	confusione
1	99.6516	1*13 double	'RMS_C'	199.2206	1*9185 double	1*9185 double	1*9185 double	4	21	[44.5073,55.1443,0.2206,0.1196]
2	99.6516	1*13 double	'media_abs'	199.2206	1*9185 double	1*9185 double	1*9185 double	4	21	[44.5073,55.1443,0.2206,0.1196]
3	99.6516	1*13 double	'ZERO PERIOD'	199.2206	1*9185 double	1*9185 double	1*9185 double	4	21	[44.5073,55.1443,0.2206,0.1196]
4	99.6516	1*13 double	'media_abs_d'	199.2206	1*9185 double	1*9185 double	1*9185 double	4	21	[44.5073,55.1443,0.2206,0.1196]

Figura 184 dettagli soluzione per il carico mascherante

È interessante osservare come le metriche scelte in questo caso siano totalmente diverse da quelle scelte nel primo caso. Questo suggerisce che al variare dei casi di carico avremo delle metriche più efficienti e delle altre meno.

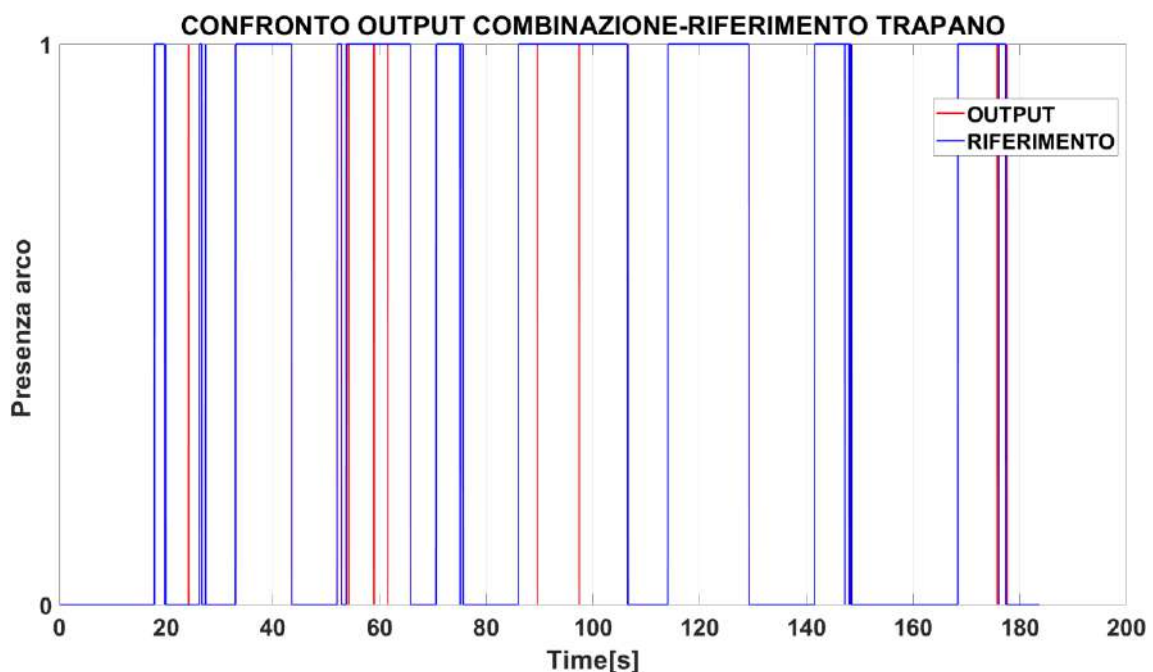


Figura 185 Sovrapposizione soluzione e riferimento

In Figura 185 è mostrata la sovrapposizione tra l'output ed il riferimento. In questo caso il grafico è meno "pulito" rispetto al carico resistivo. C'è una leggera presenza di falsi negativi, che però, essendo spuri non pregiudicano l'identificazione dell'arco elettrico. Anche in un caso con carico mascherante ed archi molto prolungati le metriche in combinazione raggiungono un ottimo risultato che non si lascia sfuggire mai un arco.

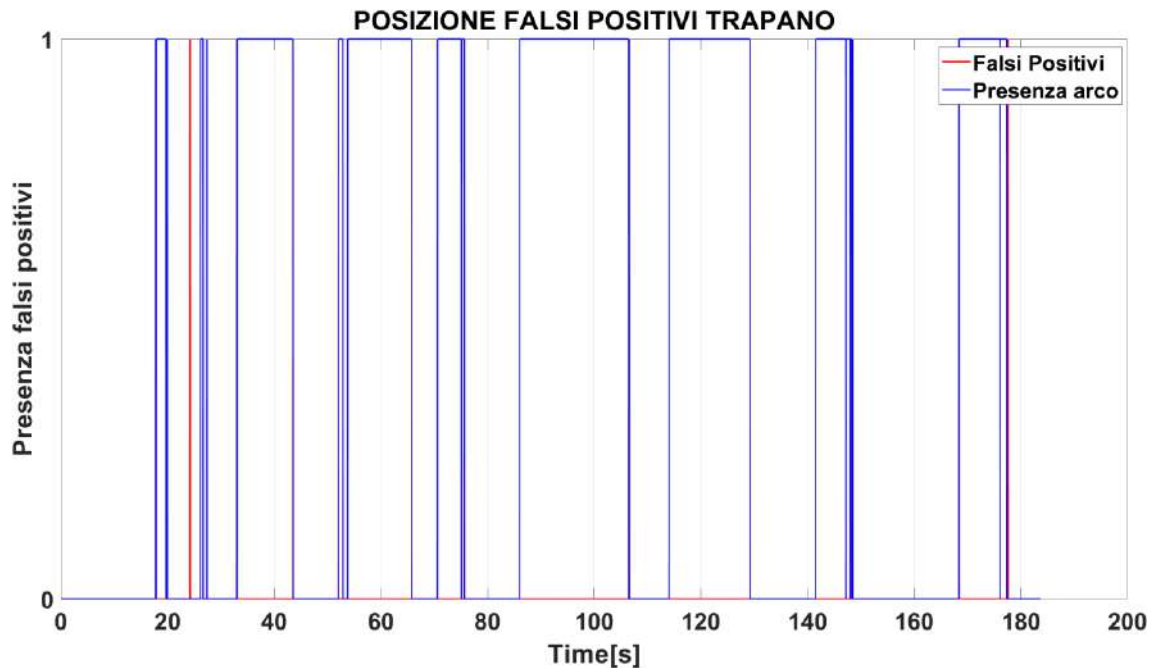


Figura 186 Posizione falsi positivi

In questo caso è presente anche un falso positivo spurio abbastanza distante dall'arco. Questo lascia riflettere sul fatto che sicuramente è opportuno che l'arco elettrico si debba manifestare per qualche periodo di corrente prima di segnalare l'arco, onde evitare interruzioni indesiderate.

In conclusione, abbiamo analizzato la potenzialità delle metriche e della loro combinazione analizzando un esempio di combinazione a quattro metriche. Ora è necessario sviluppare una vera e propria strategia come nel caso di quella vista nel capitolo 3: AFFD REAL TIME CON ALGORITMO DI ANALISI ARMONICA A BASSA FREQUENZA.

4.7 STRATEGIA: Arc Unmasking & eXtinction

La strategia proposta si basa sull'impiego di un insieme di undici metriche, calcolate a partire dal solo segnale di corrente campionato dal circuito elettrico in analisi. L'obiettivo dell'algoritmo è rilevare la presenza di un arc fault in modo adattivo, fornendo al contempo strumenti di validazione e rappresentazioni grafiche utili in questa fase di ricerca. Le metriche considerate includono:

- il valore RMS della corrente e della sua derivata,
- la media in valore assoluto della corrente e della derivata,

- l'autocorrelazione della corrente e della derivata
- lo zeroperiod,
- l'entropia.

Ciascuna metrica viene calcolata su base periodale e i valori ottenuti vengono organizzati in una matrice di dimensione $N \times T$, dove N rappresenta il numero di metriche e T il numero di periodi analizzati.

Il cuore della strategia è rappresentato da un meccanismo di votazione a maggioranza. Ogni metrica, confrontando il proprio valore con la relativa soglia, produce un esito booleano: 1 se l'arco è rilevato, 0 in caso contrario. Quando più di sei metriche (maggioranza semplice) segnalano simultaneamente la presenza di arco, viene generata la segnalazione di arc fault. In caso contrario, le soglie vengono aggiornate dinamicamente. La strategia prende in input esclusivamente il segnale di corrente campionato a monte e restituisce un output booleano ed i dati utili alla validazione.

Il funzionamento dell'algoritmo si articola in tre fasi principali:

1. Inizializzazione

In questa fase, per ciascuna metrica viene calcolata una soglia iniziale basata sulle condizioni correnti. La soglia è definita come la media di M finestre temporali moltiplicata per un coefficiente di sicurezza:

- 1.01 per le metriche a dinamica crescente,
- 0.99 per le metriche a dinamica decrescente (ad esempio l'autocorrelazione).

Da questo momento in poi, le metriche vengono confrontate con tali soglie iniziali. Qualora già in questa fase la maggioranza (≥ 6 metriche) segnali la presenza di arco, viene immediatamente attivato l'allarme.

2. Warm-up

Segue una fase di "riscaldamento" in cui l'algoritmo penalizza fortemente i falsi positivi. Se una o due metriche producono erroneamente una segnalazione di arco, la loro soglia viene incrementata sensibilmente, riducendone così la sensibilità.

Questo garantisce che il sistema non reagisca in maniera eccessiva a fluttuazioni momentanee o rumore.

3. Regime

Terminato il warm-up, l'algoritmo entra nella fase a regime. In questo stadio, se non si osservano superamenti di soglia e il valore RMS della corrente si mantiene stabile, le soglie vengono progressivamente ottimizzate. In particolare, viene ciclicamente modificata la soglia di una singola metrica alla volta, con l'obiettivo di aumentarne gradualmente la sensibilità. Questo approccio consente di mantenere l'algoritmo robusto ma al tempo stesso adattivo, bilanciando continuamente la capacità di rilevazione e la riduzione dei falsi positivi.

Di seguito sono presentati i diagrammi di flusso che spiegano graficamente quanto enunciato sopra.

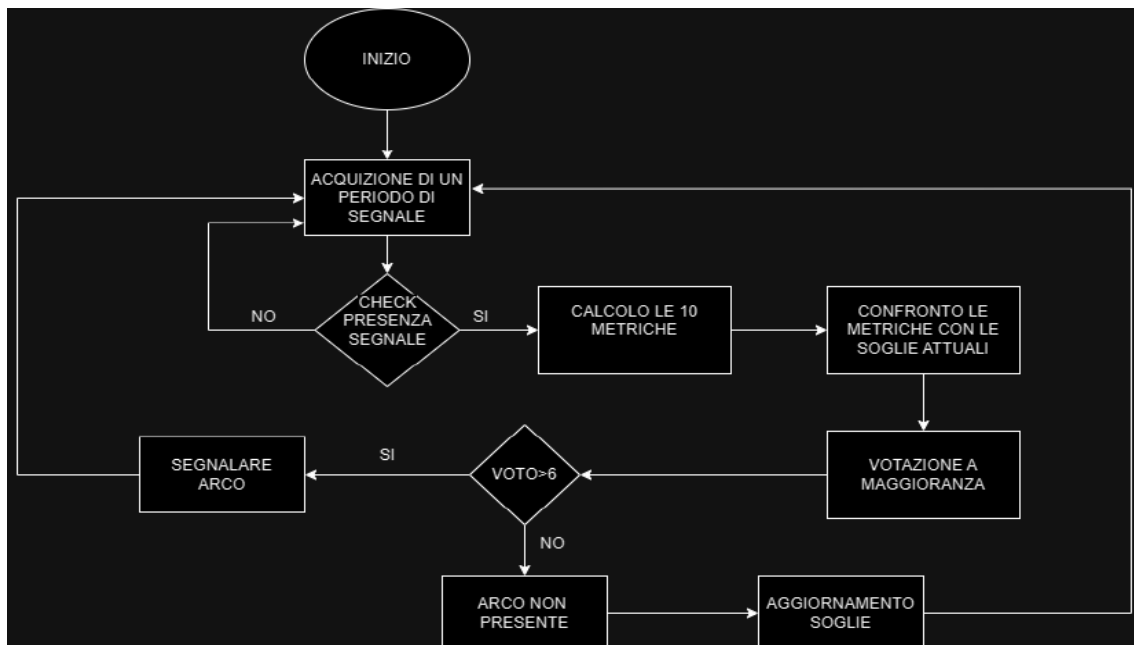


Figura 187 Diagramma di flusso generale strategia a regime

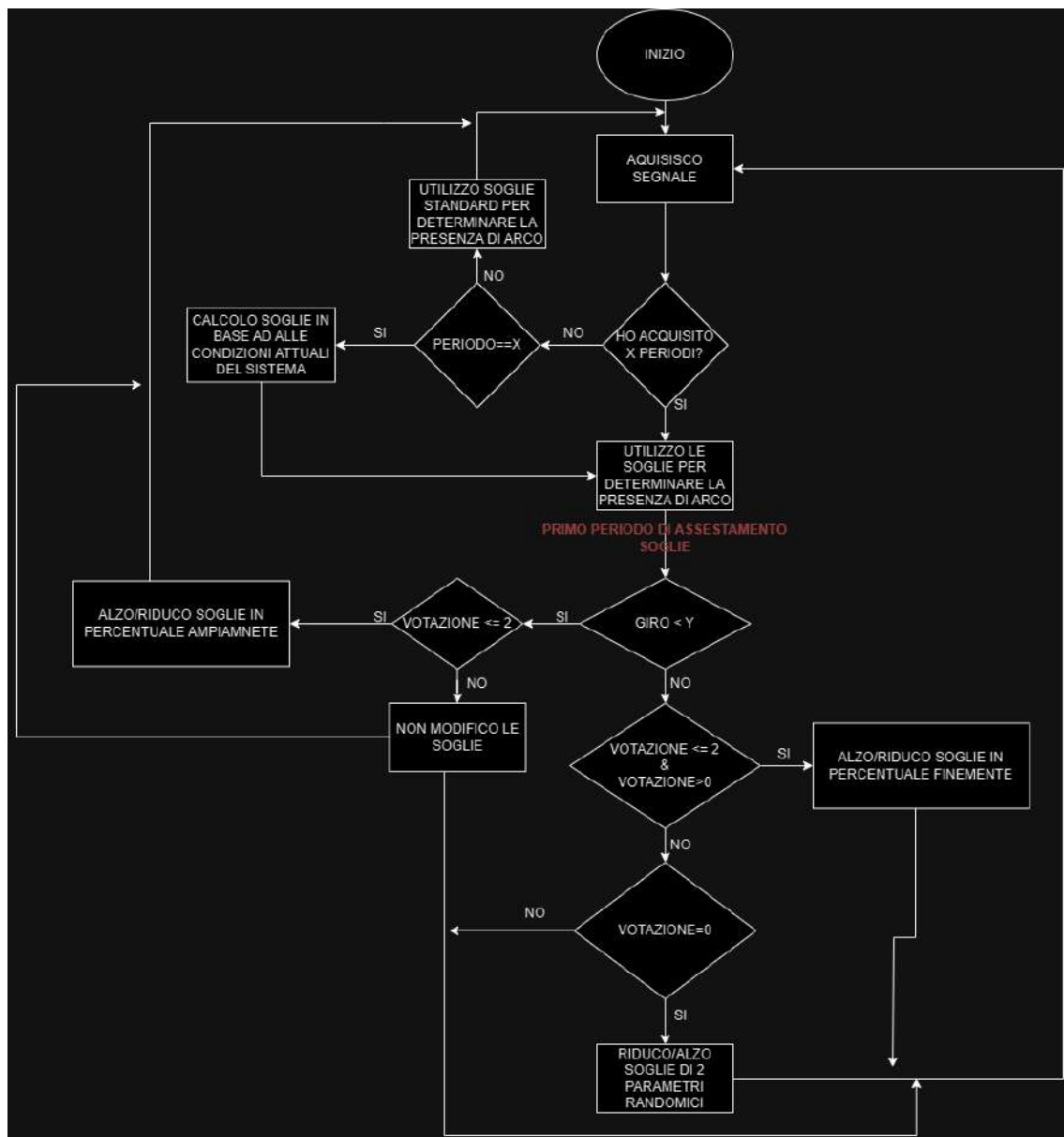


Figura 188 Diagramma di flusso soglie adattive

Seguendo dunque tutti i passaggi elencati precedentemente si giunge ai seguenti risultati:

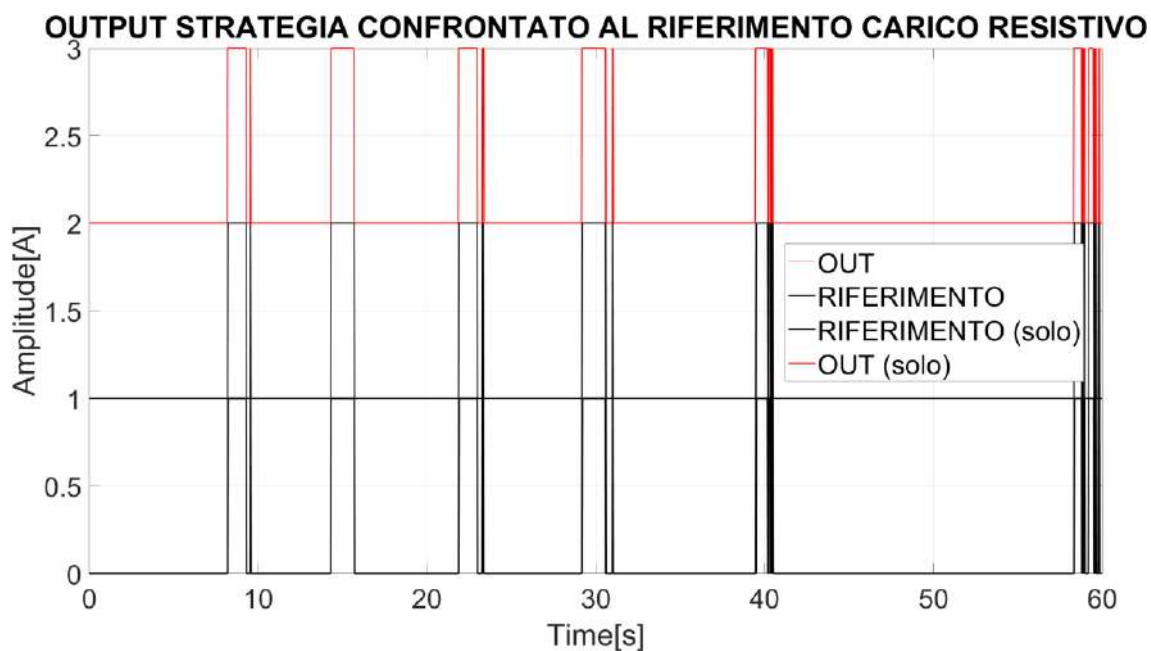


Figura 189 confronto uscita strategia-riferimento

In Figura 189 confronto uscita strategia-riferimento, osserviamo 3 curve, quella più in basso è la sovrapposizione delle prime due in alto. Per ispezione diretta si constata una quasi totale sovrapposizione tra l'uscita della strategia (curva rossa) ed il riferimento (curva nera).

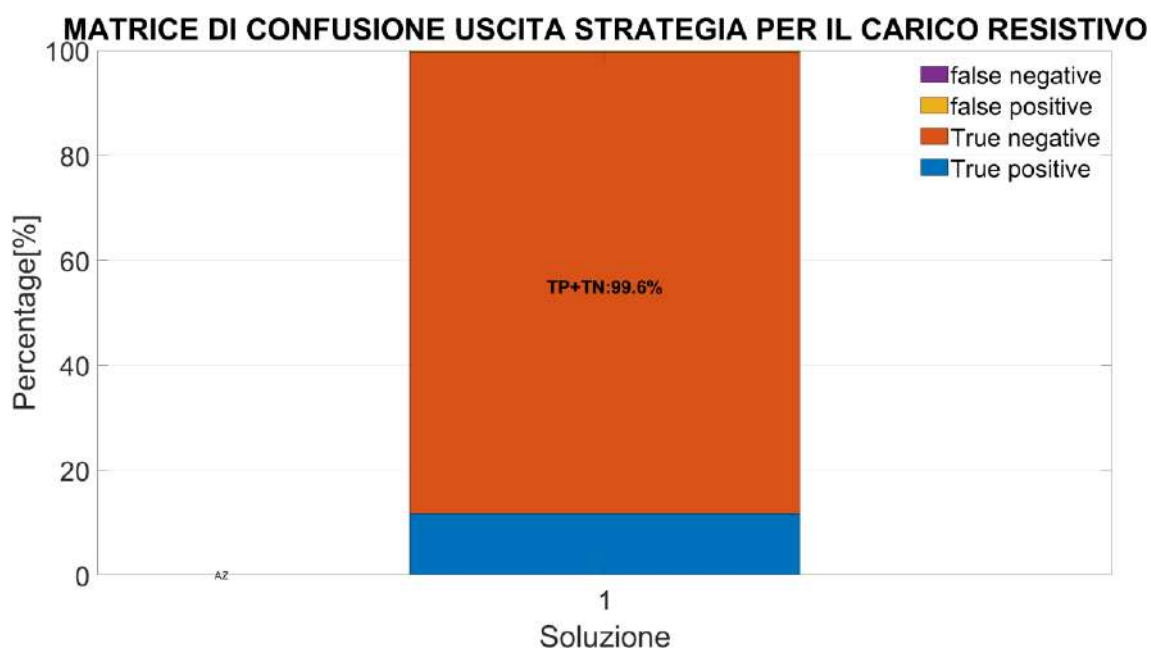


Figura 190 matrice di confusione risultato strategia

Dalla matrice di confusione in Figura 190 possiamo leggere la reale percentuale di successo per il carico resistivo, ovvero il 99.6% di successo nell'identificazione corretta della presenza o assenza di arco.

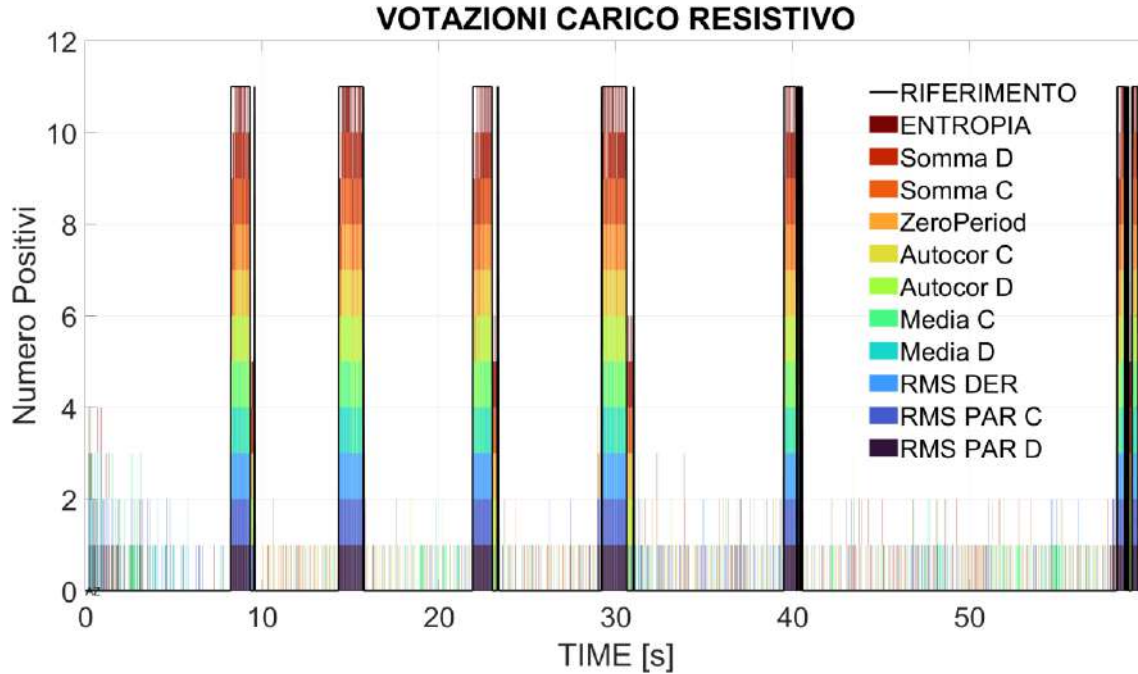


Figura 191 votazioni nel dettaglio per la durata del segnale di corrente

La Figura 191, permette di osservare in dettaglio il comportamento interno dell'algoritmo. È evidente come le soglie delle metriche non rimangano statiche, ma vengano continuamente aggiornate per garantire una condizione di prontezza in caso di insorgenza di arco elettrico. Particolarmente significativo è l'andamento iniziale, corrispondente alla fase di warm-up: in questo intervallo l'algoritmo richiede una maggiore quantità di aggiustamenti al fine di stabilizzare il sistema e ridurre l'incidenza di falsi positivi. Una volta conclusa questa fase, l'algoritmo entra a regime: le soglie continuano a essere adattate dinamicamente, non per correggere instabilità ma per evitare condizioni di stasi, mantenendo così costante la sensibilità del sistema e preservandone l'affidabilità nel tempo.

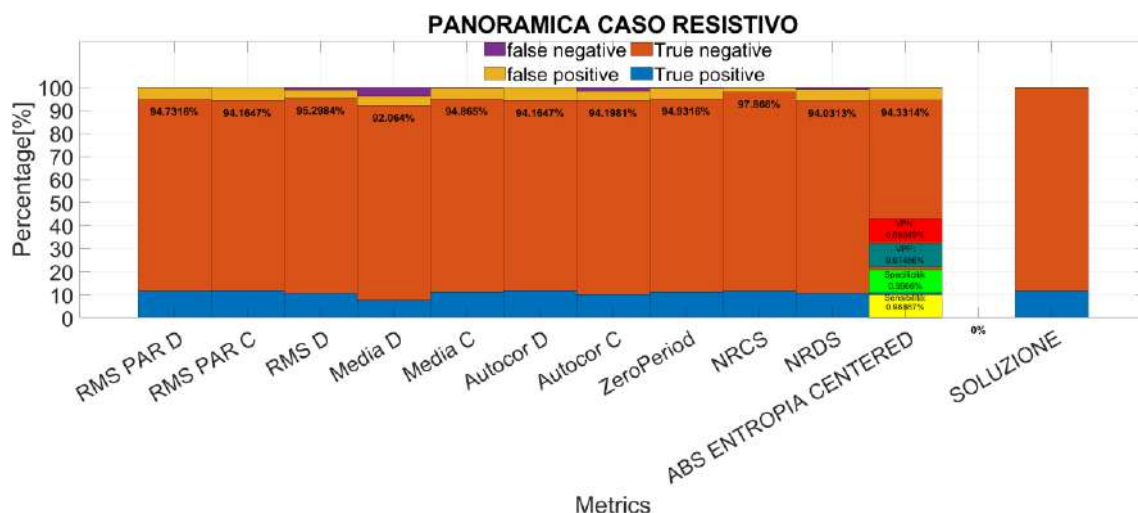


Figura 192 Panoramica con tutte le metriche

In Figura 192 osserviamo l'andamento di tutte le metriche, ben diverso da quello ottimizzato visto nel paragrafo precedente anche se come abbiamo visto il risultato non si discosta poi di molto dal precedente caso ottimizzato in base al riferimento.

È possibile osservare anche i quattro indicatori:

- La sensibilità misura la capacità del sistema di rilevare tutti i veri eventi di arco presenti nel segnale. Un'elevata sensibilità garantisce che quasi nessun episodio di arco passi inosservato, riducendo al minimo i casi in cui l'arco effettivamente avviene ma non viene segnalato (falsi negativi).
- La specificità valuta la capacità del sistema di escludere correttamente i momenti senza arco, evitando falsi allarmi. Un'elevata specificità assicura che le variazioni normali del segnale non vengano interpretate come archi, minimizzando le segnalazioni spurie.
- Il valore predittivo positivo indica la fiducia che si può riporre in una segnalazione di arco: tra tutti gli allarmi generati, quanti corrispondono realmente a un arco elettrico. Un VPP elevato significa poche segnalazioni ingannevoli, riducendo interventi non necessari.
- Il valore predittivo negativo esprime la probabilità che, in assenza di allarme, non vi sia effettivamente alcun arco. Un VPN elevato garantisce che i momenti classificati come "nessun arco" siano davvero privi di fenomeni di scarica, aumentando l'affidabilità del sistema nel non ignorare eventi critici.

Questi indicatori, derivati dalla matrice di confusione, permettono di definire un bilanciamento ottimale tra la capacità di cogliere tutti gli archi e la necessità di evitare allarmi falsi.

In questo caso osserviamo come tutti i quattro indicatori riferiti alla strategia siano elevati, denotando affidabilità.

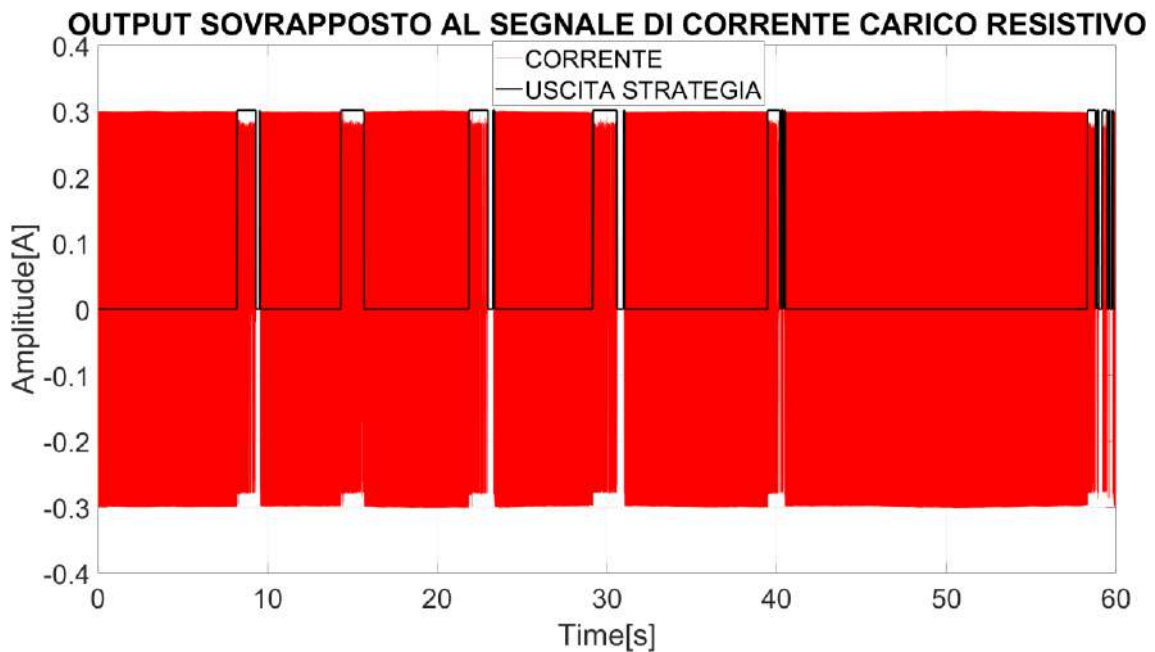


Figura 193 uscita della strategia sovrapposta al segnale di corrente

Infine, per avere un colpo d'occhio finale osserviamo la sovrapposizione di forma d'onda e riferimento.

Ovviamente le stesse analisi condotte per il caso resistivo sono state condotte per il carico mascherante:

OUTPUT STRATEGIA CONFRONTATO AL RIFERIMENTO CARICO MASCHERANTE: TRAPANO

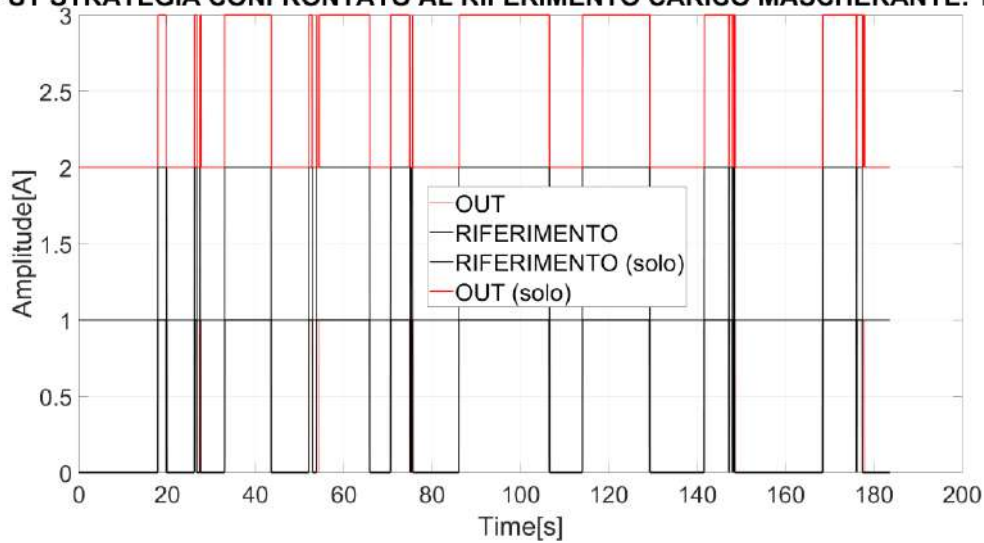


Figura 194 confronto uscita strategia-riferimento

Anche in questo caso la sovrapposizione risulta pressoché perfetta, sebbene si notino lievi discrepanze nelle porzioni iniziali e finali dei periodi di arco, che tuttavia non compromettono l'efficacia complessiva della strategia.

MATRICE DI CONFUSIONE USCITA STRATEGIA CARICO MASCHERANTE: TRAPANO

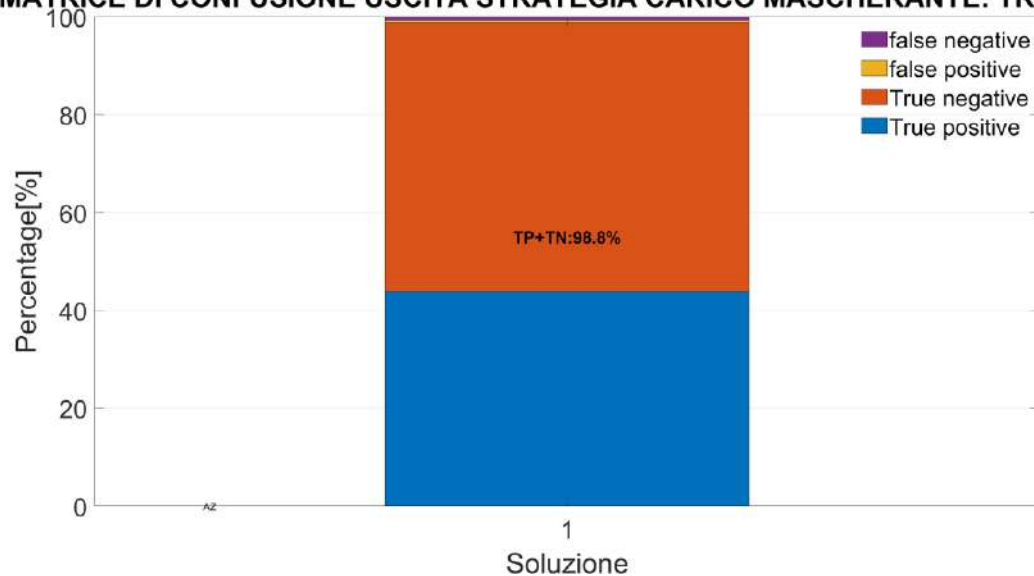


Figura 195 matrice di confusione risultato strategia

La percentuale di successo della strategia, in questo caso è del 98.8% come valore assoluto, ma come visto dal grafico precedente non esistono falsi positivi isolati che segnalerebbero un allarme ingiustificato.

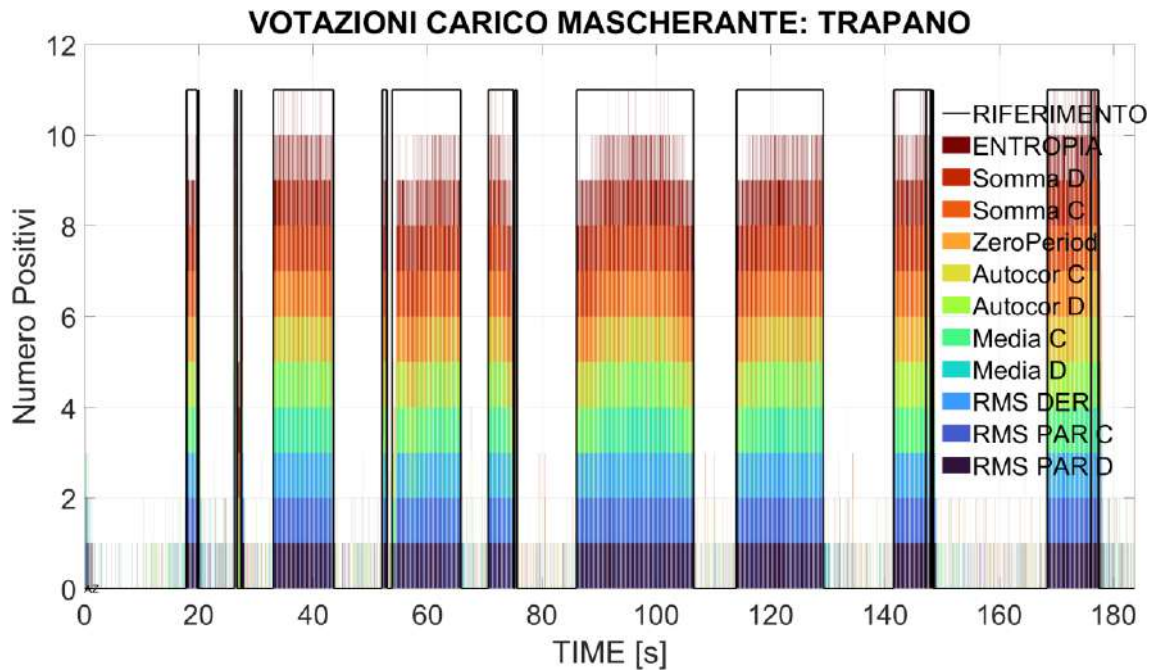


Figura 196 votazioni nel dettaglio per la durata del segnale di corrente

Per quanto concerne il grafico delle votazioni possiamo osservare come le metriche siano sempre reattive e ben regolate anche nel caso più rumoroso in presenza di un carico mascherante come il trapano.

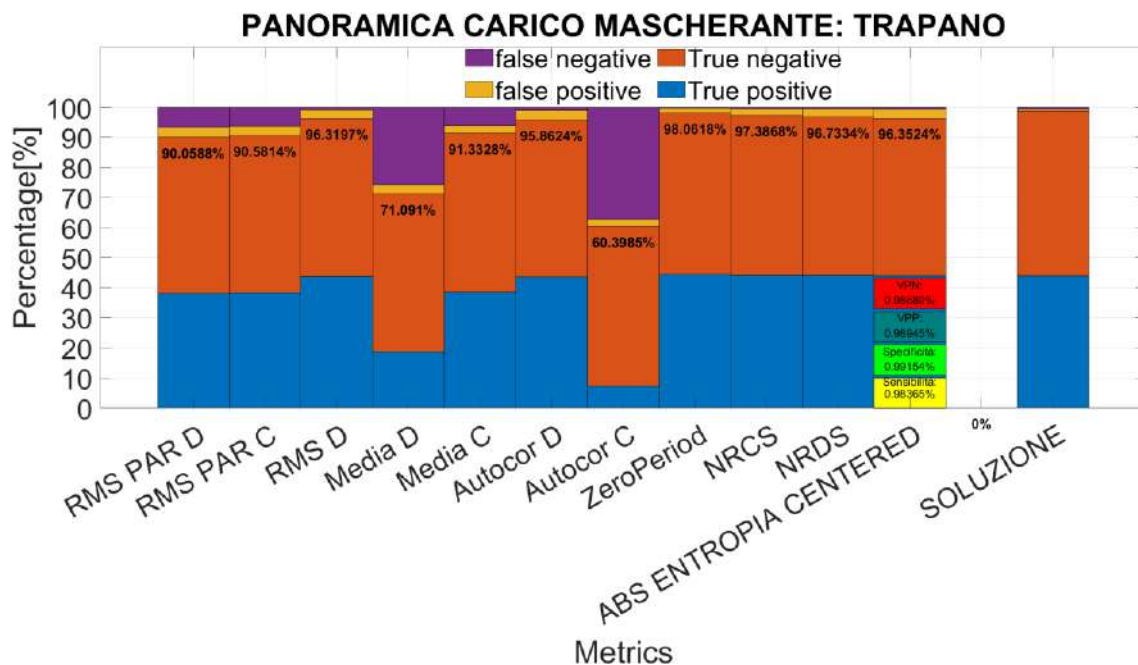


Figura 197 Panoramica con tutte le metriche

Con questo carico sicuramente gli aggiustamenti delle metriche saranno stati più pesanti e frequenti pur non intaccando nessuno dei quattro parametri utilizzati per valutare questa strategia.

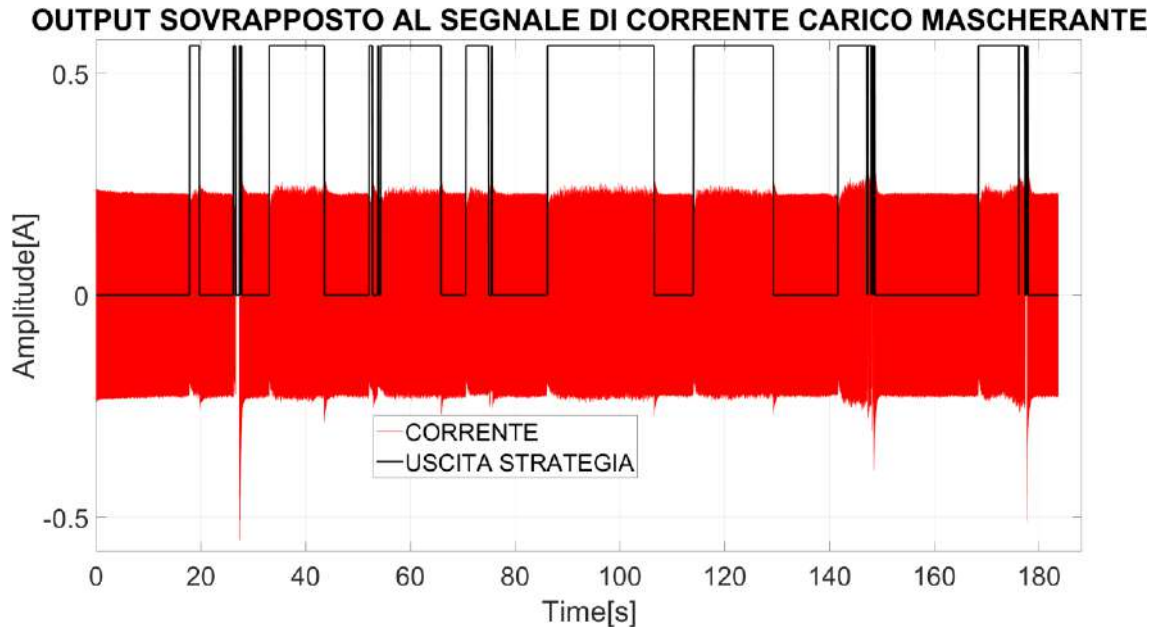


Figura 198 uscita della strategia sovrapposta al segnale di corrente

La strategia sviluppata consente di individuare la presenza di arc fault facendo affidamento unicamente sul segnale di corrente misurato, senza la necessità di riferimenti esterni come un fotodiodo. L'approccio si distingue per la sua capacità adattiva: le soglie delle metriche non rimangono statiche ma vengono continuamente aggiornate in funzione delle condizioni operative del circuito.

La combinazione di più metriche eterogenee, seguite da una logica decisionale basata sulla votazione a maggioranza, garantisce un'elevata robustezza. Nessuna singola metrica risulta infatti determinante in assoluto: l'algoritmo sfrutta il contributo collettivo delle metriche, riducendo la probabilità che fenomeni transitori o rumore producano falsi allarmi.

L'introduzione delle fasi di inizializzazione e warm-up rappresenta un ulteriore punto di forza. La prima assicura che il sistema parta con soglie coerenti con le condizioni correnti dell'impianto, mentre la seconda attenua la possibilità di falsi positivi nella fase iniziale, quando il comportamento del sistema potrebbe essere meno stabile.

A regime, il continuo aggiustamento delle soglie permette al sistema di adattarsi a variazioni graduali delle condizioni di carico, preservando la capacità di rilevare l'arco anche in scenari mutevoli e realistici. In questo modo la strategia si dimostra adatta a un'implementazione pratica, ad esempio in dispositivi destinati all'installazione in quadri elettrici residenziali.

In sintesi, la metodologia proposta rappresenta un compromesso efficace tra affidabilità e adattività: sfrutta la diversità delle metriche, bilancia sensibilità e robustezza attraverso l'aggiornamento dinamico delle soglie, ed è concepita per garantire prestazioni solide in un contesto applicativo reale.

5. INTEGRAZIONE ALGORITMO SU DISPOSITIVO PRYSMIAN

L'analisi delle metriche per l'identificazione dell'arc fault ha mostrato come anche parametri apparentemente “semplici” possano rivelarsi efficaci nell'individuazione del fenomeno. Questa seconda parte del lavoro nasce, come anticipato, dall'esigenza di sviluppare un algoritmo di Arc Fault Detection (AFD) integrabile all'interno di un dispositivo reale.

Il dispositivo considerato prende il nome di Omhero ed è stato progettato presso la sede EOSS Prysmian di Palermo. Si tratta di un sistema di monitoraggio pensato per applicazioni residenziali e per piccole imprese, installabile direttamente all'interno del quadro elettrico principale su guida DIN, in Figura 199 un esempio di montaggio. È disponibile sia in versione monofase che trifase; nel presente lavoro l'implementazione è stata realizzata sulla versione monofase.

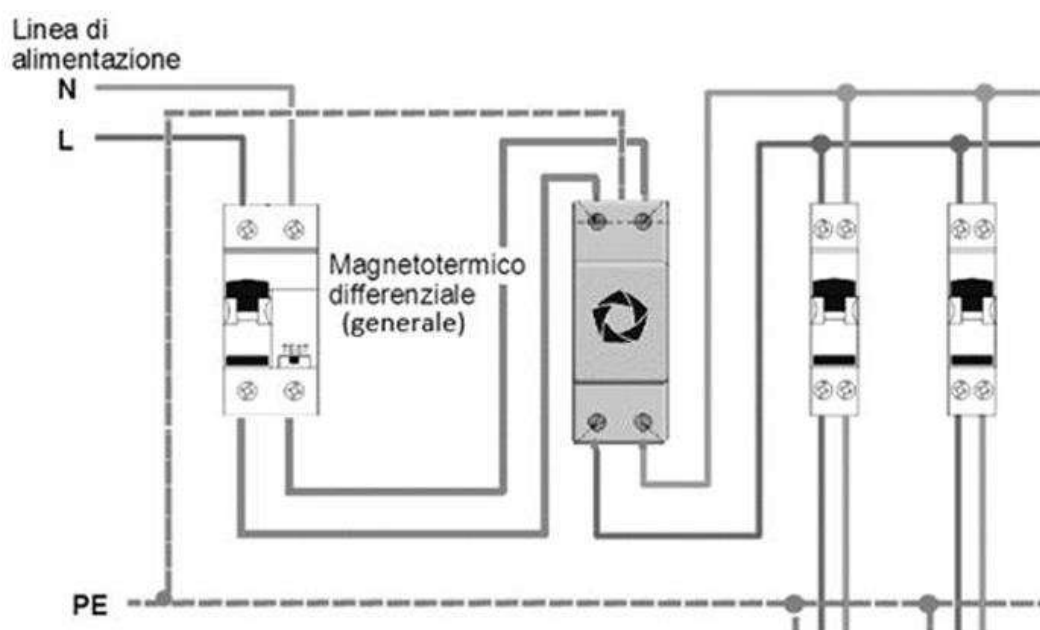


Figura 199 Il dispositivo Omhero viene installato all'interno del quadro elettrico, in posizione strategica per garantire il monitoraggio dell'intero impianto. In particolare, esso viene collegato subito a valle dell'interruttore magnetotermico differenziale generale, così da ricevere l'alimentazione direttamente dal punto di ingresso dell'impianto e monitorare tutti i carichi e le linee che si trovano a valle di esso.

È importante sottolineare che Omhero non svolge alcuna funzione di interruzione della corrente, ma ha esclusivamente un ruolo di monitoraggio. Le informazioni raccolte vengono rese disponibili all'utente attraverso un'applicazione dedicata, che consente di

analizzare in dettaglio i parametri misurati. Attualmente il dispositivo è in grado di eseguire le seguenti misure:

- Correnti e tensioni di tutte le fasi
- Corrente differenziale (dispersioni)
- Temperatura del quadro elettrico
- Resistenza di terra dell'impianto
- Qualità dell'energia (THD, sbilanciamenti)
- Potenza assorbita e consumi energetici

Qualora in uno dei parametri risulti qualche anomalia allora verrà subito notificato all'utente, un esempio possono essere:

- Cali di tensione o sovratensioni
- Cortocircuiti e dispersioni elettriche
- Guasti nel circuito di terra
- Temperature elevate nel quadro elettrico
- Dispositivi non sicuri collegati all'impianto

Tutte queste funzionalità servono anche a mitigare il rischio di incendio, oltre a migliorare in generale la sicurezza dell'impianto. Infine, grazie ai suoi sensori, Omhero è in grado di fornire molte delle informazioni più comunemente richieste dagli utenti, tra cui:

- Consumi in tempo reale con costo orario
- Storico dei consumi giornalieri, settimanali e mensili
- Analisi dei costi in euro e impatto ambientale in CO₂
- Monitoraggio degli elettrodomestici per identificare sprechi
- Avviso di sovraccarico per evitare il distacco del contatore

La sua funzione principale non è quella di interrompere la corrente, ma di effettuare un monitoraggio continuo dei parametri elettrici dell'impianto. Tali funzionalità contribuiscono in maniera significativa a ridurre i rischi legati agli incendi di origine elettrica e, più in generale, a migliorare la sicurezza dell'impianto.

In questo contesto, l'integrazione di un algoritmo di Arc Fault Detection (AFD) su Omhero risulta particolarmente sensata: il dispositivo è già concepito come piattaforma di monitoraggio avanzato, dispone dei sensori necessari per la misura dei segnali elettrici e offre la possibilità di elaborazione in tempo reale. L'AFD andrebbe così ad arricchire ulteriormente le sue capacità, fornendo un importante strumento di prevenzione e di protezione degli utenti

Tuttavia, è opportuno sottolineare che il dispositivo presenta vincoli hardware particolarmente stringenti, che ne limitano la capacità di elaborazione e la flessibilità di implementazione. Nelle sezioni successive verranno analizzati nel dettaglio i principali problemi riscontrati durante lo sviluppo e le soluzioni adottate per superarli, così da consentire l'integrazione efficace dell'algoritmo di Arc Fault Detection all'interno della piattaforma.

5.1 Hardware dispositivo & specifiche tecniche

In questo paragrafo verranno analizzate le specifiche tecniche del dispositivo e le principali limitazioni che ne derivano. Di seguito in Figura 200 è riportato lo schema interno del dispositivo Prysmian. Saranno descritte nel dettaglio le parti più inerenti al lavoro come il processore e l'integrato che si occupa delle acquisizioni del segnale di corrente.

BLOCK DIAGRAM

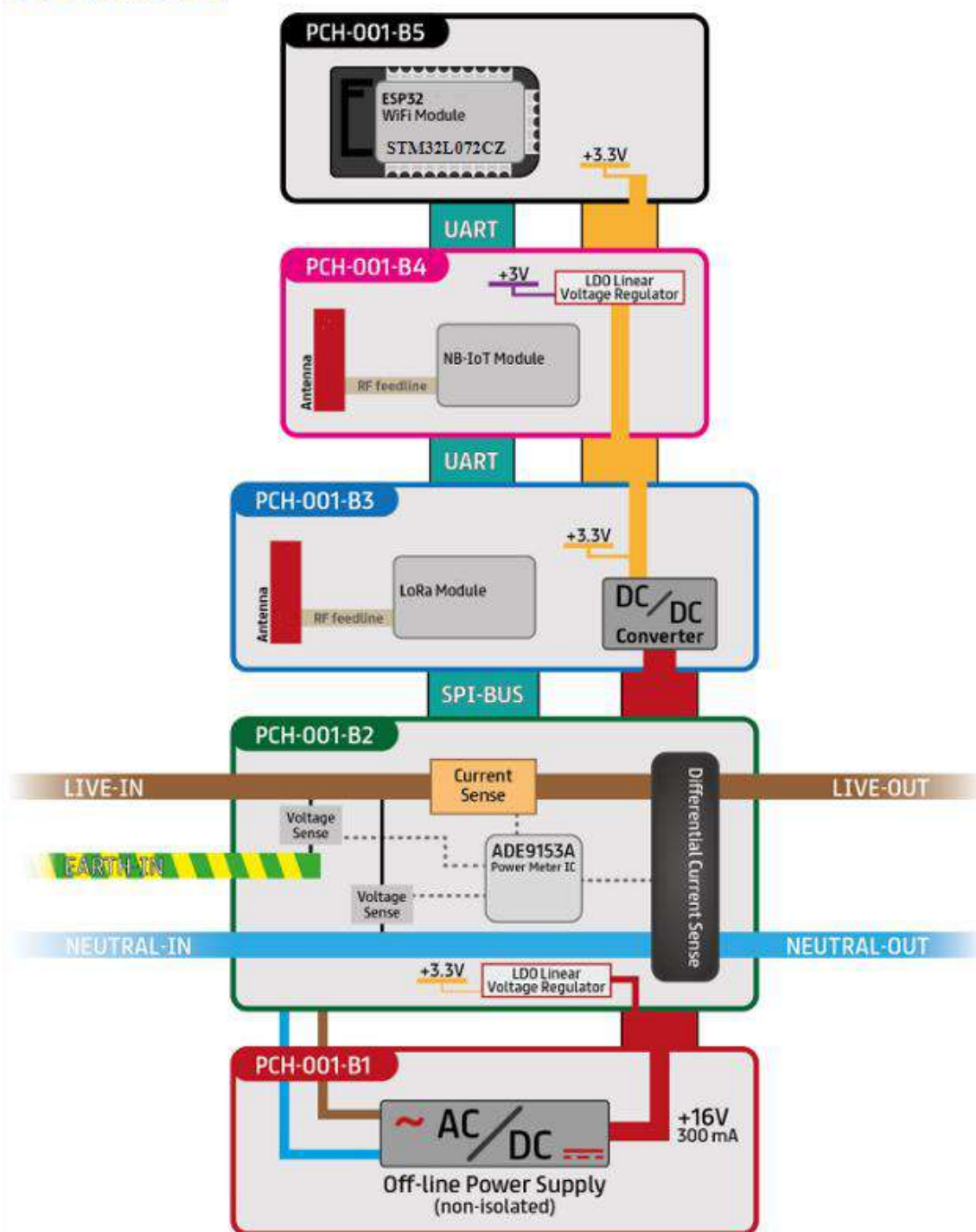


Figura 200 schema a blocchi interno omhero in cui sono evidenziati tutti i singoli moduli di cui è composto

Omhero è stato progettato con particolare attenzione all'efficienza energetica, presentando un consumo complessivo di poco superiore a un singolo Watt. È alimentato direttamente dalla rete elettrica a 230 V, e al suo interno integra i circuiti necessari alla

conversione in tensione continua (DC), indispensabile per l'alimentazione del microprocessore e degli altri componenti elettronici.

Il dispositivo è conforme a diverse certificazioni di sicurezza e compatibilità, tra cui CE, KEMA KEUR, RED e RoHS, a garanzia della sua idoneità all'impiego in contesti residenziali e professionali. Un ulteriore punto di forza è rappresentato dal comparto connettività, particolarmente avanzato, che comprende Wi-Fi, NB-IoT e LoRa, consentendo diverse modalità di comunicazione e trasmissione dati.

Scendendo nello specifico, l'algoritmo di Arc Fault Detection dovrà essere implementato direttamente sul microprocessore STM32L072CZ, prodotto da STMicroelectronics, le cui caratteristiche principali verranno riportate di seguito:

- ARM Cortex-M0+ 32-bit RISC con Memory Protection Unit (MPU)
- Frequenza operativa: da 32 kHz fino a 32 MHz massimo
- Performance: 0.95 DMIPS/MHz
- Flash: 192 KB con ECC (Error Correction Code) Organizzata in 2 banchi con capacità read-while-write
- RAM: 20 KB
- EEPROM dati: 6 KB con ECC
- Registro di backup: 20 byte
- Tensione di alimentazione: 1.65 V a 3.6 V
- Range di temperatura operativa: -40°C a +125°C
- 4 timer general-purpose a 16-bit
- 2 timers basic a 16-bit per DAC
- 1 timer ultra-low power (LPTIM)
- 1 SysTick timer
- 1 Real-Time Clock (RTC)
- Fino a 84 I/O veloci
- 78 I/O tolleranti a 5V

Per quanto riguarda il campionamento, è stata presa la decisione di utilizzare l'ADE9153A, un circuito integrato specificamente progettato per la misurazione

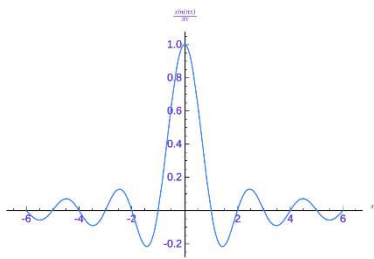


Figura 201 risposta all'impulso di un filtro sinc del primo ordine, normalmente utilizzato come filtro passa basso ed usato nel convertitore ADE9153A del quarto ordine. Il filtro sinc4 è il primo stadio di filtraggio digitale dopo il modulatore sigma-delta ADC

Immagine: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sinc_function_\(normalized\).svg#/media/File:Sinc_function_\(normalized\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sinc_function_(normalized).svg#/media/File:Sinc_function_(normalized).svg)

dell'energia monofase ad alta precisione. Tale ADC è stato impiegato in combinazione con uno shunt da 1 mΩ per la misura della corrente in ingresso al dispositivo. Il convertitore presenta la funzionalità di autocalibrazione senza necessità di riferimenti esterni, caratteristica che lo rende particolarmente adatto all'utilizzo con lo shunt. È dotato di tre canali a 24 bit, con un rapporto segnale-rumore (SNR) pari a 88 dB. Oltre alle grandezze fondamentali, come corrente e tensione RMS, l'ADE9153A consente la misura di energia attiva, reattiva fondamentale e apparente.

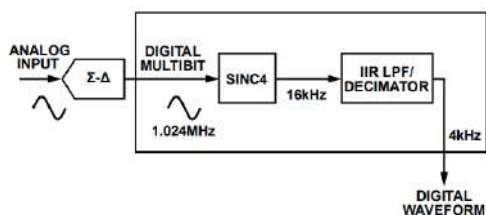


Figura 202 schema a blocchi interno convertitore ADE9153A

Il circuito integrato, come riportato nel datasheet, ha un filtro anti-aliasing integrato per fornire un'attenuazione sufficiente dei segnali fuori banda vicini alla frequenza di clock del modulatore. Lo stesso filtro RC viene utilizzato anche sui canali di tensione per evitare errori di fase tra i segnali di corrente e tensione. L'uscita

dell'integrato fornisce un segnale campionato a 4 kHz. Prima della conversione, il circuito integra un filtro IIR passa-basso con funzione di decimazione, che riduce la frequenza di campionamento da 16 kHz a 4 kHz applicando contestualmente un filtraggio piuttosto selettivo, tale da limitare la banda passante a circa 672 Hz, come riportato nel datasheet.

Per la successiva memorizzazione, i dati vengono ulteriormente ridotti a un'equivalente frequenza di campionamento di 1 kHz, mediante una media su blocchi di quattro campioni consecutivi. Questa scelta, rispetto a una semplice sotto-campionatura ottenuta scartando parte dei campioni, consente di attenuare in modo ragionevole gli effetti di aliasing. Nonostante la banda passante del dispositivo rimanga comunque contenuta (672 Hz), essa risulta superiore ai 500 Hz.

Dal punto di vista hardware si presentano due grandi problemi:

- Frequenza di campionamento ridotta: l'uscita del circuito integrato basato su convertitore ADC sigma-delta è di 4 kHz, rendendo impossibile il campionamento a 10 kHz utilizzato nelle fasi preliminari. Per questo motivo, in Omhero è stata adottata una frequenza di campionamento di 1 kHz. Nelle sezioni successive verrà condotta un'analisi comparativa per valutare le prestazioni delle metriche con campionamento a 1 kHz.
- Limitazioni del processore: Il microcontrollore STM32L072CZ opera a una frequenza di clock di 32 MHz, sensibilmente inferiore rispetto alla scheda Nucleo impiegata nelle prime fasi di sviluppo (180 MHz). A questo vincolo si aggiunge il fatto che il processore deve gestire numerose altre funzioni oltre all'algoritmo di Arc Fault Detection, con risorse di memoria molto limitate (20 KB di RAM).

Alla luce di tali vincoli, è stato necessario semplificare ulteriormente la strategia di identificazione dell'arco elettrico, privilegiando metriche leggere e nel dominio del tempo. L'obiettivo è stato quello di garantire un monitoraggio comunque affidabile, seppur meno performante rispetto alle condizioni ideali testate nelle fasi precedenti.

5.2 Analisi metriche con frequenza di campionamento ridotta e nuovo sistema di acquisizione

Come detto in precedenza uno dei problemi più grandi da affrontare è senza dubbio è abbassare la frequenza di campionamento di un intero ordine di grandezza. Passando dall'aver 200 punti per ogni periodo a 20 punti per periodo. Questo abbassamento del numero di punti presenti in ogni periodo comporta sicuramente delle rinunce in termini di accuratezza della strategia, volendo portare un esempio lo zero period avrà molte meno transizioni per lo zero dovuto alle spalle in arcing condition avendo solo 20 punti per periodo. Ed allo stesso tempo anche l'autocorrelazione perderà parte della sua attuale efficacia calcolando la correlazione tra periodi di 20 punti e non 200. Per comprendere realmente quanto questo limite sia affrontabile di seguito possiamo analizzare per ispezione diretta la variazione dell'andamento delle metriche per i nuovi segnali acquisiti direttamente dall'omhero ad 1 kHz.

In Figura 203 è presentato il nuovo segnale di corrente acquisito dal dispositivo per il carico resistivo. Anche in questo caso il riferimento è stato estratto dal fotodiiodo.

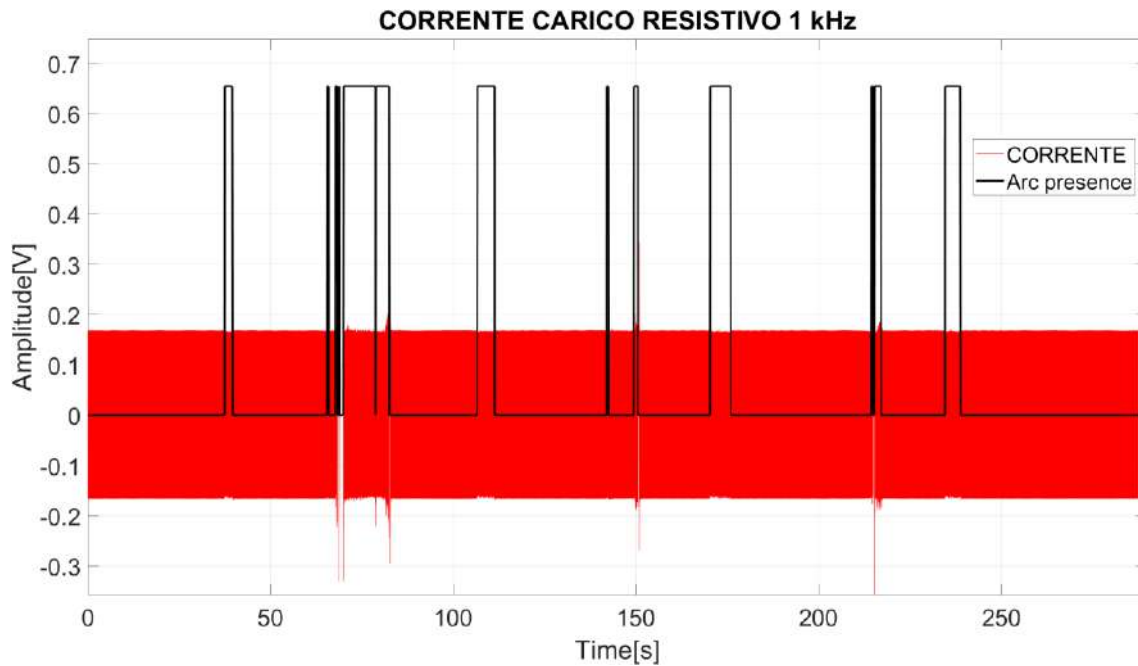


Figura 203 Forma d'onda di corrente campionata dall'omhero per il caso resistivo confrontato al riferimento

in Figura 204 possiamo osservare le 11 metriche utilizzate nella strategia precedente calcolate sul segnale di corrente presente in Figura 203.

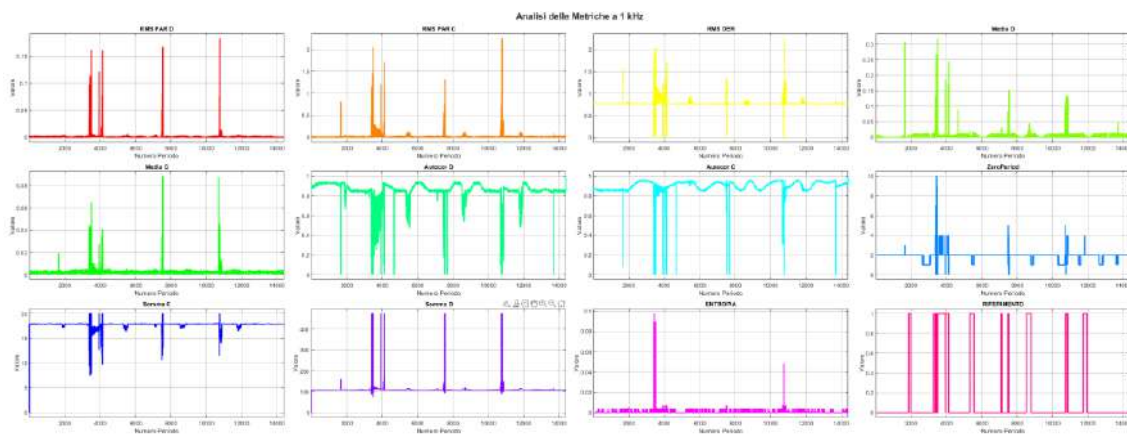


Figura 204 Rappresentazione 11 metriche più riferimento caso resistivo

Mentre alcune metriche mantengono un andamento simile, come ad esempio i due RMS Parameter o la media, notiamo anche come altre metriche siano state fortemente danneggiate dalla conversione di frequenza eseguita, la metrica basata sull'entropia praticamente smette di funzionare, l'autocorrelazione sviluppa un andamento che rende molto più complesso determinare una soglia ottima come nel caso a 10 kHz, ed anche lo zero period come previsto subisce un notevole peggioramento. Già da questo primo passaggio vediamo il grande effetto della frequenza di campionamento sulle metriche.

Nel caso resistivo in particolare la strategia può ancora funzionare più o meno efficacemente poiché la maggior parte delle metriche riesce ancora a dare un output. Dunque, otteniamo un peggioramento della strategia ma non una totale perdita di efficacia.

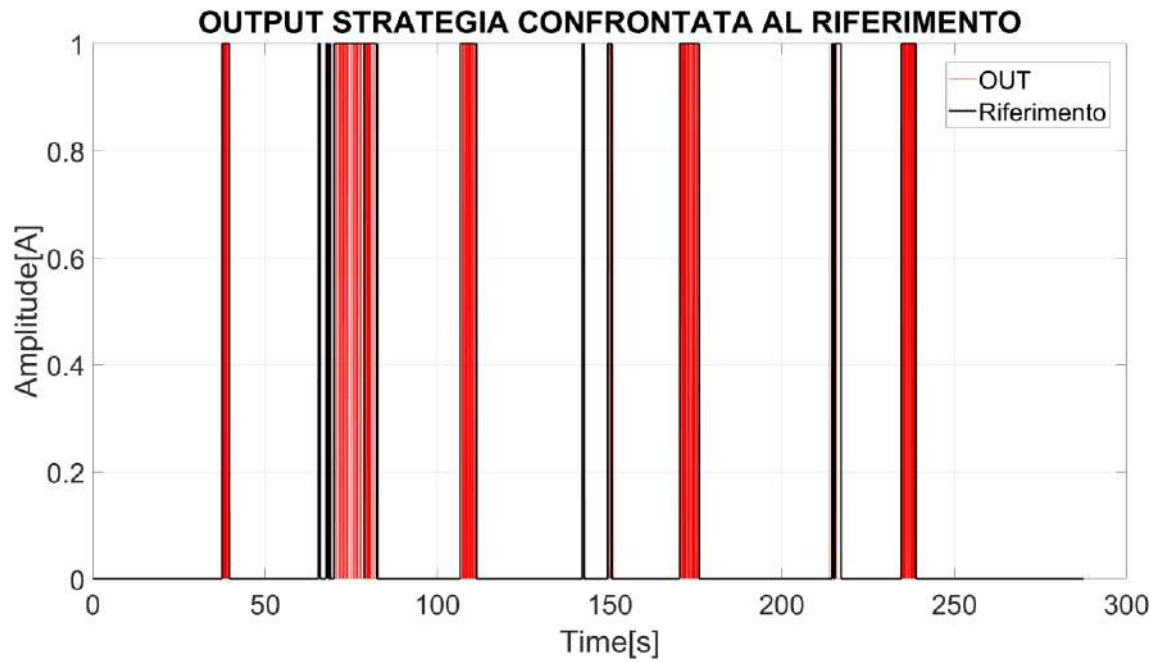


Figura 205 confronto output strategia e riferimento

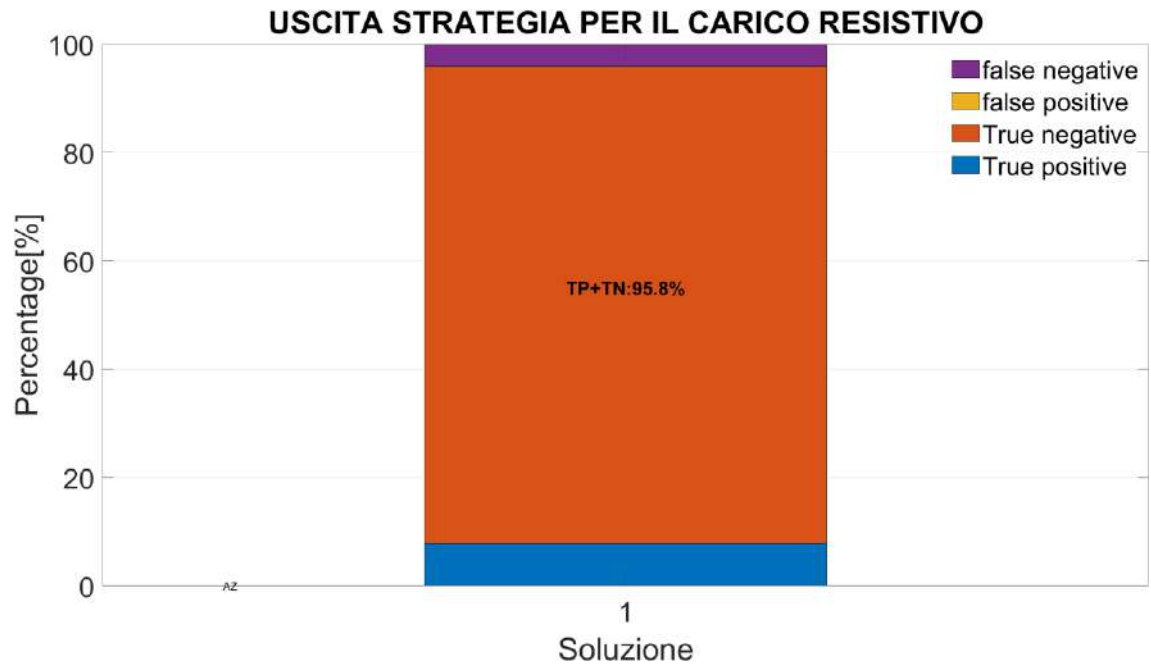


Figura 206matrice di confusione risultato strategia per il caso resistivo

La strategia per come è stata progettata nel caso del caso resistivo (il più semplice possibile) continua a garantire un tasso di successo accettabile per una strategia di arc fault seppur presenta qualche falso negativo che comunque non pregiudica il corretto funzionamento della strategia. Si nota sicuramente un peggioramento rispetto al caso precedente.

Mediante le immagini seguenti si potrà osservare come la situazione per un carico mascherante sia leggermente peggiore rispetto al carico resistivo.

In Figura 207 è presente il segnale campionato dall'omhero per il carico mascherante mentre in Figura 208 sono presenti le metriche calcolate sulla forma d'onda in questione.

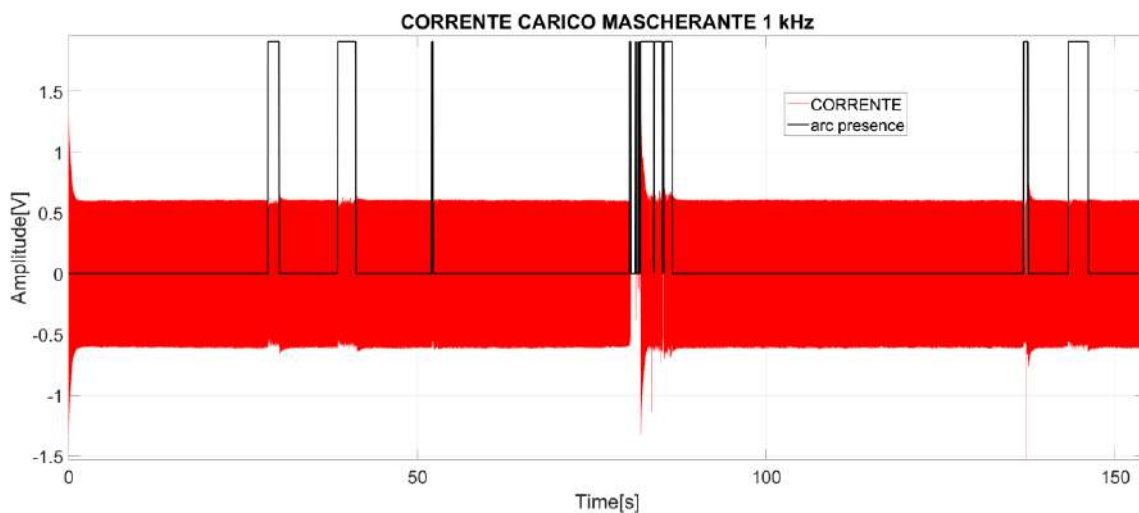


Figura 207 Corrente carico mascherante 1 kHz

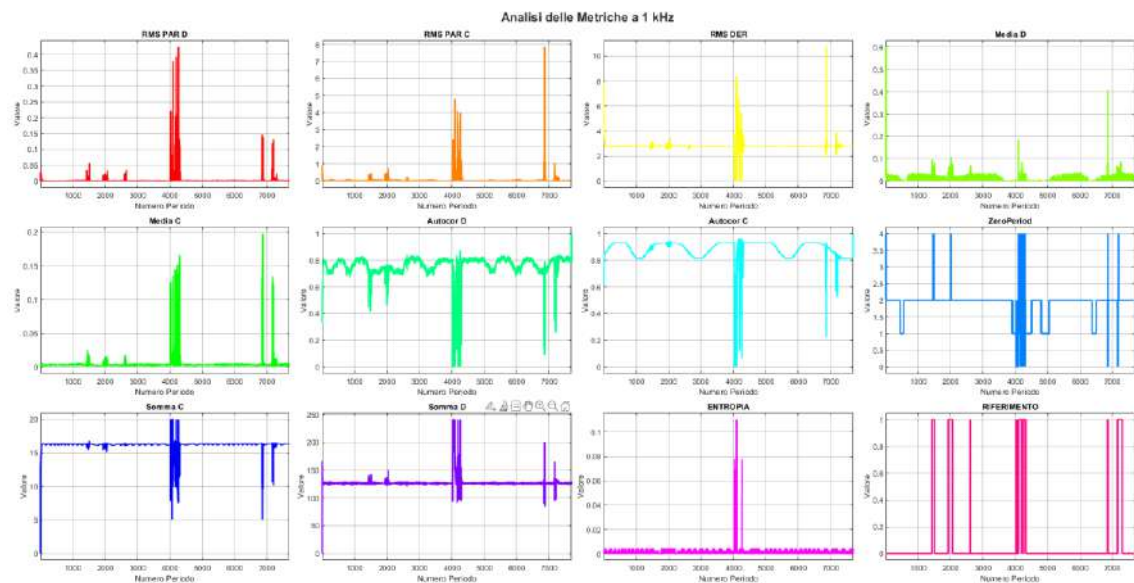


Figura 208 metriche calcolate ad 1 kHz per il carico mascherante

Le condizioni sono leggermente peggiorative rispetto al caso resistivo a causa di un maggiore rumore presente nelle metriche. Le zone dove viene identificato l'arco dalle metriche ha una dinamica inferiore rispetto al caso precedente.

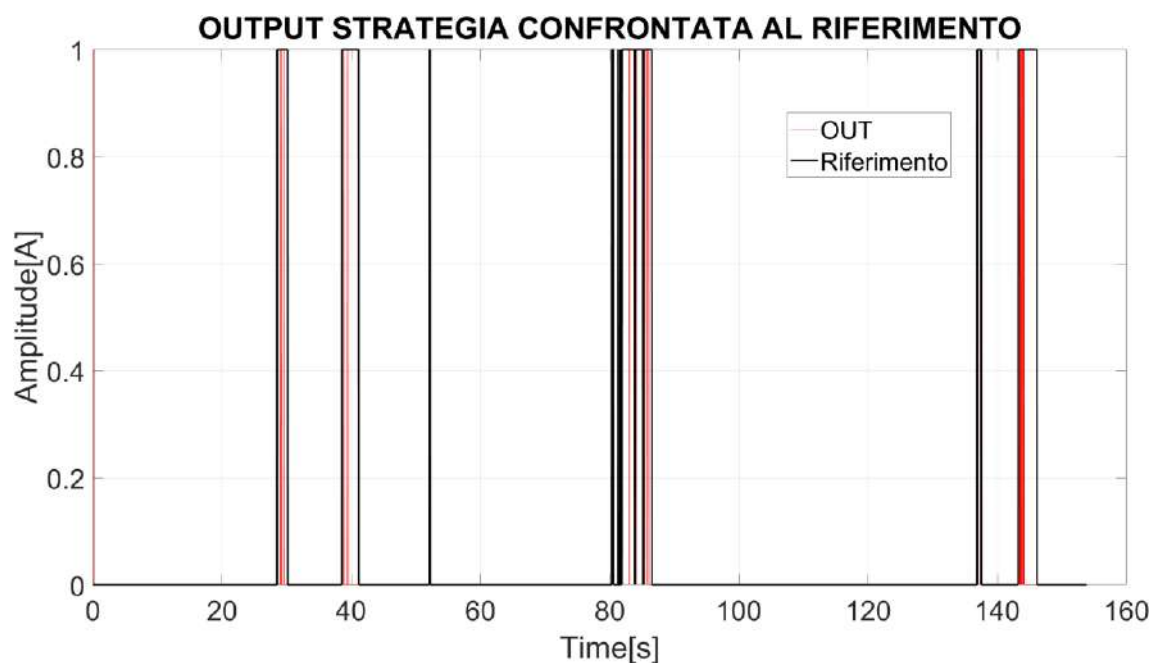


Figura 209 confronto uscita strategia e riferimento per il carico mascherante ad 1 kHz

In questo caso, la riduzione della frequenza di campionamento ha determinato un peggioramento significativo delle prestazioni della strategia, con la comparsa di falsi negativi e di un falso positivo nella fase iniziale del segnale.

Come mostrato in Figura 210, il tasso di successo complessivo risulta pari al 94.8%. Tale valore, tuttavia, è influenzato dal fatto che le porzioni di arco sono numericamente ridotte rispetto alle porzioni prive di arco, con la conseguenza che l'incidenza dei falsi negativi sul successo globale rimane contenuta. È comunque rilevante sottolineare che ogni evento di arco presente nella forma d'onda viene rilevato, seppur non sempre per l'intera durata del fenomeno.

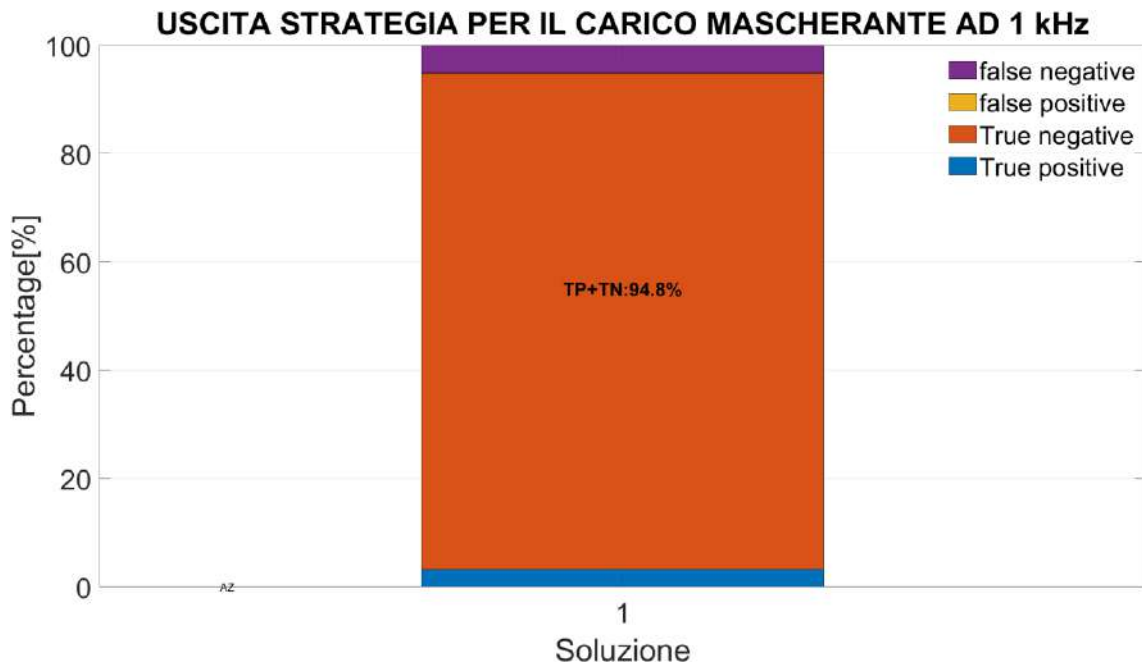


Figura 210 matrice di confusione per il carico mascherante campionato ad 1 kHz

In sintesi, si osserva come in entrambi i casi di studio la percentuale di successo subisca un calo significativo, raggiungendo un valore minimo del 94,8% nel caso del carico mascherante. Per poter procedere verso una futura implementazione sul dispositivo commerciale, sarà quindi necessario rivedere criticamente le metriche attualmente impiegate, eliminando quelle meno efficaci e modificandone altre, al fine di definire una nuova strategia di monitoraggio più robusta e adeguata alle specifiche dell'Omhero.

5.3 Adattamento metriche per omhero

Come discusso in precedenza, i principali ostacoli all'implementazione di una strategia sul dispositivo commerciale riguardano la frequenza di campionamento disponibile e la limitata potenza di calcolo. Il processore, già fortemente gravato da molteplici processi, non è infatti in grado di eseguire una strategia complessa come quella descritta nei capitoli

precedenti, che richiedeva l'elaborazione di un numero elevato di metriche. È stato quindi necessario effettuare una selezione, individuando soltanto tre metriche che potessero garantire comunque prestazioni soddisfacenti.

Le prime esclusioni riguardano l'entropia e la metrica zeroperiod, che a 1 kHz perdono gran parte della loro efficacia, risultando poco o per nulla utili. Per quanto concerne le metriche basate sul valore medio del segnale, la scelta più efficiente ricade su quelle fondate sul valore efficace (RMS). In particolare, è stata selezionata la metrica RMS_PARAMETER della derivata, che dovrà fungere da riferimento e, di fatto, sostituire tutte le altre metriche basate su RMS e media.

La seconda metrica scelta è l'autocorrelazione calcolata sulla derivata, che consente di massimizzare la sensibilità della misura sfruttando le proprietà di variazione rapida della derivata stessa.

Infine, come terza metrica, è stata adottata la RCS (Rectified Current Sum). Questa scelta è motivata dalla semplicità computazionale della metrica, che garantisce al contempo un'elevata sensibilità e affidabilità anche con una frequenza di campionamento ridotta a 1 kHz. La RCS è stata implementata senza normalizzazione, in quanto successivamente sottoposta a filtraggio e riadattamento.

In sintesi, le tre metriche selezionate sono: una calcolata direttamente sulla corrente e due basate sulla derivata.

A questo punto diventa opportuno riconsiderare alcune delle metriche discusse nel paragrafo 4.3.9 dedicato ad un'analisi inizialmente considerata marginale, relativa al filtraggio delle metriche originali mediante il metodo MACD. Tali metriche, calcolate sull'autocorrelazione della derivata e sul RCS, non erano state introdotte casualmente, ma con l'obiettivo di verificarne l'efficacia in condizioni operative limitate. L'interesse di questo approccio risiede nella possibilità di incrementare l'affidabilità dell'identificazione, seppur a fronte di un inevitabile ritardo nella rilevazione, aspetto che verrà approfondito nelle sezioni successive.

Di seguito sono presentate le metriche precedentemente discusse prima e dopo il filtraggio.

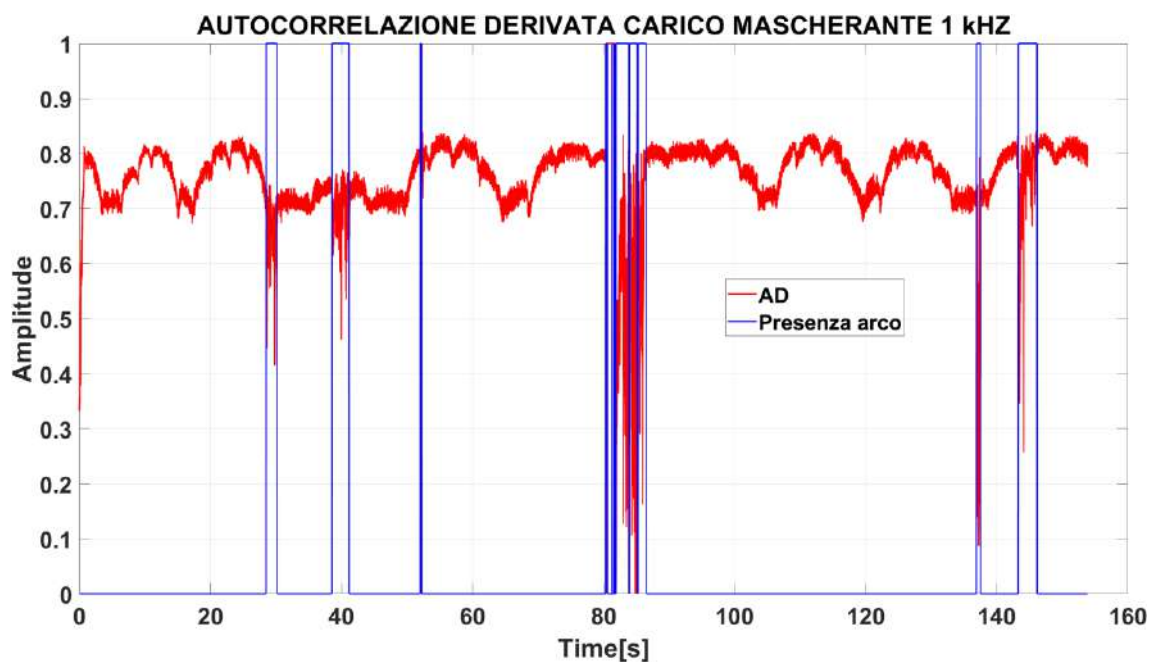


Figura 211 Autocorrelazione derivata 1 kHz

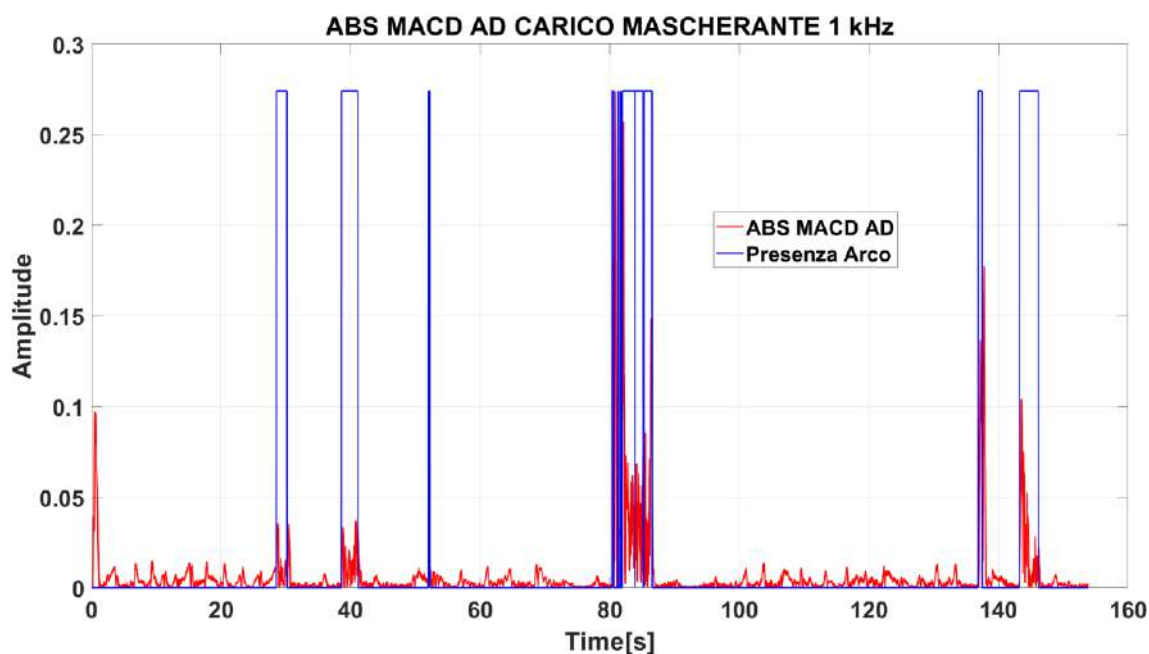


Figura 212 MACD autocorrelazione derivata

Come si può osservare dalla Figura 211, l'autocorrelazione della derivata calcolata a 1 kHz risulta fortemente influenzata dalla riduzione della frequenza di campionamento. L'andamento del parametro appare infatti irregolare e caratterizzato da oscillazioni che ne rendono difficile l'impiego diretto per la definizione di una soglia di identificazione affidabile. Questo comportamento conferma come l'autocorrelazione sia, tra tutte le

metriche considerate, quella maggiormente penalizzata dal cambiamento della frequenza di campionamento.

Per superare tale limitazione, è stato applicato un algoritmo di filtraggio basato sul MACD (Moving Average Convergence Divergence), calcolato sull'autocorrelazione della derivata. Il risultato è mostrato in Figura 212, dove si evidenzia come il segnale rielaborato assuma un andamento molto più regolare e vicino a una forma ottimale per l'individuazione di una soglia di rilevazione. In particolare, le transizioni legate alla presenza dell'arco risultano marcate e ben distinguibili, consentendo così di migliorare la sensibilità e l'affidabilità della metrica, pur introducendo un ritardo nell'identificazione.

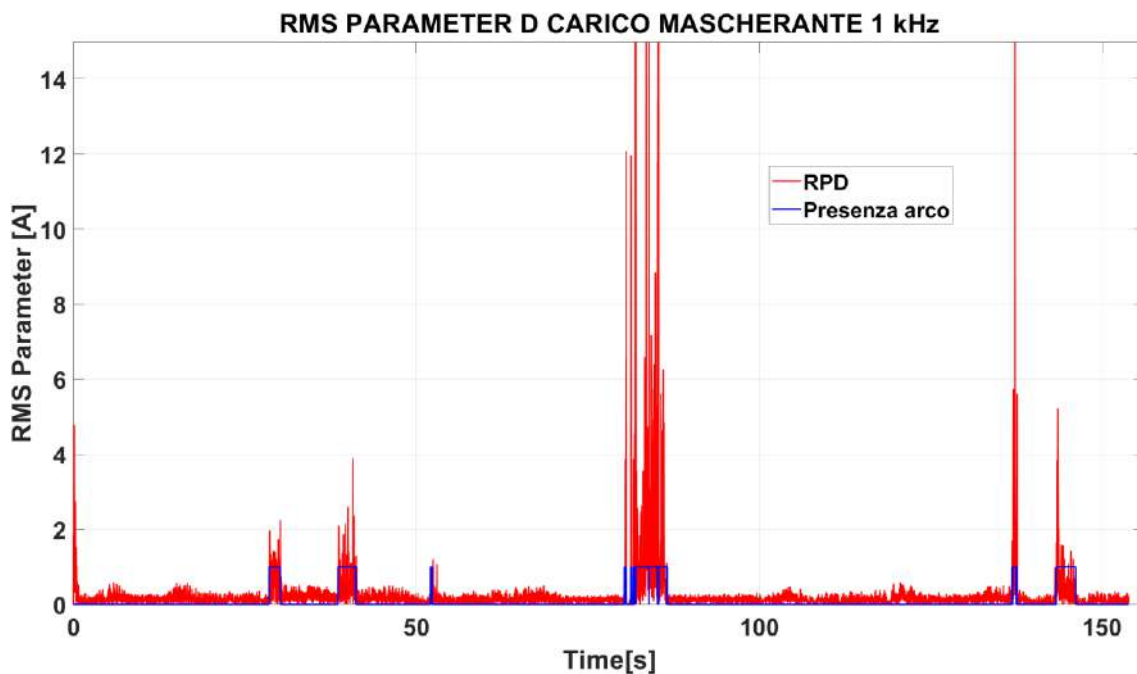


Figura 213 RMS parameter sulla derivata

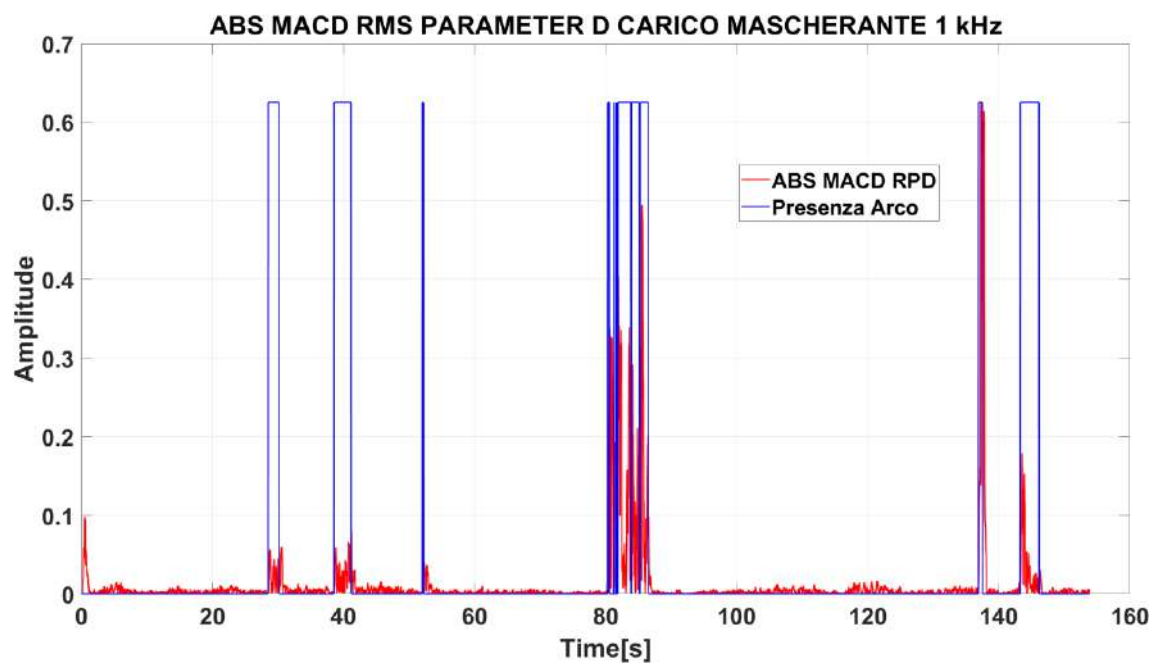


Figura 214 MACD RMS PARAMETER DERIVATA

e

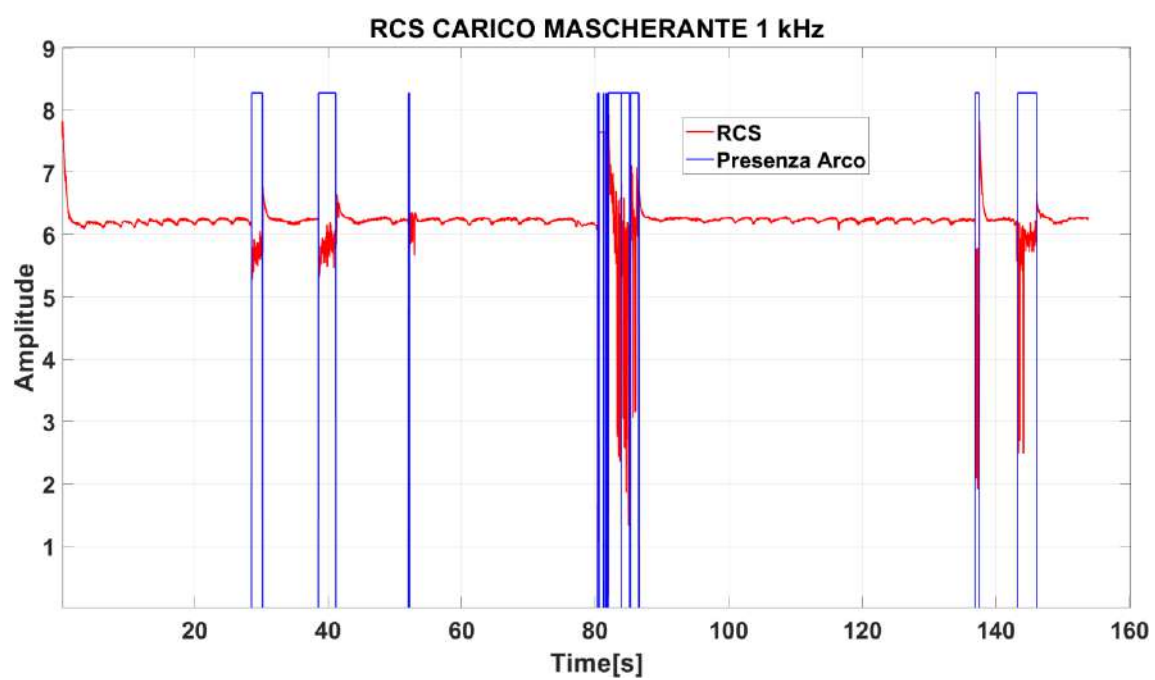


Figura 215 RCS carico mascherate, trapano, campionato ad 1 kHz

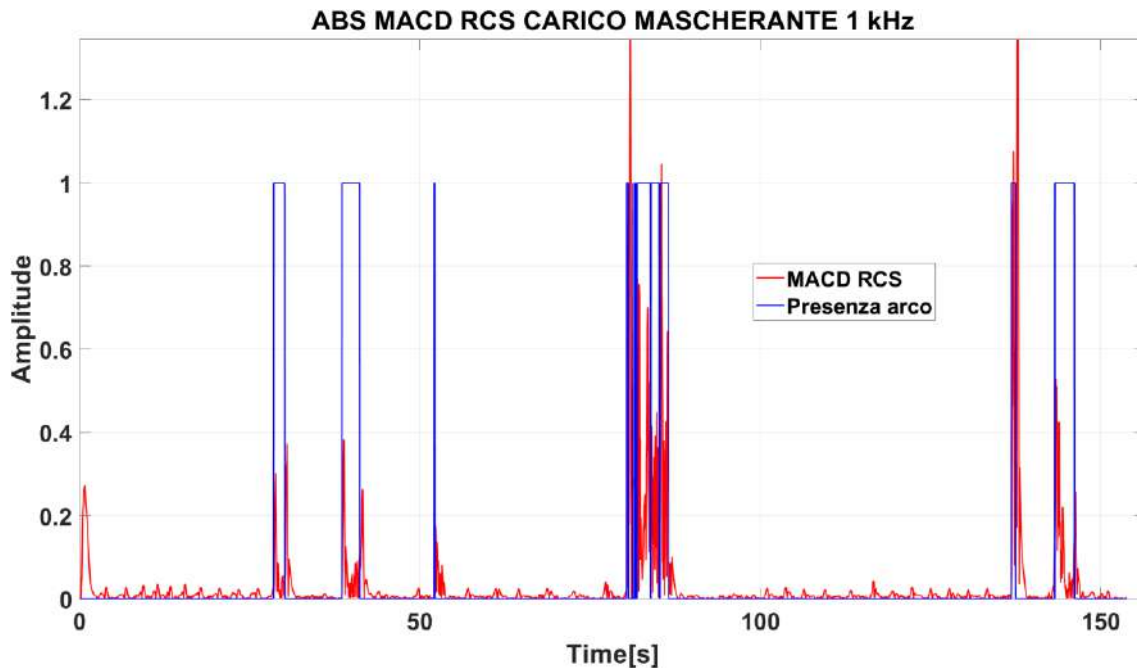


Figura 216 ABS MACD RCS carico mascherante 1 kHz

A seguito delle procedure descritte nel paragrafo 4.3.9, si osserva come le tre metriche selezionate presentino ora un comportamento uniforme: il loro andamento cresce da valori bassi, in corrispondenza dell'assenza di arco, a valori elevati in presenza di arco. In tutti i casi risulta quindi possibile definire in maniera chiara una soglia di identificazione, anche in condizioni critiche come quelle imposte dai carichi mascheranti.

Il principale vantaggio introdotto dall'impiego del MACD consiste nella capacità di auto calibrarsi, stabilizzandosi su valori prossimi allo zero in assenza di arco e rendendo così più agevole la discriminazione. Nel paragrafo successivo verrà presentata la soluzione implementativa sviluppata per il dispositivo Prysmian.

5.4 Algoritmo

Una volta viste le metriche passiamo alla vera e propria implementazione di una strategia di arc fault detection, la strategia è stata in primis elaborata su Matlab e poi trasposta nel dispositivo commerciale usando il linguaggio C ed St cube ide come visto nel capitolo 3.

Di seguito in Figura 217 possiamo osservare il diagramma di flusso della strategia.

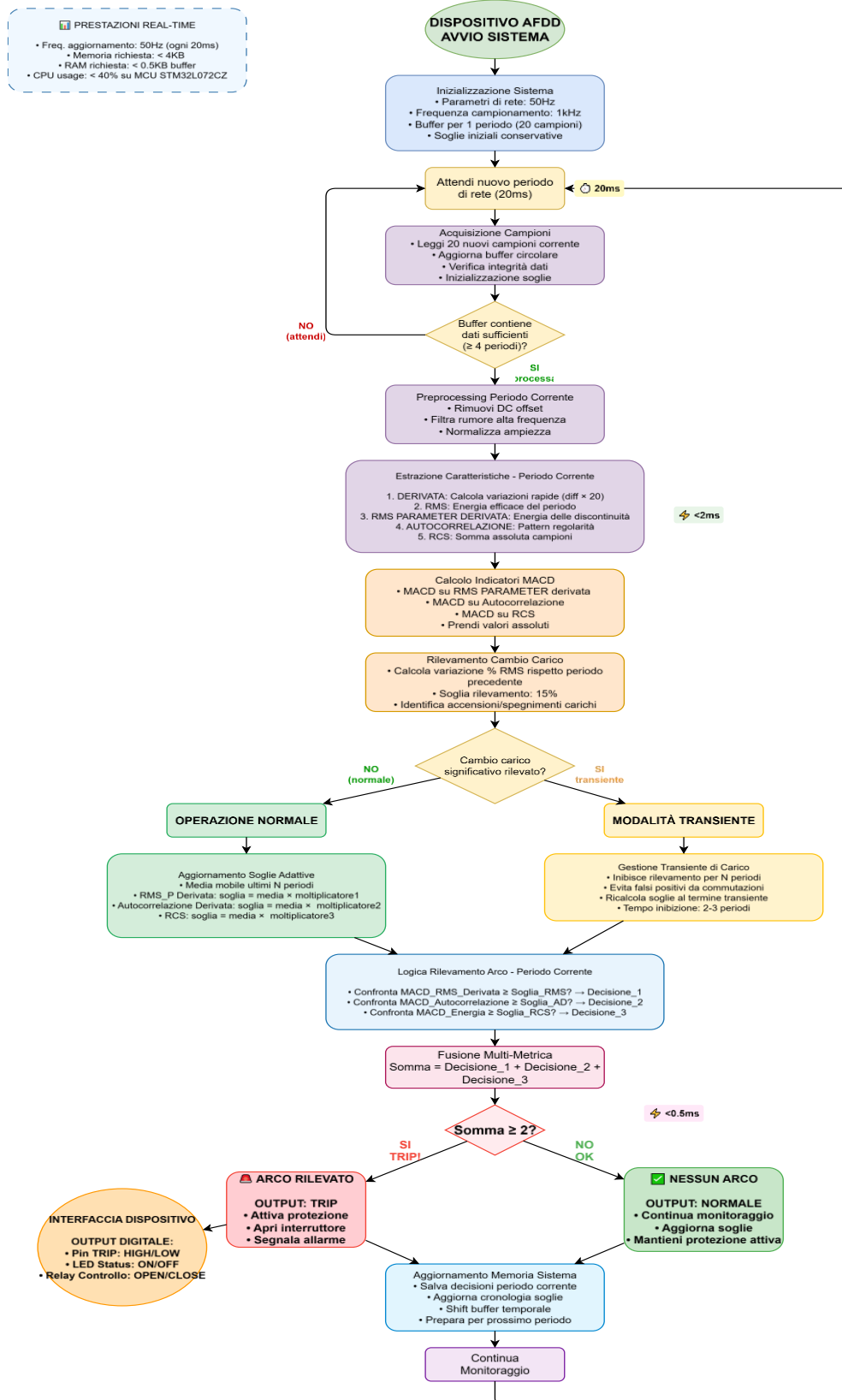


Figura 217 Diagramma di flusso strategia per il dispositivo commerciale che mostra la pipeline di elaborazione multistadio dal segnale di corrente grezzo alla decisione finale di rilevamento dell'arco

Il sistema proposto adotta una strategia multi-metrica con soglie adattive per la rilevazione di arc-fault su segnali di corrente campionati a $f_s=1$ kHz in presenza di una rete a $f=50$ Hz. L'architettura è organizzata in fasi sequenziali: preprocessing, estrazione di metriche grezze, filtraggio tramite MACD, analisi di cambi di carico, aggiornamento ritardato delle soglie e decisione multi-metrica. Di seguito si documentano in dettaglio le scelte implementative e la loro motivazione, prendendo come riferimento il codice MATLAB fornito.

Come mostrato nel diagramma di flusso in Figura 217, il processo inizia con una fase di inizializzazione (evidenziata in blu), di durata limitata, che ha lo scopo di predisporre le variabili interne e stabilire le condizioni iniziali di funzionamento.

Segue quindi la fase di preprocessing del segnale di corrente (in viola). In questa fase vengono eliminate eventuali componenti in continua (La DC viene sottratta usando la media dei primi 4 periodi (80 ms). Questo stabilizza il livello di riferimento prima del calcolo delle metriche.) e interpolati i campioni non validi (NaN) che potrebbero essere presenti in ingresso. Una volta ottenuto un segnale pulito, vengono calcolate le cosiddette metriche “grezze”, cioè indicatori preliminari sensibili alle anomalie generate dalla presenza di archi elettrici. Tra queste viene anche calcolata la derivata del segnale di corrente tramite l'algoritmo BFD. Per quanto riguarda le tre metriche grezze:

- Il valore RMS della derivata mette in evidenza variazioni rap-ide e transitorie della corrente, caratteristiche tipiche di un arco
- L'autocorrelazione mette in rilievo la mancanza di periodicità o pattern ripetitivi.
- La somma di valori rettificati evidenzia componenti impulsive di breve durata, spesso presenti in arc fault.

Tali metriche vengono poi sottoposte a un processo di filtraggio mediante l'algoritmo MACD (Moving Average Convergence Divergence), evidenziato in arancione. Questo passaggio ha la funzione di ridurre la variabilità istantanea dei parametri e di restituire valori più stabili e interpretabili, pronti per essere utilizzati nelle fasi decisionali successive.

La prima decisione riguarda la rilevazione di un cambio di carico. In caso venga identificata una variazione significativa nelle condizioni operative dell'impianto,

l'algoritmo sospende temporaneamente l'analisi degli archi elettrici, concedendo al sistema il tempo necessario per riassetare le metriche ed evitare la generazione di falsi positivi. Viene eseguito calcolando la variazione percentuale della derivata del valore RMS. Se invece non viene rilevato alcun cambio di carico, l'elaborazione procede con l'aggiornamento dinamico delle soglie e il successivo confronto con le metriche correnti.

La strategia di soglie è costruita per essere adattiva ma con ritardo rispetto allo stato istantaneo della rete elettrica di 10 periodi (pari a 200 ms). In altre parole, le soglie non vengono adattate sulla base della corrente istantanea, bensì rispetto al valore medio delle metriche calcolate dieci periodi prima. Questa strategia è stata progettata per garantire che le soglie non vengano aggiornate in condizioni non stazionarie, come durante la presenza di un arco elettrico o in seguito a transitori. Dopo un cambio di carico, risulta pertanto necessario attendere "Refractory period" prima che le soglie possano essere correttamente reinizializzate e rese nuovamente efficaci per l'analisi. Qualora non sia stato rilevato alcun cambio di carico o arco per un numero N di periodi consecutivi si procede all'aggiornamento delle soglie sempre calcolando una media della situazione passata moltiplicata per una tolleranza specifica per ogni metrica.

Infine, nella fase di decisione finale, le metriche vengono confrontate con le soglie aggiornate per ogni periodo di segnale. Qualora almeno due delle tre metriche principali indichino simultaneamente la presenza di un arco elettrico, il sistema genera una notifica di possibili guasti destinata all'utente. In assenza di una logica di interruzione automatica del circuito, il monitoraggio prosegue comunque regolarmente, registrando però l'evento per fini diagnostici e di tracciamento storico.

usare valori ritardati nel tempo di 200 ms per il calcolo delle soglie evita che una condizione anomala (arco) causi l'auto-adattamento delle soglie verso quella anomalia, riducendo la probabilità di "inglobare" l'arco come normale.

L'uscita della strategia sarà un vettore binario che indica i periodi in cui la strategia decide per un possibile arco. Gli eventi vengono salvati per analisi offline (registro storico utile per diagnostica e tuning).

Dunque, le scelte intraprese per semplificare e adattare la precedente strategia al caso attuale sono molteplici:

- Utilizzo dell'indicatore finanziario MACD per il rilevamento di archi elettrici.
- Sistema Tri-metrico.
- Soglie adattive con delay rispetto alla condizione attuale.

Nel prossimo paragrafo analizzeremo i risultati della strategia presentata funzionante sul dispositivo omhero di prysmian.

5.5 Strategia su Ohmero

In questo paragrafo vengono analizzati i risultati ottenuti dalla strategia implementata sull'Omhero, secondo quanto discusso nei capitoli precedenti. Il dispositivo è stato installato insieme ai carichi e allo scaricatore ed ha il compito di acquisire i segnali elettrici e generare un'uscita binaria in grado di segnalare la presenza o meno di un arco elettrico. Oltre a questa funzionalità di classificazione, l'Omhero permette anche di esportare il segnale di corrente da esso campionato, così da consentire un'analisi più approfondita dell'input.

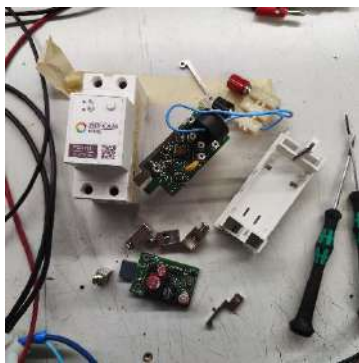


Figura 218 Modifica eseguita sull'omhero

Il testing preliminare del dispositivo è stato condotto utilizzando la scheda National Instruments NI-9239 per l'acquisizione del segnale del fotodiodo, impiegato come riferimento. In una fase successiva, l'Omhero è stato configurato per campionare non soltanto la corrente, ma anche il segnale proveniente da un fotodiodo posto in prossimità dello scaricatore (Figura 219).

Nella configurazione iniziale il fotodiodo veniva campionato in tensione; tuttavia, al fine di consentirne l'acquisizione diretta da parte dell'Omhero, si è optato per il campionamento in corrente. A tal proposito è stata inserita una resistenza da 500 Ω in serie al circuito di condizionamento, così da convertire la tensione generata in un segnale di corrente compatibile con l'ingresso del dispositivo.

Nella configurazione di prova riportata in Figura 218, il filo blu visibile nella parte superiore attraversa il trasformatore del sistema Prycam, che convoglia la corrente prodotta e amplificata dal fotodiodo. È opportuno evidenziare che tale trasformatore è connesso direttamente alla fase della rete e che l'intero circuito non dispone di un riferimento a terra.

Il dispositivo è stato sottoposto a test in differenti condizioni di carico realistiche, poiché il suo funzionamento non può essere caratterizzato se non attraverso le prove previste dalla normativa di riferimento. Con le strumentazioni disponibili, infatti, non è possibile utilizzare un generatore di segnale per riprodurre i profili di carico acquisiti in precedenza e verificarne così il comportamento.

In Figura 219 è riportato il banco completo utilizzato per i test; si segnala che, durante la fase iniziale di sperimentazione, era presente anche la scheda National Instruments per le acquisizioni, non mostrata tuttavia in figura.

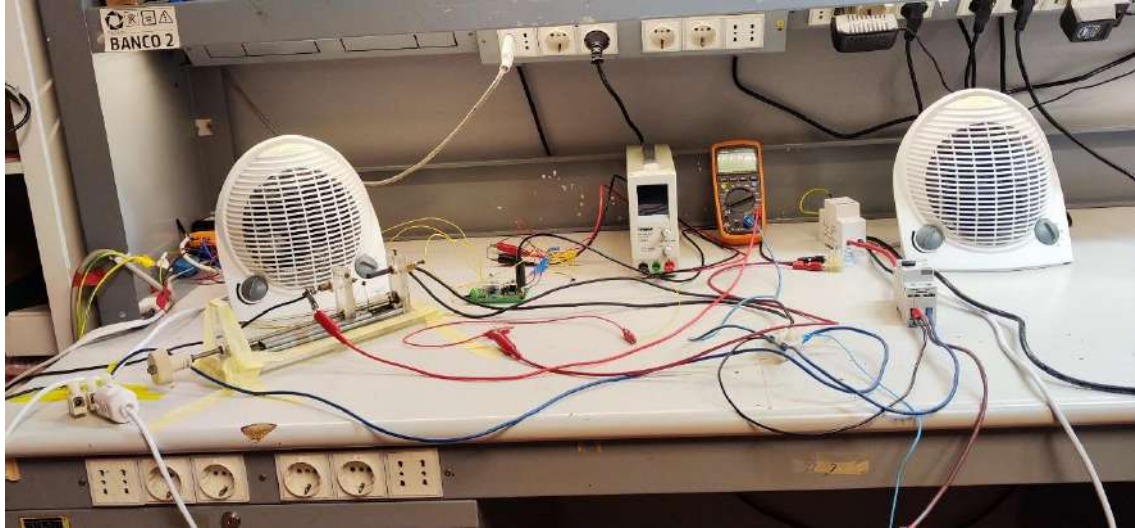


Figura 219 Test bench Omhero

In primo luogo, viene analizzato il funzionamento dell'algoritmo nel caso di un carico puramente resistivo, per poi estendere l'osservazione ai risultati ottenuti con carichi di natura più complessa. Successivamente, il comportamento dell'algoritmo di rilevazione del cambio di carico viene esaminato nel dettaglio.

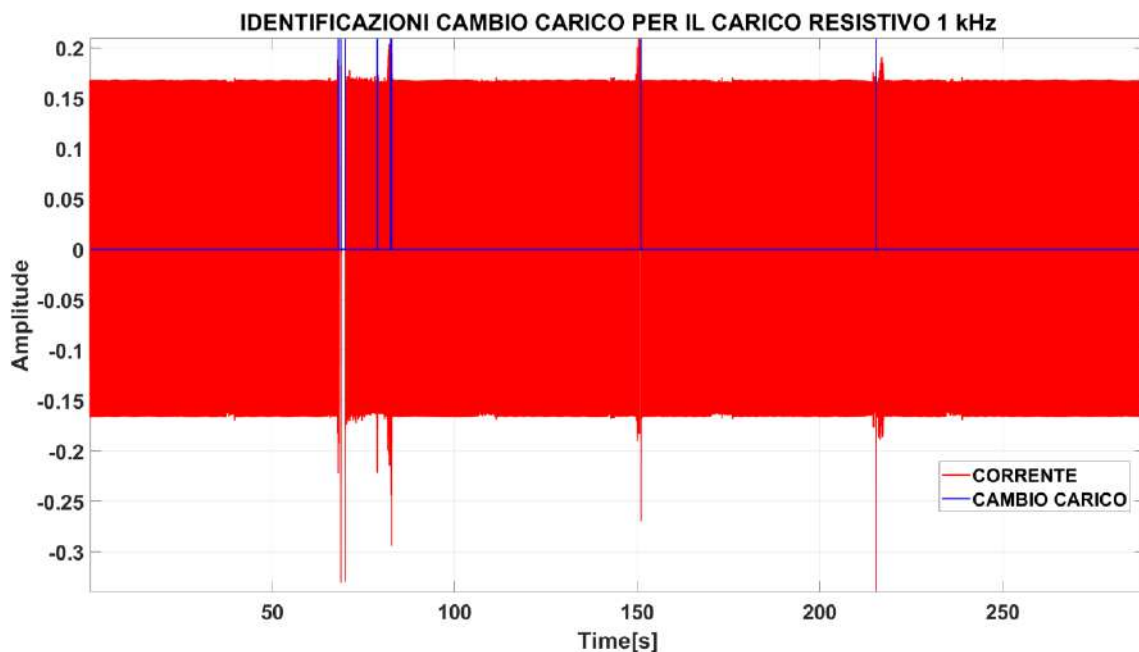


Figura 220 Funzionamento meccanica cambio carico

Per valutare il corretto funzionamento del modulo di rilevazione dei cambi di carico, è mostrato il comportamento della strategia durante le interruzioni di segnale. Dalla Figura 220 si può osservare come l'algoritmo sia in grado di individuare sistematicamente le variazioni di carico: un evento di "cambio carico" viene registrato ogni volta che il sistema torna al normale regime operativo. Al contrario, le interruzioni di corrente non vengono classificate come tali, poiché l'assenza di segnale è esplicitamente esclusa dall'analisi del codice.

In Figura 221 possiamo anche osservare uno zoom della Figura 220 in cui si vede come l'algoritmo reagisca anche a cambi carichi molto veloci dando sempre un output affidabile.

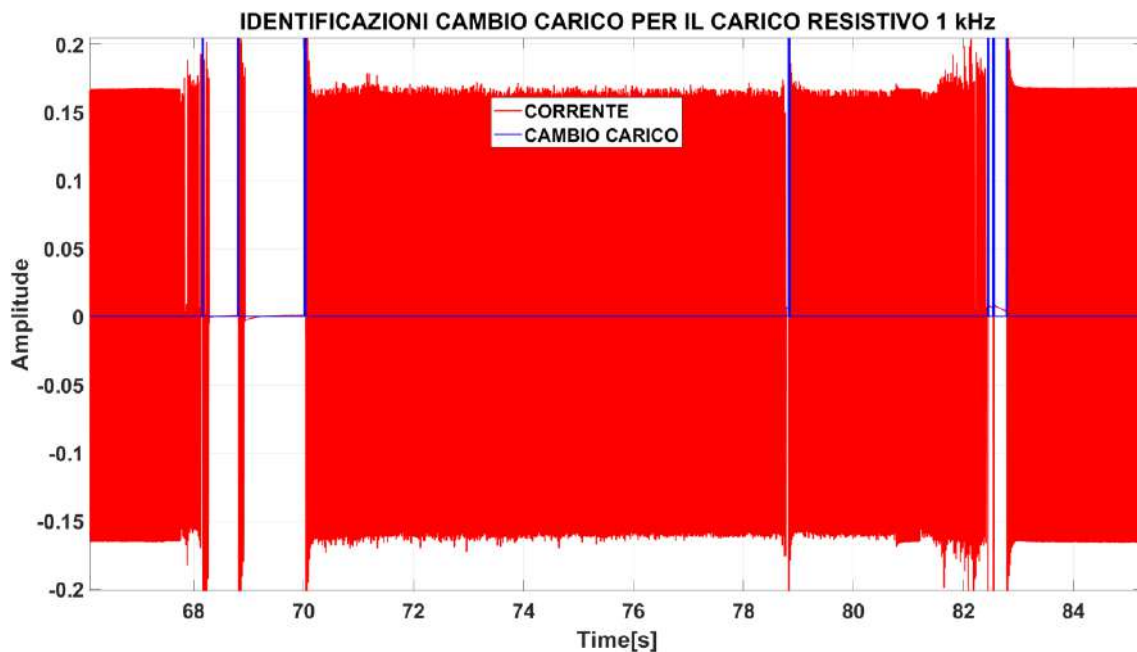


Figura 221 Zoom algoritmo cambio carico

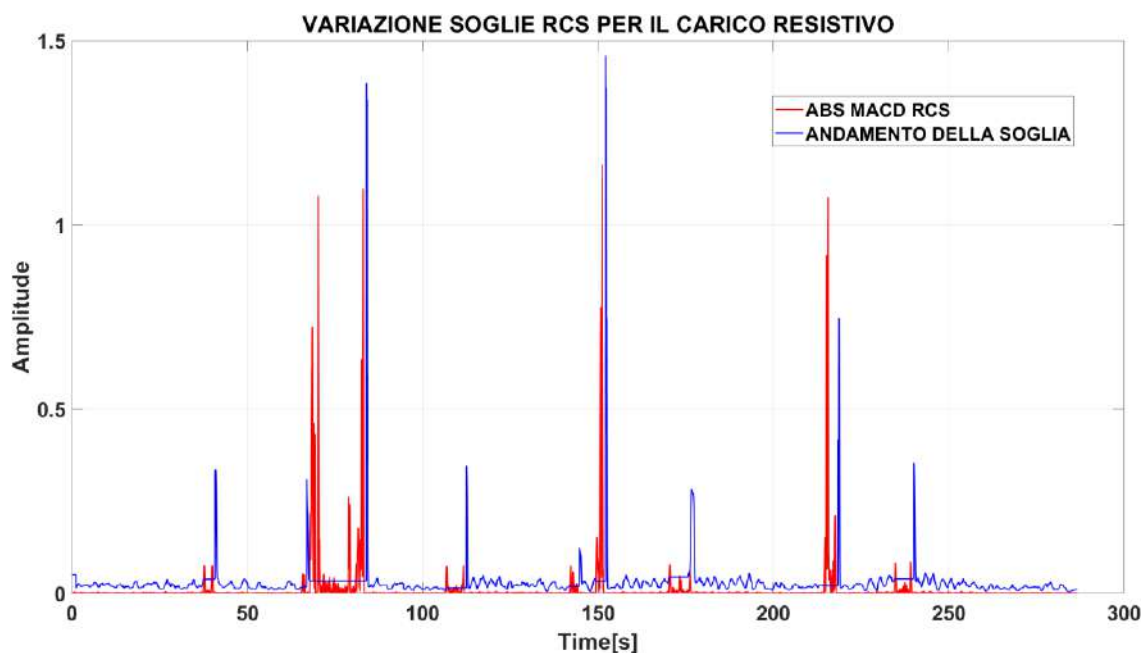


Figura 222 Funzionamento soglie adattive

Nella Figura 222 è mostrata invece l'evoluzione delle soglie dinamiche utilizzate dall'algoritmo. Grazie al ritardo programmato di dieci periodi, la soglia risulta sempre significativamente più bassa rispetto alle variazioni improvvise della metrica associate alla presenza di arco. In questo modo l'algoritmo riesce a mantenere sensibilità elevata durante la fase di innesco dell'arco. Una volta terminato l'evento, le soglie vengono progressivamente aggiornate: la sensibilità viene volutamente ridotta per consentire un graduale riassetto verso la nuova condizione di stazionarietà che segue la fase di arcing.

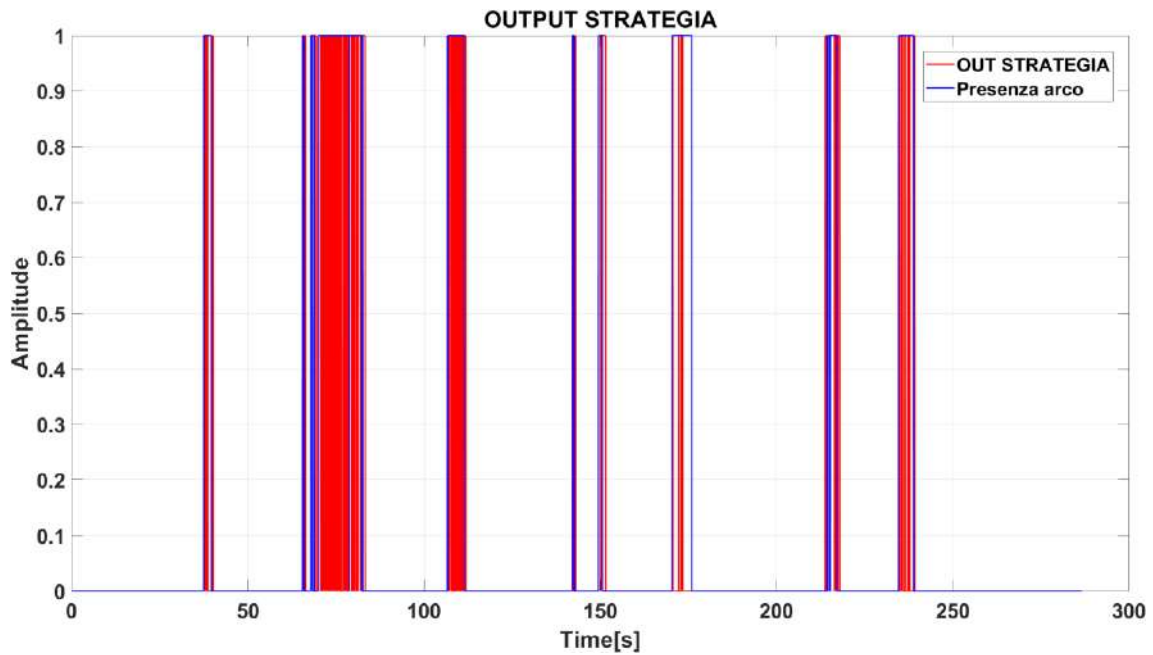


Figura 223 uscita strategia

In Figura 223 è possibile osservare come la strategia implementata segua correttamente l'andamento degli archi elettrici, pur mostrando la presenza di alcuni falsi positivi in corrispondenza delle fasi immediatamente successive a ciascun arco. Tali eventi indesiderati sono attribuibili al filtraggio applicato alle metriche. Poiché l'obiettivo principale di questa strategia è il monitoraggio, l'attenzione è stata posta sul garantire che nessun arco venga perso, accettando quindi un margine di segnalazioni spurie.

Gli archi presenti nella prova sono stati tutti identificati con successo: l'utente riceverebbe pertanto tutte le segnalazioni di pericolo, in linea con il numero reale di eventi.

Passiamo ora al carico mascherante presentato precedentemente in Figura 207. Il carico in questione è un'aspirapolvere ovvero uno dei carichi mascheranti identificati nella norma di riferimento, ovvero la CEI 62606.

Il comportamento in presenza di carico mascherante evidenzia alcune differenze:

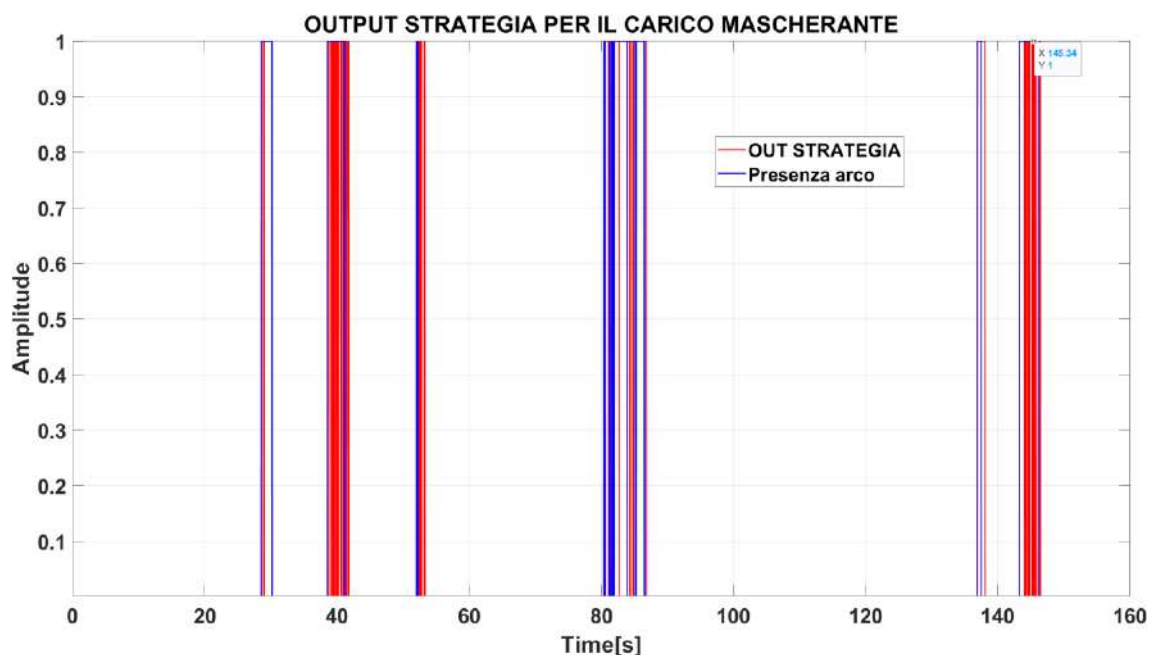


Figura 224 uscita strategia carico mascherante

Sebbene ci sia una presenza di falsi negativi all'interno dei periodi di arco ed una presenza di falsi positivi immediatamente successiva alle fasi di arco l'algoritmo anche con l'aspirapolvere come carico mascherante funziona correttamente.

5.5.1 Test finali multicarico

Dopo questa fase preliminare, in cui l'acquisizione del fotodiodo è stata eseguita mediante la scheda National Instruments NI-9239, l'Omhero è stato configurato per campionare direttamente anche tale segnale. In questa nuova configurazione è stato quindi possibile eseguire prove in condizioni più complesse rispetto ai carichi analizzati fino a questo punto, includendo scenari multicarico, così da valutare il comportamento del dispositivo in situazioni maggiormente rappresentative del funzionamento reale.

Tra le diverse configurazioni multicarico analizzate, in questa sezione se ne riportano due di particolare interesse. La prima riguarda la presenza di due carichi puramente resistivi (stufe elettriche), commutati più volte durante il funzionamento del dispositivo. In tale configurazione l'arco è posto in serie a una delle due stufe, mentre l'altra è collegata in parallelo. La seconda configurazione prevede invece un carico misto: l'arco è posto in serie al trapano, considerato come carico mascherante, mentre in parallelo è collegata una stufa elettrica per ambienti, che funge da carico puramente resistivo.

Questi scenari, tra i più complessi tra quelli realizzati, sono stati scelti poiché permettono di evidenziare in maniera chiara sia i punti di forza sia le criticità del sistema sviluppato, fornendo una valutazione complessiva più completa e bilanciata delle prestazioni del dispositivo.

È opportuno, prima di analizzare i risultati, formulare due considerazioni preliminari:

- **Affidabilità del fotodiodo:** Con questo set-up l'affidabilità del fotodiodo risulta ridotta rispetto a quando veniva campionato in tensione. Infatti, poiché ora il segnale è acquisito mediante trasformatore di corrente, il sistema è in grado di rilevare con chiarezza solo le grandi variazioni di corrente, associate a intensi flash luminosi generati dall'arc flash. In tale configurazione, dunque, il fotodiodo non fornisce una misura diretta e continua dell'arco, ma diventa piuttosto un indicatore qualitativo della sua presenza.
- **Configurazione multicarico:** Quando l'arco è in serie a un dispositivo, e in parallelo è presente un altro carico con corrente di modulo maggiore, quest'ultimo tende a mascherare la presenza dell'arco. Infatti, a monte, l'Omhero acquisisce la sovrapposizione di una corrente "sana" (quella della stufa) e di una affetta da arco (quella del trapano). Per enfatizzare questo effetto, l'arco è stato posto in serie al carico che assorbe meno corrente (il trapano, inoltre mascherante). In Appendice è possibile ritrovare lo spettrogramma del segnale.

Si passa quindi ad analizzare il primo scenario multicarico, costituito da due stufe elettriche utilizzate come carichi puramente resistivi. In questa configurazione l'arco è stato posto in serie a una delle due stufe, mentre la seconda è stata collegata in parallelo. Durante la prova, le stufe sono state commutate più volte al fine di osservare la risposta del dispositivo in condizioni di variazione di carico. Di seguito vengono riportati i segnali di corrente acquisiti, utili per valutare il comportamento del sistema in presenza di carichi resistivi multipli.

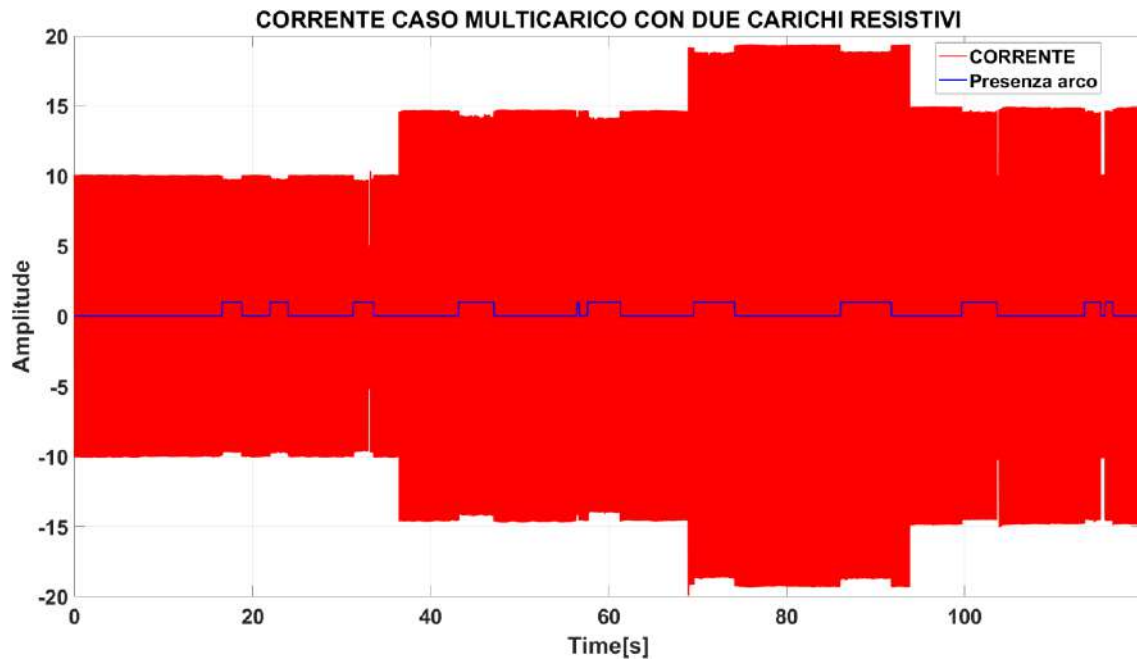


Figura 225 Corrente caso multicarico con due carichi resistivi

Questo test è stato concepito per sottoporre l'algoritmo a condizioni particolarmente gravose. In questa configurazione, infatti, si verificano frequenti cambi di carico e l'ampiezza della corrente d'arco varia sensibilmente in funzione della potenza impostata sulle due stufe. In particolare, quando la stufa non attraversata dall'arco opera alla massima potenza e l'altra al minimo, la corrente d'arco risulta molto piccola rispetto alla corrente totale, rendendo più complesso il suo rilevamento. In tali condizioni, oltre a essere più difficile mantenere stabile l'arco, quest'ultimo risulta anche meno pericoloso dal punto di vista energetico.

Un ulteriore aspetto di interesse riguarda i casi in cui l'innesco dell'arco avviene in prossimità di un cambio di carico: in queste circostanze, le metriche necessitano di un tempo di assestamento e diventa quindi più difficile distinguere la componente d'arco dalle variazioni dovute alla commutazione del carico stesso.

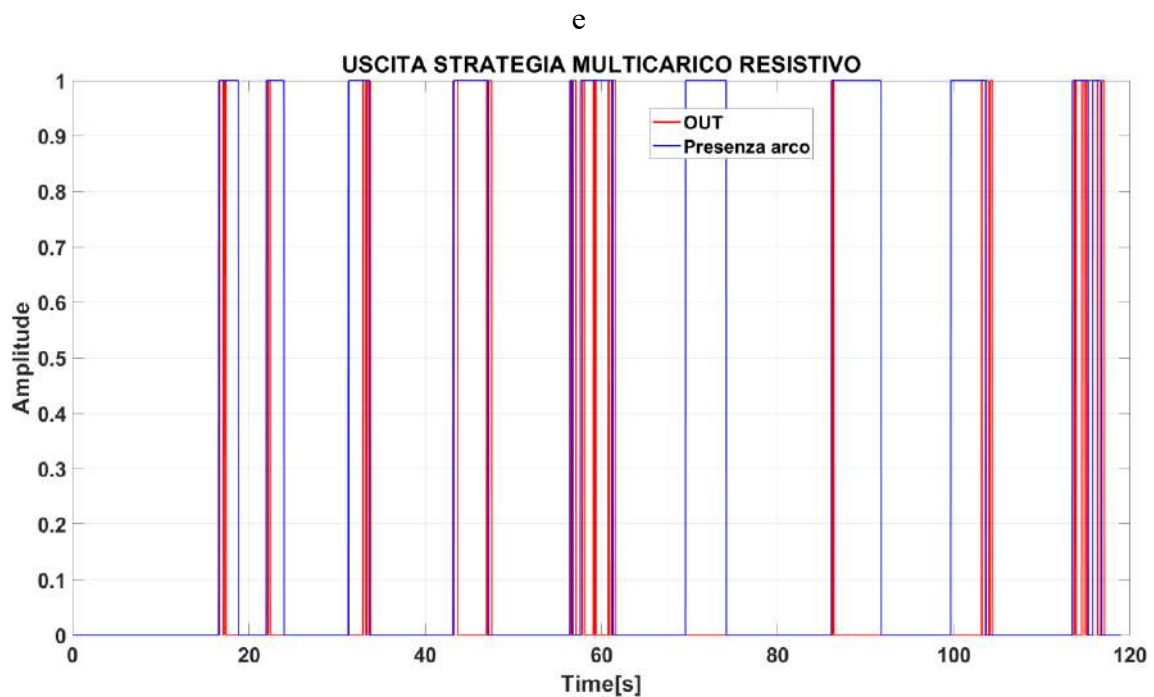


Figura 226 Uscita strategia per il caso multicarico resistivo

Come si può osservare dalla Figura 226 non sono presenti falsi positivi ma come prevedibile dato le grandi correnti in gioco tanti falsi negativi. Comunque, la maggior parte degli archi sono stati identificati almeno da un evento. L'arco che non è stato totalmente identificato è quello in cui entrambe le stufe sono al massimo ma l'arco scocca molto vicino ad un cambio di carico, pregiudicando le soglie, durando inoltre molto poco l'arco non si è dato tempo al sistema di assestarsi per identificarlo correttamente.

Nella figura successiva, per dare un'idea migliore della situazione è mostrata la corrente sovrapposta all'uscita della strategia.

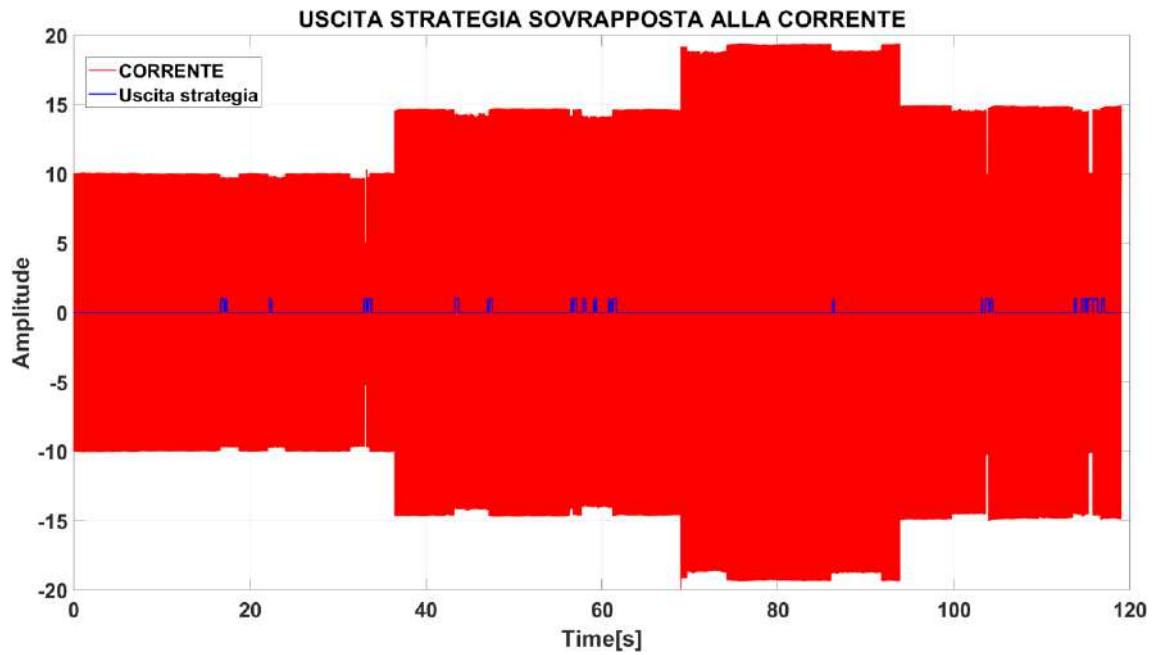


Figura 227 Uscita strategia sovrapposta alla corrente nel caso multicarico resistivo

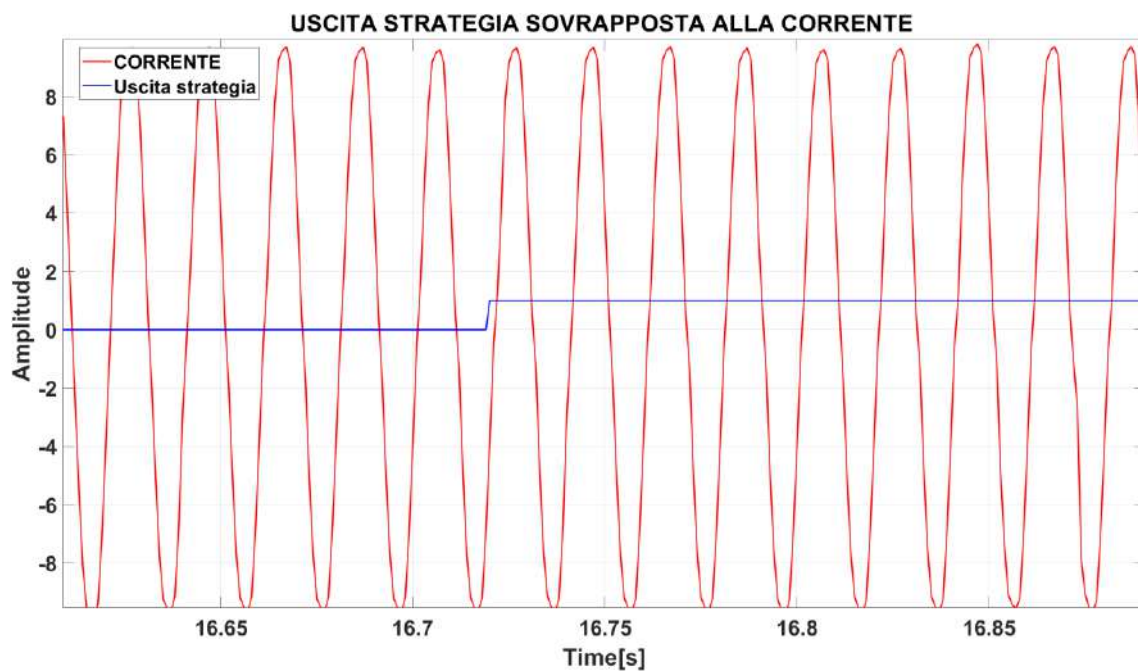


Figura 228 Zoom figura precedente

A conferma di quanto osservato, in Figura 228 viene riportato uno zoom che evidenzia come, per semplice ispezione visiva, la corrente nelle condizioni di normale operatività e in presenza di arco non mostri differenze apprezzabili. Non si riscontrano infatti né spalle né incremento del rumore, rendendo pressoché impossibile l'identificazione dell'arco basandosi unicamente sull'andamento della corrente.

È opportuno sottolineare che le prove multicarico non sono previste dalla normativa per la certificazione degli AFDD e che, anche in letteratura, risulta difficile reperire studi che affrontino tali scenari. In questo lavoro di tesi si è tuttavia ritenuto significativo includere questo tipo di sperimentazione, al fine di mettere ulteriormente in evidenza le criticità insite nel processo di identificazione degli arc fault.

Si procede quindi con l'analisi del secondo scenario sperimentale, caratterizzato dalla presenza di un carico misto: una stufa elettrica, che funge da carico puramente resistivo, e un trapano, considerato come carico mascherante, all'interno del quale è stato posto in serie l'arco. Questa configurazione consente di valutare le prestazioni dell'algoritmo in condizioni più complesse e realistiche, in cui la componente mascherante tende a rendere meno evidente la presenza del guasto.

In Figura 229, è mostrata la sovrapposizione tra la corrente misurata e il segnale di riferimento (fotodiodo). Nella fase iniziale si nota un evento di arco molto breve, dovuto a una scintilla innescata dagli elettrodi all'accensione del sistema. Nei successivi intervalli di estinzione del segnale del trapano, provocati da un eccessivo allontanamento degli elettrodi, si osserva come la corrente della stufa diventi predominante rispetto a quella del trapano. Anche il comportamento del fotodiodo risulta meno affidabile: non segue più in maniera puntuale la presenza di arco, come si può verificare anche dall'ispezione diretta delle figure successive.

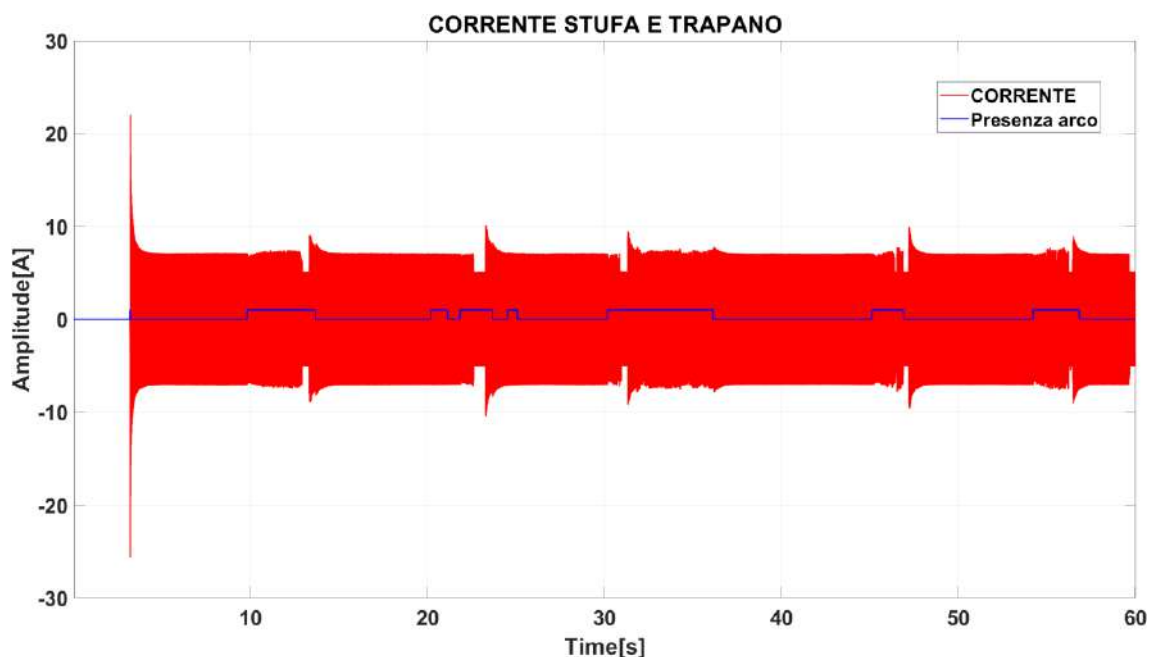


Figura 229 Corrente campionata dall'omhero in presenza di un carico resistivo ed uno mascherante

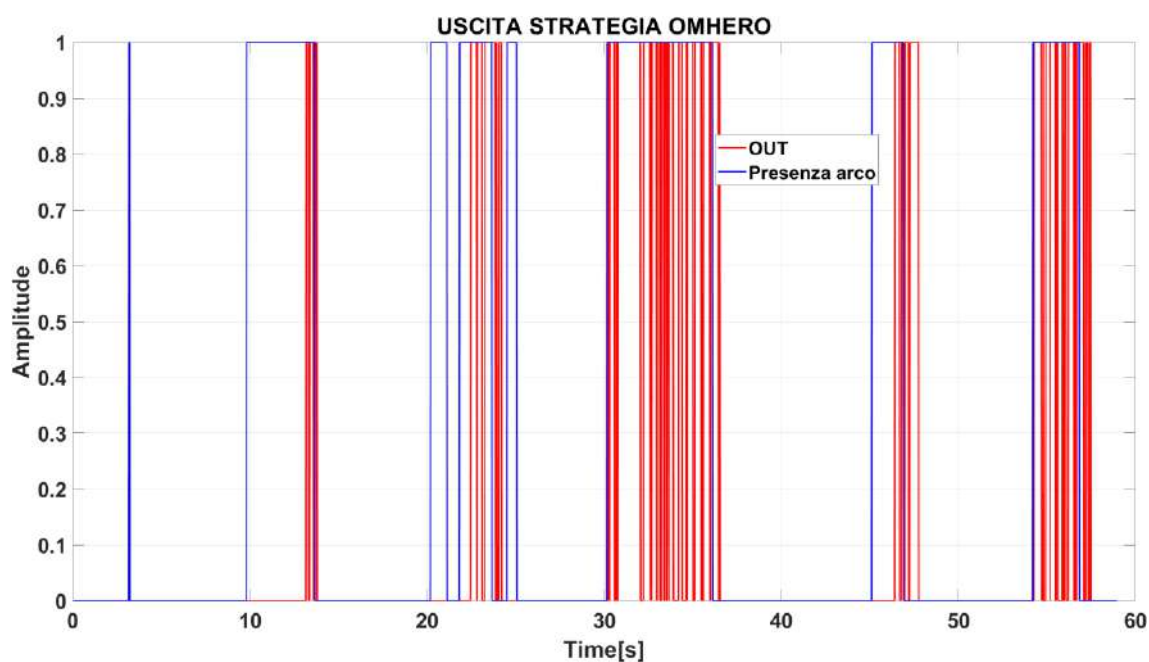


Figura 230 uscita strategia in presenza di due carichi uno mascherante ed uno resistivo

L'uscita della strategia, correttamente, non classifica il primo segnale del fotodiode come arco elettrico, riconoscendolo invece come un semplice cambio di carico. Nei successivi eventi, l'algoritmo non segue perfettamente l'andamento del secondo arco, pur riuscendo infine a identificarlo, e mostra in generale uno scostamento maggiore rispetto al riferimento. Tuttavia, anche in questo scenario complesso, tutti gli eventi di arco vengono identificati.

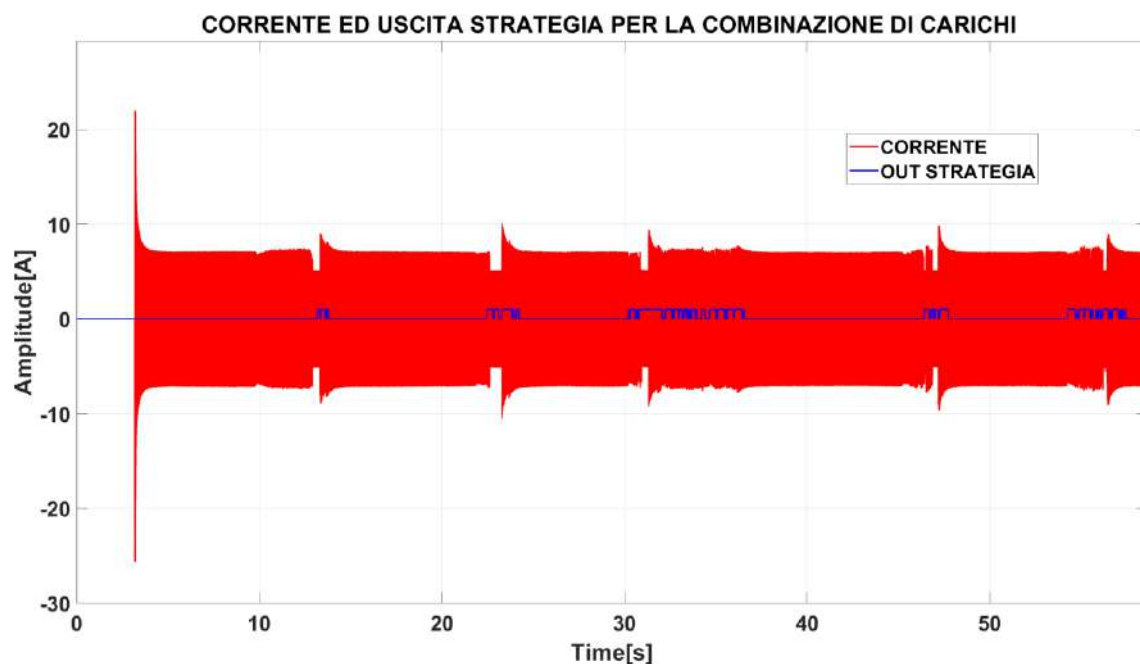


Figura 231 Confronto corrente ed uscita strategia

Per una comprensione più immediata, in Figura 231 è riportata la corrente del segnale sovrapposta all'uscita della strategia. Si nota chiaramente come, nei periodi in cui la corrente è più disturbata dall'arco, la strategia riesca a generare correttamente una segnalazione.



Figura 232 Zoom immagine precedente

Poiché la corrente assorbita dal trapano a vuoto è già piuttosto ridotta, l'impedenza introdotta dall'arco influisce immediatamente sul funzionamento del motore, che mostra infatti una lieve diminuzione della velocità. In ogni caso, in Figura 232 , non si osservano distorsioni significative nella forma d'onda tra la condizione senza arco e quella con arco, analogamente a quanto avviene nel caso del carico resistivo.

In sintesi, nonostante le difficoltà introdotte dalla configurazione multicarico e dalla ridotta affidabilità del fotodiodo, l'algoritmo sviluppato si è dimostrato in grado di identificare correttamente gli eventi di arco. Ciò conferma la validità della soluzione proposta, che si configura come un sistema di monitoraggio dell'arc fault a bassissimo costo, implementato con successo all'interno del dispositivo commerciale Omhero di Prysmian.

6. CONCLUSIONI

In questa tesi è stata verificata la fattibilità di diverse strategie di identificazione degli arc fault finalizzate allo sviluppo di un dispositivo di monitoraggio per le abitazioni. Lo studio si inserisce nel contesto dell'evoluzione dell'Omhero, dispositivo già in commercio prodotto da Prysmian, ed è stato condotto con un duplice obiettivo: individuare nuove metriche di rilevazione e affrontare le problematiche legate all'implementazione pratica, così da poter arrivare non solo alla definizione di metodologie efficaci, ma anche alla realizzazione di un prodotto realmente commercializzabile con funzioni di AFDD.

Dopo la fase di studio, sono state svolte numerose prove in condizioni operative reali, collegando il dispositivo alla rete elettrica. I risultati hanno dimostrato che, nonostante le limitate risorse di calcolo, l'Omhero si è rivelato sufficientemente affidabile per il monitoraggio di un impianto domestico, grazie all'impiego di tre metriche a basso costo computazionale, tra cui una coperta da brevetto.

Il lavoro è stato sviluppato in maniera progressiva. Inizialmente è stato realizzato un prototipo di AFDD basato su una strategia già brevettata dal gruppo Misure dell'Università di Palermo. Successivamente è stata avviata la ricerca di metriche semplici dal punto di vista computazionale, in grado di coesistere con l'algoritmo già implementato nel dispositivo commerciale. Questa attività ha portato alla definizione di una nuova strategia, validata in simulazione, che ha mostrato in gran parte dei casi un tasso di successo superiore al 99%. Infine, è stata sviluppata una strategia "ultra leggera" basata su tre metriche (di cui una delle tre oggetto di brevetto congiunto), integrata direttamente nel dispositivo, capace di garantire un monitoraggio dell'arc fault affidabile e compatibile con le esigenze di mercato.

Il risultato complessivo del lavoro raggiunge un Technology Readiness Level elevato, poiché ogni risultato sperimentale è stato ottenuto nel rispetto delle normative di riferimento, e ha già condotto alla produzione di un dispositivo prossimo alla commercializzazione.

Il naturale proseguimento di questa attività di ricerca sarà l'estensione della strategia di rilevazione degli archi elettrici anche in altri settori oltre quello domestico, come ad

esempio nel campo della produzione di energia fotovoltaica, su cui sono già in corso i primi studi.

7. RINGRAZIAMENTI

Questo progetto di dottorato è stato realizzato grazie al cofinanziamento e alla collaborazione di EOSS.

Desidero ringraziare il mio co-tutor, Ing. Antonio Di Stefano, e il Prof. Roberto Candela di EOSS, per la loro professionalità, la precisione e la dedizione dimostrate durante tutto il percorso di ricerca.

Un sentito ringraziamento va inoltre al gruppo di Misure dell'Università degli Studi di Palermo, e in particolare al mio tutor, Prof. Antonio Cataliotti, alla Prof.ssa Valentina Cosentino e al Prof. Giovanni Artale, per il costante supporto scientifico e umano offerto nel corso di questi anni.

8. BIBLIOGRAPHY

- [1] Underwriters Laboratories Inc., UL Standard for Safety for Arc-Fault-Interrupters, UL 1699.
- [2] Underwriters Laboratories Inc., Photovoltaic (PV) DC Arc-Fault Circuit Protection, Underwriters Laboratories Inc., UL 1699B, 1st Edition, Rev. April 2024
- [3] IEC 62606, General Requirements for Arc Fault Detection and Protection devices (AFDDs), Rev. 1.2, Nov. 2022
- [4] CEI EN 62606: Requisiti generali per dispositivi di rilevamento guasto per arco elettrico. Comitato Elettrotecnico Italiano.
- [5] National Fire Protection Association, NFPA 70®: National Electrical Code®, 2023 Edition, Article 210.12, 2023.
- [6] Canadian Standards Association, Canadian Electrical Code, Part I: Safety Standard for Electrical Installations, 25th Edition, CSA C22.1:21.
- [7] GB/T 31143-2014, "General requirements for arc fault detection devices (AFDD)," Standardization Administration of China, Beijing, China, Sep. 2014.
- [8] IEC 60364 :2010, "Low-voltage electrical installations - Part 4-42: Protection for safety - Protection against thermal effects," International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2010.
- [9] CEI – Comitato Elettrotecnico Italiano. (2024). Norma CEI 64-8: Impianti elettrici a tensione nominale non superiore a 1 000 V in corrente alternata e a 1 500 V in corrente continua.
- [10] IEC – International Electrotechnical Commission, “IEC 60364: Low-voltage electrical installations,”
- [11] C. E. Restrepo, "Arc Fault Detection and Discrimination Methods," Electrical Contacts - 2007 Proceedings of the 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2007, pp. 115-122, Doi: 10.1109/HOLM.2007.4318203.
- [12] USFA.2006. On the Safety Circuit: A Factsheet on Home Electrical Fire Prevention. United States Fire Administration
- [13] Korea National Fire Data System, "Annual Fire Statistics," 2010-2016.
- [14] J. T. Wilson e J. C. Wilson, "Ground fault protector with arcing fault indicator," U.S. Patent 3,911,323, pubblicato il 7 Ott. 1975.

- [15] Ronald T. Harrold, Emil M. Fort, Herbert E. Pietsch, "Detection of arcing faults in generator windings", US4156846A
- [16] Raymond W. MacKenzie, Joseph C. Engel, "Electronic circuit breaker with protection against sputtering arc faults and ground faults", US5224006A
- [17] A. Yaramasu, Y. Cao, G. Liu e B. Wu, "Aircraft electric system intermittent arc fault detection and location", in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 51, n. 1, pp. 40-51, January 2015, Doi: 10.1109/TAES.2014.120556
- [18] N. Qu, J. Zuo, J. Chen and Z. Li, "Series Arc Fault Detection of Indoor Power Distribution System Based on LVQ-NN and PSO-SVM," in IEEE Access, vol. 7, pp. 184020-184028, 2019, Doi: 10.1109/ACCESS.2019.2960512.
- [19] M. Naidu, T. J. Schoepf and S. Gopalakrishnan, "Arc fault detection scheme for 42-V automotive DC networks using current shunt," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 21, no. 3, pp. 633-639, May 2006, Doi: 10.1109/TPEL.2006.872385.
- [20] Wenxin Dai, Xue Zhou, Zhigang Sun, Guofu Zhai, Series AC arc fault detection method based on spectrogram and deep residual network, Microelectronics Reliability, Volume 170,2025, 115756, ISSN 0026-2714, <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2025.115756>.
- [21] Liangshi Lin, Wei Gao, Gengjie Yang, A DC arc fault location method for PV systems based on redundant antenna array and ellipse algorithm, Solar Energy, Volume 274, 2024, 112588, ISSN 0038092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112588>.
- [22] Zhang T., Zhang R., Wang H., Tu R., Yang K. Series AC Arc Fault Diagnosis Based on Data Enhancement and Adaptive Asymmetric Convolutional

- Neural Network (2021) IEEE Sensors Journal, 21 (18), pp. 20665 - 20673, Cited 45 times. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3099638
- [23] Wenxin Dai, Xue Zhou, Zhigang Sun, Guofu Zhai, Series alternating current arc fault detection method based on relative position matrix and deep convolutional neural network, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Volume 136, Part A, 2024, 108874, ISSN 0952-1976, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108874>.
- [24] Han Liu, Jiacheng Li, Wenjia Wang, Shouxiang Lu, Arc-1DCNN: An enhanced model for series arc fault detection, Measurement, Volume 234, 2024, 114814, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114814>.
- [25] Artale G., Caravello G., Cataliotti A., Cosentino V., Di Cara D., Guaiana S., Panzavecchia N., Tinè G. Characterization of DC series arc faults in PV systems based on current low frequency spectral analysis (2021) Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 182, art. no. 109770.
- [26] L. Du, Y. Shen, Z. Xu, L. Chen, and D. Chen, “Characteristics and fire-inducing risk analyses of arc faults in low-voltage electrical systems,” *Electric Power Systems Research*, vol. 238, p. 111199, 2025, Doi: 10.1016/j.epsr.2024.111199.
- [27] [Protection against final circuits arc faults in conductors and connections \(AFDD\) - Electrical Installation Guide](#)
- [28] https://library.e.abb.com/public/879763d41a8b4c3babd4a8cb76d6d771/ART_PROTEZ_ARCO_EL_MM3.pdf?x-

[sign=U5JHVf7HldReGscDLwhqagTRg%2FLOT+yHjwUaEQKmTxzEDnRlp1s3Cb+DfUTPLPr](https://www.researchgate.net/publication/358111111/sign=U5JHVf7HldReGscDLwhqagTRg%2FLOT+yHjwUaEQKmTxzEDnRlp1s3Cb+DfUTPLPr)

- [29] [Appliance and Electrical Fire Safety](#)
- [30] [Incendi di natura elettrica_rev04.09.2017.docx](#)
- [31] L. Zhao, C. Chi, Q. Zhao, and H. Mao, "Series Arc Fault Diagnosis Based on Variational Mode Decomposition and Random Forest," *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, 2022, Doi: 10.3389/fenrg.2022.889273.
- [32] Li B, Shu J, Cui F. Research on series arc fault detection method household loads based on voltage signals. *Sci Rep*. 2025 Jul 27;15(1):27324. doi: 10.1038/s41598-025-12760-7. PMID: 40717143; PMCID: PMC12301451.
- [33] <https://www.mdpi.com/2313-576X/8/3/65/pdf?version=1662540402>
- [34] [\(23\) Germany Arc Fault Circuit Interrupter \(AFCI\) Market size 2026 | Strategy, Trends & Insights Scope 2033 | LinkedIn](#)
- [35] A Study on the Operation Characteristics of Arc Fault Detection Device under Arc Generation *Int J Fire Sci Eng*. 2024;38(2):27-40. Published online June 30, 2024 DOI: <https://doi.org/10.7731/KIFSE.e87fb1d2>
- [36] <https://www.prysmianclub.it/cpr/>
- [37] J. Johnson et al., "Differentiating series and parallel photovoltaic arc-faults," 2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2012, pp. 000720-000726, Doi: 10.1109/PVSC.2012.6317708.
- [38] Casciaro, Vincenzo. (2019). DISPOSITIVI PER IL RILEVAMENTO DELL'ARCO ELETTRICO - DEVICES FOR DETECTING THE ELECTRIC ARC.
- [39] Protection against arc faults in cables and connections (AFDD) - Electrical Installation Guide (electrical-installation.org)

- [40] M. Atharparvez and K. R. Purandare, "Series Arc Fault Detection Using Novel Signal Processing Technique," 2018 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2018, pp. 335-339, Doi: 10.1109/HOLM.2018.8611761.
- [41] G. Ala et al., "A Smart Sensing Method for Real- Time Monitoring of Low Voltage Series-Arc-Fault," 2020 IEEE 20th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), 2020, pp. 512-516, Doi: 10.1109/MELECON48756.2020.9140599.
- [42] A. F. Ilman and Dzulkiflih, "Low Voltage Series Arc Fault Detecting with Discrete Wavelet Transform," 2018 International Conference on Applied Engineering (ICAE), 2018, pp. 1-5, Doi: 10.1109/INCAE.2018.8579416.
- [43] Y. Yi, Y. Qiongfang, D. Aihua and Z. Dezhong, "Study on the Fault Arc On-line Detecting Based on Wavelet Singularity Detection Principle," 2009 WASE International Conference on Information Engineering, 2009, pp. 151-154, Doi: 10.1109/ICIE.2009.130.
- [44] Chul-Hwan Kim, Hyun Kim, Young-Hun Ko, Sung-Hyun Byun, R. K. Aggarwal and A. T. Johns, "A novel fault-detection technique of high-impedance arcing faults in transmission lines using the wavelet transform," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. 4, pp. 921-929, Oct. 2002, DOI: 10.1109/TPWRD.2002.803780.
- [45] J. Jiang, W. Li, Z. Wen, Y. Bie, H. Schwarz and C. Zhang, "Series Arc Fault Detection Based on Random Forest and Deep Neural Network," in IEEE Sensors Journal, vol. 21, no. 15, pp. 17171-17179, 1 Aug.1, 2021, Doi: 10.1109/JSEN.2021.3082294.
- [46] S. Li and Y. Yan, "Fault Arc Detection Based on Time and Frequency Domain Analysis and Radom Forest," 2021 International Conference on

- Computer Network, Electronic and Automation (ICCNEA), 2021, pp. 248-252,
Doi: 10.1109/ICCNEA53019.2021.00062.
- [47] M. A. Abdulrachman, E. Prasetyono, D. O. Anggriawan and A. Tjahjono,
"Smart Detection of AC Series Arc Fault on Home Voltage Line Based on Fast
Fourier Transform and Artificial Neural Network," 2019 International Electronics
Symposium (IES), 2019, pp. 439-445, Doi: 10.1109/ELECSYM.2019.8901671.
- [48] C. -G. Cho, J. -B. Ahn, J. -H. Lee, H. -J. Ryoo, K. -D. Lee and Y. -J. Kim,
"DC Series Arc Fault Characteristic Comparision of a Fast Fourier Transform
Result," 2020 8th International Conference on Condition Monitoring and
Diagnosis (CMD), 2020, pp. 218-221, Doi: 10.1109/CMD48350.2020.9287251.
- [49] G. Artale, A. Cataliotti, V. Cosentino, D. Di Cara, S. Nuccio and G. Tinè,
"Arc Fault Detection Method Based on CZT Low-Frequency Harmonic Current
Analysis," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 66,
no. 5, pp. 888-896, May 2017, Doi: 10.1109/TIM.2016.2627248.
- [50] E. Sritrai, S. Kittiratsatcha and S. Polmai, "Low Voltage Series Arc Fault
Detection Using Rogowski Coil," 2018 International Conference on Engineering,
Applied Sciences, and Technology (ICEAST), 2018, pp. 1-4, Doi:
10.1109/ICEAST.2018.8434503.
- [51] G. Long, H. Mu, Y. Li, D. Zhang, N. Ding and G. Zhang, "Fault
Identification Technology of Series Arc Based on Deep Learning Algorithm,"
2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and
Application (ICHVE), 2020, pp. 1-4, Doi: 10.1109/ICHVE49031.2020.9279366.
- [52] G. Long, H. Mu, Y. Li, D. Zhang, N. Ding and G. Zhang, "Fault
Identification Technology of Series Arc Based on Deep Learning Algorithm,"
2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and
Application (ICHVE), 2020, pp. 1-4, Doi: 10.1109/ICHVE49031.2020.9279366.
- [53] E. Calderon, S. Patrick and W. Serge, "Kalman Filter for Detecting Serial
Arc Faults in a Domestic Electrical Network," 2020 IEEE 66th Holm Conference

- on Electrical Contacts and Intensive Course (HLM), 2020, pp. 165-169, Doi: 10.1109/HLM49214.2020.9307878.
- [54] H. -L. Dang, J. Kim, S. Kwak and S. Choi, "Series DC Arc Fault Detection Using Machine Learning Algorithms," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 133346-133364, 2021, Doi: 10.1109/ACCESS.2021.3115512.
- [55] M. K. Khafidli, E. Prasetyono, D. O. Anggriawan, A. Tjahjono and M. H. Riza Alvi Syafii, "Implementation AC Series Arc Fault Recognition using Mikrokontroller Based on Fast Fourier Transform," 2018 International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications (IES-ETA), 2018, pp. 31-36, doi: 10.1109/ELECSYM.2018.8615529.
- [56] Cheng Hong, Chen Xiaojuan, Xiao Wei and Wang Cong, "Short time Fourier transform based analysis to characterization of series arc fault," 2009 2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS), Shenzhen, China, 2009, pp. 185-188, doi: 10.1109/PEITS.2009.5407038.
- [57] C. Sun, X. Li and H. Li, "Analysis method of fault arc characteristics of distribution lines in heritage buildings based on time and frequency domain," 2022 IEEE 2nd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI), Changchun, China, 2022, pp. 362-365, doi: 10.1109/ICETCI55101.2022.9832164.
- [58] B. Rubini and R. Krishnakumar, "Implementation of Yagi-Uda Loop Array Antennas in Distribution Switchboards," 2022 6th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI), Tirunelveli, India, 2022, pp. 492-497, doi: 10.1109/ICOEI53556.2022.9777222.
- [59] Z. He, Z. Xu, H. Zhao, W. Li, Y. Zhen and W. Ning, "Detecting Series Arc Faults Using High-Frequency Components of Branch Voltage Coupling Signal,"

- in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 73, pp. 1-13, 2024, Art no. 3528413, doi: 10.1109/TIM.2024.3449954.
- [60] A. Tang, Z. Wang, S. Tian, H. Gao, Y. Gao and F. Guo, "Series Arc Fault Identification Method Based on Lightweight Convolutional Neural Network," in IEEE Access, vol. 12, pp. 5851-5863, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3350644.
- [61] S. Wei, Q. Yang, Y. Qi, T. Zhou, W. Liao and J. Sun, "A Location Method for Arc Fault Based on Electromagnetic Radiation Signals and TDOA," 2022 5th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE), Chongqing, China, 2022, pp. 427-431, doi: 10.1109/CEEPE55110.2022.9783382.
- [62] Z. Zhang, J. Ren, X. Tang, S. Jing and W. -J. Lee, "Novel Approach for Arc Fault Identification with Transient and Steady State Based Time-Frequency Analysis," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 58, no. 4, pp. 4359-4369, July-Aug. 2022, doi: 10.1109/TIA.2022.3170288.
- [63] Y. -L. Shen and R. -J. Wai, "Fast-Fourier-Transform Enhanced Progressive Singular-Value-Decomposition Algorithm in Double Diagnostic Window Frame for Weak Arc Fault Detection," in IEEE Access, vol. 10, pp. 39752-39768, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3165793.
- [64] Giuseppe Privitera, Antonio Cataliotti, Valentina Cosentino Giovanni Artale; Arc fault detection equipment and method using low frequency harmonic current analysis <https://patents.google.com/patent/US9025287B2/en>.
- [65] <https://www.prysmian.com/it/mercati/asset-management-e-elettronica/omhero>
- [66] G. Artale et al., "Time domain symmetry parameters analysis for series arc fault detection," 2022 IEEE 12th International Workshop on Applied

- Measurements for Power Systems (AMPS), Cagliari, Italy, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/AMPS55790.2022.9978832.
- [67] G. Artale et al., "Measurement of Time Domain Parameters for Series Arc Fault Detection. Sensitivity Analysis in the Presence of Noise," 2024 IEEE 22nd Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), Porto, Portugal, 2024, pp. 668-673, doi: 10.1109/MELECON56669.2024.10608622.
- [68] A. Di Stefano, A. Zinno, G. Artale, e N. Panzavecchia, "Arc-fault detection apparatus and method and electrical installation," U.S. Patent Application US20240110955A1, Apr. 4, 2024. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US20240110955A1/en>

APPENDICE A

In questa appendice del testo principale saranno riportati altri grafici utili e di approfondimento alla tematica in oggetto.

A.1 Spettrogrammi

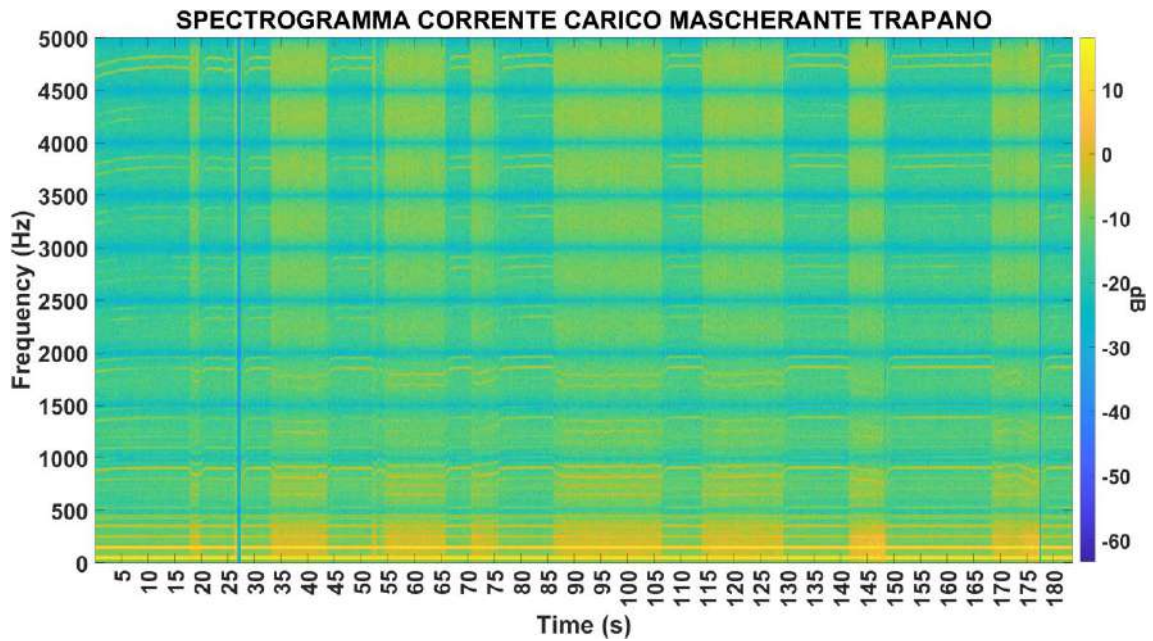


Figura 233 SPETTROGRAMMA TRAPANO

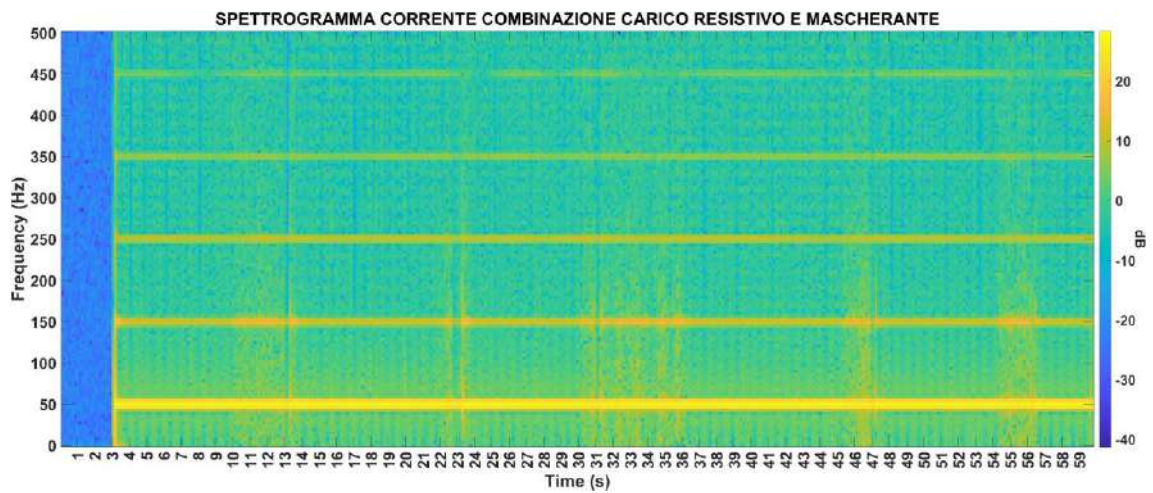


Figura 234 Spettrogramma corrente campionata ad 1 kHz dall'omhero

A.2 CARICO MASCHERANTE CAPACITIVO: LAMPADE FLUORESCENTI

Le lampade fluorescenti sono considerate un "carico mascherante" per l'arco elettrico perché la loro presenza in un circuito può rendere più difficile la rilevazione e la protezione contro i guasti da arco elettrico. Vediamo perché, partendo dal loro funzionamento e dalla natura del carico.



Le lampade fluorescenti sono lampade a scarica in gas: la luce viene prodotta da una scarica elettrica che attraversa un gas (tipicamente vapori di mercurio a bassa pressione) all'interno di un tubo di vetro rivestito di materiale fluorescente.

Per funzionare, necessitano di un reattore (ballast), che è un componente induttivo (bobina) che limita la corrente dell'arco elettrico all'interno della lampada.

Il circuito può includere anche uno starter (nei sistemi tradizionali) e spesso un condensatore per il rifasamento, cioè per migliorare il fattore di potenza.

In sintesi, le lampade fluorescenti hanno sia una componente induttiva che capacitiva ed il loro funzionamento prevede la generazione di archi elettrici controllati all'interno del gas. La corrente assorbita dalle lampade fluorescenti è "sporca" (ricca di armoniche e disturbi), simile a quella di un arco di guasto, rendendo difficile la rilevazione degli archi elettrici anomali. Considerando questo si comprende come sia un carico ostico per l'arc fault detection.

Di seguito seguiranno le analisi svolte su questo carico come è stato visto per il trapano ed il carico resistivo da laboratorio

OUTPUT STRATEGIA CONFRONTATO AL RIFERIMENTO LAMPADE FLUORESCENTI

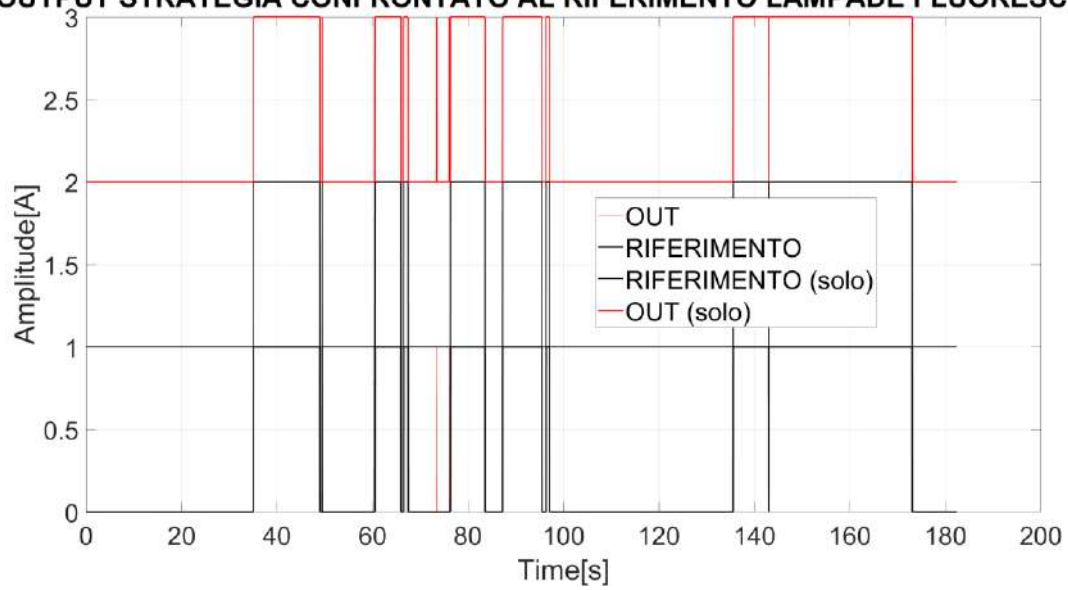


Figura 235 output strategia confrontato al riferimento

MATRICE DI CONFUSIONE STRATEGIA PER LE LAMPADE FLUORESCENTI

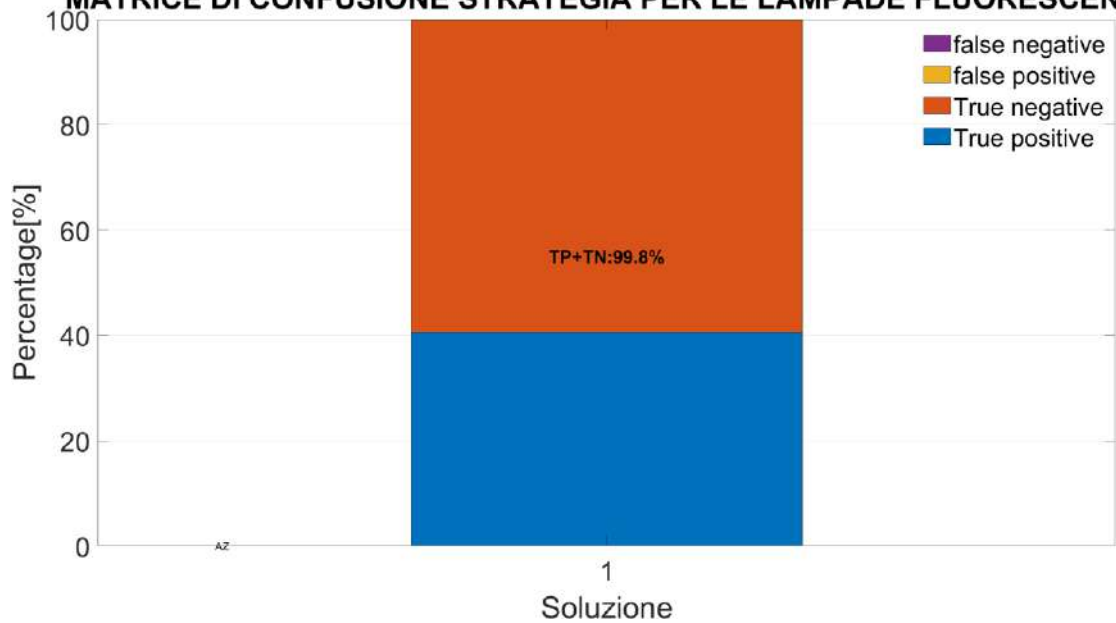


Figura 236 matrice di confusione uscita strategia per il carico mascherante lampade fluorescenti

Non c'è manco un falso negativo

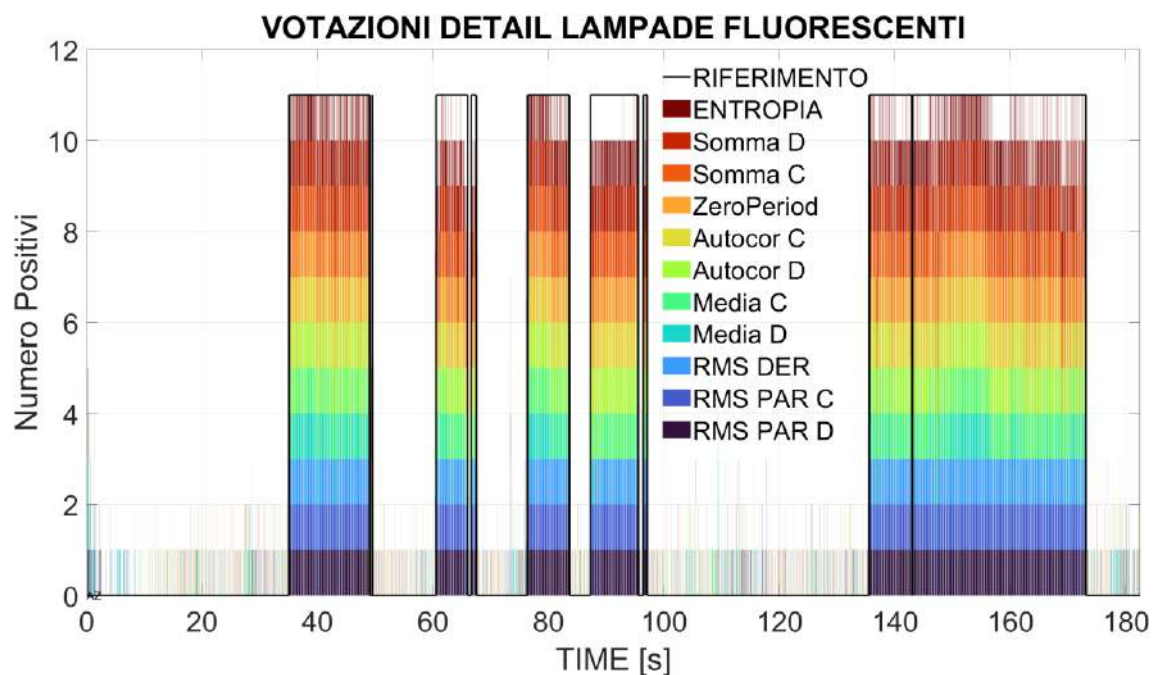


Figura 237 Dettaglio votazioni

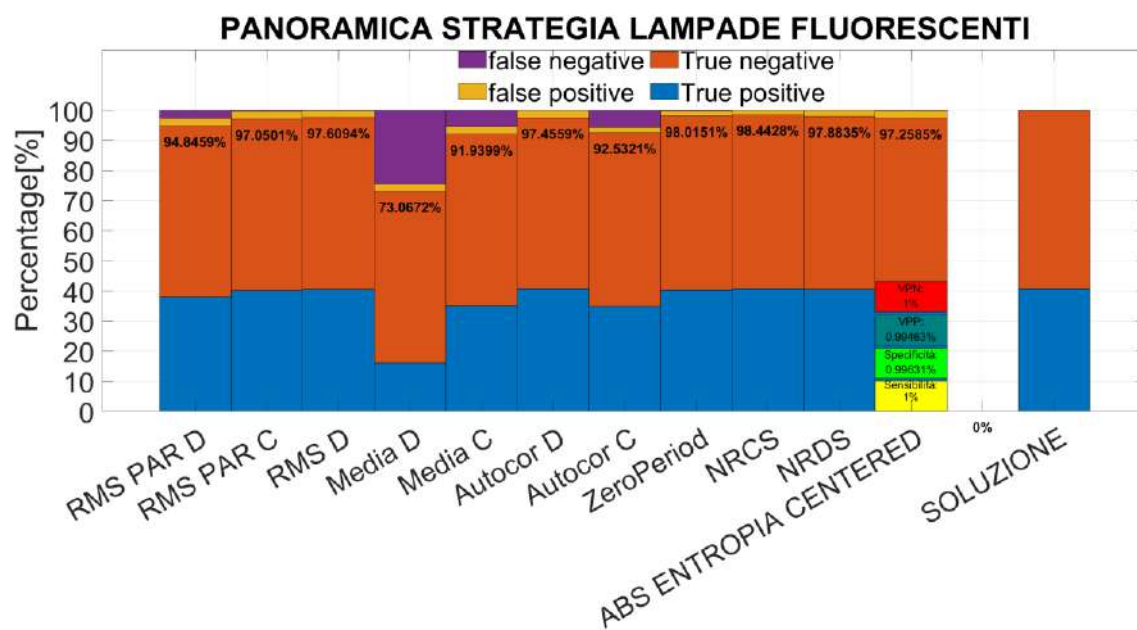


Figura 238 Panoramica metriche per le lampade fluorescenti

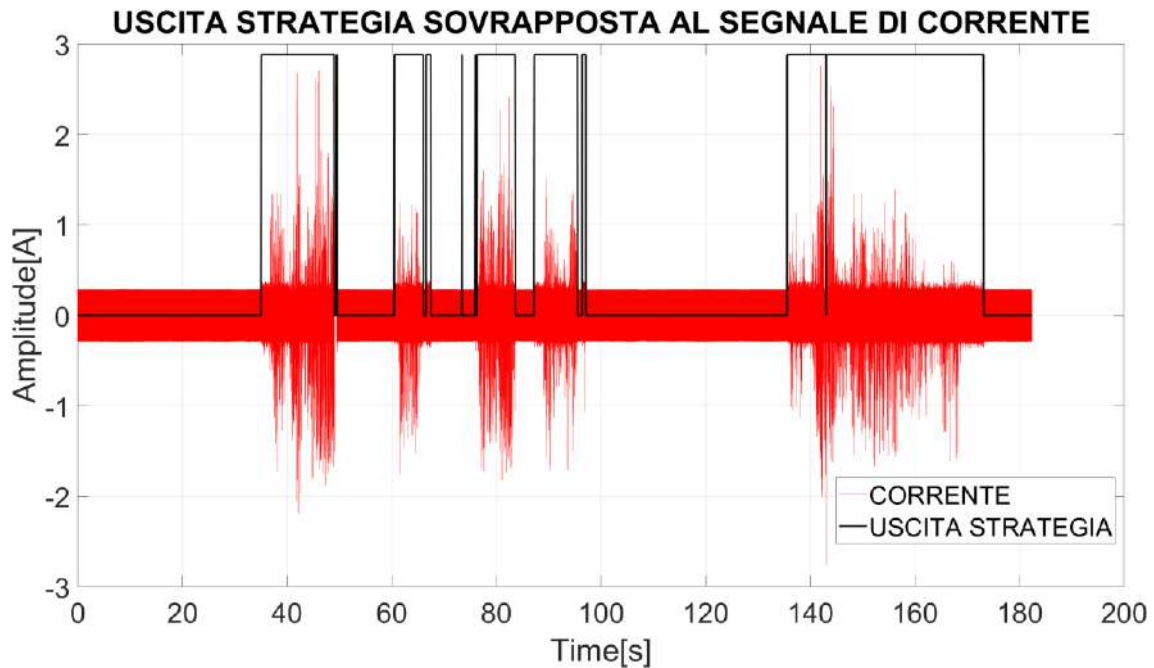


Figura 239 uscita strategia sovrapposta al segnale di corrente

A.3 CARICO RESISTIVO 2

L'utilizzo di diversi tipi di carichi resistivi nell'identificazione degli archi elettrici presenta caratteristiche sostanzialmente diverse tra i reostati di laboratorio e le stufe elettriche commerciali, con implicazioni significative per l'accuratezza e l'affidabilità dei sistemi di rilevamento.

I reostati di laboratorio offrono una stabilità resistiva superiore grazie alla loro costruzione con materiali di alta qualità. Materiali caratterizzati da un coefficiente di temperatura trascurabile. Questi dispositivi sono progettati specificamente per fornire una regolazione graduale e precisa delle correnti e tensioni AC e DC senza interruzioni o scintille, permettendo di stabilire prontamente tutti i carichi desiderati. La loro costruzione utilizza tubi di porcellana speciale ad alta resistenza termica ed elettrica, garantendo prestazioni costanti nel tempo.

Al contrario, le stufe elettriche commerciali presentano caratteristiche resistive meno stabili nel tempo e con la temperatura. Gli elementi riscaldanti commerciali mostrano variazioni significative della resistenza in funzione della temperatura di funzionamento, con coefficienti di temperatura che possono influenzare notevolmente le misurazioni. Inoltre, questi dispositivi non sono progettati per applicazioni di test di precisione, ma per

il riscaldamento domestico, risultando in una minore ripetibilità delle condizioni sperimentali.

L'identificazione degli archi elettrici è significativamente influenzata dal tipo di carico utilizzato. I reostati di laboratorio forniscono un carico resistivo puro e stabile, minimizzando le interferenze sui segnali di tensione e corrente utilizzati per la rilevazione. La stabilità delle loro caratteristiche elettriche facilita l'identificazione delle distorsioni indotte dall'arco elettrico, poiché le variazioni nel segnale possono essere attribuite più chiaramente al fenomeno dell'arco piuttosto che a variazioni del carico stesso.

Le stufe elettriche commerciali introducono invece variabilità aggiuntive che possono compromettere l'accuratezza della rilevazione. I sistemi di rilevamento degli archi basati sulla tensione lato carico possono essere influenzati dalle caratteristiche instabili di questi dispositivi. La presenza di componenti termici e controlli automatici può generare disturbi nel segnale che possono essere interpretati erroneamente come indicatori di arco elettrico, riducendo l'affidabilità del sistema di rilevamento.

Considerazioni per l'Implementazione Sperimentale

Dal punto di vista sperimentale, l'utilizzo di reostati di laboratorio garantisce condizioni di test riproducibili e controllate, essenziali per lo sviluppo e la calibrazione di sistemi di rilevamento dell'arco. La loro capacità di mantenere caratteristiche elettriche stabili permette di isolare e analizzare più efficacemente i fenomeni associati agli archi elettrici, fornendo dati più affidabili per la validazione degli algoritmi di rilevamento.

L'impiego di stufe elettriche commerciali, pur rappresentando condizioni più realistiche di utilizzo domestico, introduce complessità aggiuntive che possono mascherare i segnali caratteristici dell'arco elettrico. Tuttavia, esse possono essere utili per testare la robustezza dei sistemi di rilevamento in condizioni operative reali, dove la presenza di carichi variabili è la norma piuttosto che l'eccezione.

La scelta tra questi due approcci dipende quindi dagli obiettivi specifici della ricerca: i reostati di laboratorio sono preferibili per studi di caratterizzazione fondamentale e sviluppo di algoritmi, mentre le stufe elettriche commerciali sono più appropriate per test di validazione in condizioni operative realistiche.

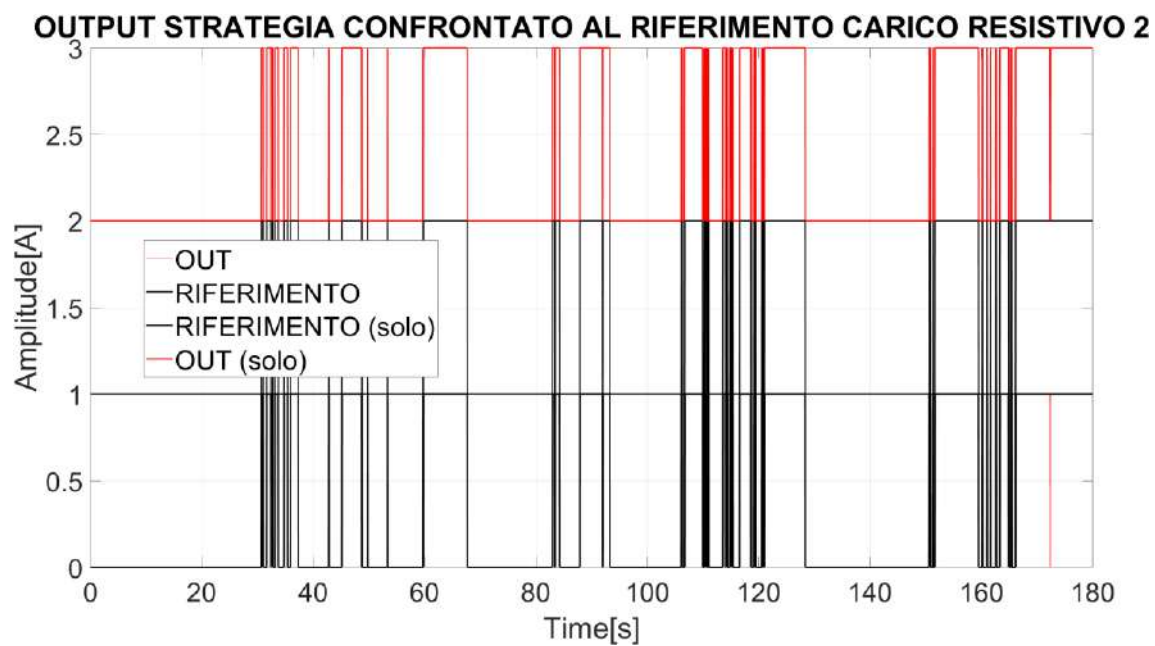


Figura 240 output strategia confrontato al riferimento per il secondo carico resistivo

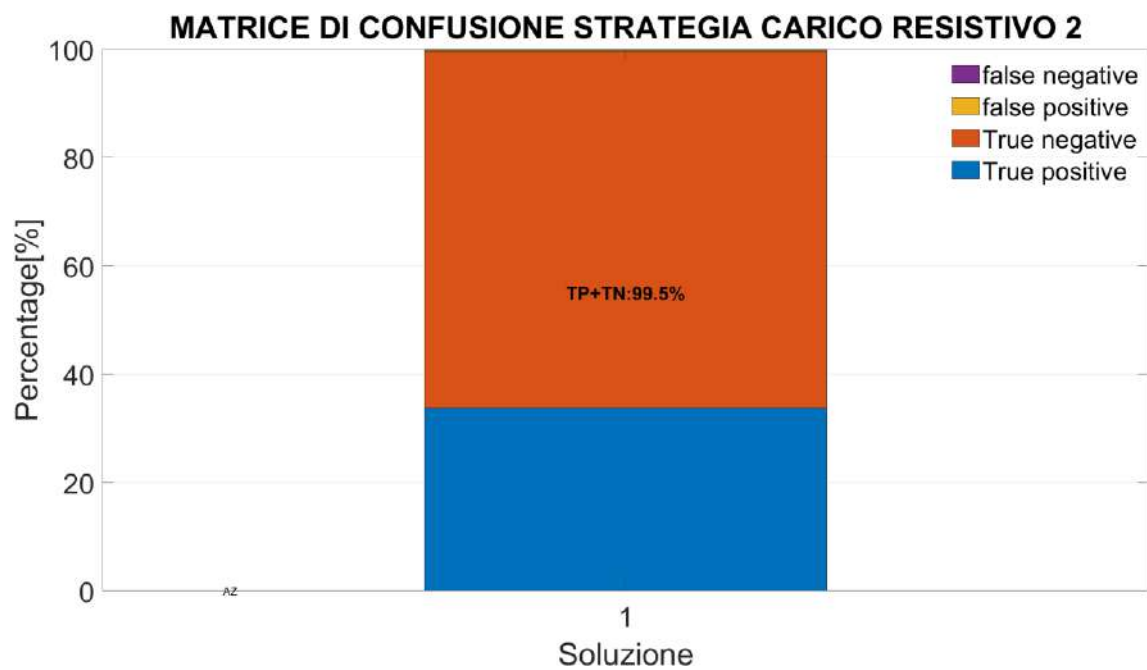


Figura 241 matrice di confusione strategia carico resistivo

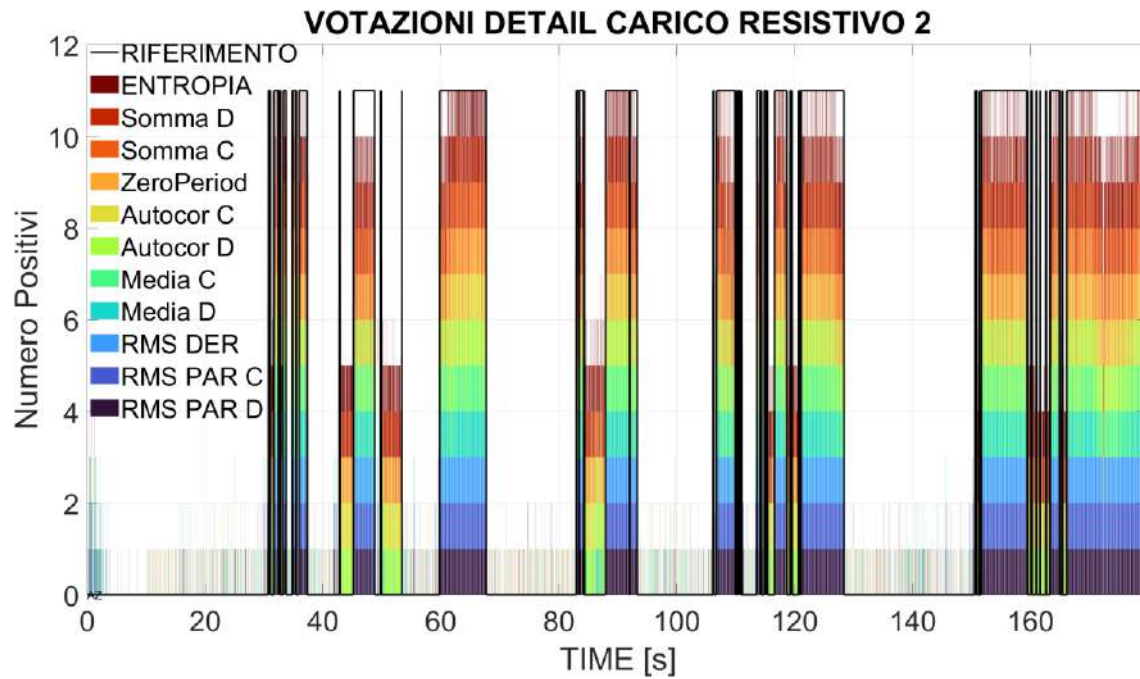


Figura 242 dettaglio votazione

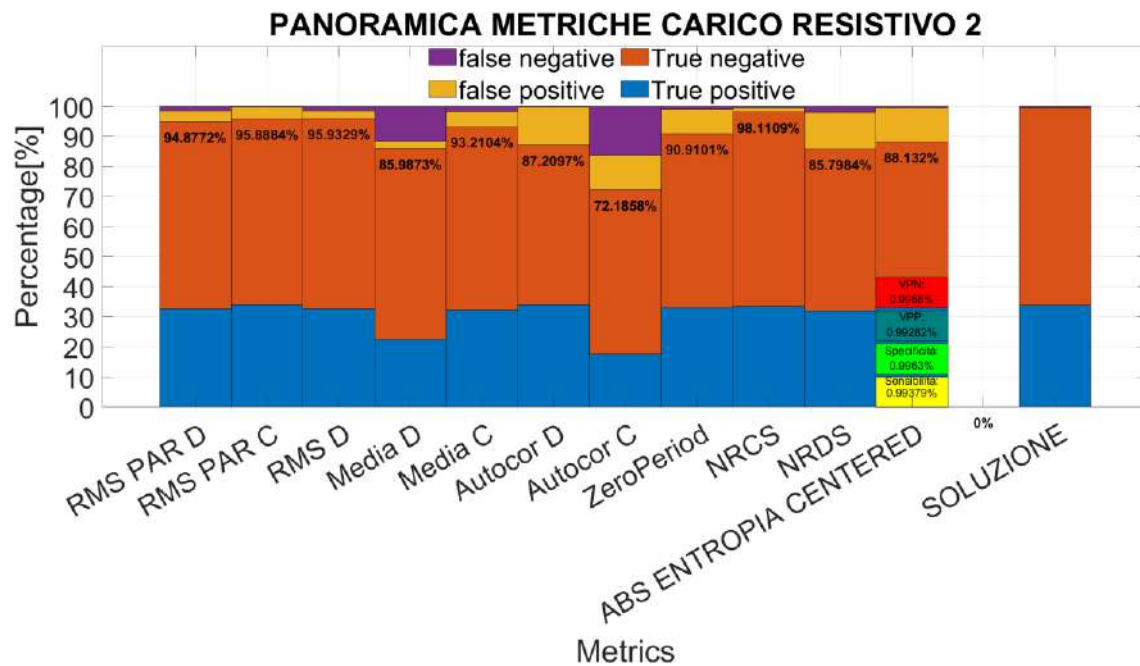


Figura 243 panoramica metriche

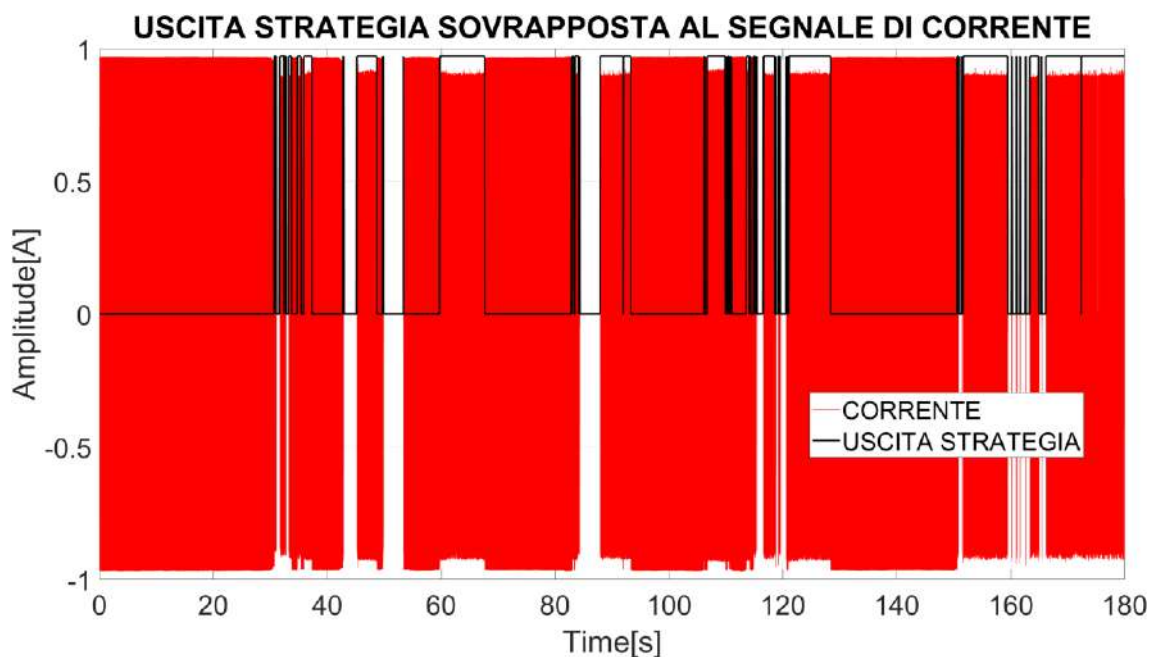


Figura 244 uscita strategia

In Figura 244 è mostrata la sovrapposizione tra il segnale di corrente acquisito (in rosso) e l'uscita della strategia di rilevazione (in nero).

Si osserva come l'algoritmo riesca ad attivarsi correttamente in corrispondenza degli intervalli in cui la corrente è disturbata dalla presenza di arco elettrico. In particolare: nei tratti in cui la corrente mostra un andamento regolare, l'uscita della strategia rimane stabile a zero, evitando falsi positivi; durante gli eventi di arco, caratterizzati da variazioni repentine e discontinuità del segnale di corrente, l'uscita della strategia si porta ad 1, segnalando correttamente la condizione di pericolo;

la durata degli impulsi nell'uscita della strategia segue in maniera coerente la persistenza dell'arco, mostrando quindi una buona capacità di adattamento anche a eventi di diversa lunghezza.

Nel complesso, la figura evidenzia come la strategia implementata sia in grado di distinguere in modo affidabile i periodi di funzionamento normale da quelli in cui è presente l'arco, garantendo così un comportamento conforme agli obiettivi di monitoraggio anche in questo caso.