POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

Tesi di Laurea Magistrale

Il ruolo del contatore ad eventi in un contesto Industry 4.0

Relatore:

Gianfranco Chicco

Co-relatore:

Andrea Mazza

Candidata:

Diletta Guglielmino

Anno Accademico: 2017/2018

Ringraziamenti

Ringrazio il Professore Chicco e il Professore Mazza per la pazienza e la gentilezza con cui mi hanno accompagnata nella stesura di questo elaborato. Trasmettendomi la loro conoscenza mi hanno permesso di migliorare professionalmente e di far parte di un progetto innovativo e importante per il futuro, grazie al quale mi affaccio al mondo del lavoro con maggiori consapevolezze.

Dedico questo mio traguardo ai miei genitori, che mi hanno permesso di realizzare un sogno.

INDICE

Ringraziamenti 1

Introduzione 4

1. La quarta rivoluzione industriale 8

1.1. Industria 4.0 8

1.2. Smart meter 2.0 12

1.2.1. Introduzione 12

1.2.2. Open meter per Enel 14

1.2.3. Fonti Rinnovabili – La proposta di ABB 17

2. Il contatore ad eventi 19

2.1. Principi per la definizione degli eventi 19

2.2. La contabilizzazione analitica dell'energia basata sulla generazione di eventi 30

2.1.1 Gestione dei dati e metrica di riferimento 30

2.2.2 Differenza tra approccio TDM ed EDM 34

3. Strumento di misura 37

3.1. Caratteristiche tecniche del dispositivo di misura 38

3.2. Modalità di posa 40

3.3. Software ed elaborazione dati 41

4. Prove su elettrodomestici con approccio Change and transmit 43

4.1. Caso Frigorifero 45

4.2. Primo caso lavatrice 54

4.3. Secondo caso lavatrice 61

5. Prove su elettrodomestici con approccio Send on delta. 67

5.1. Esempio applicativo 71
5.2. Caso Frigorifero 75
5.3. Primo e secondo caso Lavatrice 81
5.4. Caso Forno 88
6. Prove su elettrodomestici con approccio Combinato a doppia soglia. 92
6.1. Esempio applicativo 95
6.2. Caso Frigorifero 102
6.3. Primo caso Lavatrice 108
6.4. Caso Forno 112
7. Comparazione tra i vari approcci. 120
7.1. Caso Frigorifero 122
7.2. Secondo caso lavatrice 129
Conclusioni 134
Indice delle figure 137
Indice dei grafici 139
Indice delle equazioni 144
Indice delle tabelle 145
Sitografia 146
Riferimenti bibliografici 148

Introduzione

Nel corso della storia si sono succedute tre rivoluzioni industriali.

La prima, dal 1750 al 1830, rivoluzionò totalmente il sistema produttivo, basato non più sull'uso della forza umana o animale, ma su macchine azionate da energia meccanica e dall'utilizzo di combustibili fossili, concludendosi con l'avvento di una delle più grandi scoperte della storia: la macchina a vapore.

Essa sancì di fatto la nascita del settore industriale.

La seconda, dal 1870 al 1970, vide nell'elettricità, i prodotti chimici e il petrolio i suoi tre pilastri.

La terza, dal 1970 al 2000, segnò la fine del fordismo. Elettronica, telecomunicazioni e informatica rivoluzionarono il modo di elaborare le informazioni, modificando così sia l'assetto organizzativo che la qualità del lavoro, suddiviso in diversi processi produttivi. Fu l'era della terziarizzazione, cioè della prevalenza del settore terziario e dei servizi.

Ciò che accumunò ognuna di essa fu di fatto la rivoluzione scientifica, mediante la quale le tecnologie divennero sempre più prestanti e raffinate, dando vita a processi produttivi innovativi in grado di ridurre gli sprechi e aumentare i profitti.

Tale lavoro ha come scopo quello di indagare le soluzioni tecnologiche protagoniste della quarta rivoluzione industriale, che vedrà la nascita di modelli, strategie e paradigmi del tutto nuovi: la cosiddetta Industria 4.0.

Nello specifico tale lavoro di tesi si soffermerà sull'analisi di una delle tecnlogie fondamentali per la determinazione dei consumi di energia elettrica: il contatore.

L'obiettivo è quello di fornire le principali differenze tra le informazioni recuperabili da un contatore tradizionale ed i nuovi contatori attualmente esistenti e di come questi ultimi possano di fatto migliorare l'assetto del nuovo sistema industriale.

L'industria del futuro baserà il suo funzionamento su una moltitudine di dati differenti e afferenti ai settori più disparati: dalle informazioni sul personale a quelle su ogni tipo di macchinario adoperato per la produzione, ai consumi, sia energetici che economici e molto altro ancora. Qualsiasi tipo di informazione utile per l'analisi e la programmazione di un processo industriale sarà disponibile su semplici e intuitive piattaforme, in grado di raccogliere tali dati ed effettuarne una analisi congruente agli obiettivi stabiliti, grazie ai notevoli progressi registrati nel settore delle tecnologie ICT (*Information and Communications Technology)*, le quali sono in grado di trasmettere, ricevere ed elaborare dati digitali in brevissimi tempi e con un ristretto margine di errore. Una maggiore conoscenza avrà come obiettivo fondamentale una drastica riduzione di errori tecnici, guasti e conseguenti perdite economiche, inquadrandosi perfettamente nell'ottica di ciò che viene globalmente definita come analisi predittiva.

L'analisi preponderante nel settore industriale riguarda il consumo energetico.

La metodologia affrontata nell'elaborato di tesi, si basa su specifiche grandezze che prendono il nome di "eventi", da cui dipendono tutte le logiche caratteristiche di una nuova tipologia di contatori, denominati "contatori ad eventi" in quanto basano il loro funzionamento proprio sulla generazione di eventi. Una introduzione sulle caratteristiche e sulle logiche di funzionamento di tale tecnologia è presente nel secondo capitolo.

Oggigiorno i contatori fiscali sono dotati di una base tempi piuttosto ampia, solitamente pari ad un quarto d'ora, all'interno della quale sono effettuate le misurazioni dei valori di energia. Il contatore ad eventi ha come prima finalità quella di ridurre quantitativamente la base tempi a disposizione, ma nel contempo aumenta qualitativamente i dati forniti. In tal modo è possibile ricostruire i vari profili di carico adoperando un minor numero di informazioni, il che costituisce un vantaggio notevole se inquadrato nel contesto moderno in cui, come precedentemente accennato, i dati sia da conservare che da analizzare ammontano a milioni, se non miliardi. Ciò permetterà quindi non solo una riduzione del consumo energetico, con conseguenti profili di carico esenti da cospicui picchi, ma anche una riduzione di costi. Le nuove tecnologie saranno in grado di predire infatti

i momenti economicamente più convenienti in cui generare o assorbire potenza ed inoltre, riuscendo a identificare comportamente anomali, saranno in grado di individuare possibili difetti di fabbrica. Si riduce così il pericolo di conseguenti costi di riparazione o di riprogammazione della produzione, permettendo anche un risparmio in termini di tempi di produzione e una riduzione dei fermi tecnici delle catene di montaggio.

Il primo capitolo delinea quali sono le più grandi sfide relative alla quarta rivoluzione industriale e gli strumenti proposti dai più grandi operatori agenti sul mercato elettrico per affrontarla. L'elaborato si sofferma in particolare sul contatore ad eventi, attualmente proposto esclusivamente dalla società di ingegneria TW-TeamWare.

In Figura I.1 è possibile osservare il modello Wally A e Wally B. Esso è un analizzatore di rete per il monitoraggio della qualità del servizio elettrico con certificazione di conformità alla norma EN61000-4-30, prodotto e distributito dalla azienda TW_TEAMWARE S.r.L.

Figura I.1 Electric Power Quality Analyzer

Tutti i risultati ottenuti si basano su algoritmi definiti su piattaforma Matlab, il cui scopo è quello di simulare le varie logiche di funzionamento per la generazione degli eventi di tale contatore ad eventi.

L'analisi dei dati viene effettuata inizialmente su dati relativi ad apparecchiature domestiche largamente note, prelevati mediante l'utilizzo di uno strumento specifico le cui caratteristiche e i principi di funzionamento sono definiti nel terzo capitolo.

Gli andamenti delle apparecchiature residenziali hanno una variabilità notevole e costituiscono un esempio particolarmente critico di come le metodologie utilizzate possano essere efficaci e permettere una migliore rappresentazione dei processi che avvengono anche nel settore industriale.

1. La quarta rivoluzione industriale

1.1. Industria 4.0

Il primo concept di Industria 4.0 si ebbe nel 2011 alla fiera di Hannover, durante la quale Kagermann, Lukas e Wahlster presentarono il loro ambizioso progetto sull'industria del futuro[S1]. Esso comprendeva investimenti su diversi settori quali: enti di ricerca, aziende, scuole, infrastrutture e sistemi energetici. Un progetto nato con la finalità di riportare la Germania ai vertici del settore manifatturiero, attraverso un cambiamento radicale della sua struttura.

Un progetto all'avanguardia tanto quanto la sua denominazione, rimasta invariata sino ad oggi.

Il termine "Industria 4.0" e l'annesso concetto di "smart factory" raggiunsero il resto dell'Europa soltanto due anni dopo, nel 2013.

L'Industria 4.0 si compone di tre parti fondamentali:

Smart production: Una produzione guidata da nuove tecnologie produttive caratterizzate dalla collaborazione sinergica tra operatore, macchinari e strumenti.

Smart services: Infrastrutture, sia tecniche che informatiche, pensate per integrare sistemi e aziende, sia tra loro che con tutte le strutture esterne.

Smart energy: Un nuovo concetto di energia sostenibile, volto ad abbattere i consumi energetici e alla creazione di sistemi sempre più performanti.

La Boston Consulting ha inoltre definito nove tecnologie abilitanti, la cui adozione permetterebbe concretamente alle aziende l'ingresso nel mondo dell'industria 4.0.

Esse sono:

Advanced manufacturing: una produzione interconnessa e modulare, grazie a sistemi di produzione avanzati che garantiscono performance e flessibilità, come ad esempio sistemi robotici avanzati per la movimentazione automatica dei materiali.

Additive manufacturing: la cosiddetta produzione additiva. Essa permette di aumentare considerevolmente l'efficienza dell'uso dei materiali.

Augmented reality: una tecnologia spesso associata prettamente al mondo ludico, ma integrabile in innovativi sistemi di visione volti a guidare al meglio gli operatori nello svolgimento quotidiano delle attività.

Simulation: l'uso della simulazione tra diverse macchine connesse, diventa uno strumento essenziale per l'ottimizzazione dei processi.

Vertical and horizontal integration: un flusso continuo di informazioni per integrare tra loro tutti gli attori del processo produttivo.

Industrial internet: possibili comunicazioni interne continue ed estemporanee tra tutti gli elementi afferenti alla produzione, estendibile anche all'esterno dell'azienda mediante un collegamento internet.

Cloud: tecnologia di raccolta delle informazioni, con annesso possibile utilizzo del *cloud computing* e di servizi esterni di analisi dati.

Cyber-security: l'aumento esponenziale delle interconnessioni esterne ed interne pone al centro dell'attenzione il problema della sicurezza delle informazioni.

Big data analytics: il monitoraggio massivo di tutti gli aspetti produttivi implica l'introduzione di tecniche di gestione di grandissime quantità di dati, sfruttando sistemi aperti che implementino predizioni e/o previsioni.

Alcune di esse sono riassunte nella infografica della pagina seguente (Figura 1.1), creata da "Osservatori.net", del Politecnico di Milano [S2].

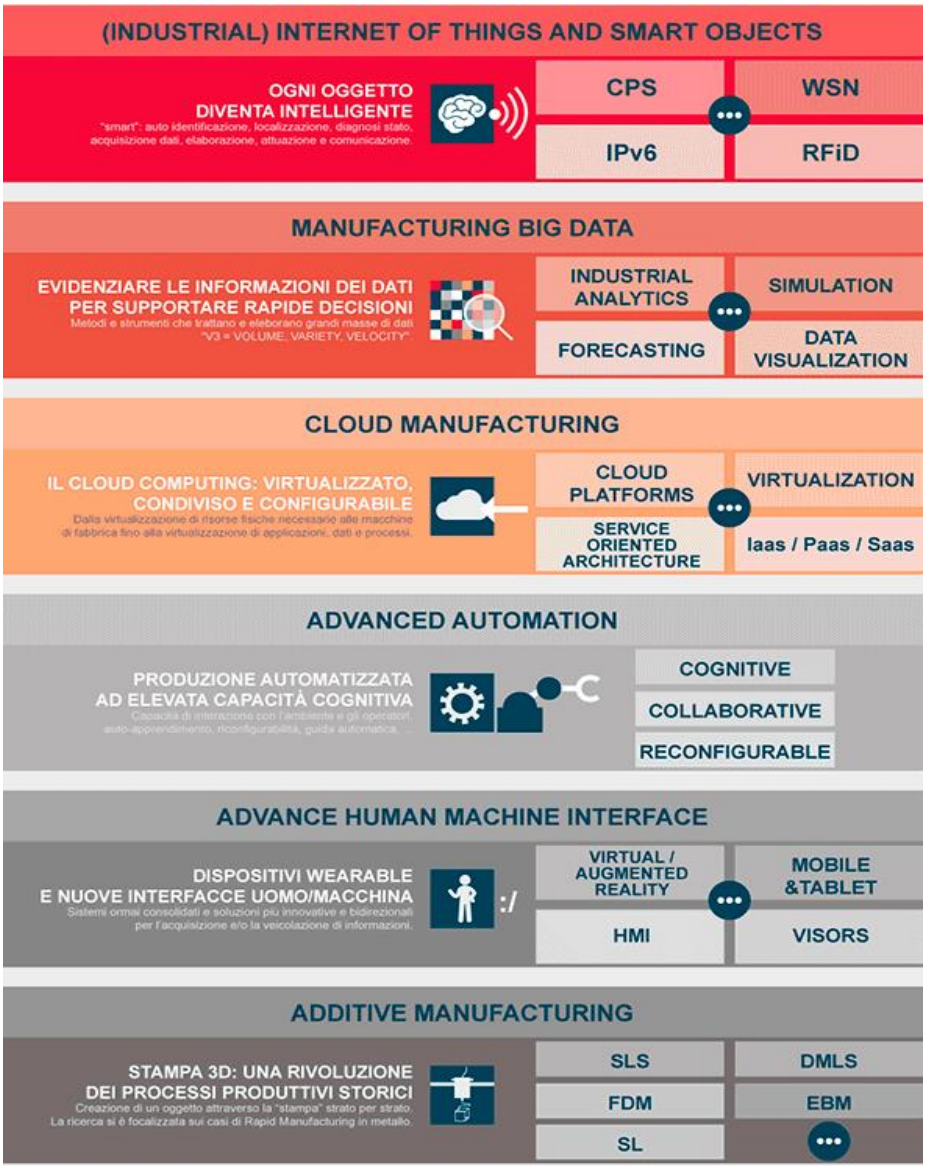


Figura 1.1 Tecnologie abilitanti per l'Industry 4.0 [S2]

La fabbrica del futuro, infatti, deve essere interconnessa su due livelli distinti[S3]:

Interno: tutte le risorse dell'impresa dovranno essere collegate ed essere in grado di comunicare, siano esse oggetti fisici, persone o informazioni, al fine di massimizzare le efficienze e minimizzare gli sprechi.

Esterno: la possibilità di immagazzinare enormi quantità di dati riguardanti tutte le aziende, dello stesso settore produttivo e non, è al centro del progetto Industria 4.0, poiché la condivisione di dati ed esperienze può giovare a tutte le imprese coinvolte.

Come già sottolineato nell'introduzione del presente lavoro, la smart energy è una delle componenti cardine dell'Industria 4.0 [S4]. In questa nuova visione dell'impresa, è necessario sfruttare al meglio sistemi energetici avanzati. Infatti, l'efficienza energetica ormai ricopre un ruolo tale da rappresentare un passo imprescindibile per lo sviluppo di qualsiasi *business* e la competitività dello stesso. Le nuove tecnologie permettono inoltre di diagnosticare in modo estremamente preciso i consumi, ed anche di monitorarli nel tempo. È possibile, dunque, valutare ogni singolo elemento del bilancio energetico, così da capire in che modo intervenire per migliorare le prestazioni e al tempo stesso diminuire i costi con interventi mirati.

Risulta quindi chiaro che la capacità di un'azienda di gestire in modo intelligente le risorse energetiche è un importante vantaggio competitivo, per ottenere dei miglioramenti significativi sia in termini di risparmio sui costi di esercizio, sia di salvaguardia ambientale [S5]. Tutto ciò è possibile soltanto eseguendo un'accurata analisi delle abitudini di consumo e conseguenti interventi mirati. Elemento essenziale è il monitoraggio continuo dei consumi e l'analisi dei dati, tramite la combinazione di sistemi hardware e software, che risultano inoltre indispensabili per soddisfare l'audit energetico, ormai obbligatorio per le grandi imprese e per quelle energivore ed utili per agevolare la compilazione delle schede di accesso ai certificati bianchi.

Gli accorgimenti principali per ottimizzare l'efficienza energetica aziendale sono i seguenti:

a) Utilizzare solo l'energia necessaria, che si traduce nel modulare la velocità dei motori quando si ha a che fare con carichi molto variabili, nel minimizzare le perdite energetiche, nell'utilizzare dispositivi e macchine ad alta efficienza, nel corretto dimensionamento delle macchine stesse.
b) Appiattire la domanda, individuando i carichi gestibili al fine di eliminare i picchi di consumo o trasferendoli su fasce di consumo meno costose.
c) Evitare il pagamento di penali, mantenendo un fattore di potenza sufficientemente elevato.

d) Individuare i disturbi della rete, che mettono a rischio la produttività, dato che possono guastare apparecchiature sensibili e causare l'arresto dei processi di produzione.

1.2. Smart meter 2.0

1.2.1. Introduzione

L'ultimo decennio è testimone di una sempre più marcata tendenza di investimento nelle infrastrutture e nelle reti di distribuzione.

Il consumo energetico sta cambiando e con esso anche l'assetto della rete elettrica e dei sistemi di produzione.

La crescente richiesta di energia elettrica ha contribuito ad un aumento dei costi energetici.

Il trend futuro è, pertanto, quello di creare nuove tecnologie in grado di massimizzare l'efficienza del sistema e di abbattere i costi per una migliore gestione dell'energia, il tutto guidato dall'esigenza di sapere quando, dove e come tale energia viene utilizzata, mediante un campionamento dei dati sempre più fitto.

L'allocazione puntuale dei consumi riesce, infatti, a fornire una panoramica molto più dettagliata, permettendo così una più semplice identificazione delle aree in cui il consumo di energia è eccessivo, in linea con l'esigenza dell'ottimizzazione energetica degli impianti attraverso un'analisi predittiva dei consumi.

I contatori di energia elettrica 2.0 rispondono a tale esigenza.

"I contatori intelligenti e l'internet delle cose rivoluzioneranno il mercato delle tecnologie per l'efficienza energetica. Oggi in Europa si registra il 21% dei ricavi di questo settore."

Così riporta l'articolo di "key4biz" [S6], secondo cui in Europa il mercato degli smart meter potrebbe raggiungere un valore di oltre 22.12 miliardi di euro.

Secondo uno studio di "Machina Research" (principale fornitore al mondo di market intelligence e intuizione strategica sulle emergenti IoT), la crescita del mercato delle *connected energy* sarà favorito dall'installazione di 160 milioni di smart meter nei Paesi europei.

La GSMA (*Global System for Mobile Communications Association*) [S7] stima che il mercato dei dispositivi connessi crescerà più velocemente se all'interno delle reti a bassa potenza e ampio raggio verranno incluse soluzioni IoT.

Inoltre, la Commissione europea ha stabilito che entro il 2020 il 72% dei consumatori europei dovrà essere munito di uno smart meter per l'elettricità e il 40% di uno smart meter per il gas.

Complessivamente, l'Unione Europea ha annunciato l'installazione entro tre anni di 200 milioni di smart meter per l'elettricità e di 45 milioni di smart meter per il gas.

Il mercato delle tecnologie legate all'energia si compone non solo di connessioni da macchina a macchina (M2M: *machine-to-machine*) e operatori mobili riservati ai dispositivi IoT, che ne assicurano la connessione a qualsiasi rete attualmente esistente anche in aree poco accessibili, garantendo nel contempo la sicurezza e la gestione dei propri dati, ma anche di applicazioni per la generazione e la distribuzione di energia, di impianti di microgenerazione e di soluzioni per l'efficienza energetica avanzata.

Come suggerisce il nome, la nuova generazione di contatori si propone di essere intelligente e maggiormente orientata agli utenti.

Il funzionamento si basa su un monitoraggio continuo dei consumi, i dati energetici sono prelevati e memorizzati con cadenza temporale pari ad un quarto d'ora, mentre quelli relativi alla potenza sono memorizzati durante tutto il periodo di funzionamento, con una cadenza solitamente pari alla sensibilità dello strumento utilizzato per le rilevazioni.

Gli smart meter 2.0 eliminano, inoltre, l'onere dell'auto-lettura da parte dei clienti con una conseguente tariffazione più sicura, in quanto privata dei possibili errori

nelle stime di consumo, derivanti da problemi di comunicazione tra distributore e fornitore. La lettura dei consumi e la gestione di eventuali guasti o malfunzionamenti avviene, infatti, in modo diretto tra consumatore di energia e fornitore, attraverso due possibili metodologie:

1. Attraverso la power line communication (PLC), ovvero i dati sono trasmessi attraverso cavo elettrico.
2. In radiofrequenza.

La figura stessa del consumatore è in continuo cambiamento, in quanto egli stesso è sempre più interessato e attento ai propri consumi, che potrà controllare anche direttamente dal proprio telefono, coordinando a distanza ad esempio il funzionamento dei propri elettrodomestici, del proprio impianto elettrico o il servizio di telesorveglianza e molto altro ancora grazie ai recenti sviluppi della domotica.

1.2.2. Open meter per Enel

In tale contesto Enel è l'azienda italiana che ha scommesso di più in tale tecnologia, avviando la sostituzione di circa 33 milioni di contatori su tutto il suolo italiano.

Un investimento per 4.3 miliardi di euro, 250 imprese coinvolte, 4000 persone in campo, questi i numeri del piano Enel per sostituire 41 milioni di contatori da qui ai prossimi 15 anni, di cui 32 milioni già entro il 2021 (29 milioni nel residenziale e 3 milioni nell'industria/commercio)

Opern Meter è il nome del contatore di seconda generazione firmato Enel [S9], riportato in Figura 1.2.

Figura 1.2 Open Meter. Fonte: E-distribuzione

La presentazione del nuovo prodotto è avvenuta il 26 giugno 2017, presso l'Auditorium Enel di Roma, alla presenza, oltre che dell'Amministratore delegato di Enel Francesco Starace, del capo delle reti Livio Gallo e dell'ex presidente del consiglio Paolo Gentiloni, il quale ha affermato [9]:

"Enel è da sempre protagonista a livello mondiale nella transizione energetica e l'Italia si posiziona fra i paesi leader anche in quanto a contributo solare.

Il piano smart meter di Enel punta a un risparmio fra il 2% e il 6% dei consumi elettrici e soprattutto mette in campo 4.4 miliardi di investimenti che possono arrivare a 6 miliardi.

Un'operazione che creerà lavoro e darà ossigeno alla nostra economia".

Il nuovo contatore è in grado di rilevare ogni 15 minuti il consumo energetico e di effettuare un profilo di consumo giornaliero. La fatturazione avviene dunque sulla base dei consumi reali ed è possibile effettuare bilanci locali di energia. I dati saranno consultabili via web con uno scarto temporale di 24 ore. Scomparirà la tariffa di maggior tutela e ogni consumatore dovrà sceglierne una nuova dal mercato libero, non più basata sulle fasce orarie predefinite.

La novità più importante è, dunque, la possibilità per i clienti di avere sempre a disposizione i propri consumi energetici.

Tale maggiore consapevolezza porterebbe a uno sviluppo dei contratti di tipo *demand response*, attraverso i quali un utilizzo efficiente dell'energia si tradurrebbe in un benificio economico, oltre che tecnico, attraverso nuovi metodi di tariffazione basati su incentivi e premi.

Tali tipologie di contratti permetterebbero una riduzione dei picchi, incentivando ad esempio i consumi in determinati momenti della giornata piuttosto che in altri, e di avere un miglior equilibrio tra domanda e offerta.

Il *consumer* (ovvero il consumatore) diventa *prosumer* (termine nato dall'unione dei termini produttore e consumatore) e in tal modo è in grado lui stesso di immettere energia nella rete elettrica, oltre che prelevarla, contribuendo di fatto alla stabilità della rete, costituendo una eventuale fonte di energia in casi di emergenza.

In tale ottica, le possibilità di nuove tipologie di servizi sono in continua espansione, basti pensare che il mercato dei soli contatori ha un giro d'affari dell'ordine dei miliardi di euro. Nasceranno così nuove tipologie di aziende in grado di garantire una gestione dei "Big Data" ottimale, rivolgendosi non soltanto ad utenti industriali, ma anche residenziali. Tutto ciò renderà il mercato più flessibile e probabilmente con un maggior numero di concorrenti al mercato elettrico. L'intero sistema energetico diventerà più efficiente, in grado di fronteggiare le più grandi sfide a livello di impatto ambientale, quale ad esempio quella di generare una energia sempre più "pulita", proveniente da fonti rinnovabili.

L'energia sostenibile ha, pertanto, come pilastri:

- Tecniche di controllo distribuite basate sulle ICT (Tecnologie dell'Informazione e della Comunicazione)
- L'efficienza energetica
- Il risparmio energetico

Misurazioni e monitoraggi "intelligenti" guideranno l'evoluzione delle tecnologie verso una migliore conoscenza, oltre che del consumo energetico, anche delle iterazioni con altre quantità, quali ad esempio le variabili ambientali, il comportamento dei consumatori e la natura dei processi. In tal modo potrebbe

diminuire il ricorso a combustibili di tipo fossile, poichè sarebbero necessarie centrali elettriche in numero inferiore per fornire elettricità.

Attualmente, nonostante la presenza di numerosi strumenti e metodi a supporto, l'uso di tali risorse da parte delle imprese è ancora limitato.

1.2.3. Fonti Rinnovabili – La proposta di ABB

Data la crescente mole di dati da analizzare, un'altra tecnologia interessante da attenzionare sono i *data logger*. Un *data logger* è un dispositivo che può essere utilizzato per memorizzare dati. Fanno parte di questa categoria dispositivi quali schede plug-in o di comunicazione seriale, che utilizzano un computer come una vera e propria sorgente di registrazione dei dati in tempo reale. È uno strumento completo, in grado di leggere diversi tipi di segnali elettrici e memorizzare i dati nella memoria interna, per renderli scaricabili su PC o computer.

Nella Figura 1.3 viene indicata una delle ultime tecnologie di ABB [S10].

Figura 1.3 - Data Logger. Fonte: ABB.

Tale dispositivo, adatto sia per grandi impianti fotovoltaici che per applicazioni domestiche, è in grado di registrare dati provenienti da diverse fonti e di diverso tipo: dai dati energetici relativi ad uno specifico sistema di produzione, ai dati elettrici provenienti dai contatori, sino ai dati ambientali.

Avere informazioni circa l'irraggiamento, lo stato degli inverter, la potenza istantanea e l'energia generata dall'impianto è fondamentale per capire la

produttività degli impianti fotovoltaici nel tempo, basandosi su dati in tempo reale e non soltanto su stime. In tal modo è possibile evitare interventi di manutenzione straordinaria per guasti inattesi ed è possibile raggiungere gli obiettivi prefissati in modo più semplice, in quanto un maggiore monitoraggio permette di effettuare una pianificazione più accurata. Il *data logger* non è in grado di effettuare una analisi qualitativa dei dati che registra, pertanto esso svolge la funzione di *gateway*, inviando tali dati, nel rispetto degli standard di sicurezza informatica, alla piattaforma web Aurora Vision® Plant Management Platform, che in seguito ad una scrupolosa analisi e al calcolo di determinati indici, è in grado di offrire una stima circa la produttività dell'impianto e possibili anomalie (Figura 1.4).

Ogni operazione è riportata su file facilmente accessibili anche in modalità remota, in modo tale da aver accesso ad uno storico dati accurato per possibili comparazioni sui livelli di produttività in tempi o siti di installazione diversi o per una eventuale assistenza tecnica.

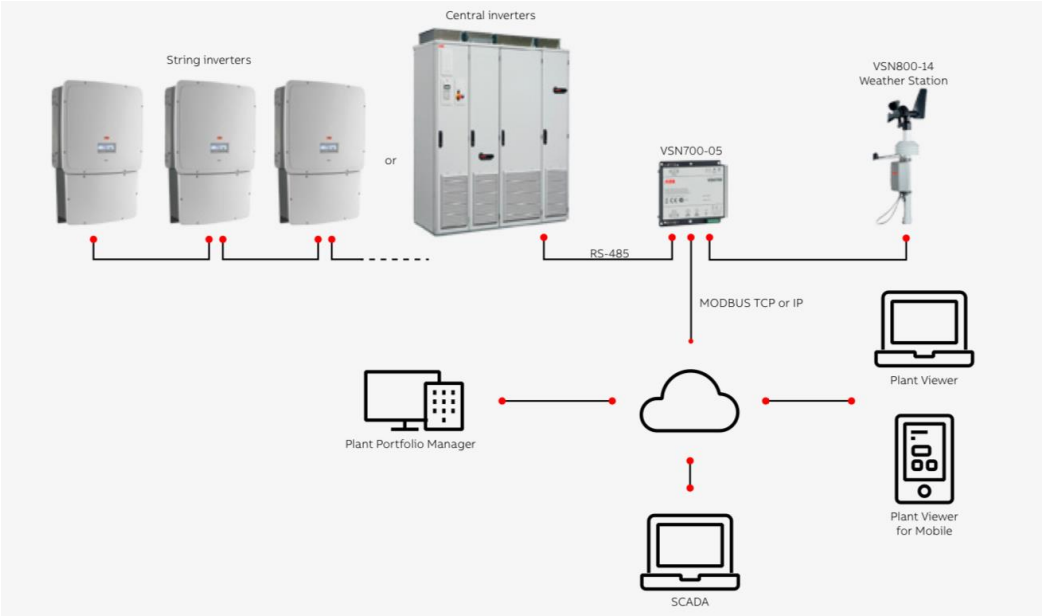


Figura 1.4 - Schema funzionale Aurora Vision Plant Management Platform. Fonte: ABB.

2. Il contatore ad eventi

2.1. Principi per la definizione degli eventi

Sviluppi recenti nelle applicazioni di misurazione intelligente hanno portato alla concettualizzazione e alla costruzione di un nuovo tipo di contatore di energia, operando sulla base di principi guidati dagli eventi.

I concetti di misurazione basati sugli eventi sono applicati per rappresentare l'informazione sui modelli di carico elettrico, che hanno un valore integrale.

Migliorare l'efficienza di comunicazione dei dati monitorati degli eventi di power quality è un compito chiave da eseguire.

Il contatore basa il suo funzionamento sul rilevamento di eventi specifici e la definizione di azioni che devono essere eseguite al verificarsi dell'evento. Le applicazioni corrispondenti si riferiscono ai dati per i quali è importante garantire l'accuratezza, la corretta trasmissione e la rappresentatività del fenomeno o dell'informazione rappresentata.

Ogni grandezza analizzata sarà classificata in *endurant* o *perdurant.* La prima corrisponde ad una quantità istantanea, mentre la seconda è una quantità integrale.

Nel rilevamento EDM quasi tutte le quantità di interesse sono perdurant.

I dati raccolti devono obbedire al requisito chiave di rappresentare la realtà in termini integrali, senza la necessità di riprodurre i dettagli della forma dell'evoluzione della potenza nel tempo. Esiste una differenza sostanziale tra il concetto di campionamento utilizzato nell'elaborazione del segnale e gli obiettivi della misurazione dell'energia [R1]. Mentre il primo ha come scopo quello di rappresentare il contenuto di frequenza del segnale originale, mediante un campionamento sufficientemente veloce, nelle applicazioni di misurazione dell'energia l'obiettivo principale è la riproduzione esatta della quantità integrale associata all'andamento, in quanto la misurazione dell'energia ha la necessità di

mantenere le informazioni sulla precedente evoluzione per evitare di perdere qualsiasi quantità di energia utilizzata all'interno del sistema. Nello specifico, il primo caso ha come obiettivo quello di riprodurre l'esatta forma d'onda adoperando metodi di interpolazione o di approssimazione. Nel secondo caso la misurazione dell'energia è guidata dalla presenza di perdurant che rivelano le loro quantità solo dopo un certo intevallo di tempo. La forma reale dell'andamento di una variabile non è di particolare interesse, mentre potrebbe esserlo, ad esempio, la potenza media di uno specifico intevallo di tempo, ricavata come rapporto tra l'energia consumata in quell'intervallo di tempo e la durata dell'intervallo stesso, ovvero mediante calcoli. La potenza viene così rappresentata graficamente mediante un andamento costante, il cui valore istantaneo non ha un riscontro puntuale, ma è fondamentale per scopi legati al settore energetico, quali la fatturazione o l'analisi dei consumi.

La misurazione dell'elettricità è un processo che misura la quantità di energia elettrica prodotta o consumata durante un certo periodo continuo di tempo. I sistemi automatici di lettura AMR (Automatic Meter Reading) e di gestione dati AMM (Automatic Meter Management) raccolgono e scambiano dati digitali tra dispositivi di misurazione e altre parti coinvolte della rete, elaborandoli automaticamente. Le tipiche applicazioni di misurazione dell'energia vengono eseguite con la misurazione guidata dal temporizzatore (TDM: timer-driven metering), in cui è definito un intervallo di tempo regolare dove misurare i valori di energia. Nella modalità guidata dal timer, l'attuale sfida consiste nel cercare di ottenere informazioni più raffinate riducendo lo step temporale, sviluppando allo stesso tempo soluzioni per comprimere i dati ed evitare di inviare troppi dati ai canali di comunicazione. Inoltre l'attuale sistema di misurazione supporta le procedure di fatturazione, ma non consente di avere il controllo totale delle funzionalità dei processi in atto, in quanto non è in grado di fornire informazioni in tempo reale su ciò che si verifica ai nodi dei sistemi fisici.

Un'altra variabile importante è il riferimento temporale. Esso rappresenta l'istante temporale di riferimento di ciascun evento, espresso in secondi o in minuti, a seconda della scala tempi adoperata.

Una visione diversa per trattare i dati derivanti dalla misurazione dei modelli di flusso dell'energia elettrica sfrutta il concetto di misurazione guidata dagli eventi (EDM), basato sul riconoscere eventi specifici, che si verificano nel modello di consumo dell'energia, che modificano il precedente andamento della evoluzione del consumo, trasmettendo l'energia risultante tra questi eventi.

Il paradigma EDM potrebbe costituire una possibile soluzione per uno dei punti deboli delle applicazioni relative all'Industria 4.0, ovvero la raccolta dati, necessaria sia per la gestione dell'energia che per il monitoraggio della qualità.

I principi di base per la rappresentazione degli eventi sono i seguenti:

Definizione di un intervallo di tempo elementare τ: esso corrisponde al passo temporale con cui vengono calcolati i valori di energia all'interno del contatore. E' da notare che l'intervallo di tempo elementare non è il tempo di campionamento delle grandezze all'interno del contatore, ma è il passo temporale minimo con cui vengono forniti i valori di uscita. Tutto ciò che avviene all'interno di un intervallo di tempo elementare non può essere identificato e qualsiasi quantità al suo interno viene rappresentata come una quantità costante, generando una rappresentazione a gradini del diagramma di carico. Utilizzare la potenza media riferita al passo temporale elementare implica l'impossibilità di registrare valori di potenza istantanea al suo interno. L'approccio TDM genera un flusso di informazioni a passi temporali regolari, discreti e costanti.

Data la variabile x_k, pari alla quantità misurata e l'istante temporale t_k associato ai dati relativi alla misura, si ha che:

$$x_k = x([t_k - \tau, t_k])$$

Equazione 2.1 Generica quantità misurata con approccio TDM.

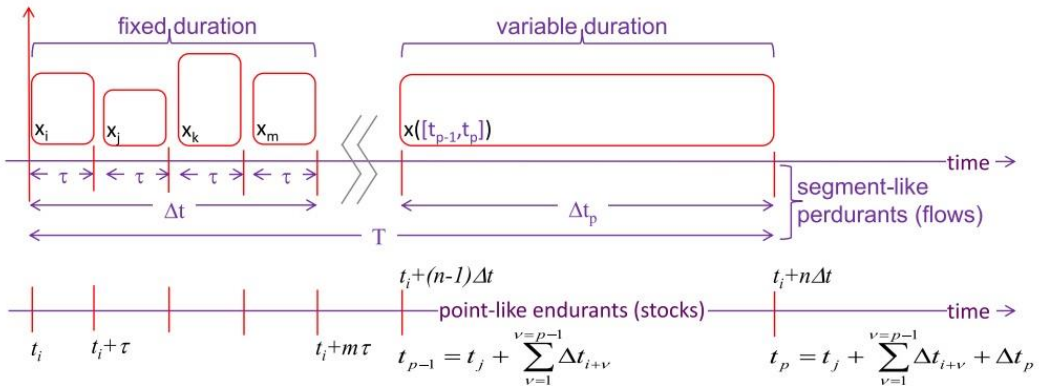


Figura 2.1 Definizione degli intervalli di tempo con approccio TDM e con approccio EDM. Fonte: M. Simonov, G. Chicco, G. Zanetto.

La Figura 2.1 rappresenta la differenza tra gli intervalli di tempo relativi all'utilizzo di un approccio di tipo TDM e quelli relativi all'utilizzo di un approccio di tipo EDM. Nel caso TDM gli intervalli sono distanziati uniformemente, ovvero:

$$\Delta t_{i+1} = \Delta t$$

Equazione 2.2 Passi regolari TDM

Nel caso EDM il processo di misurazione genera una sequenza di termini non equamente distanziati. L'informazione è rappresentata non più da una singola variabile, ma da una coppia di grandezze relative agli istanti di tempo adiacenti t_{j-1} e t_j. La durata è pari a:

$$\Delta t_j = t_j - t_{j-1}$$

Equazione 2.3 Durata dell'intervallo temporale relativo all'approccio EDM

Essa è un multiplo di τ, ma la sua estensione dipende dalla evoluzione del diagramma di carico nel tempo. La successione ordinata di tali informazioni viene in seguito comunicata in modo tale da poter risalire alle caratteristiche del processo.

Change-and-transmit: tale principio è basato sul fatto che per la maggior parte delle volte le variazioni di potenza media sono relativamente basse, in modo che

possa essere sufficiente trasmettere l'informazione solo quando si verifica un evento di grandi dimensioni. Tale metodo è stato proposto da Li et al. [R2], in seguito ad un esperimento finalizzato ad ottenere la corrente circolante nel cavo principale di una casa, alimentato a 100 V. I valori di corrente sono stati registrati ogni 500 ms, con un passo di 0.1 A. Li et al osservarono che, per la maggior parte del tempo, il consumo rimane costante e che pertanto può essere necessario trasmettere informazioni soltanto in caso di un cambiamento significativo delle grandezze monitorate, cambiamento definito come un evento dato dalla differenza di due misurazioni successive superiore ad una determinata soglia. Per questo scopo, una soglia δ_1 è impostata sulla variazione della potenza media tra due successivi passaggi temporali elementari, e viene rilevato un evento quando questa variazione supera la soglia δ_1. Al verificarsi di un evento, l'energia accumulata dall'evento precedente all'evento attualmente rilevato viene trasmessa (Figura 2.2).

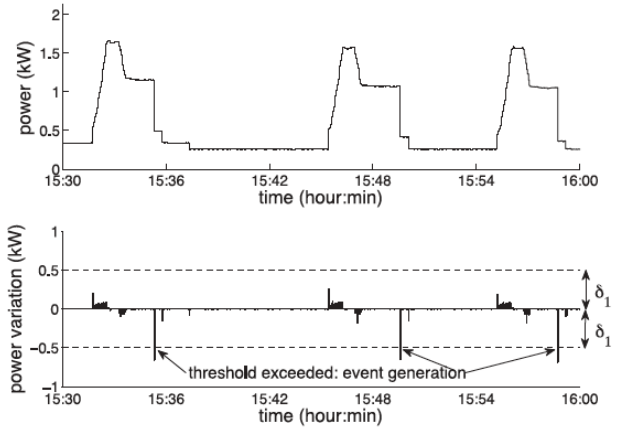


Figura 2.2 Applicazione Change-and-transmit con δ_1=0,5 kW.

Fonte: M. Simonov, G. Chicco, G. Zanetto [R2].

Send-on-delta: tale principio è basato sull'energia accumulata durante il funzionamento del sistema in analisi. Una soglia δ_E è impostata sulla variazione dell'energia accumulata ed è applicata all'evoluzione del modello per identificare l'istante temporale in cui viene superata la soglia (Figura 2.3). Il principio send-on-delta concettualmente non richiede la definizione di un intervallo temporale

elementare, in quanto la variazione di energia viene considerata lineare durante ogni intervallo di tempo di analisi e l'interpolazione viene eseguita all'interno dell'intervallo di tempo in cui la soglia è stata superata. Se l'intervallo di tempo elementare è stato definito gli eventi saranno generati soltanto per multipli dell'intervallo di tempo elementare. In questo caso, occorrerà decidere se l'elemento corrisponde al passo temporale precedente o successivo al raggiungimento della soglia sull'energia accumulata. Nelle applicazioni per i sensori, lo schema di segnalazione di tipo send-on-delta determina un evento quando la quantità monitorata cambia più di una specificata soglia rispetto al valore identificato per l'ultimo evento. La comunicazione degli eventi avviene pertanto in istanti di tempo variabili, che non possono essere stabiliti a priori come invece avviene nell'approccio tradizionale TDM.

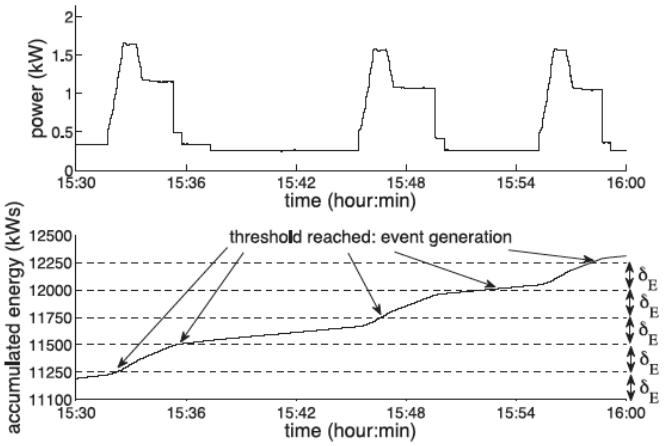


Figura 2.3 Applicazione Send-on-Delta con δ_E=250 kW. Fonte: M. Simonov, G. Chicco, G. Zanetto [R2].

Schema EDM combinato a doppia soglia: La soglia δ_1 ha lo stesso significato dello schema Change-and-transmit. La soglia aggiuntiva δ_2 considerata non si basa sull'energia accumulata, ma sulla variazione di energia accumulata. In questo modo, è possibile stabilire una tendenza attesa di evoluzione del modello, all'interno della quale nessun evento viene rilevato, mentre un evento viene generato ogni volta che il valore ottenuto cade all'esterno della tendenza attesa (Figura 2.4).

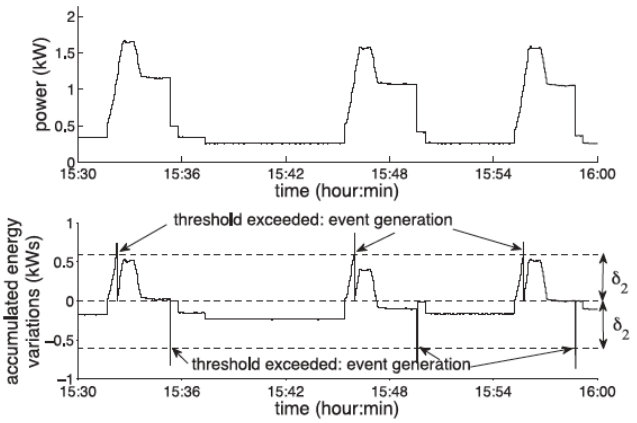


Figura 2.4 Applicazione Schema EDM combinato a doppia soglia con δ_1=0.5 kW e δ_2=0.6 kWs.

Fonte: M. Simonov, G. Chicco, G. Zanetto [R2].

In seguito alla scelta dell'approccio da operare per il monitoraggio dei dati, la misurazione dell'energia guidata dagli eventi offre la possibilità di utilizzare due tipi diversi di criteri durante l'iterazione di calcolo [R4]:

- Criterio *stateless*: come suggerito dalla denominazione stessa che letteralmente significa "senza stato", la scelta di tale criterio comporta l'utilizzazione immediata dei dati a disposizione, con conseguente invio dei risultati all'unità centrale, senza il mantenimento di alcuna memoria degli stessi. Ciò succede ad esempio quando la potenza media, che si riferisce ad un intervallo di tempo elementare, viene confrontata con la potenza media dell'intervallo elementare precedente per verificare se la differenza tra questi valori supera una determinata soglia. Se la soglia viene superata, viene generato un evento, altrimenti il risultato viene ignorato.
- Criterio *stateful*: in questo caso l'invio dei risultati all'unità centrale non avviene in un preciso momento, ma dipende dal verificarsi di una o più condizioni che coinvolgono un certo numero di dati, dei quali si è mantenuta nel tempo una certa memoria. Tale criterio viene impiegato quando è necessario un monitoraggio continuo dello stato di un sistema, ad esempio

per verificare quando i valori di energia, riferiti ad un certo numero di intervalli di tempo elementari, superano o meno una determinata soglia definita dall'utente, con conseguente generazione dell'evento.

Un'altra variabile molto importante per la codifica delle informazioni è il tasso degli eventi, indicato solitamente con la sigla RoE (*Rate of Events*). Come precedentemente detto, i contatori ad eventi generano un traffico dati irregolare. Il RoE offre la possibilità di quantificare mediante un numero la densità dell'occorrenza di tali eventi. In base al numero di occorrenze degli eventi è, infatti, possibile stabilire la variabilità o la volatilità di un processo. Un RoE pressochè costante può essere espressione di un comportamento invariato del sistema, che continua a mantenere le condizioni operative precedenti, mentre un aumento dello stesso potrebbe essere espressione di un cambiamento nel processo o di eventuali problematiche relative al corretto funzionamento. La finestra temporale all'interno della quale viene effettuato il conteggio degli eventi e quindi del relativo RoE è a discrezione dell'utente. A lungo termine la sequenza dei valori del RoE diventa una mappa degli eventi MoE (Map of Events). In campo industriale il RoE potrebbe essere usato per confrontare tra di loro gli eventi avvenuti in diversi periodi di tempo e in diversi sistemi fisici.

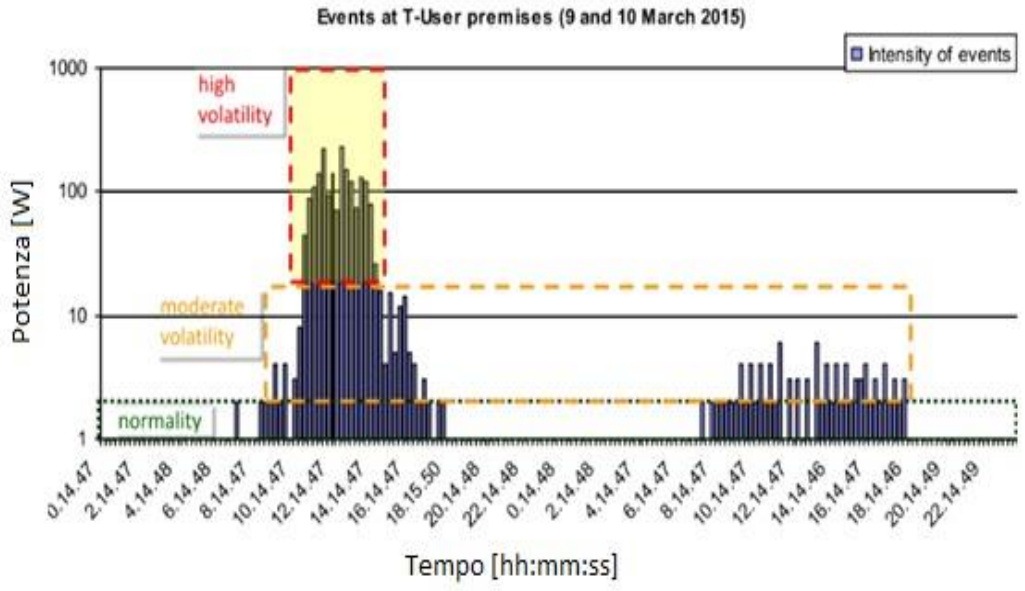


Figura 2.5 Tasso degli eventi per un impianto fotovoltaico di piccole dimensioni [R4].

L’esempio in Figura 2.5 mostra un esempio reale, relativo ad un impianto fotovoltaico, dove è possibile notare che il processo è affetto da una elevata volatilità nel periodo di tempo che intercorre tra gli istanti temporali pari a 10:14:47 e a 16:14:47, coincidente con il periodo di tempo generalmente con maggiore radiazione solare.

Un nuovo tipo di contatore basato sui concetti EDM è stato prodotto di recente. Questo misuratore di energia multifunzionale è stato progettato per misurare e registrare quantità elettriche su linee elettriche trifase. Integra il modulo GSM / GPRS, l'interfaccia Ethernet 10/100 BaseT e la porta locale di comunicazione RS232 / 485.

Grazie alla disponibilità di protocolli standard basati sui protocolli classici TCP/IP, questo dispositivo si adatta alle reti di ampie aree complesse e semplici applicazioni indipendenti dove è necessario uno strumento di misurazione affidabile e preciso per monitorare e registrare il consumo di energia.

Il dispositivo EDM può essere utilizzato per profilare i carichi, per eseguire analisi della fatturazione e contribuire alla valutazione di domanda-risposta ed efficienza energetica. Offre un’accuratezza di Classe 1 per l'energia attiva e l’accesso remoto da Web attraverso un comune programma di navigazione in rete. Il dispositivo EDM è compatibile con Modbus Protocolli RTU e Modbus su TCP.

Un vantaggio significativo dell'utilizzo dell'approccio EDM è la possibilità di identificare i periodi con le attività più significative nel modello in analisi.

Una volta definito l'intervallo di tempo, il tasso di eventi è rappresentato in forma di istogramma nella mappa degli eventi. Esso è di interesse per scopi predittivi, ad esempio per cercare di anticipare il comportamento del modello nel prossimo futuro sulla base della recente evoluzione degli eventi o per rilevare anomalie nel caso in cui si verifica un'intensificazione degli eventi in un modello che rappresenta un processo che concettualmente dovrebbe evolvere in modo regolare.

La Figura 2.6 mostra la mappa di eventi per l'intera giornata, da cui è chiaro che l'attività di produzione si basa su un processo regolare per tutto il giorno, con alcune variazioni in alcuni quarti d'ora.

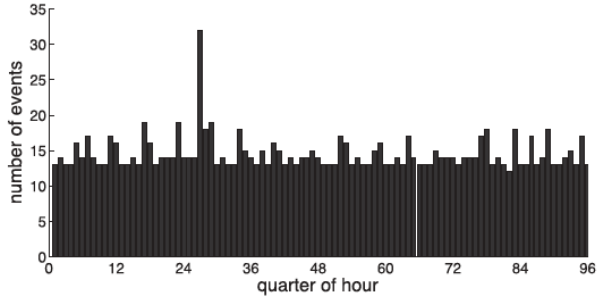


Figura 2.6 - Istogramma tasso di eventi. Fonte: M. Simonov, G. Chicco, G. Zanetto [R2].

Il misuratore di energia basato sull'evento è, pertanto, un dispositivo originale utilizzato per migliorare la rappresentatività dei dati misurati riducendo il numero di dati da trattare.

Il misuratore internamente "conosce" l'evoluzione della potenza media dopo l'ultimo timestamp (data e ora) comunicato ed è anche in grado di stimare la tendenza prevista che si verificherebbe se non accadesse alcun evento, aggiornando internamente la potenza media in ciascuna fase temporale elementare, quasi in tempo reale. Questa conoscenza può essere utilizzata per interfacciare il contatore con unità locali, ad esempio, esso può essere associato a sistemi di protezione, e sviluppare conoscenze anticipatorie per assistere la previsione e la *demand response*.

La capacità di elaborazione locale rende il misuratore basato sugli eventi, che si comporta come un'unità in tempo reale in grado di fornire servizi specifici, in linea con il paradigma della rete intelligente (*smart grid*).

Nei sistemi di controllo ibridi usati in diversi campi, quali ad esempio i processi di fabbricazione, la gestione del traffico aereo, il controllo di un motore o di un sistema

robotico attraverso sistemi automatici integrati, gli eventi possono essere utilizzati come meccanismi di innesco.

Nello schema EDM è possibile evidenziare le variazioni di energia accumulata sia per processi lenti sia per processi veloci.

I risultati dell'EDM sono facili da gestire allo scopo di ricostruire il diagramma di carico con un alto livello di dettaglio, in particolare attraverso le variazioni veloci, che sono facili da riconoscere nel modello di potenza, si possono evidenziare casi in cui si eccede la potenza massima prevista. Questa informazione è anche significativamente rilevante per acquisire una migliore conoscenza dell'evoluzione del carico, con lo scopo di identificare possibili strategie per lo spostamento del carico e la partecipazione attiva.

L'elaborazione locale può includere l'applicazione parallela di diverse coppie di soglie, per riconoscere diverse caratteristiche dei processi. Più in generale, le soglie potrebbero anche essere impostate in modo dinamico, ad esempio, stimate in base a un limite al numero di eventi trasmessi in un dato tempo di osservazione. È importante notare che in termini energetici qualsiasi scelta delle soglie è valida, come anche il modo in cui le informazioni vengono codificate garantisce che nessun dato sull'energia associata al processo possa essere perso.

2.2. La contabilizzazione analitica dell'energia basata sulla generazione di eventi

2.1.1 Gestione dei dati e metrica di riferimento

Molti degli approcci basati sull'osservazione si basano su dati raccolti con cadenza regolare, adoperando specifici timer, tale tecnica prende infatti il nome di tecnica TDM (Timer Driven Meter). Tale tecnica però non sempre riesce a fornire delle ricostruzioni appropriate dei processi monitorati, pertanto l'ultimo decennio è stato protagonista dello svilupparsi di nuovi modelli di gestione dati, in quanto le problematiche nelle quali è possibile incorrere, specialmente in un contesto industriale, sono diverse e non trascurabili [R3].

Per prima cosa i dati relativi all'energia non sempre sono disponibili e l'uso diretto dei dati raccolti durante un processo di produzione, risulta alquanto complicato, a causa delle diverse unità di misura delle variabili in esame e di una non indifferente presenza di rumore che interferisce con la qualità del segnale.

La gestione dati consiste nella creazione di software, basati su regole logiche precedentemente predefinite, in grado di analizzare i dati memorizzati in un periodo di tempo stabilito.

In un contesto industriale la rappresentazione dei dettagli di un processo di fabbricazione Π_m (in cui $m \in \mathcal{M}$ è l'indice del processo nell'insieme $\mathcal{M}$ dei processi svolti) ottenuto mediante un campionamento rapido dei dati che produce $\Pi_m(t)$. La frequenza di campionamento è variabile e può andare dal semplice Hz fino all'ordine dei kHz. Tale approccio viene definito in accordo al teorema del campionamento di Nyquist-Shannon della teoria dei segnali secondo il quale la frequenza di campionamento f_s minima, necessaria per ricostruire un segnale senza perdere informazioni, deve essere pari almeno al doppio della frequenza massima $f_{\max}$ contenuta nel segnale.

Pertanto assegnato un qualsiasi segnale analogico $s(t)$ esso può essere ricostruito se e solo se: $f_s > 2f_{\max}$.

Nel contesto Industry 4.0 l'EDM precedentemente discusso, ha permesso la definizione di un nuovo tipo di approccio per la contabilità analitica dell'energia Esso offre la possibilità di ottenere infomazioni, non soltanto sulla quantità di energia, ma anche sugli accumuli nel tempo di ciascuna grandezza determinante per il processo. Una struttura dati ordinata permette inoltre di associare constantemente le quantità richieste dal mercato con il piano di produzione, in modo tale da avere una maggiore consapevolezza delle modalità di variazione delle materie prime impiegate in un determinato processo produttivo. La creazione di uno storico dei dati permetterà inoltre agli enti predisposti di analizzare le principali voci di costo e ovviare alle possibili discrepanze tra l'andamento registrato e l'andamento atteso.

Il nuovo approccio per la contabilità analitica dell'energia (Analytical Energy Accounting= AEA) parte dalla definizione di una struttura metrica di riferimento comune. La prima grandezza definita consiste nell'intervallo di tempo t_I, ovvero il più breve intervallo di tempo elementare corrispondente alla presenza di informazioni riguardanti l'energia, ad esempio ad un prezzo invariato u_p, all'interno del contatore. L'intervallo di tempo t_I è definito inoltre come un multiplo del periodo alla frequenza industriale considerando un numero intero $k > 0$:

$$t_I = kT$$

Equazione 2.4 Intervallo di tempo elementare

Per rappresentare le variazioni che si verificano in un processo di produzione reale Π_m il valore numerico di t_I non può essere troppo piccolo, a causa del conseguente aumento di rumore. Un valore tipico è pari ad un secondo.

La durata dell'intervallo temporale elementare viene presa come riferimento dagli operatori per rilevare un cambiamento nel valore delle grandezze analizzate. Fino a quando il processo accumula costantemente un valore nel tempo vengono calcolati i valori attesi successivi adoperando lo stesso, senza la trasmissione di ulteriori informazioni.

Lo schema di riferimento R_m associato al processo Π_m è considerato come la sequenza dei costi energetici affrontati da un processo reale partendo dalla scala temporale dei secondi. L'analogo digitale $R_m\ (t_I)$ rappresenta così un indicatore della realtà.

Ogni cambiamento inaspettato nel valore associato a un processo di produzione Π_m che si muove tra diversi Livelli di Domanda (DL) o di Quantità Domandate (QD), viene rilevato grazie alla definizione di appropriate soglie per la rilevazione degli eventi. Esse possono essere fisse o possono seguire un meccanismo di definizione adattivo.

Una prima soglia δ_1 controlla la variazione della media mobile di un flusso di denaro che si verifica all'interno di due fasi temporali elementari successive. La logica di questa soglia consiste nel rilevare bruschi salti tra i livelli di domanda.

Una seconda soglia δ_2 controlla se l'evoluzione dell'energia accumulata in un orizzonte temporale più ampio abbia subito variazioni rispetto ad un altro livello dell'arco di tempo della struttura. La logica di questa soglia è di consentire il rilevamento di eventi da modelli che variano progressivamente nel tempo al di fuori della tendenza di variazione attesa.

La tendenza attesa è codificata dalle soglie δ_1 e δ_2, la cui definizione spetta agli operatori atti al controllo delle richieste di domanda energetica, oppure può essere effettuata mediante l'impiego di statistiche sul modello energetico della applicazione industriale specifica.

Un evento viene generato ogni volta che il modello ricade al di fuori della tendenza prevista e la relativa tendenza emergente dalla generazione dell'evento è presa come riferimento per l'evoluzione futura.

Le esigenze di Industria 4.0 richiedono che le quantità di energia siano convertite in una sequenza ordinata di attività $\{A_1, \dots, A_S, \dots\}$ del processo di produzione Π_m, richiedenti una determinata energia $E^{(A)}$ modulata nel tempo $t^{(A)}$ secondo una ben specificata regola. Ad esempio un'attività protrebbe consumare energia a

determinati livelli costanti $P^{(A)}$di lavoro / potenza o potrebbe consumare energia secondo incrementi costanti: $\{E^{(A)}{}_1$, ..., $E^{(A)}{}_{k+1} = E^{(A)}{}_1 + k\Delta\mathrm{E}$, ...$\}$.

Una successione di energie istantanee senza stato $E\ (t_j)$ viene così sostituita da una struttura ordinata e con memoria del passato.

Nel caso in cui l'obiettivo fosse esclusivamente quello di essere conformi agli attuali standard normativi secondo i quali è necessario effettuare delle registrazioni dei dati dell'energia con cadenza temporale regolare, l'approccio EDM potrebbe essere sostituito dal più semplice approccio TDM, registrando all'interno della struttura dati l'eventuale cambio nello schema di codifica. Di fatto, nell'approccio TDM gli eventi sono generati a cadenza regolare, indipendentemente dall'evoluzione dei consumi, un contatore ad eventi è quindi totalmente compatibile con la classica logica TDM.

Altre variabili registrate nella struttura dati sono le seguenti:

- *Il tempo di utilizzo* ξ_j (anche noto in inglese come ToU: Time of Use, espresso in unità di tempo) dell'importo di energia E_j che corrisponde al periodo di tempo effettivo trascorso tra due eventi successivi verificatesi tra l'istante di tempo attuale t_i e l'istante di tempo successivo t_j.
- *La quantità di energia accumulata* $AoE^{(\xi)}{}_k$ definita in una scala temporale ξ, la cui origine coincide con l'istante in cui il contatore viene installato e termina con il valore più alto del ToU registrato nell'istante precedente.
- *La quantità di energia accumulata* $AoE^{(t)}{}_k$ definita in una scala temporale t, la cui origine coincide con l'istante in cui il contatore viene installato e termina con l'intervallo di tempo elementare attualmente in corso t_I.
- *La quantità di energia ad intervalli* $E^{(k)}{}_t$
- *L'identificatore di generazione evento*, codificato per rappresentare tutte le $2^3 = 8$ possibili combinazioni che possono essere trovate considerando che le soglie potrebbero essere state raggiunte o sul lato positivo o sul lato negativo rispetto alla tendenza attesa, e che le soglie δ_1 e δ_2 possano anche intervenire contemporaneamente.

- *La potenza media* calcolata considerando l'energia tra l'istante precedente in cui si è verificato l'evento e l'istante attuale.
- Sulla base dei risultati, si possono poi calcolare alcuni indicatori tra cui la distanza euclidea d_E, l'errore medio MAE (Mean Average Error) e l'errore assoluto percentuale WAPE (Weighted Absolute Percentage Error), necessari per valutare la differenza tra il modello riprodotto sulla scala tempi t rispetto al modello di riferimento. Per condurre questo tipo di calcolo è necessario avere a disposizione anche i dati riferiti all'intervallo di tempo elementare.

2.2.2 Differenza tra approccio TDM ed EDM

Il bisogno fondamentale nelle applicazioni di Industria 4.0 è quello di ricavare un andamento dei Quantitativi richiesti (QD) per cui un'azienda paga, in quanto tali cifre sono associate all'efficienza energetica e all'indice di redditività.

Se si considera l'utilizzo di un approccio TDM, con cadenza temporale pari a 15 minuti, il risultato che si ottiene è quello riportato nella Figura 2.7.

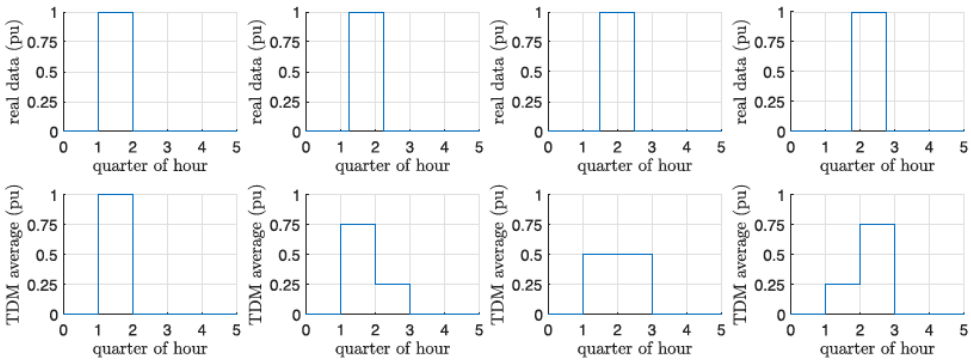


Figura 2.7 Andamento di un processo con approccio TDM a 15 min. di ampiezza pari ad 1 pu [R3].

La Figura 2.7 mostra un esempio di modello di processo di ampiezza pari ad una unità (in pu), di durata esattamente uguale a T_{TDM}. Il caso più favorevole che potrebbe verificarsi per il TDM è riportato nel primo subplot: in questo caso il processo inizia esattamente all'inizio del periodo di tempo TDM e si conclude

esattamente alla fine del periodo di tempo di tempo TDM, con ampiezza pari a quella del processo.

È così possibile ricostruire il modello esattamente sulla base dell'uscita TDM. Gli altri subplot indicano lo stesso processo traslato nel tempo rispettivamente di $\frac{T_{TDM}}{4}$, $\frac{T_{TDM}}{2}$ e $\frac{3T_{TDM}}{4}$ rispetto al periodo TDM. In questi casi, l'uscita TDM è diversa da zero per due periodi temporali TDM successivi, in particolare i valori misurati non sono in grado di rappresentare la natura del modello. Infatti, lo stesso modello origina quattro forme diverse nelle corrispondenti rappresentazioni. In conclusione è possibile dire che il TDM non è sincronizzato con i modelli del processo, e non è in grado di rappresentare la natura e la forma del modello in modo appropriato.

Il problema è la regolarità di acquisizione dell'energia da misurare, che non può essere utilizzata per rappresentare il processo in modo appropriato. In tutti i precedenti casi, il nuovo approccio definito sarebbe stato in grado di fornire l'esatta rappresentazione del modello misurato, identificando solo due eventi, a condizione che la soglia impostata sull'ampiezza fosse inferiore alla variazione che si verifica nell'andamento. L'impostazione delle soglie può essere personalizzata in base alle caratteristiche del processo. Sequenze ripetute di eventi possono fornire suggerimenti sulla regolarità dei processi e possono essere confrontate con l'attività programmata al fine di identificare possibili discrepanze. La regolarità del processo può anche essere confermata calcolando il tasso di eventi che rientrano in determinati perdurant di tempo (ad esempio definito a intervalli di tempo regolari). Un cambiamento inaspettato nel tasso degli eventi potrebbe attivare un avvertimento sulla corretta esecuzione del processo.

In Figura 2.8 è possibile osservare un esempio illustrativo tratto da dati reali, campionati in un periodo di tempo pari a 30 minuti. I dati sono i valori della potenza media (espressi in pu, rispetto alla potenza base di 6 kW) raccolti con fase temporale elementare di 1 s, per un totale di 1800 valori. Il subplot della Figura 2.8 mostra i risultati dell'applicazione TDM con un passo temporale relativamente breve di 15 s, per un totale di 120 valori e dell'applicazione dell'approccio EDM, con soglie $\delta_1 = \frac{1}{2}\ pu$ e $\delta_2 = \frac{1}{6} pu \cdot s$ con un totale di 109 valori. Sebbene il numero totale di

valori prodotti da TDM ed EDM sia simile, è facilmente comprensibile dalla figura che l'approccio EDM abbia la capacità di rappresentare i dettagli del processo in un modo significativamente superiore.

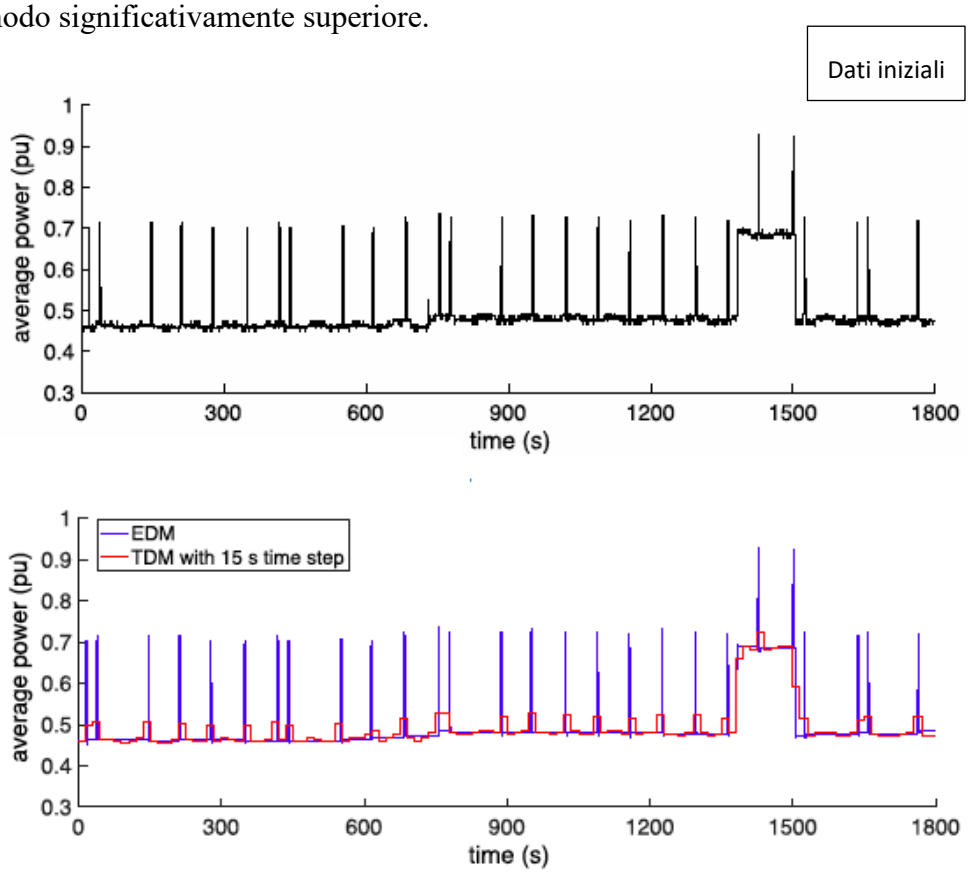


Figura 2.8 Confronto tra una ricostruzione effettuata con approccio EDM ed approccio TDM [R3].

3. Strumento di misura

Tale capitolo ha lo scopo di descrivere lo strumento di misura adoperato per effettuare dei test su alcuni elettrodomestici.

Lo strumento scelto è il Wattmetro CLM1000 Professional (Plus) prodotto dalla Christ Eletktronik, visionabile nella Figura 3.1:

Figura 3.1 Wattmetro CLM1000 Professional (plus). Fonte: Manuale Christ Eletktronik

3.1. Caratteristiche tecniche del dispositivo di misura

Il Wattmetro CLM1000 Professional Plus permette di misurare le seguenti grandezze:

- Potenza attiva istantanea [W]
- Potenza massima e Potenza minina [W]
- Potenza apparente istantanea [VA]
- Potenza reattiva istantanea [var]
- Tensione [V]
- Tensione massima e Tensione minima [V]
- Corrente [A]
- Corrente massima e corrente minima [A]
- Fattore di Potenza
- Tipo di carico analizzato [R,L,C]
- Energia consumata [kWh]
- Energia apparente [kVAh]
- Energia reattiva [kvarh]
- Istante di campionamento [hh:mm]
- Tasso di tempo di superamento di una certa soglia impostata [%]
- Tempo di superamento della soglia [hh:mm]

La Tabella 3.1 ha lo scopo di identificare la risoluzione e i rispettivi intervalli di definizione di ognuna delle grandezze sovraelencate.

Tabella 3.1 Intervalli di definizione e risoluzione delle grandezze.

Grandezza	Intervallo di definizione	Risoluzione
Potenza attiva	0.0 – 4224 W	0.1 W /1 W
Potenza apparente	0.0 – 4224 VA	0.1 VA/ 1 VA
Potenza reattiva	0.0 – 4224 var	0.1 var /1 var
Tensione	100.0 – 264.0 V	0.1 V
Corrente	0.000 – 16.00 A	0.001 A / 0.01 A
Energia attiva	0.0000 – 99999.99 kWh	0.0001 – 0.01 kWh
Energia apparente	0.0000 – 99999.99 kVAh	0.0001 – 0.01 kVAh
Energia reattiva	0.0000 – 99999.99 kvarh	0.0001 – 0.01 kvarh
Tempo	00:00 – 9999:59 h	1 minuto
Fattore di Potenza	0.000 – 1.000	0.001

È possibile impostare tre livelli di prestazione del dispositivo, scegliendo i valori limiti delle soglie in base al carico analizzato. Il raggiungimento di uno di tali livelli sarà facilmente visibile mediante il cambiamento di colore del display dello strumento, in seguito all'attivazione della modalità `Var.Color` nel menù principale.

3.2. Modalità di posa

Il collegamento tra l'utilizzatore e lo strumento è assicurata tramite l'utilizzo di una presa Schuko. Quando è inserita nella presa, la spina Schuko copre la cavità, evitando che possano essere toccati accidentalmente gli spinotti della presa stessa e stabilisce prima il contatto di terra, grazie alle mollette laterali e successivamente i contatti di fase e neutro.

Questi ultimi due contatti sono quelli effettivi che permettono il passaggio di corrente, hanno un diametro di 4.8 mm, sono lunghi 19 mm e sono distanti tra loro 19 mm. Questo connettore è usato per collegare carichi fino a 16 A in circuiti in corrente alternata a 220 V e 50 Hz. Sono considerate prese molto sicure. La presa Shuko si è imposta come modello standardizzato in buona parte dell'Europa continentale, soprattutto da quando viene adottata sia dai piccoli che dai grandi costruttori di elettrodomestici.

Dopo aver effettuato il collegamento presa-spina (Figura 3.2):

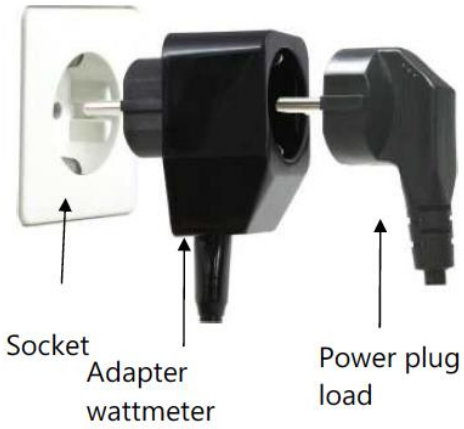


Figura 3.2 Presa Shuko. Fonte: Manuale Christ Eletktronik

sarà possibile, scorrendo tra le varie pagine, visualizzare tutti i parametri misurabili dallo strumento.

Tenendo pigiate entrambe le frecce sullo strumento sarà possibile invece accedere al menu principale.

La raccolta dati è possibile soltanto attivando la modalità `Log Data` all'interno della sezione *`Set Data Log`*, in questo modo lo strumento conserverà i dati misurati nella memoria interna. Lo spazio di archiviazione disponibile dipende dalla velocità di archiviazione scelta. Ad esempio selezionando un tempo di campionamento pari ad un secondo sarà possibile raccogliere dati soltanto per 24 ore, se invece si sceglierà un tempo di campionamento pari a 5 secondi sarà possibile raccogliere dati per 5 giorni, e così via. Tutto ciò è dovuto al fatto che la memoria interna dello strumento è limitata, inoltre essendo limitata anche la velocità di trasmissione dati dello strumento di misura, nello specifico dai 9600 Baud ai 115200 Baud, la trasmissione dalla memoria dati interna al computer potrebbe richiedere alcuni minuti.

3.3. Software ed elaborazione dati

Se il driver è già installato, il computer lo identificherà durante la connessione e il CLM1000 verrà indicato tra i dispositivi USB come porta seriale USB (COM 22), altrimenti è possibile scaricare i driver corrispondenti al proprio sistema operativo[S11].

Per trasferire i dati da CLM1000 al computer è necessario disporre di un programma specifico, come ad esempio HTerm, un programma open source facilmente scaricabile da internet.

I dati memorizzati possono essere trasmessi collegando lo strumento, tramite un semplice cavo usb, al computer, utilizzando l'interfaccia HTerm, una interfaccia molto semplice e intuitiva.

La voce `Connect` presente in alto a sinistra dell'interfaccia permetterà una connessione immediata dello strumento al computer, ma i dati saranno disponibili

per l'invio soltando dopo aver attivato la modalità `Send Data` dalla sezione `Set Data Log` dello strumento.

E' possibile salvare tutti i dati in diversi formati, ma l'estenzione consigliata è ".csv", essa infatti rende molto semplice il trasferimento dei dati su una cartella di lavoro di Microsoft Excel, indispensabile per un successiva importazione dei dati sul software Matlab.

Una volta avviato il sofware Microsoft Excel, sarà sufficiente creare una nuova cartella di lavoro e nella finestra "Dati", selezionare la voce "Da testo", in modo tale da importare il proprio file con estenzione .csv. Nella procedura successiva le opzioni da spuntare saranno:

- Per la voce "Tipo di file che meglio si adatta ai dati", l'opzione "Delimitato".
- Per la voce "Delimitatori", l'opzione "Punto e virgola".
- Per la voce "Formato dati per colonna", l'opzione "Generale".

Una volta terminata tale procedura, la cartella di lavoro Excel sarà immediatamente disponibile e i dati, comodamente suddivisi su colonne diverse, utilizzabili.

4. Prove su elettrodomestici con approccio Change and transmit

L'obiettivo di questo capitolo è quello di emulare il funzionamento di un event driven meter, basandosi sui dati di diversi elettrodomestici, misurati attraverso il Wattmetro CLM1000 Professional (Plus).

Impostata una determinata base tempi, il cui valor minimo corriponde alla sensibilità dello strumento adoperato, è stato analizzato il funzionamento dell'elettrodomestico in questione in un periodo completo. In seguito a tale processo di osservazione è stato possibile elaborare un algoritmo in grado di emulare il funzionamento di un event driven meter con le relative soglie. In questo modo è stato possibile diminuire la quantità di dati elaborati, che diminuiscono all'aumentare del valore numerico scelto come soglia. Infatti all'aumentare di questo, il numero di eventi rilevati diminuisce, permettendo comunque una ricostruzione ottimale del profilo di carico.

La scelta della base tempi è pertanto fortemente legata alle esigenze e agli obiettivi prefissati. Essa può così coincidere con un valore numerico pari ad un secondo, se il periodo di osservazione è stato relativamente breve, come ad esempio nel primo caso analizzato, coincidente con il funzionamento giornaliero di un frigorifero. Oppure può essere pari al minuto, ad esempio se il periodo di osservazione dei dati è pari ad un mese. I dati possono così essere raggruppati anche per intervalli di 10 minuti o 15 minuti, seguendo le esigenze della descrizione dei processi che riguardano i consumi.

L'obiettivo principale è quindi quello di far notare quanto ci si guadagna da una rappresentazione di tipo event-driven rispetto ad una rappresentazione timer-driven.

Una volta definita la logica di elaborazione e definito il periodo di monitoraggio vedremo come ricostruire il segnale partendo da un numero di informazioni, la cui entità dipenderà dalla soglia impostata per il nostro contatori ad eventi simulato.

Potremo notare come in realtà tale logica si sposi meglio in un contesto industriale, piuttosto che casalingo, in quanto gli elettrodomestici sono affetti da forti oscillazioni, a differenza delle macchine industriali le quali non sono generalmente affette da forti oscillazioni istantanee. Tali oscillazioni rendono infatti difficile l'impostazione di soglie adatte ad una ricostruzione ottimale del profilo.

In ogni caso l'impostazione delle soglie sarà sempre *case-dependent*, pertanto in seguito alla memorizzazione di un elevato numero di cicli di carico, sarà possibile determinare in modo statistico la soglia più adatta per l'emissione di eventi.

Se ad esempio all'interno di una catena produttiva si guastasse un componente di una delle macchine produttive, avendo a disposizione un *pattern* statistico consolidato utilizzabile come riferimento, dall'istante in cui l'andamento delle grandezze osservate fuoriesce dal riferimento è possibile notare il malfunzionamento. Tutto ciò non sarebbe possibile con una misurazione di tipo tradizionale, in quanto essa non è in grado di percepire le variazioni che avvengono nelle curve di carico che descrivono i processi di consumo.

4.1. Caso Frigorifero

La prima analisi dati è stata effettuata su un frigorifero Samsung, modello RT59QBSL, con classe di efficienza energetica A+.

I dati afferenti all'elettrodomestico sono stati prelevati mediante l'utilizzo del Wattmetro CLM1000 ed essi consistono in:

- Data
- Ora
- Timestamp riportato in secondi
- Potenza attiva [P]
- Potenza apparente [S]
- Potenza reattiva [Q]
- Tensione
- Corrente
- Fattore di potenza [$\cos\theta$]
- Energia attiva
- Energia apparente
- Energia reattiva
- Tipologia di carico

Successivamente le rispettive unità di misura e i rispettivi valori numerici sono stati riportati su un foglio di elaborazione dati Excel, in modo tale da poter essere implementati facilmente sulla piattaforma Matlab.

La Figura 4.1 presente nella pagina successiva mostra i primi dieci dati raccolti e la relativa struttura del foglio di calcolo.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Data	Ora	Tempo	P	S	Q	Tensione	Corrente	cos(θ)	Energia attiva	Energia apparente	Energia reattiva	Tipo di carico
2	[gg/mm/aa]	[h:m:s]	[s]	[W]	[VA]	[var]	[V]	[A]	[num]	[kWh]	[kVAh]	[kvarh]	R,L,C=0,1,2
3	08/04/18	11:49:08	42548,00	1,5	9,7	9,6	231,8	0,042	0,158	0,0001	0,0002	0,0001	2
4	08/04/18	11:50:08	42608,00	1,7	9,8	9,7	230,4	0,043	0,175	0,0002	0,0004	0,0002	2
5	08/04/18	11:51:08	42668,00	1,5	9,7	9,5	232	0,042	0,16	0,0002	0,0005	0,0004	2
6	08/04/18	11:52:08	42728,00	1,5	9,5	9,4	229,9	0,042	0,158	0,0002	0,0007	0,0006	2
7	08/04/18	11:53:08	42788,00	1,5	9,6	9,5	230,3	0,042	0,159	0,0002	0,0008	0,0007	2
8	08/04/18	11:54:08	42848,00	1,5	9,6	9,5	230,3	0,042	0,156	0,0003	0,001	0,0009	2
9	08/04/18	11:55:08	42908,00	1,5	9,4	9,3	228,5	0,041	0,159	0,0003	0,0012	0,001	2
10	08/04/18	11:56:08	42968,00	53,5	94,5	77,9	229,5	0,412	0,566	0,0004	0,0015	0,0013	2
11	08/04/18	11:57:08	43028,00	53,4	94,9	78,5	228,5	0,415	0,562	0,0013	0,0031	0,0026	2
12	08/04/18	11:58:08	43088,00	61,3	105,8	86,2	230,9	0,458	0,579	0,0022	0,0046	0,0039	2
13	08/04/18	11:59:08	43148,00	91,1	149,3	118,3	230,1	0,649	0,61	0,0035	0,0069	0,0057	2

Figura 4.1 Dati Frigorifero Samsung

Il funzionamento di tale elettrodomestico è stato osservato per un periodo di tempo di due ore e quindici minuti, con una base tempi pari ad un minuto, in modo da non rendere troppo oneroso il caricamento dei dati su Matlab e poter effettuare rapidamente una verifica del funzionamento dell'algoritmo.

Tale casistica è stata adoperata per la creazione della logica Change and transmit.

L'evento è generato nel momento in cui la variazione della potenza, intesa come la differenza di due valori di potenza consecutivi, supera un determinato valore, corrispondente alla soglia scelta $\delta_{change_and_transmit}$.

Gli elementi cardine dell'algoritmo saranno pertanto due vettori, uno costituito da tutti i valori di potenza relativi al periodo di analisi e il rispettivo vettore degli istanti di tempo in cui tali valori di potenza occorrono.

Riportato in formule, l'evento si verificherà, quindi, se e solo se il modulo della variazione di potenza sarà maggiore o uguale a $\delta_{change_and_transmit}$:

$$|P_i - P_{i-1}| \geq \delta_{change_and_transmit}$$

Equazione 4.1 Generazione evento change and transmit

Definendo con l'indice k il numero totale di dati raccolti, nel nostro caso:

$$1 \leq k \leq 166$$

Equazione 4.2 Numero di dati per il frigorifero

P_i: rappresenta il vettore delle potenze escluso il primo valore, avrà pertanto dimensione pari a $(k-1)$.

P_{i-1}: rappresenta il vettore delle potenze escluso il k-esimo elemento, ovvero l'ultimo, avrà pertanto dimensione pari a $(k-1)$.

Non sempre è semplice scegliere un valore ottimale come soglia. Il metodo adoperato in questo specifico caso è stato quello di osservare, una volta effettuato il caricamento dati, il profilo di potenza, riportato nel Grafico 4.1 e confrontarlo con il massimo valore ed il minimo valore relativo al vettore contenente tutti i valori di potenza.

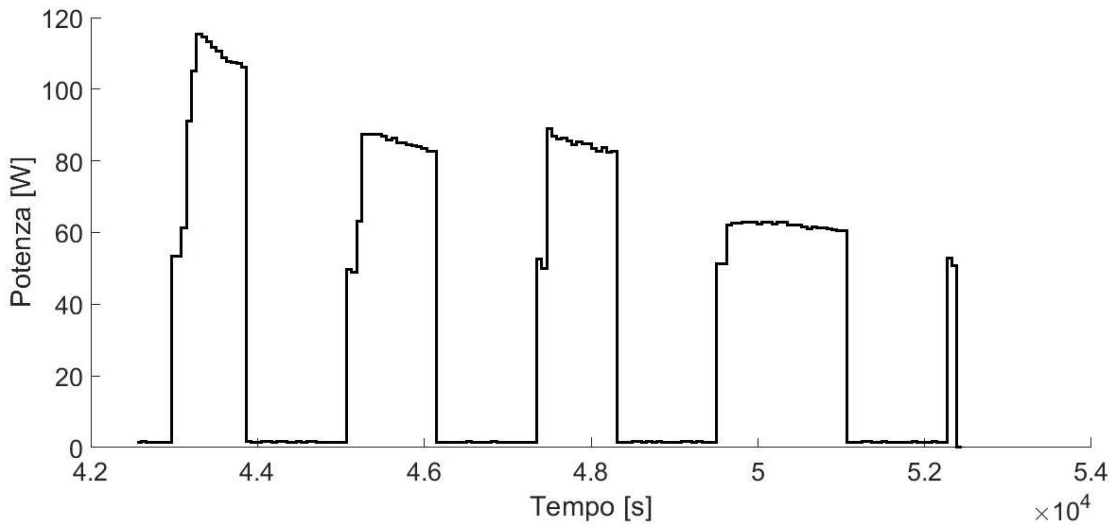


Grafico 4.1 Profilo di potenza frigorifero Samsung.

In un primo momento è stato così assegnato un valore pari a 60 W alla soglia $\delta_{change_and_transmit}$.

Gli eventi si verificheranno pertanto in specifici istanti di tempo, denominati *tempi_eventi* all'interno del codice e la differenza tra due valori adiacenti di tale grandezza è pari alla durata dell'evento stesso.

Una volta identificata la soglia e l'istante di tempo esatto in cui essa viene superata, il metodo prevede il calcolo di tutti i valori di energia corrispondenti all'istante precedente al verificarsi di un evento. Per farlo è sufficiente effettuare una somma cumulativa di tutti i valori di energia che precedono il verificarsi di un evento. Per tale finalità è stata utilizzata la funzione *find* di Matlab, la quale non fa altro che indicare l'indice k corrispondente al verificarsi dell'evento, così da poter definire facilmente tra quali intervalli dell'indice è necessario sommare i valori relativi all'energia e alle durate.

Nella Figura 4.2 si riporta il workspace relativo alla soglia $\delta_{change_and_transmit}$ pari a 60 W.

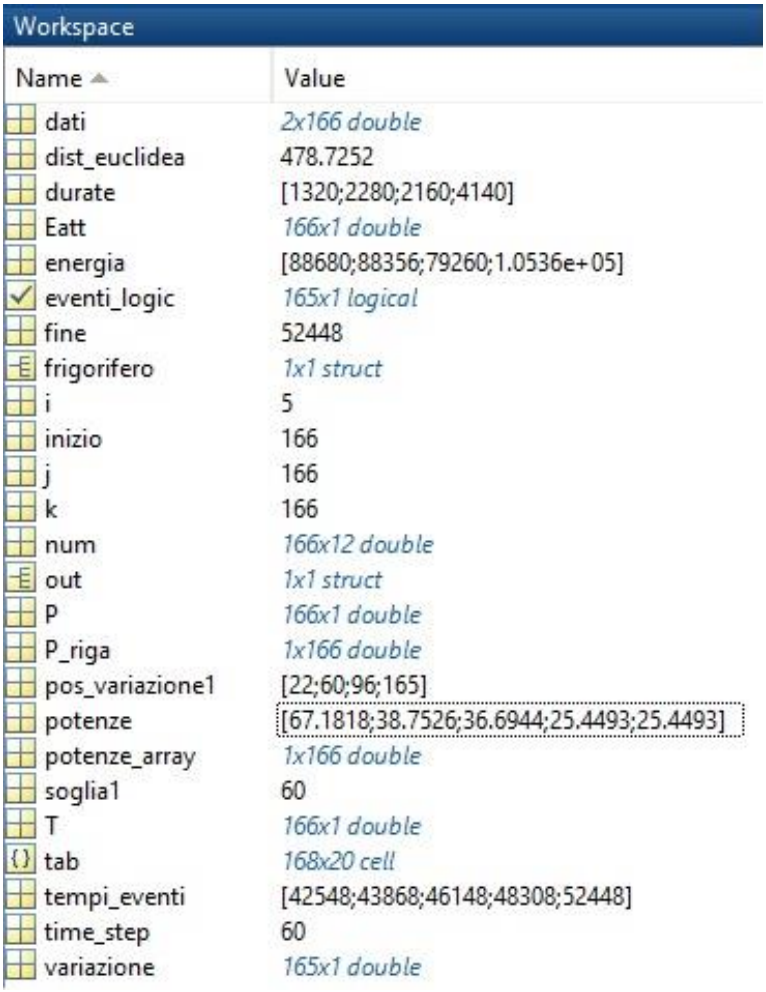


Figura 4.2 Workspace Frigorifero con soglia pari a 60 W.

Osservando la grandezza *pos_variazione1*, che indica l'indice *k* relativo al verificarsi dell'evento, è possibile determinare quanti eventi si siano verificati e, sebbene possa sembrare che essi siano quattro, in realtà sono soltanto tre, in quanto l'ultimo valore afferente all'istante di tempo finale del periodo di analisi viene riportato semplicemente per una migliore visualizzazione grafica del pattern, esso rappresenta una sorta di evento fittizio.

Una delle grandezze più importanti presenti in Figura 4.2 è la grandezza *potenze*, tale vettore è infatti costituito dai valori medi di potenza compresi tra un evento e il successivo. È attraverso questi valori che è possibile creare una ricostruzione del profilo di carico della potenza del frigorifero con solo quattro valori.

L'algoritmo adoperato è stato sintentizzato nel Grafico 4.2, mediante la creazione di un diagramma di flusso.

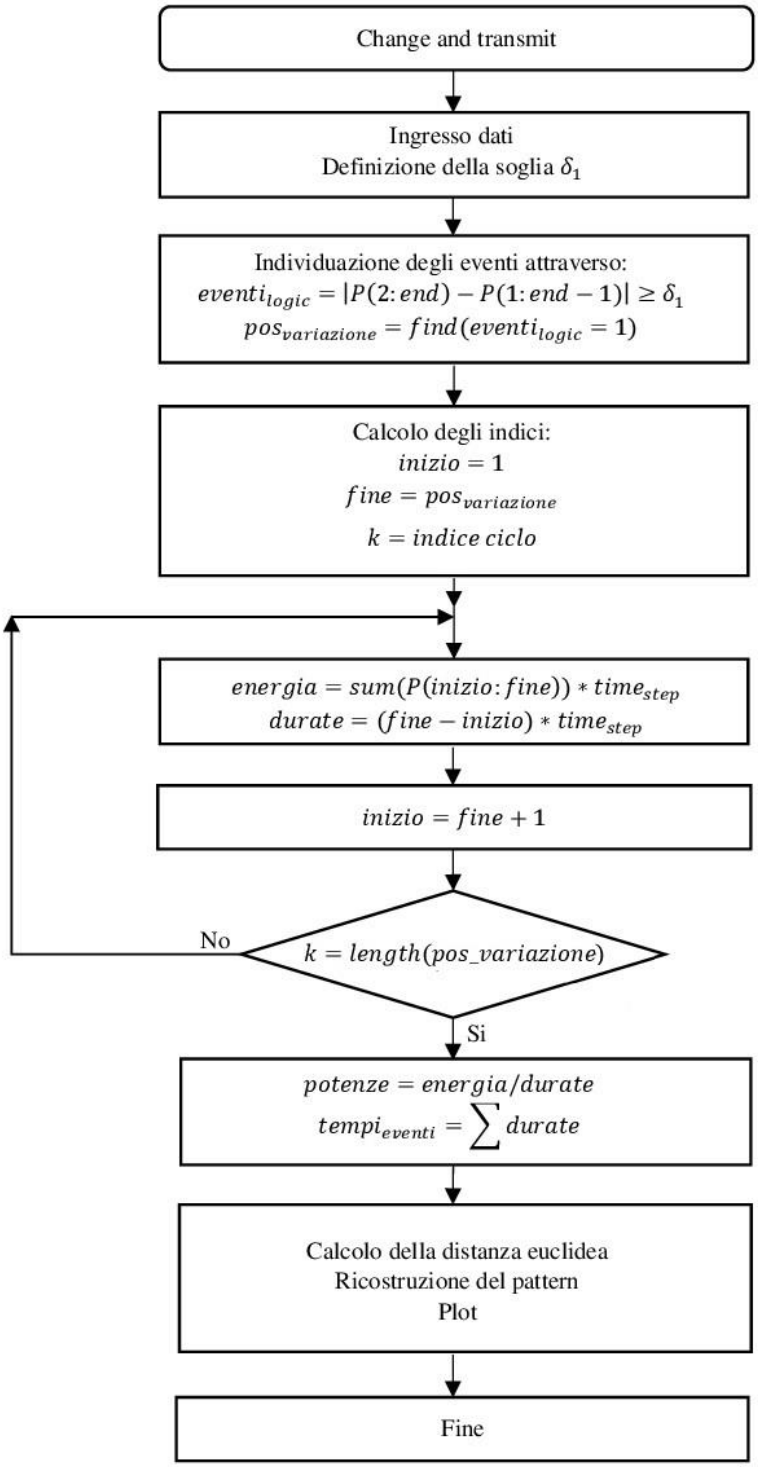


Grafico 4.2 Diagramma di flusso CaT

Il Grafico 4.3 mostra una comparazione tra un profilo di carico ottenuto utilizzando tutti i 166 valori di potenza a disposizione, tracciato in nero e il profilo di carico ottenuto adoperando soltanto quattro valori di potenza relativi a tre eventi, espressione del superamento della prima soglia impostata, tracciato in rosso.

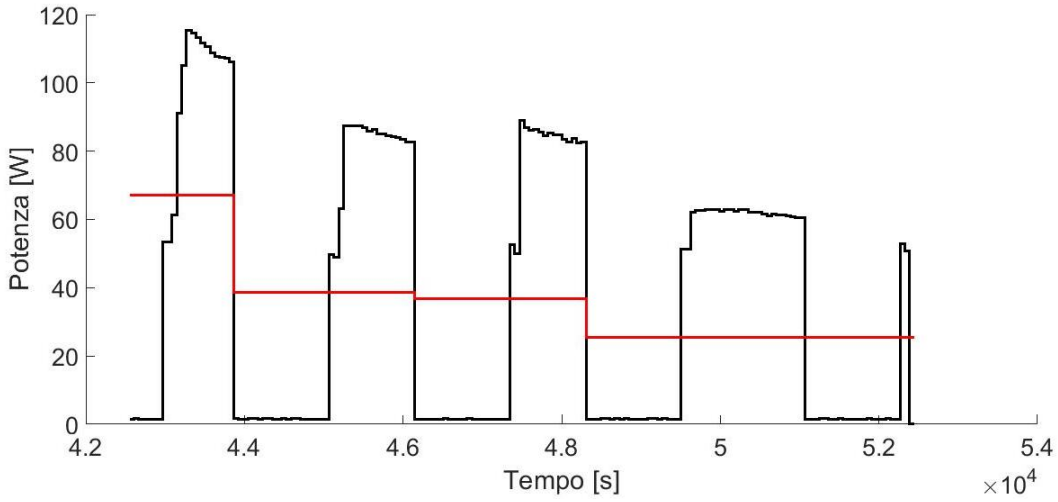


Grafico 4.3 Comparazione profilo di carico TDM ed EDM con soglia pari a 60 W.

È possibile notare come in realtà la ricostruzione in rosso, energeticamente equivalente a quella in nero, è come se stesse considerando soltanto i fronti discendendenti del profilo, in quanto in quel caso la variazione è netta e la soglia viene superata, mentre sui fronti di salita non viene mai superata la soglia.

Per tale motivo, in un secondo momento la soglia $\delta_{change_and_transmit}$ è stata modificata, impostando un valore pari a 40 W.

Nella Figura 4.3 viene riportato il workspace relativo a tale soglia per la visualizzazione dei risultati ottenuti con tale soglia.

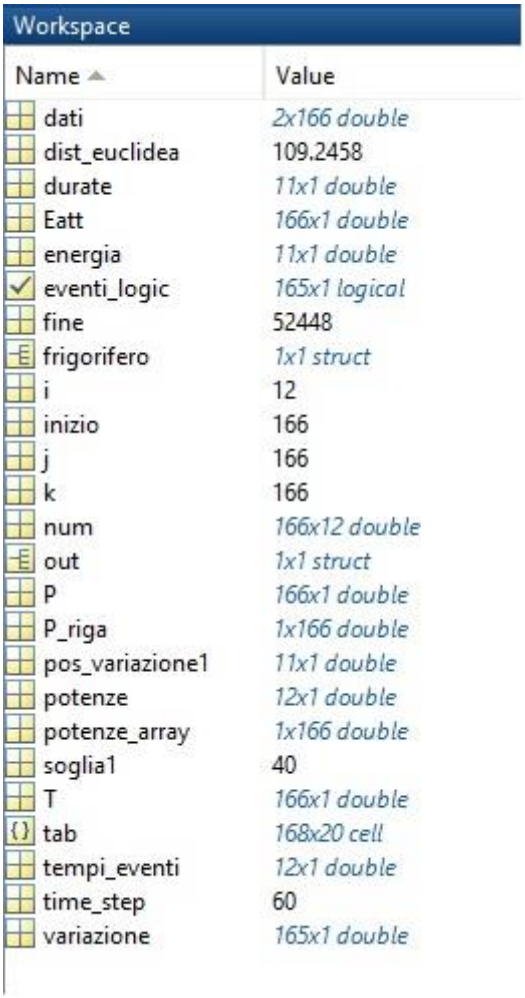


Figura 4.3 Workspace Frigorifero con soglia pari a 40 W.

In tal caso gli eventi registrati sono undici e la ricostruzione finale del profilo di carico risulta essere più accurata, come è possibile notare dal Grafico 4.4.

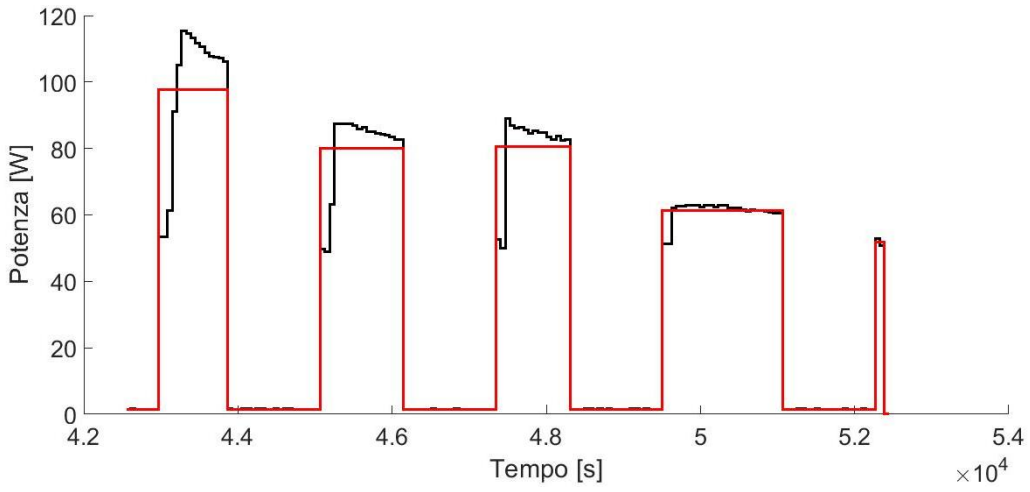


Grafico 4.4 Comparazione profilo di carico TDM ed EDM con soglia pari a 40 W.

Riducendo drasticamente il valore della soglia da 40 W ad 8 W, gli eventi registrati diventano diciotto. La ricostruzione grafica del profilo di carico è riportata nel Grafico 4.5.

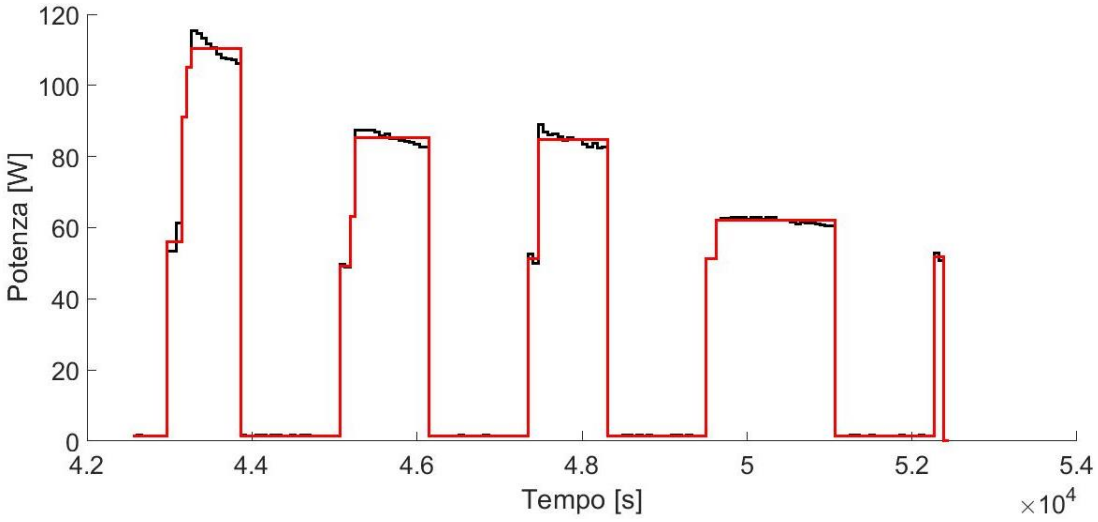


Grafico 4.5 Comparazione profilo di carico TDM ed EDM con soglia pari ad 8 W.

Il Grafico 4.5 rende evidente la potenzialità della ricostruzione dei profili di carico mediante una logica guidata da eventi in quanto, sebbene la soglia impostata nell'ultimo caso sia quasi pari ad un ottavo rispetto alla prima soglia scelta, il

numero di eventi registrati è comunque nettamente inferiore al numero totale di dati a disposizione e con soltanto diciotto valori è possibile ottenere una ricostruzione quasi coincidente con il profilo di carico effettivo riscontrabile impiegando la risoluzione pari all'intervallo di tempo elementare.

4.2. Primo caso lavatrice

Le prove effettuate nei paragrafi seguenti sono state condotte adoperando i concetti largamente spiegati fino ad ora, ma attraverso l'applicazione contemporanea di diverse soglie, in modo tale da poter operare dei confronti in modo diretto ed immediato.

Il primo caso analizzato con tale logica è stato quello di una lavatrice Indesit modello IWB 5065 conforme alle Direttive Comunitarie:

- 89/336/CEE
- 2002/96/CE
- 2006/95/CE

Il funzionamento di tale elettrodomestico è stato osservato per un periodo di tempo pari circa ad un'ora e cinquanta minuti, con una base tempi pari ad un secondo.

In Figura 4.4 è riportato il workspace relativo alla prova effettuata.

I dati in ingresso, utili per l'individuazione degli eventi, sono i valori di potenza registrati mediante l'utilizzo di un Wattmetro, precedentemente proprosto, insieme agli istanti temporali relativi al momento in cui è stata effettuata la misura. Essi sono stati riportati in due vettori, denominati rispettivamente *P* e *T*, costituiti da 6562 elementi ciascuno.

La prova è stata effettuata utilizzando quattro valori di soglia diversi, riportati nella variabile *soglia1*.

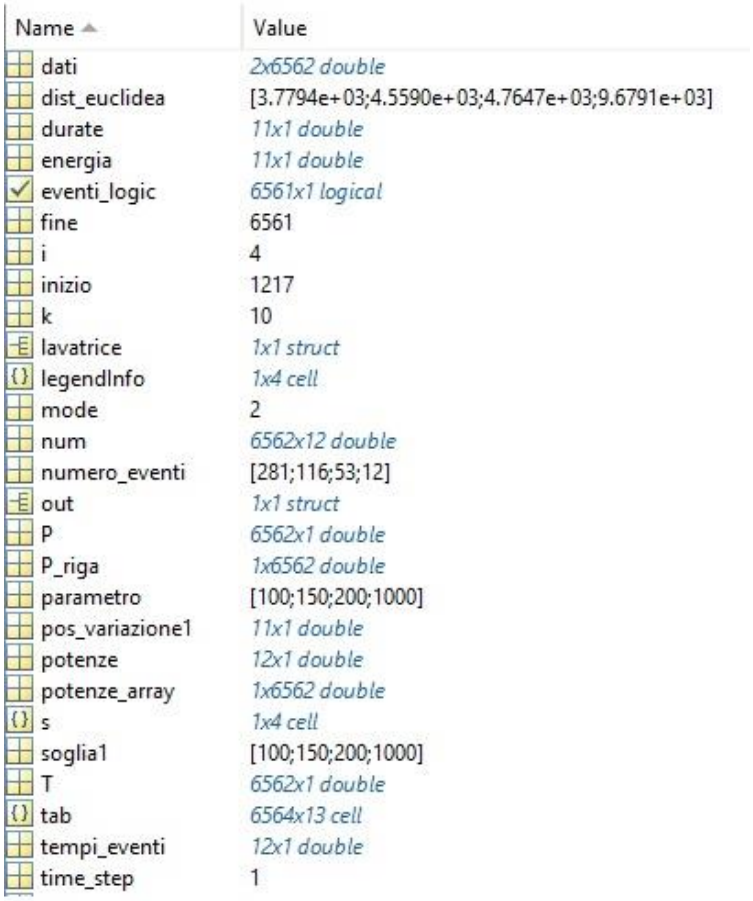


Figura 4.4 Workspace Lavatrice, primo caso lavatrice.

E' facile notare come la variabile *parametro* abbia gli stessi valori della variabile *soglia1*, essi infatti coincidono, in quanto tale algoritmo è stato creato sia per l'individuazione di eventi mediante un approccio di tipo EDM, sia per la ricostruzione mediante approccio TDM, semplicemente cambiando la parte iniziale relativa alle condizioni necessarie per la generazione degli eventi. Tale concetto sarà approfondito successivamente.

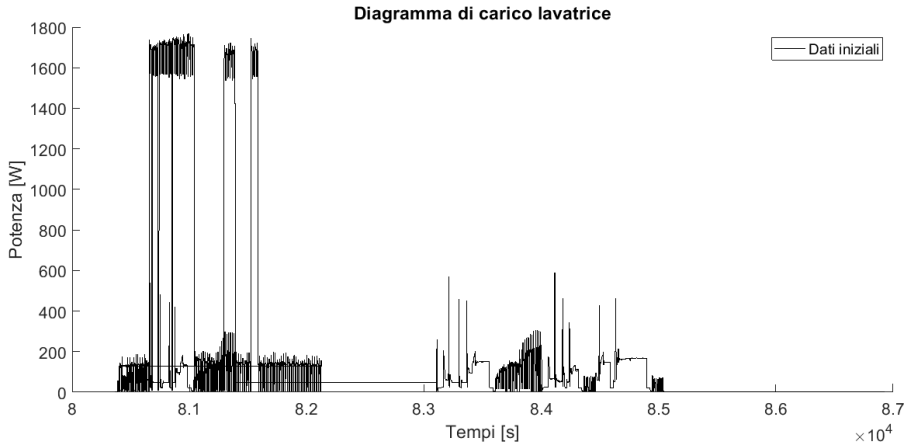


Grafico 4.6 Diagramma di carico lavatrice, primo caso lavatrice.

Nel Grafico 4.6 è possibile osservare il diagramma di carico dell'elettrodomestico analizzato. Esso è caratterizzato da un andamento iniziale affetto da forti oscillazioni di ampiezza pari circa a 1.8 kW, mentre dall'istante temporale uguale a 8300 secondi, l'andamento del carico è affetto da oscillazioni meno marcate, con ampiezza massime di 600 W.

L'osservazione dei dati iniziali è stata necessaria per la scelta delle soglie da adoperare per la ricostruzione dell'andamento del carico, mediante la logica ad eventi con approccio Change and Transmit.

Il Grafico 4.7 mostra la ricostruzione ottenuta per ognuno di tali valori.

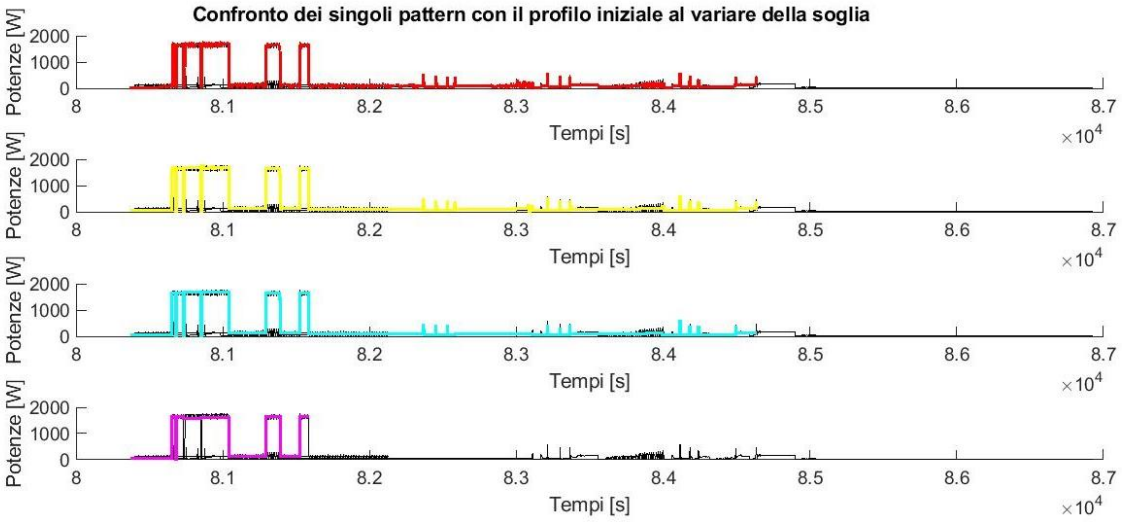


Grafico 4.7 Confronto dei singoli pattern con il profilo iniziale al variare della soglia per una lavatrice, primo caso.

La scelta di una prima soglia pari a 100 W ha come scopo quello di far vedere come con soltanto 281 eventi, valore visionabile in Figura 4.4 alla voce *numero_eventi*, l'approccio EDM riesca non soltanto a ricostruire l'andamento relativo alle forti oscillazioni, ma anche le più piccole variazioni.

All'aumentare della soglia, il numero di eventi diminuisce, così come i dettagli ricostruiti. Concetto facilmente visibile mediante lo zoom offerto nel Grafico 4.8 per tre dei valori della soglia. Una soglia di 100 W consente una ricostruzione quasi del tutto coincidente con l'andamento iniziale, mentre man mano che il suo valore aumenta gli andamenti sono sempre più mediati, in particolare nell'intervallo di tempo compreso tra 83500 s e 84000 s, sia per una soglia pari a 150 W che a 200 W le oscillazioni di potenza sono sostituite con unico valor medio.

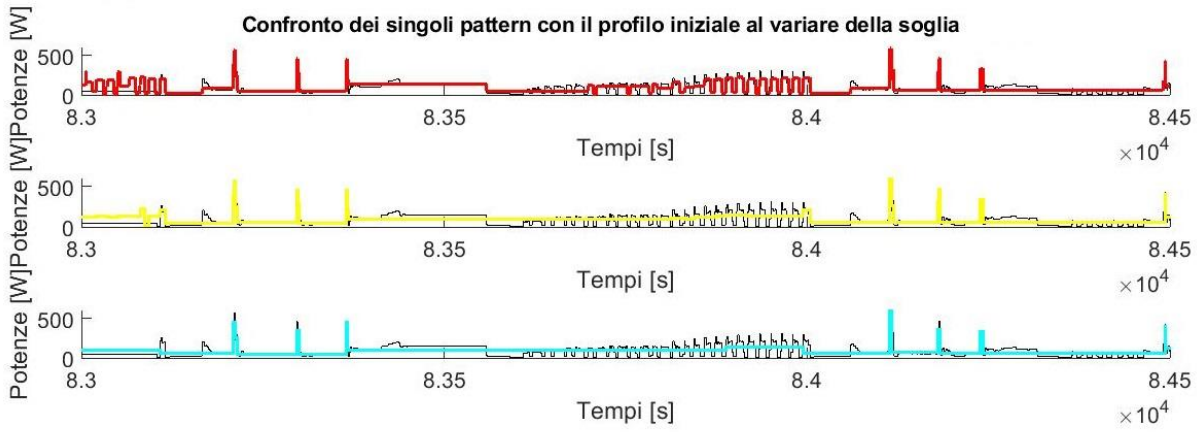


Grafico 4.8 Zoom Grafico 4.7.

Un ulteriore indicatore in grado di fornire un confronto diretto tra il diagramma di carico iniziale e quello ottenuto mediante una ricostruzione di tipo EDM è la distanza euclidea.

Tabella 4.1 Valori della distanza euclidea per ogni valore di soglia, primo caso lavatrice.

Soglia [W]	Distanza euclidea[i]
100	3779
150	4559
200	4764
1000	9679

La Tabella 4.1 mostra come all'aumentare della soglia il valore della distanza euclidea cresca in modo monotono, infatti all'aumentare della soglia gli eventi

[i] I valori sono approssimati.

registrati diminuiscono e quindi anche il numero di punti a disposizione per la ricostruzione del profilo di carico, pertanto la differenza tra l'andamento iniziale e quello ricostruito è sicuramente più ampia, come espresso numericamente dalla distanza euclidea.

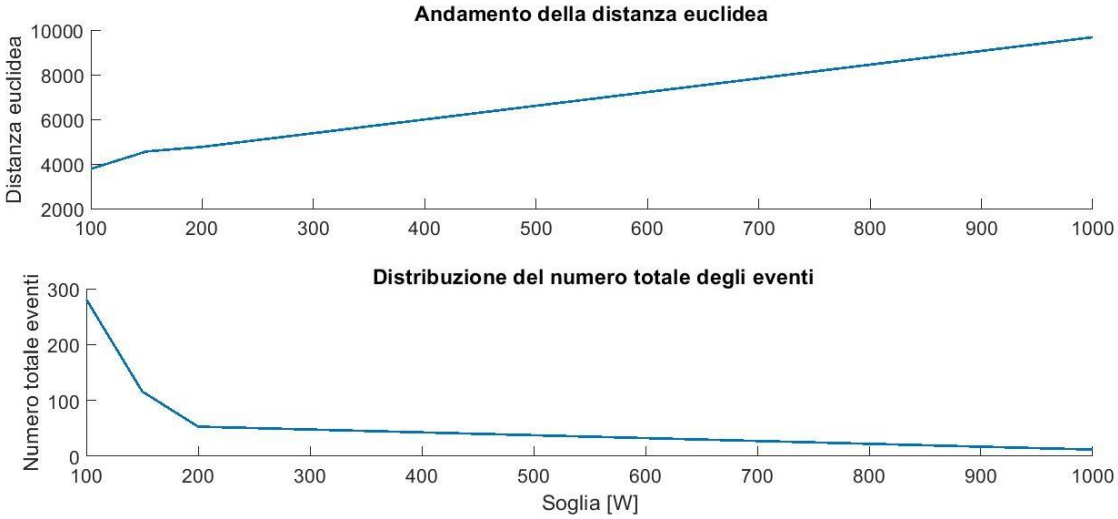


Grafico 4.9 Confronto tra l'andamento della distanza euclidea e quello del numero di eventi verificatesi, primo caso lavatrice.

Un confronto visivo diretto è possibile mediante il Grafico 4.9, in cui sono stati messi a confronto, al variare del valore della soglia, la distanza euclidea e il numero di eventi. E' facile notare come i due esattamente siano perfettamente speculari, mentre il primo ha un andamento monotono crescente, il secondo ha un andamento monotono decrescente.

Un altro grafico molto importante, ai fini di una migliore comprensione dei processi è il Grafico 4.10, nel quale sull'asse delle ascisse sono riportati gli istanti temporali in cui si verificano gli eventi, mentre sull'asse delle ordinate i valori di potenza associati a ciascun evento. Ogni evento è stato così associato ad un impulso di durata pari all'intervallo di tempo elementare e di ampiezza pari alla potenza media. Tale grafico non è altro che una rappresentazione grafica del RoE, variabile per la cui definizione si riporta al Capitolo 2.

Nel primo grafico è possibile notare impulsi associati anche alle piccole variazioni di potenza, mentre all'aumentare della soglia permangono soltanto le informazioni veramente utili per le finalità di analisi dati.

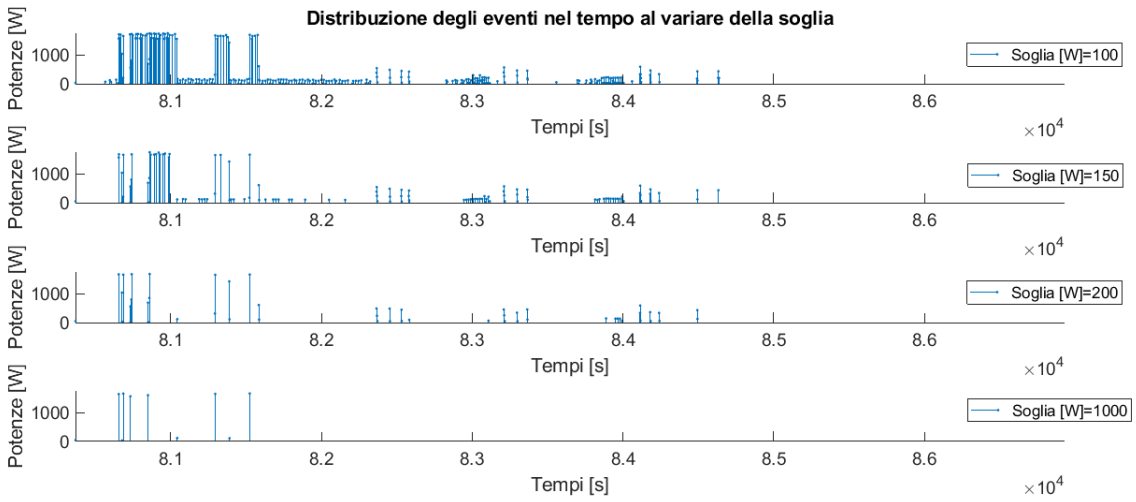


Grafico 4.10 Distribuzione degli eventi nel tempo, primo caso lavatrice.

Il valore massimo di potenza registrato per la prima soglia è stato scelto come valore di riferimento per tutti gli altri grafici, in modo da poter adoperare la stessa scala per tutti i grafici. Nel caso analizzato il processo risulta essere altamente volatile nell'intervallo di tempo che intercorre tra l'istante in cui ha inizio la misurazione fino all'istante di tempo pari a 8200 s.

Si conclude così che adoperando una soglia adeguata è possibile replicare fedelmente il diagramma di carico iniziale. La problematica principale del Change and transmit risiede però nella scelta di una soglia adeguata, in quanto essa deve essere sufficientemente bassa, per poter registrare tutte le variazioni, anche le più piccole. Essa quindi rappresenta l'approccio ideale soltanto nel caso in cui si fosse interessati esclusivamente a cambiamenti nel profilo di carico istantanei e di ampiezza elevata.

4.3. Secondo caso lavatrice

Il periodo di osservazione e la base tempi adoperata per tale prova, coincidono esatttamente con il caso precedente.

Tale prova ha come scopo quello di illustrare come, sebbene l'elettrodomestico sia lo stesso, semplicemente modificando il tipo di operazione richiesto alla lavatrice, il numero di eventi registrati cambia, così come il profilo di carico, sottolineando l'esigenza della delineazione di un metodo in grado di variare non soltanto l'ampiezza delle soglie al variare del macchinario scelto, ma anche dell'operazione richiesta.

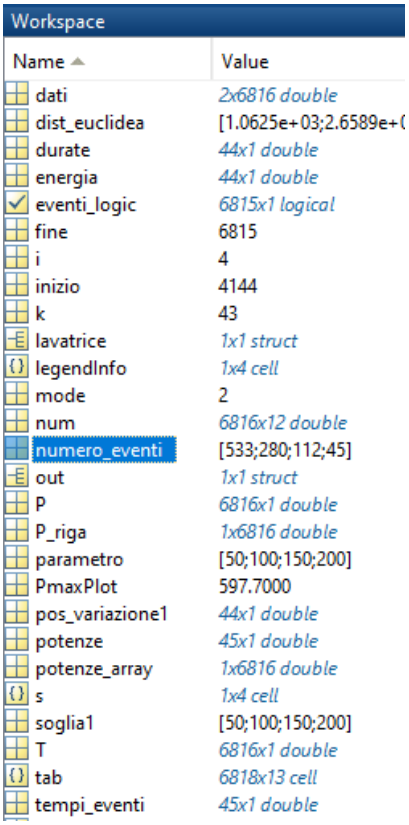


Figura 4.5 Workspace secondo caso lavatrice.

In Figura 4.5 è stata evidenziata la variabile *numero eventi* proprio per far vedere come il numero di eventi, adoperando come prima soglia sempre un valore pari a 100 W, passi da 281 a 533.

Il diagramma di carico relativo alla prova è illustrato nel Grafico 4.11.

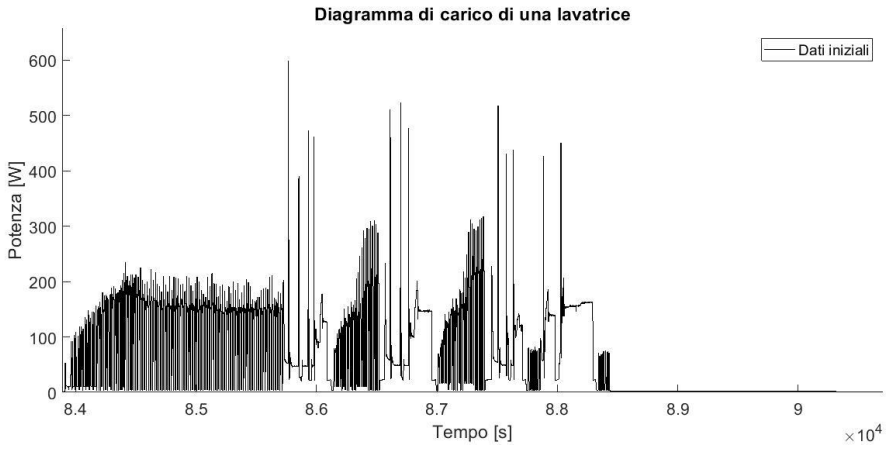


Grafico 4.11 Diagramma di carico iniziale di una lavatrice, secondo caso lavatrice.

Nonostante l'andamento sembri affetto da un numero maggiore di variazioni, in realtà se paragonato al primo caso analizzato i picchi registrati hanno ampiezze decisamente inferiori, il cui livello massimo raggiunge circa i 600W, pertanto sebbene le soglie adoperate in questo caso coincidano con le soglie adoperate per il caso precedente, l'ultimo valore di soglia pari a 1 kW non è stato utilizzato, in quanto comporterebbe la registrazione di un numero di eventi pari a zero dato che, in tale diagramma di carico, non è presente alcuna variazione così elevata.

Il Grafico 4.12 mostra la ricostruzione dei singoli diagrammi al variare della soglia adoperata.

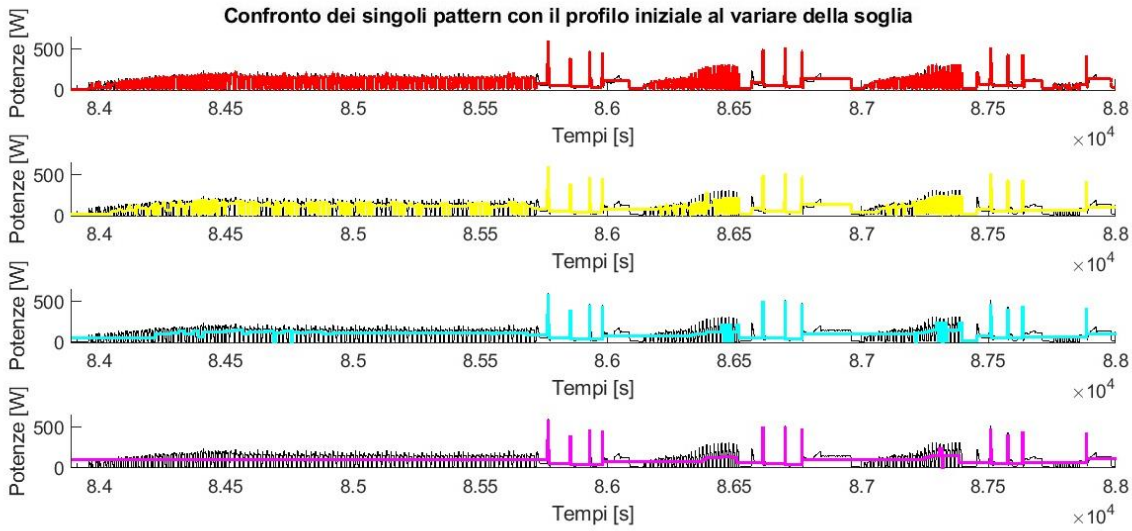


Grafico 4.12 Singoli pattern lavatrice, secondo caso.

Anche in questo caso i dettagli ricostruiti diminuiscono all'aumentare della soglia. In realtà l'infomazione di interesse, sia in questa applicazione domestica, che in una eventuale applicazione del metodo in un contesto industriale, è la rilevazione dei picchi. Informazione che non viene persa in nessuno dei casi presenti nel Grafico 4.12. Pertanto ipotizzando che tale grafico si riferisca ad un processo industriale la soglia giusta da operare per i propri studi in questo caso sarebbe stata l'ultima, in quanto avrebbe permesso di raggiungere il proprio obiettivo, ovvero la rilevazione della variazioni più ampie in termini di ampiezza, adoperando soltanto 45 valori, mentre l'andamento compreso tra l'istante di inizio della rilevazione dei dati e la rilevazione del primo evento, il cui valore numerico è stato evidenziato in Figura 4.6, coinciderebbe con un unico valore di potenza media, facilitando così sia la gestione che l'analisi dati.

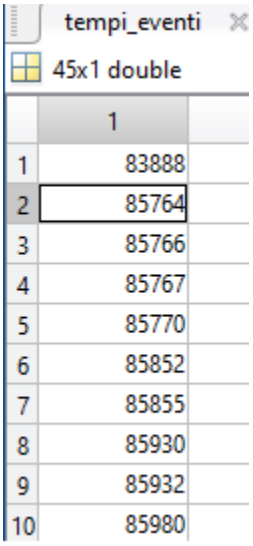


Figura 4.6 Istanti temporali relativi alla generazione di eventi per l'ultimo valore di soglia1

Anche i valori relativi alla distanza euclidea al variare della soglia, riportati nella Tabella 4.2, sono diversi rispetto al caso precedente.

Tabella 4.2 Valori della distanza euclidea per ogni valore di soglia, secondo caso lavatrice

Soglia [W]	Distanza euclidea**
100	1062
150	2659
200	4540
1000	4915

** I valori sono approssimati.

Sebbene i valori siano diversi, l'andamento monotono, crescente per la distanza euclidea e decrescente per il numero di eventi, si mantiene, come è possibile osservare nel Grafico 4.13.

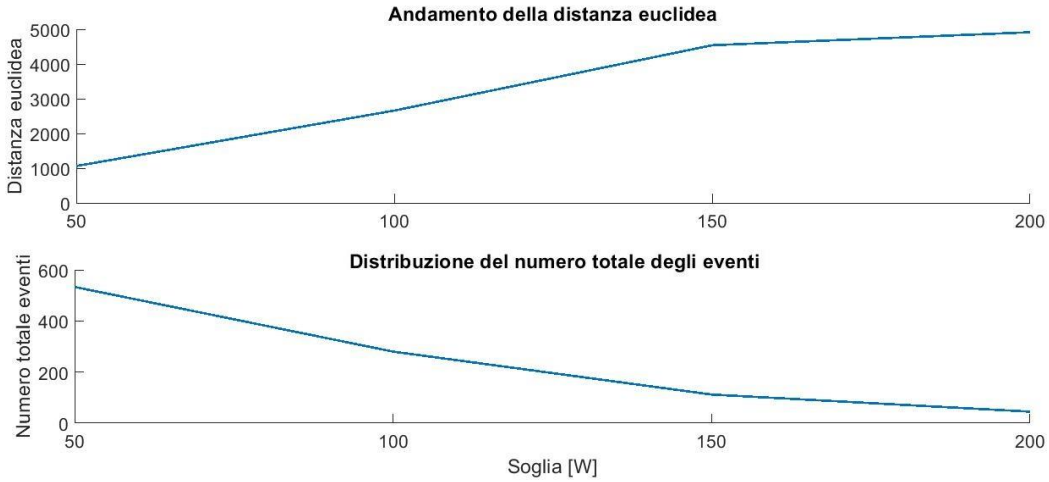


Grafico 4.13 Confronto tra l'andamento della distanza euclidea e quello del numero di eventi verificatesi, secondo caso lavatrice.

Anche in questo caso è importante analizzare il grafico relativo al RoE (Grafico 4.14) per poter capire in quali intervalli di tempo il diagramma di carico è affetto da una maggiore variabilità.

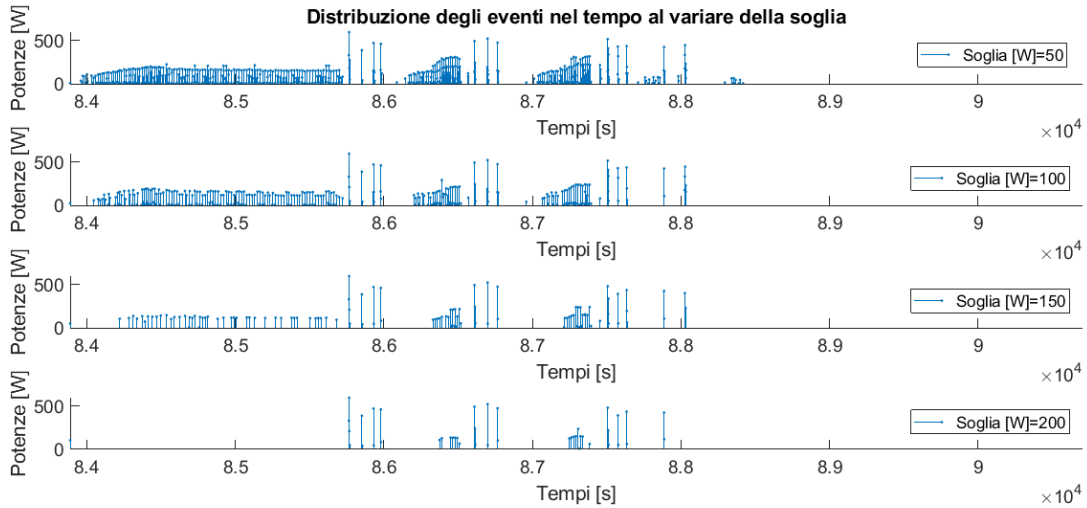


Grafico 4.14 Distribuzione degli eventi nel tempo, secondo caso lavatrice.

Sono presenti due intervalli di tempo in cui il processo risulta sempre particolarmente variabile, indifferentemente rispetto alle soglie applicate ed essi sono:

- L'intervallo di tempo compreso tra 85764 s (istante di tempo facilmente individuabile in quanto coincidente con il primo evento ottenuto dall'applicazione dell'ultima soglia) e 86000 s.
- L'intervallo di tempo compreso tra 87510 s e 87887 s.

5. Prove su elettrodomestici con approccio Send on delta.

Nel capitolo precedente sono stati elencati i risultati ottenuti applicando un approccio di tipo Change and Transmit. Esso è stato implementato come analisi *post-processing*, ovvero l'analisi dati viene effettuata soltanto a posteriori della loro raccolta. In realtà, le variazioni sono disponibili ad ogni intervallo di tempo elementare, per cui il metodo Change and Transmit si presta molto bene ad un'analisi in tempo reale (real-time), inviando i dati per ogni evento subito dopo che l'evento è stato generato.

L'approccio *send on delta* è un approccio di tipo real-time, ovvero i dati sono processati contemporaneamente alla loro raccolta. Da un punto di vista industriale, l'approccio in tempo reale costituisce un grande vantaggio, in quanto in caso di difetti di sistema o variazioni del diagramma di carico eccessive, il produttore può essere informato tempestivamente del malfunzionamento e ovviare al problema.

Una volta definite le variabili in ingresso, ovvero i vettori con i valori di potenza e i relativi istanti temporali in cui è avvenuta la misura, è possibile ricostruire il vettore relativo all'energia attiva, semplicemente moltiplicando il vettore della potenza per il *time step*, cioè la base tempi scelta, che nella maggior parte dei casi analizzati è pari ad un secondo.

Inizializzate le variabili, viene definito l'indice del ciclo, che per questioni didattiche in questo caso è stato scelto pari alla dimensione del vettore relativo all'energia attiva ma, che in un caso di applicazione reale dipenderebbe dalle scelte operate dall'azienda. Essa infatti potrebbe decidere ad esempio di operare delle relazioni riguardanti gli stati del processo in concomitanza alle tempistiche previste per legge per scopi fiscali.

L'approccio send on delta basa il suo funzionamento sull'energia accumulata durante il funzionamento del sistema in analisi. Una volta che l'energia accumulata supera una determinata soglia, prestabilita, viene generato l'evento. L'algoritmo,

pertanto, costruisce poco alla volta il vettore pari all'energia accumulata dal sistema, cioè l'integrale.

La logica dell'algoritmo prevede due possibilità di calcolo:

- Una prima versione prevede la generazione dell'evento al superamento della soglia e la trasmissione di tutta l'energia antecedente, inclusa l'energia dell'ultimo passo temporale.
- Una seconda versione prevede la generazione dell'evento al superamento della soglia e la trasmissione di tutta l'energia esclusa l'energia relativa all'ultimo passo temporale.

Ogni prova relativa ai vari elettrodomestici è stata affrontata con entrambi i criteri.

La procedura di calcolo prevista è uguale per entrambi i casi.

I valori di energia rappresentativi degli eventi, con i relativi istanti temporali, sono stati riportati in due vettori specifici denominati rispettivamente *evento* e *tempo evento*, la durata di ogni evento è stata calcolata semplicemente come differenza tra l'istante di tempo dell'evento successivo e l'istante di tempo dell'evento precedente, in modo da richiamare il concetto che tutti gli approcci di tipo EDM comportano un invio dei dati asincrono.

La differenza tra le due versioni precedentemente esposte risiede in un'unica variabile all'interno dell'algoritmo: k_{min}. Tale indice è indispensabile per la ricostruzione della dimensione del vettore energia su cui applicare la soglia prescelta e attraverso il quale effettuare il calcolo dell'integrale. La prima versione prevede che, una volta trovato il valore integrale superiore alla soglia, la variabile relativa al calcolo dell'integrale venga azzerata e che dal ciclo successivo il valore dell'integrale sia calcolato a partire dal valore di energia successivo all'evento. Il secondo tipo di approccio, invece, dopo aver trovato il valore integrale superiore alla soglia, conserva una memoria del valore di energia associato a tale evento, che sarà considerato nel calcolo dell'integrale nel successivo ciclo. Inoltre, il primo caso comunica come valore di energia associato all'evento l'ultimo valore di energia

registrato in corrispondenza della soglia, mentre il secondo approccio comunica il valore di energia precedente al superamento della soglia.

La procedura di calcolo è stata riassunta nel diagramma di flusso presente nel Grafico 5.1.

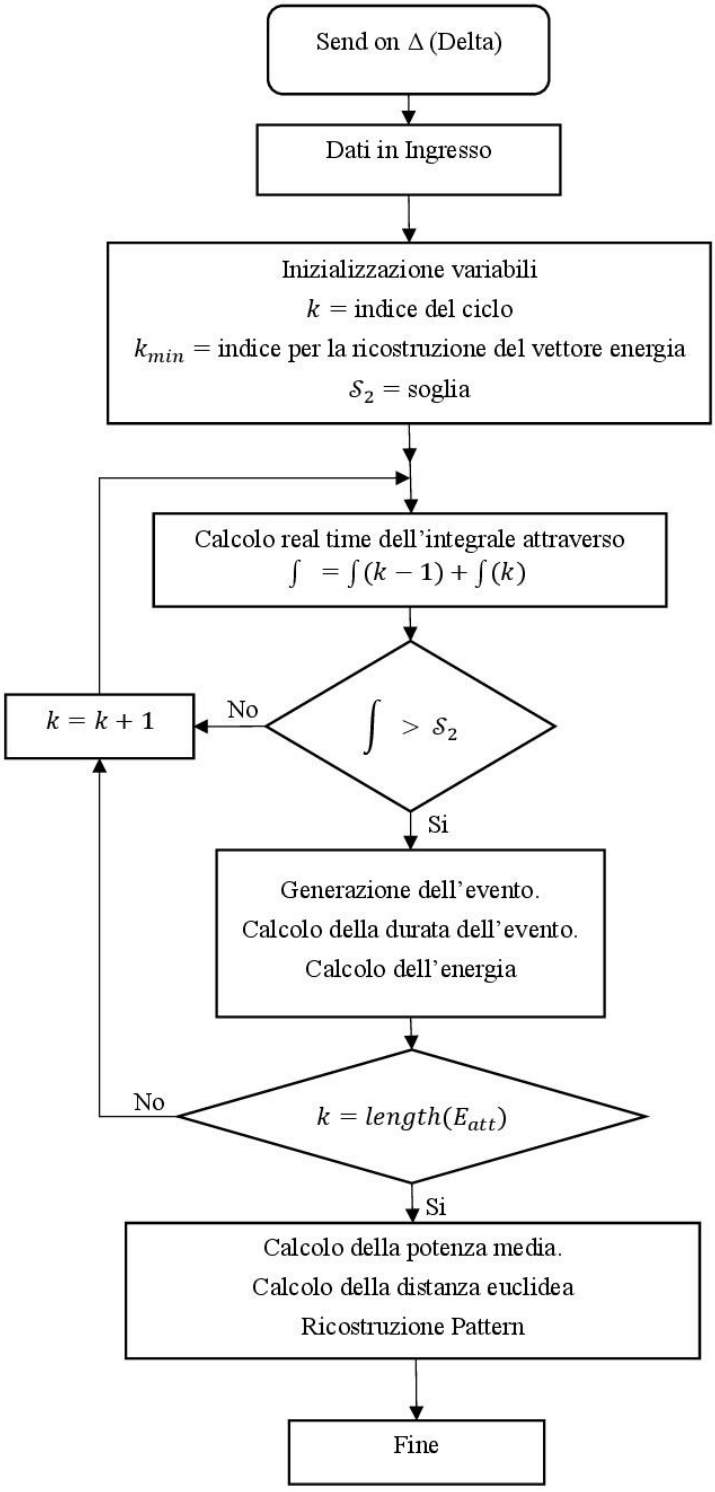


Grafico 5.1 Diagramma di flusso approccio send on delta.

Una volta raggiunto il criterio di arresto definito, si procede con il calcolo delle variabili di interesse, che nelle prove a seguire sono:

- Il calcolo della potenza media.
- Il calcolo della distanza euclidea.
- La ricostruzione grafica del pattern.

5.1. Esempio applicativo

Prima di applicare l'approccio send on delta con i vari elettrodomestici scelti, è stata effettuata una prova su dati puramente generici in modo tale da rimarcare la differenza tra le due versioni adoperate.

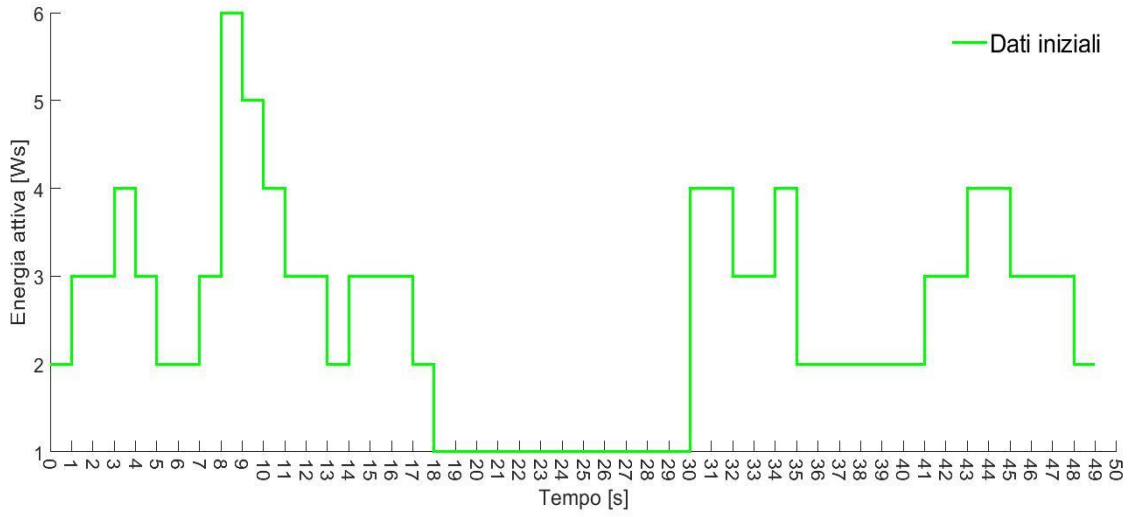


Grafico 5.2 Dati iniziali test send on delta

Il Grafico 5.2 riporta i cinquanta valori energetici adoperati per il test, per i quali è stata scelta una base tempi pari a sessanta secondi. La soglia scelta è di 10 Ws. Osservando tali valori ci si aspetta pertanto che il primo eventa occorra in corrispondenza del quarto valore dell'energia in quanto, calcolando l'integrale con i valori di energia precedenti a tale istante, si otterrebbe un valore di energia pari a

12 Ws, maggiore della soglia. Una volta verificatasi la condizione prevista per la generazione dell'evento, la prima versione comunica come valore di energia rappresentativo dell'evento il quarto valore, ovvero 12 Ws, mentre il secondo comunica come dato corrispondente all'evento 8 W. Per quanto riguarda invece l'indice k_{min}, rappresentativo del punto di ripartenza per il calcolo dell'integrale, esso assume un valore pari a quattro o a cinque a seconda della versione utilizzata. La prima versione, per la ricerca dell'evento successivo al primo, prevede un valore di $k_{min} = 5$, in quanto in seguito all'evento l'integrale è stato azzerato e per il suo calcolo si ripartirà dal valore di energia successivo all'evento. La seconda versione, invece, prevede un valore di $k_{min} = 4$ perché il quarto valore di energia deve essere memorizzato e utilizzato per il calcolo dell'integrale necessario per la generazione dell'evento successivo.

Lo stesso concetto vale anche per l'istante temporale associato all'evento. La prima versione, comunicando anche l'ultimo valore di energia rilevato, ha come tempo dell'evento l'istante pari a 4 s, mentre la seconda versione comunica come istante dell'evento 3 s.

Fino ad ora pertanto ci aspettiamo che i valori comunicati al sistema centrale siano quelli riassunti nella Tabella 5.1.

Tabella 5.1 Valori attesi per il primo evento

	Tempo evento	**Valore energetico associato all'evento**	**Durata dell'evento**
	[s]	[Ws]	[s]
Prima versione	4	12	4
Seconda versione	3	8	3

Adoperando le logiche sopra citate per tutti gli elementi, i risultati ottenuti per le rispettive versioni sono riportati nella Figura 5.2.

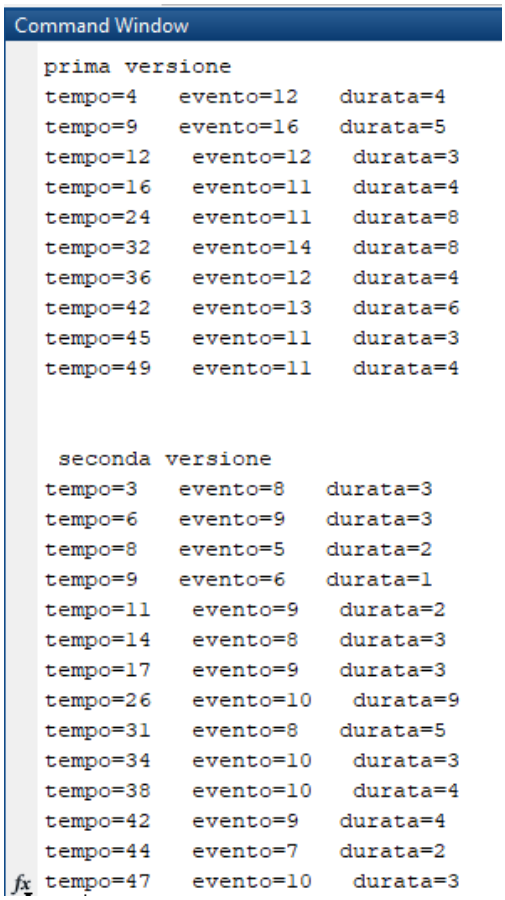


Figura 5.1 Risultati per entrambe le versioni del test per l'approccio send on delta.

La Figura 5.1 offre un confronto diretto tra i dati iniziali di energia e l'energia accumulata nei due approcci adoperati per il Send on Delta.

Riprendendo le aspettative enunciate per il primo evento è facile notare dal Grafico 5.3 come, mentre nel grafico in rosso, rappresentativo del primo approccio, l'energia accumulata nell'istante temporale pari a 180 s è pari a 12 Ws, nel grafico in nero, rappresentativo del secondo approccio è pari a 8 Ws. Pertanto nel primo caso l'evento è generato all'istante temporale pari a 4 s e il calcolo dell'energia accumulata riprende dal valore di energia corrispondente all'istante successivo, ovvero 3 Ws (grafico in verde), mentre nel secondo caso l'evento è generato a 3 s

e il calcolo dell'energia accumulata riprende dal valore di energia corrispondente all'istante dell'evento, ovvero 4 Ws (visibile sempre nel grafico in verde).

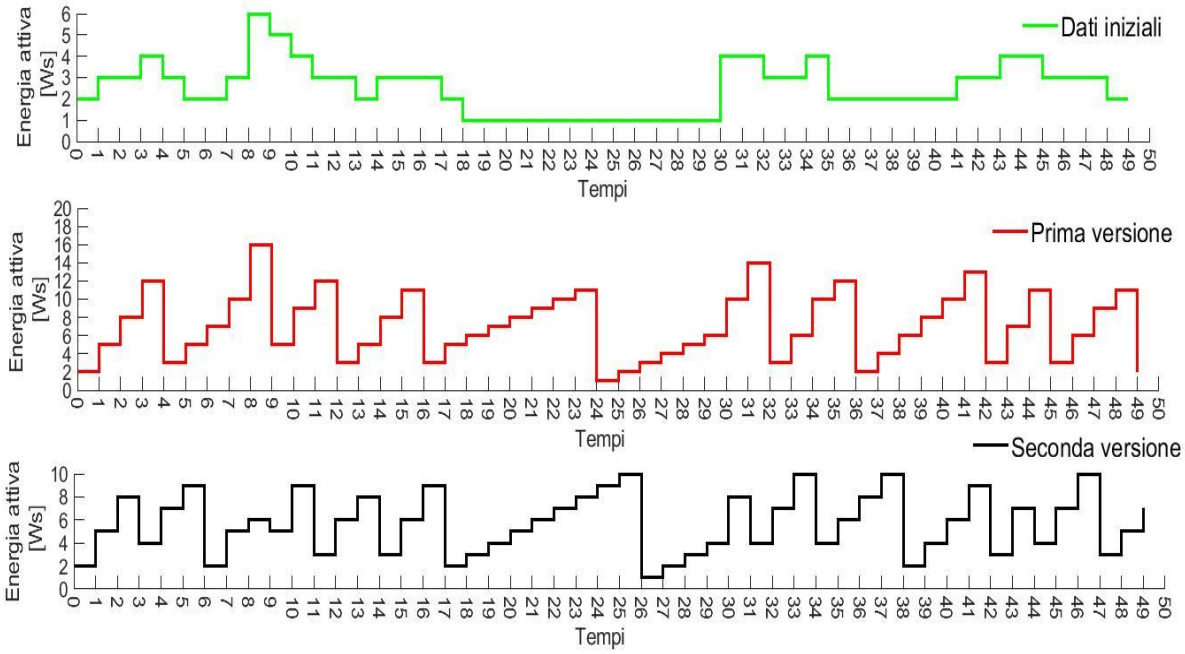


Grafico 5.3 Confronto tra i dati iniziali e le due versioni del Send on delta.

5.2. Caso Frigorifero

La prima prova reale è stata implementata su un frigorifero, le cui caratteristiche tecniche sono state citate nel capitolo quattro, durante l'applicazione dell'approccio Change and trasmit.

La base tempi adoperata per tali prove è pari ad un minuto, riportata poi sull'algoritmo con il suo analogo in secondi.

La logica adoperata per i calcoli è quella riassunta nel Grafico 5.1.

Il caso del frigorifero è stato affrontato per capire quanto l'approccio send on delta sia affidabile per identificare i processi che avvengono nella vita reale. Infatti, sebbene sia stato introdotto con riferimento a un concetto di registrazioni degli eventi in tempo reale e non in una fase di elaborazione dati successiva, per una analisi effettuata non sulle variazioni di potenza ma sull'energia accumulata, tale metodo in realtà risulta essere il meno applicabile per la gestione dei dati riferiti ai processi con consumo energetico.

La prova è stata effettuata applicando la seconda versione dell'approccio send on delta e contemporaneamente quattro soglie diverse, pari rispettivamente a 10 kWs, 15 kWs, 20 kWs e 30 kWs.

La Tabella 5.2 riporta il numero di eventi registrati e i rispettivi valori della distanza euclidea al variare della soglia impostata. E' facile notare come, al diminuire del numero di eventi registrati, la distanza euclidea cresca, pertanto ci si aspetta che il suo andamento in un grafico, dove si abbiano i diversi valori di soglia in ascissa e la distanza euclidea in ordinata, sia monotono crescente.

Tabella 5.2 Numero di eventi e distanza euclidea al variare della soglia, seconda versione Send on delta.

Soglia [kWs]	Numero eventi registrati	Distanza euclidea
10	53	161
15	29	239
20	20	257
30	13	344

E' possibile vedere che il numero di eventi registrati diminuisce, anche dal Grafico 5.4, dove è riportato in ascissa il vettore dei tempi relativi alle misure, in modo da poter osservare con quale cadenza temporale si verificano gli eventi, rappresentati come se fossero degli impulsi, di ampiezza pari alla potenza media calcolata attraverso l'integrale associato ad ogni evento.

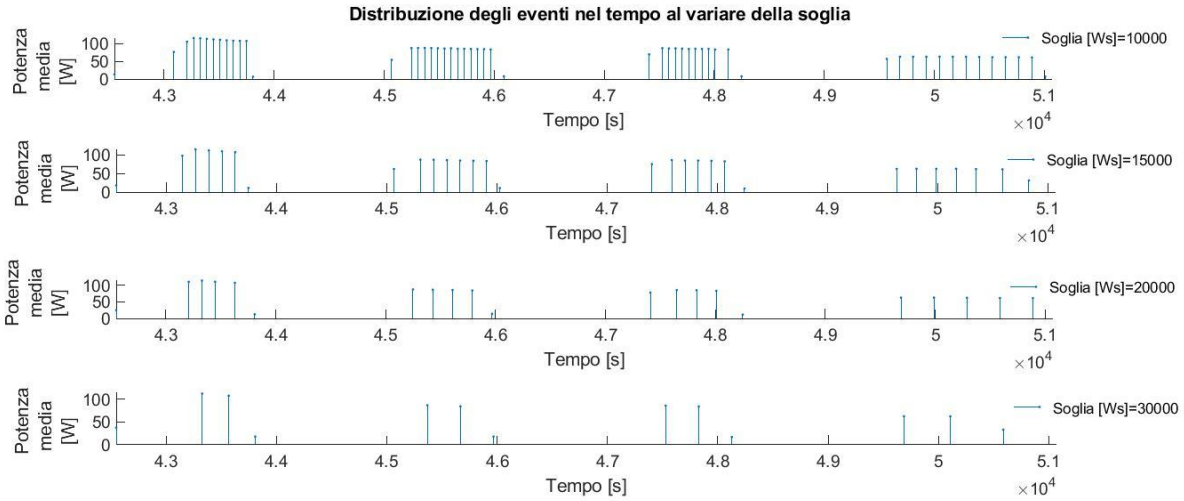


Grafico 5.4 Distribuzione degli eventi nel tempo per un frigorifero con la seconda versione del Send on delta.

Osservando attentamente i quattro subplot presenti nel Grafico 5.4 è possibile notare come gli eventi si verifichino sempre negli stessi intervalli di tempo, ma in numero sempre inferiore.

I risultati ottenuti sono sintetizzati nel Grafico 5.5 dove è evidente come entrambe le grandezze, sia la distanza euclidea che il numero degli eventi, abbiamo andamenti opposti. Infatti, la distanza euclidea ha un andamento monotono crescente, come atteso, mentre il numero di eventi ha un andamento monotono decrescente.

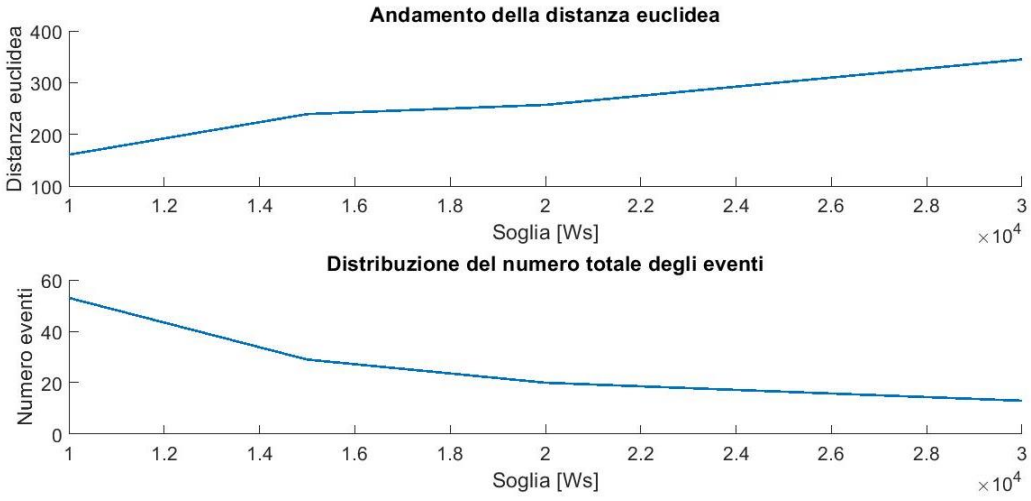


Grafico 5.5 Confronto tra la distanza euclidea e il numero di eventi registrati con approccio Send on delta, seconda versione.

Il motivo di tale andamento è chiaro dal Grafico 5.6, dove è possibile notare come all'aumentare della soglia si passi dal grafico in rosso fino a quello di colore blu. Il primo caso, rappresentato in rosso, presenta la migliore ricostruzione del profilo di carico di tutti e quattro i casi, il peggiore invece è quello riportato in blu proprio perché tale ricostruzione è stata ottenuta con un numero di punti pari circa al 25% dei punti adoperati per la ricostruzione con il primo valore di soglia.

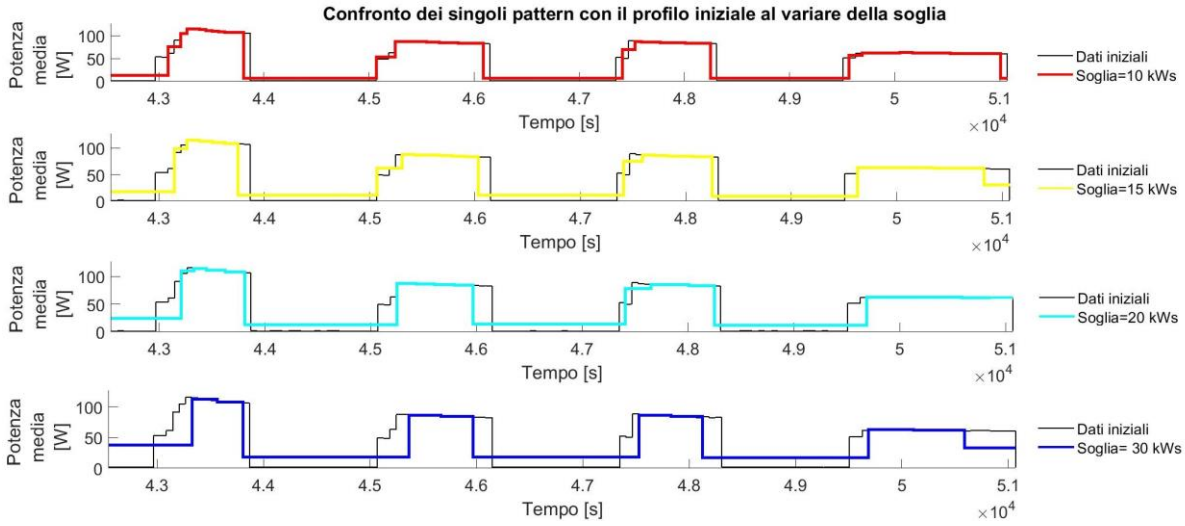


Grafico 5.6 Ricostruzione singoli pattern di un frigorifero con approccio send on delta, seconda versione.

E' importante però ricordare che, a differenza del Change and transmit dove semplicemente alzando la soglia è possibile avere un maggior numero di punti per la ricostruzione dei pattern, il send on delta basandosi sull'integrale, non offre alcuna garanzia sull'istante temporale associato all'evento e pertanto non può essere assicurato che l'andamento della distanza euclidea sia monotono crescente.

Applicando le stesse soglie, ma la prima versione dell'approccio Send on Delta, i risultati cambiano. La modifica nel modo in cui effettuare il calcolo dell'integrale comporta, quindi, una ricostruzione dei singoli pattern differente, come è chiaro nel Grafico 5.7, nel quale le soglie adoperate sono rispettivamente di 10 kWs, 15 kWs, 20 kWs e 30 kWs.

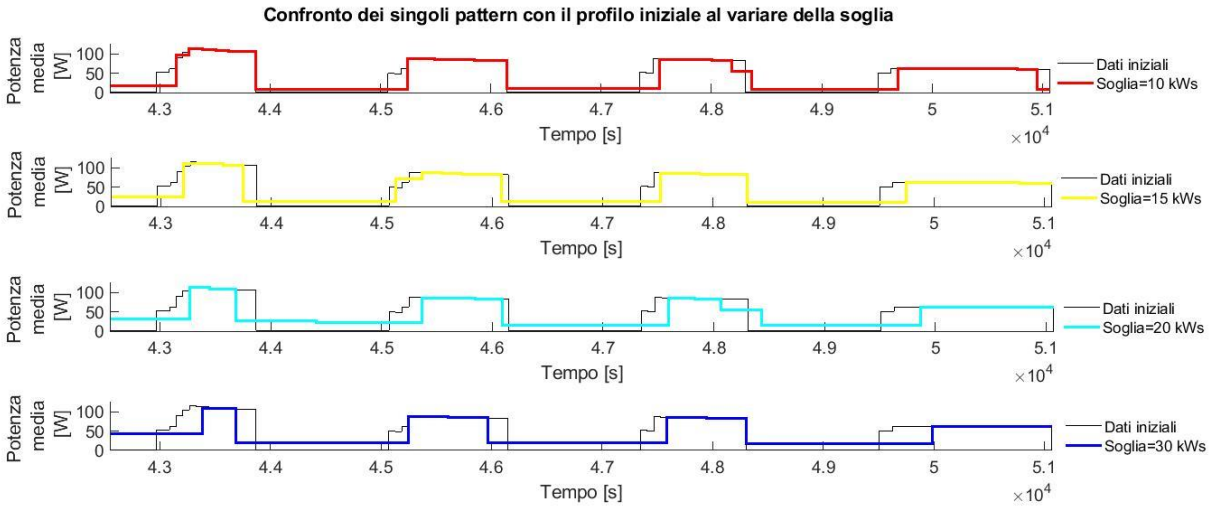


Grafico 5.7 Ricostruzione singoli pattern di un frigorifero con approccio send on delta, prima versione.

I risultati relativi al numero di eventi registrati, con i relativi valori della distanza euclidea sono riportati nella Tabella 5.3.

Tabella 5.3 Numero di eventi e distanza euclidea al variare della soglia, seconda versione Send on delta.

Soglia [kWs]	Numero eventi registrati	Distanza euclidea
10	31	216
15	21	263
20	16	336
30	11	342

Effettuando una rapida comparazione tra i risultati presenti nella Tabella 5.2 e nella Tabella 5.3 si nota come al variare della soglia, il numero di eventi registrati con un approccio o con un altro sia completamente diverso. In particolare nel primo caso, dove è stata utilizzata una soglia pari a 10 kWs, mentre la seconda versione ha

registrato 53 eventi, la prima versione ne ha registrati soltanto 31, gli altri valori invece sono piuttosto simili perché differiscono di poco. Per quanto esposto nella Tabella 5.3 anche in questo caso ci si aspetta che la distanza euclidea abbia un andamento monotono crescente. Ciò viene confermato dal Grafico 5.8, che presenta un andamento ovviamente differente da quello ottenuto con la prima versione, dati i diversi valori di distanza euclidea.

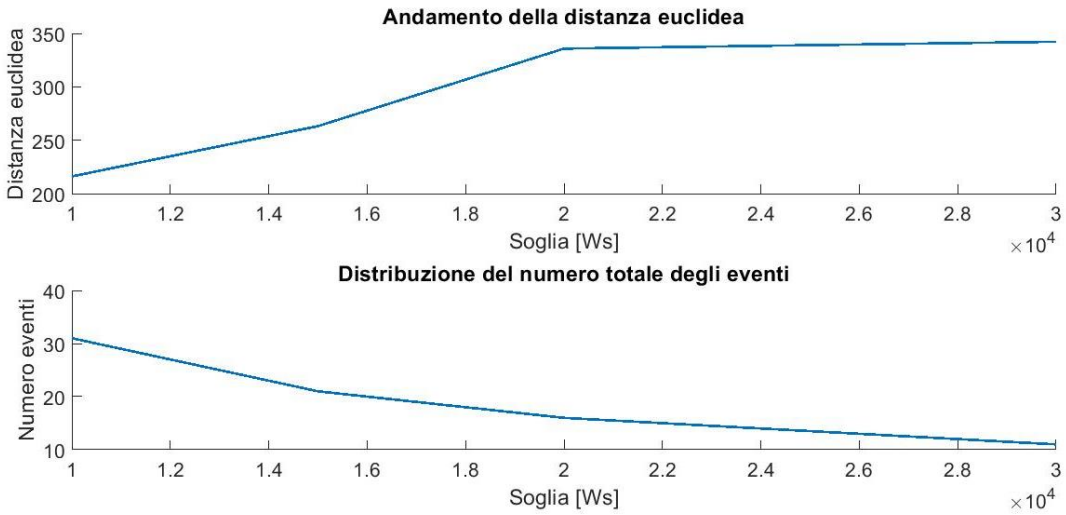


Grafico 5.8 Confronto tra la distanza euclidea e il numero di eventi registrati con approccio Send on delta, prima versione.

Proprio perché le ricostruzioni dei singoli pattern sono risultati differenti, esclusivamente passando dalla prima alla seconda versione pur mantenendo gli stessi valori di soglia, il Send on delta risulta essere il più inaffidabile in termini di ricostruzione tra i metodi presentati.

5.3. Primo e secondo caso Lavatrice

Tale casistica è stata affrontata per capire se quanto ottenuto nel paragrafo precedente fosse una eccezione o se fosse sempre presente una differenza abbastanza marcata tra le ricostruzioni ottenute con le due versioni possibili per il Send on Delta.

A tal scopo vengono osservati sia i grafici che i valori numerici relativi alla distanza euclidea.

Come detto nel quarto capitolo, i dati raccolti per le due casistiche inerenti alla lavatrice, hanno base tempi pari ad un secondo e differiscono soltanto per l'operazione richiesta all'elettrodomestico.

Per la seconda prova effettuata per la lavatrice, entrambe le versioni presentano un andamento monotono crescente per la distanza euclidea, come è possibile notare nei Grafici 5.9 e 5.10.

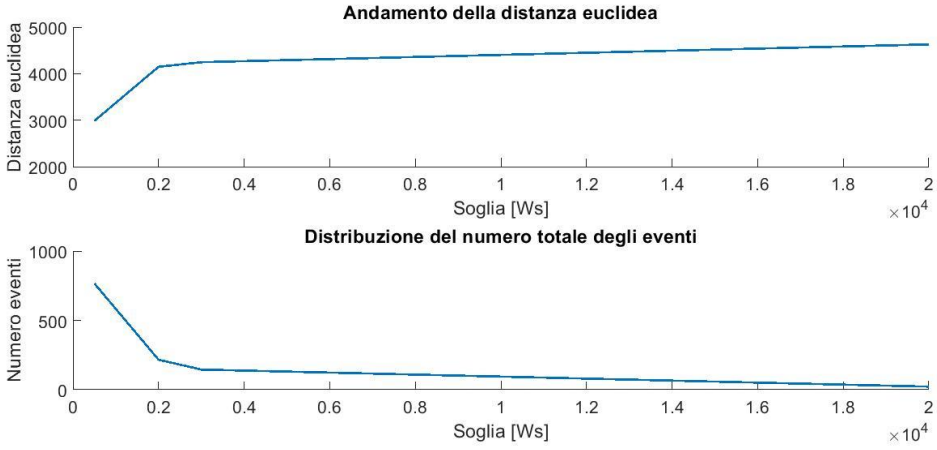


Grafico 5.9 Distanza euclidea e numero eventi per il secondo caso della lavatrice, prima versione Send on delta.

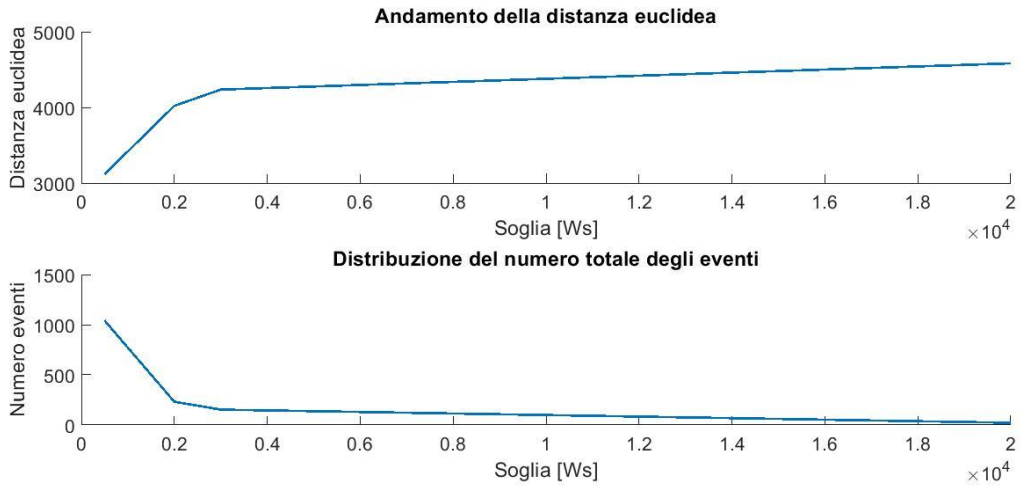


Grafico 5.10 Distanza euclidea e numero eventi per il secondo caso della lavatrice, seconda versione Send on delta.

Anche in questo caso i valori ottenuti per la distanza euclidea al variare della soglia applicata sono stati riportati in una tabella (Tabella 5.4). Le soglie adoperato in questo caso sono pari rispettivamente a 500 kWs, 2 kWs, 3 kWs e 20 kWs.

Tabella 5.4 Confronto delle distanze euclidee ottenute per il secondo caso della lavatrice con le due versioni del Send on delta.

Soglia [kWs]	Distanza euclidea prima versione	Distanza euclidea seconda versione
0.5	2984	3118
2	4148	4020
3	4246	4236
20	4630	4582

Le ricostruzioni ottenute per la prima e la seconda versione del Send on Delta sono riportate nei Grafici 5.11 e 5.12. In entrambi i casi soltanto la prima soglia è in

grado di ricostruire i picchi presenti, anche se alcuni solo parzialmente. Tutti gli altri subplot, invece, non sono in grado di ricostruire i picchi, offrendo una ricostruzione simile a quella che si otterrebbe adoperando un classico approccio TDM. Fatta eccezione per il primo caso, le ricostruzioni migliori sono ottenute attraverso la seconda versione del Send on delta, come è possibile notare dai valori della distanza euclidea e dal Grafico 5.12 dove si riesce ad ottenere una ricostruzione parziale dei picchi anche con il secondo valore di soglia.

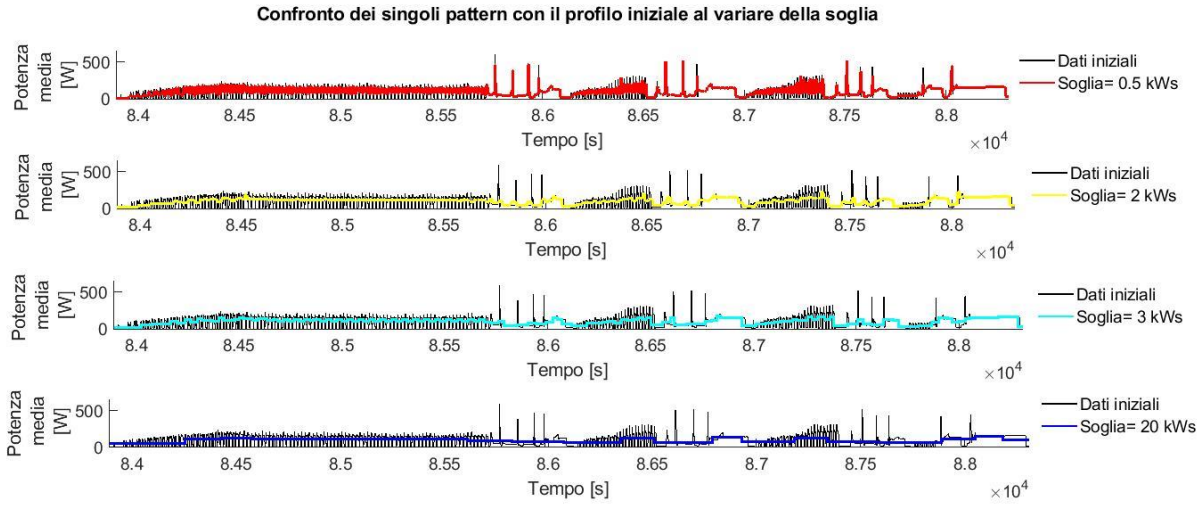


Grafico 5.11 Ricostruzione singoli pattern secondo caso lavatrice, con approccio send on delta, prima versione.

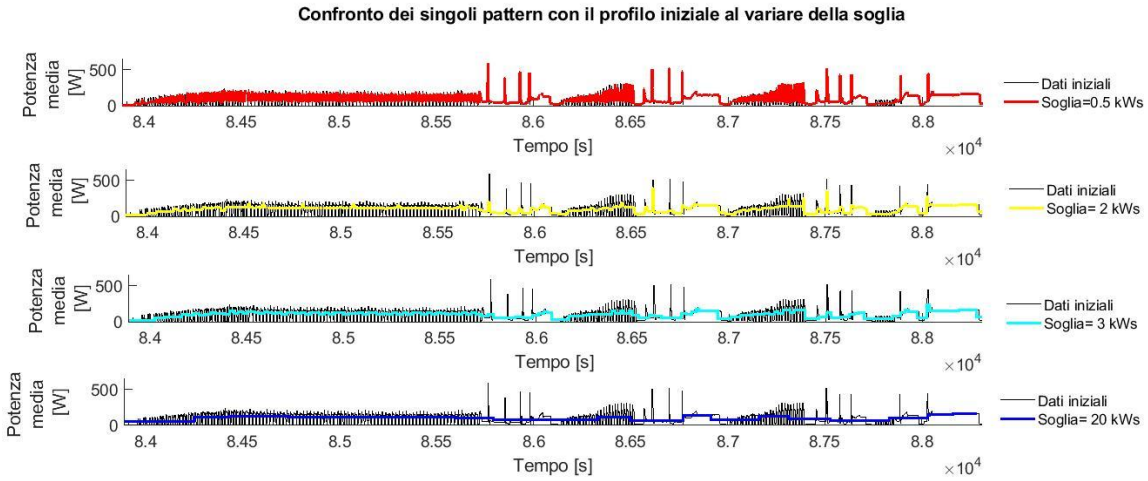


Grafico 5.12 Ricostruzione singoli pattern secondo caso lavatrice, con approccio send on delta, seconda versione.

Applicando la prima versione del Send on delta ai dati relativi alla prima prova sulla lavatrice, l'andamento della distanza euclidea continua ad essere come atteso (Grafico 5.13).

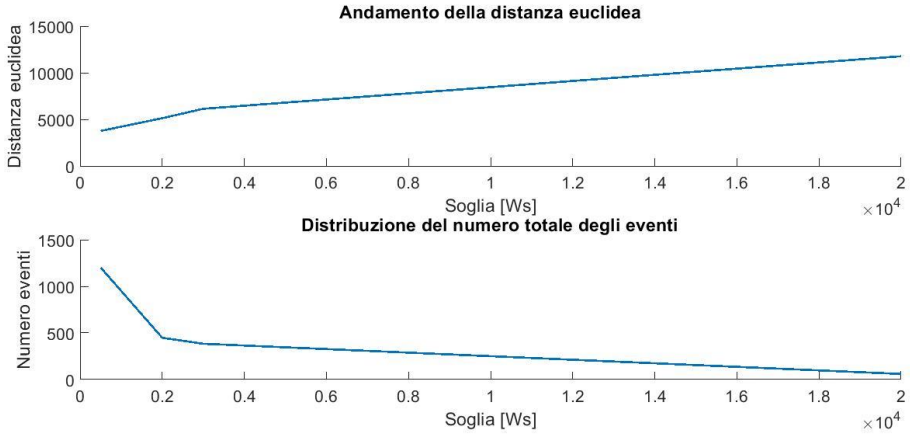


Grafico 5.13 Distanza euclidea e numero eventi per il primo caso della lavatrice, prima versione Send on delta.

Anche con la seconda versione si ottiene un andamento monotono crescente per la distanza euclidea e monotono decrescente per il numero totale degli eventi registrati (Grafico 5.14).

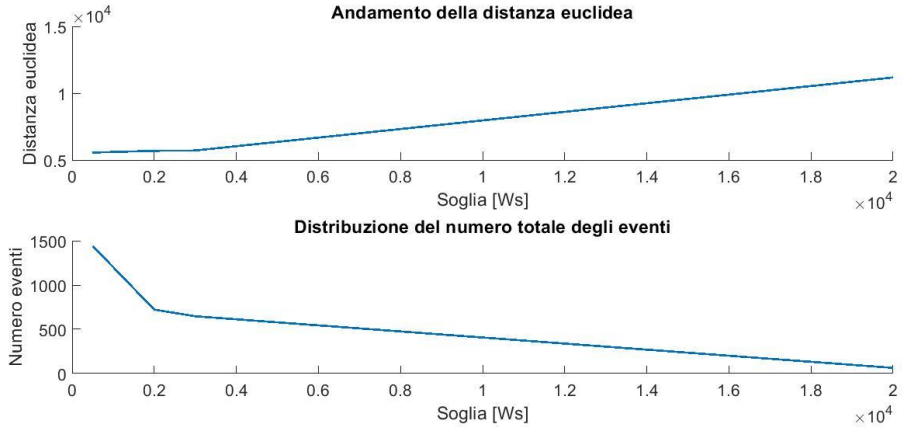


Grafico 5.14 Distanza euclidea e numero eventi per il primo caso della lavatrice, seconda versione Send on delta.

Per maggiore sicurezza, l'analisi è stata ripetuta anche con i dati relativi alla prima prova effettuata sulla lavatrice.

I risultati numerici ottenuti per la distanza euclidea con entrambe le versioni sono state riportate nella Tabella 5.5, per poter operare nuovamente una comparazione tra i risultati ottenuti per la ricostruzione dei pattern in entrambi i casi.

Tabella 5.5 Confronto delle distanze euclidee ottenute per il primo caso della lavatrice con le due versioni del Send on delta.

Soglia [kWs]	Distanza euclidea prima versione	Distanza euclidea seconda versione
0.5	3758	5554
2	5126	5685
3	6135	5709
20	11773	11177

In entrambi i casi le distanze euclidee sono tutte dell'ordine di 10^3, eccetto che per l'ultimo valore di soglia per il quale la distanza euclidea è dell'ordine di 10^4.

Dati i valori riportati in Tabella 5.5 ci si aspetta che, per i primi due valori di soglia, si abbia una ricostruzione dei singoli pattern migliore tramite l'utilizzo della prima versione del Send on delta, per il terzo valore di soglia attraverso la seconda versione e per l'ultimo valore di soglia ci si aspetta che le ricostruzioni ottenute siano uguali.

Quanto sopracitato è confermato dai Grafici 5.15 e 5.16.

La prima ricostruzione del Grafico 5.15 è in grado di ricostruire quasi del tutto fedelmente i dati iniziali, mentre quella del Grafico 5.16 sin da subito non è in grado di ricostruire totalmente i salti presenti nel Grafico, come è possibile notare nell'istante temporale pari circa a 80700 s.

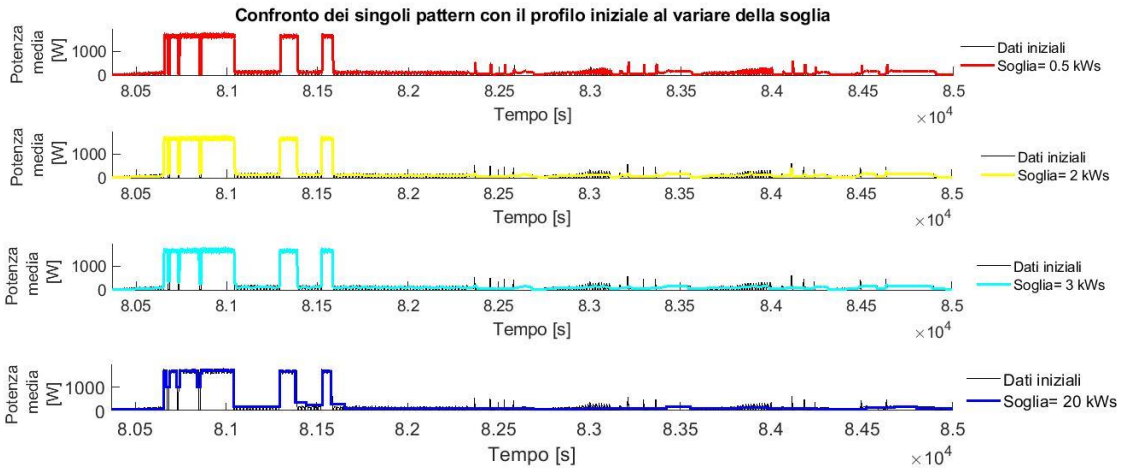


Grafico 5.15 Ricostruzione singoli pattern primo caso lavatrice, con approccio send on delta, seconda versione.

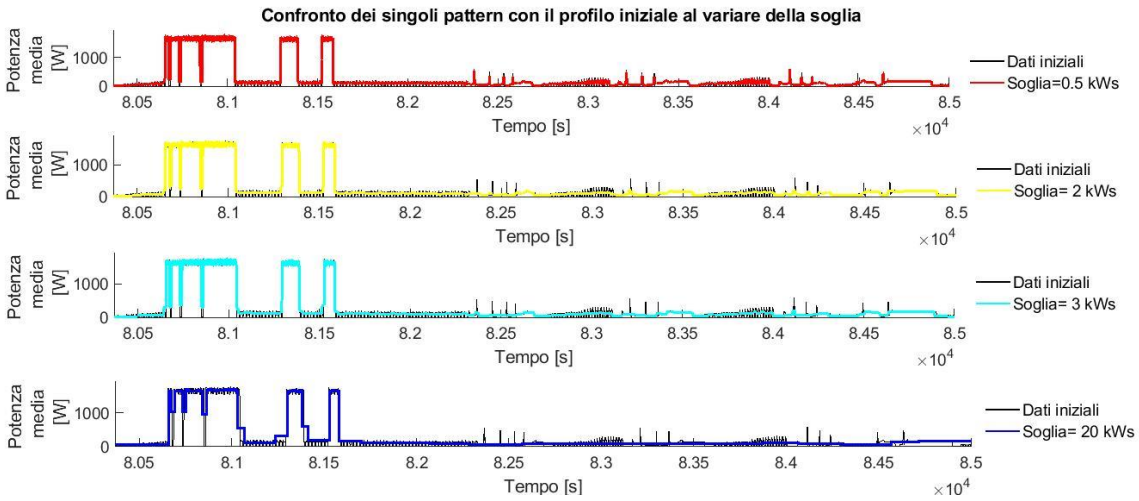


Grafico 5.16 Ricostruzione singoli pattern primo caso lavatrice, con approccio send on delta, prima versione.

Anche in questo caso non è stato possibile riscontrare una regolarità nell'utilizzo della prima o della seconda versione.

5.4. Caso Forno

Il caso del forno è stato affrontato per osservare come si comporta il metodo Send on delta in caso di andamenti molto variabili nel tempo.

Le soglie applicate a tale scopo sono pari rispettivamente a 5 kWs, 10 kWs, 20 kWs e 30 kWs. La base tempi è di un secondo.

Tabella 5.6 Confronto delle distanze euclidee ottenute per un forno con le due versioni del Send on delta.

Soglia [kWs]	Distanza euclidea prima versione	Distanza euclidea seconda versione
5	18935	16913
10	24759	23719
20	31229	30429
30	34715	34233

La Tabella 5.6 mostra come in questo caso le ricostruzioni migliori si hanno tutte con l'applicazione della seconda versione del Send on delta, sebbene le differenze tra le distanze euclidee ottenute con una versione o con un'altra siano poco marcate. I risultati ottenuti riconfermano il fatto che non esiste una versione preferibile all'altra e che il conseguimento di una ricostruzione migliore attraverso la prima o la seconda versione è del tutto casuale.

Le ricostruzioni ottenute con le due versioni sono riportate nei Grafici 5.17 e 5.18.

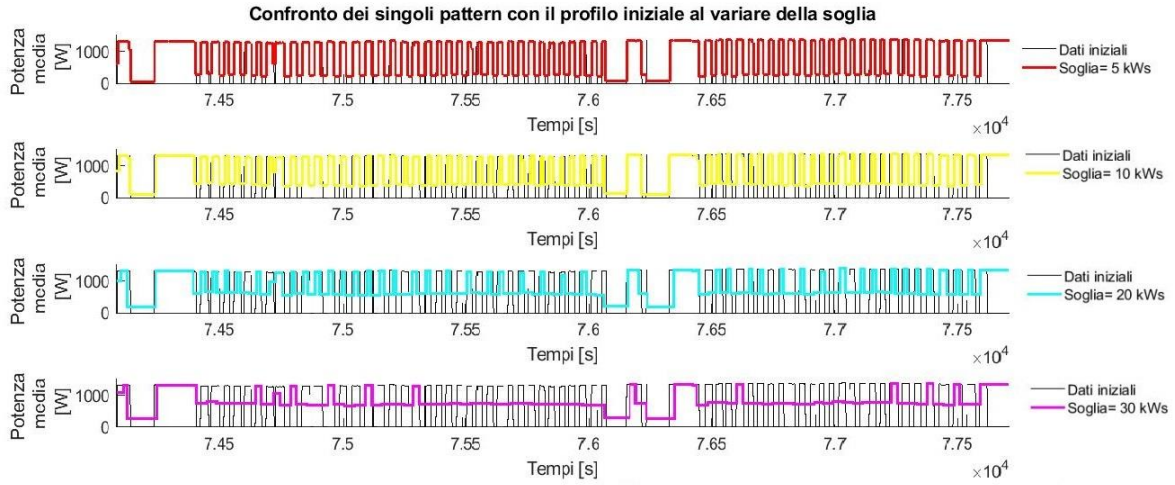


Grafico 5.17 Ricostruzione singoli pattern di un forno, prima versione Send on delta.

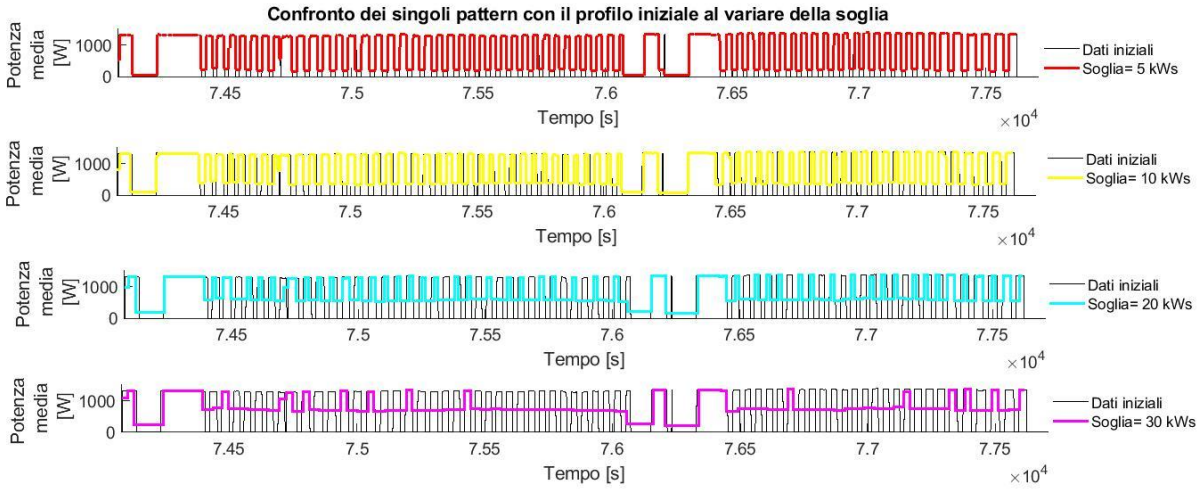


Grafico 5.18 Ricostruzione singoli pattern di un forno, seconda versione Send on delta.

Sulla base dei risultati ottenuti e riportati nella Tabella 5.6, ci si aspetta che la distanza euclidea abbia andamento monotono crescente in entrambi i casi.

I Grafici 5.19 e 5.20 confermano tali aspettative.

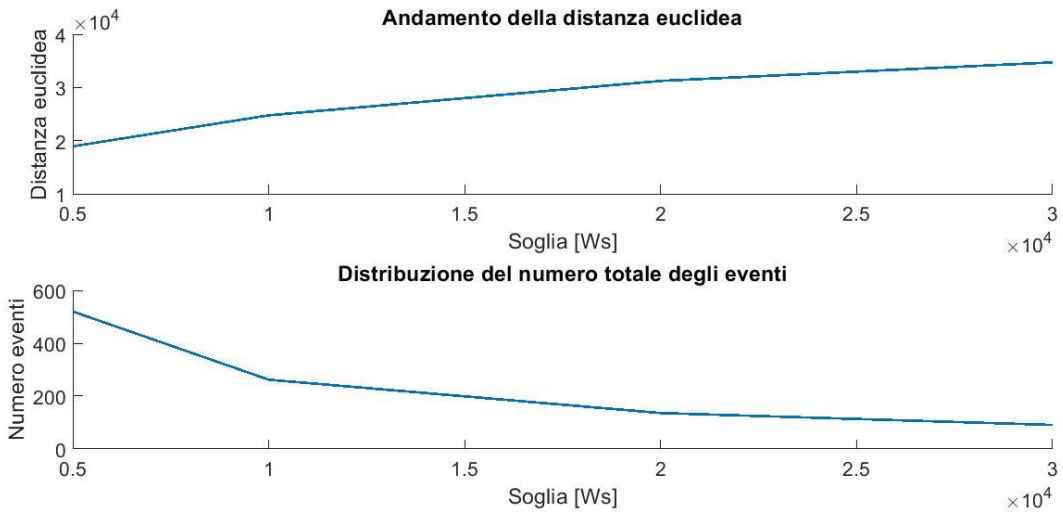


Grafico 5.19 Distanza euclidea e numero eventi per un forno, prima versione Send on delta.

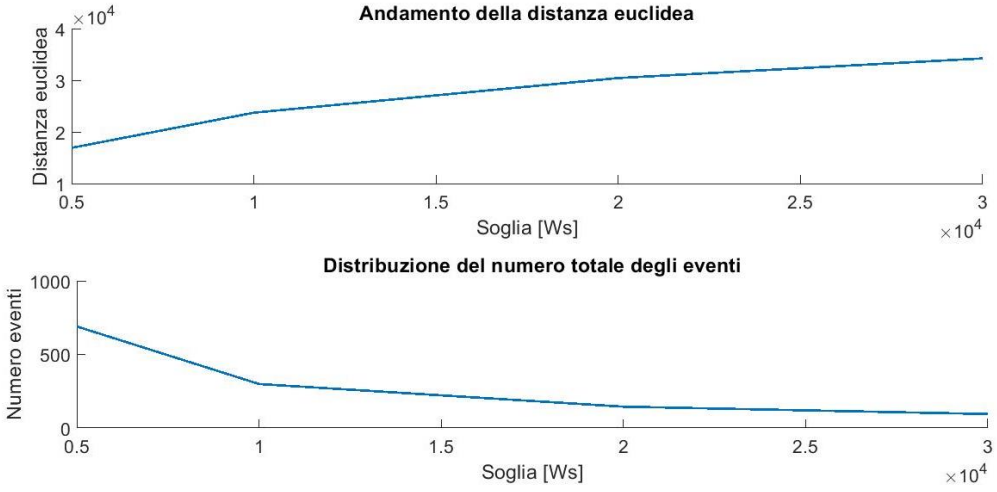


Grafico 5.20 Distanza euclidea e numero eventi per un forno, seconda versione Send on delta.

In seguito a quanto visto è possibile concludere lo studio dell'approccio Send on delta asserendo che tra le due versioni analizzate, nessuna sembra offrire una migliore affidabilità dal punto di vista della ricostruzione degli andamenti. Le ricostruzioni in entrambi i casi non sembrano offrire una qualità eccelsa, non

riuscendo nella maggior parte dei casi a individuare i picchi o i salti presenti nei diagrammi di carico, seppur gli andamenti risultino energicamente equivalenti.

In entrambi i casi gli andamenti ottenuti per la distanza euclidea sono sempre monotoni e crescenti, mentre per il numero totale di eventi monotoni e decrescenti. L'approccio Send on delta riveste così un importante ruolo didattico, ma non è applicabile alle realtà industriali, in quanto affetto da una eccessiva casualità nella fornitura dei risultati.

6. Prove su elettrodomestici con approccio Combinato a doppia soglia.

Entrambi gli algoritmi presentati fino ad ora, rispettivamente nei capitoli 4 e 5, presentano delle limitazioni. L'approccio Combinato a doppia soglia è stato così pensato per ovviare alle limitazioni di tali approcci, unendo i concetti del Change and transmit con altre due caratteristiche presentate nel Send on delta, cioè la formulazione di un algoritmo che effettui i suoi calcoli in tempo reale e che non si basi più sui valori di potenza. Lo schema combinato a doppia soglia, infatti, basa i suoi calcoli sulla variazione dell'energia accumulata.

Lo schema combinato a doppia soglia permette di rilevare due tipi di cambiamenti:

- Cambiamenti istantanei e di elevata ampiezza: essi sono rilevati quando il valore assoluto della variazione della potenza media da un intervallo di tempo elementare a quello successivo supera la soglia $\delta_{change_and_transmit}$. Le transazioni veloci sono riconosciute attraverso una modalità senza memoria che dipende dalla soglia scelta per il Change and transmit. Infatti, qualsiasi variazione di potenza calcolata attraverso l'equazione 6.1, è indipendente da quella precedente, per questo l'approccio Change and transmit è un approccio di tipo *stateless.*

$$\Delta P([t_i - \tau, t_i]) = P(t_i) - P(t_i - \tau)$$

Equazione 6.1 Formula per il calcolo della variazione di potenza nel Change and transmit.

dove rispettivamente:

τ: intervallo di tempo elementare.

$t_i - \tau$: istante temporale riferito all'estremo inferiore della variazione di potenza rilevata $P(t_i - \tau)$.

t_i: istante temporale riferito all'estremo superiore della variazione di potenza rilevata $P(t_i)$.

- Piccole variazioni accumulate che si protraggono nel tempo.

  La variazione di energia accumulata in un certo numero k di intervalli di tempo elementare τ può essere scritta come:

$$\Delta E([t_{n-1}, t_{n-1} + k\tau]) = \tau \sum_{t=1}^{k} \big(P(t_{n-1} + t\tau) - P(t_{n-1} + (t-1)\tau)\big)$$

Equazione 6.2 Variazione di energia accumulata in un schema EDM a doppia soglia.

dove rispettivamente:

τ: intervallo di tempo elementare.

t_{n-1}: istante iniziale del periodo di monitoraggio

$t_{n-1} + k\tau$: istante finale del periodo di monitoraggio, calcolato come la somma dell'istante iniziale e un certo numero k di intervalli di tempo elementare τ successivi.

$\sum_{t=1}^{k}\big(P(t_{n-1} + t\tau) - P(t_{n-1} + (t-1)\tau)\big)$: sommatoria di tutte le variazione dei valori di potenza nell'intervallo di tempo successivo e nell'intervallo di tempo precedente nei k intervalli di tempo elementare τ.

Tale variazione viene monitorata all'interno di una fascia di valori attesi pari alle soglie impostate. Esse sono due perché rappresentano l'errore previsto per l'evoluzione del sistema, sia in senso positivo che negativo. Fino a quando il processo si mantiene all'interno della fascia costruita, nessuna informazione viene inviata e nessun evento vieno registrato. Nel momento in cui una variazione, vicina ad una delle due soglie impostate, non viene compensata da nessuna variazione di senso opposto, allora l'andamento oltrepassa la fascia impostata, ovvero si distacca dall'andamento atteso, con conseguente invio dell'informazione e generazione dell'evento alla fine della fase temporale elementare alla quale si è verificata la variazione di

energia accumulata. Il fatto quindi che l'unità centrale non riceva alcuna informazione per certi periodi è essa stessa una informazione, in quanto significa che il sistema è conforme alla tendenza prevista. Un improvviso aumento del RoE potrebbe indicare invece possibili guasti o malfunzionamenti all'interno del sistema.

All'inizio del periodo di monitoraggio, la tendenza attesa futura viene stabilita sommando e sottraendo al primo dato di potenza media a disposizione, la soglia scelta. Pertanto si avrà:

$$Prima\ tendenza\ positiva\ attesa = P(1) + \delta_2^{(+)}$$

$$Prima\ tendenza\ negativa\ attesa: P(1) + \delta_2^{(-)}$$

Equazione 6.3 Primi valori di tendenza attesi per uno schema combinato doppia soglia.

In seguito alla generazione dell'evento, è possibile stabilire la tendenza futura in due modi diversi:

- **Prima versione:** il valore di riferimento per le tendenze future è pari all'ultimo valore di variazione di energia accumulata registrato.
- **Seconda versione:** il valore di riferimento per le tendenze future è pari alla media di tutti i valori di variazione di energia accumulata registrati prima del verificarsi dell'evento, escluso l'ultimo valore che sarà invece considerato nella media dell'evento successivo.

L'elaborato di tesi analizza entrambe le versioni.

6.1. Esempio applicativo

Come nel caso del Send on Delta, anche per lo schema combinato a doppia soglia sono stati affrontati due casi con dati generici, nello specifico diciassette dati, prima di passare alle applicazioni reali.

Il primo caso prevede l'applicazione della prima versione dello schema combinato a doppia soglia, mentre il secondo caso prevede l'applicazione della seconda versione.

La seguente prova è stata svolta adoperando una base tempi pari ad un secondo e un vettore dati, contenenti i valori di potenza in kW, così definito:

$$Dati = [1; 1.2; 1.2; 1.3; 1.7; 1; 0.8; 1; 1.2; 1.3; 1.8; 0.6; 0.8; 1.3; 2.4; 1.9; 2.8]$$

I valori di soglia sono pari rispettivamente a:

$$\delta_{change_and_transmit} = 0.4\ kW$$

$$\delta_2^{(+)} = 0.5\ kW$$

$$\delta_2^{(-)} = -0.5kW$$

Sulla base dell'equazione 6.3, si ha così che:

$$Prima\ tendenza\ positiva\ attesa = 1 + 0.5 = 1.5\ kW$$

$$Prima\ tendenza\ negativa\ attesa: 1 - 0.5 = 0.5\ kW$$

Per una maggiore semplicità di esposizione, all'interno dell'algoritmo la tendenza attesa positiva è stata denominata $tendenza1$ ed indicata nei grafici con il colore blu, mentre la tendenza attesa negativa è stata denominata $tendenza2$ ed indicata nei grafici con il colore rosso.

Dopo aver ricevuto i dati in ingresso, tutte le variabili utili ai fini di calcolo vengono inizializzate. In particolare i vettori riferiti ai valori di energia, delle tendenze, e delle durate degli eventi sono definiti con una dimensione sufficientemente grande per i calcoli futuri, nello specifico solitamente viene scelta come dimensione la stessa dimensione del vettore contenente i dati iniziali. Tale operazione viene effettuata in quanto per poter avere una ricostruzione dei dati oppurtana i vettori derivanti dai dati iniziali e i vettori derivanti dalla generazione degli eventi devono avere egual dimensione per poter essere confrontati. All'interno del ciclo di calcolo, le variabili sopracitate vengono aggiornate in tempo reale, in modo che quando l'operatore ritiene opportuno visionare i dati, può effettuare qualsiasi tipo di confronto senza svolgere ulteriore operazioni di calcolo. Nel caso analizzato ad esempio, i dati sono 17, mentre gli eventi registrati e dunque i rispettivi valori di potenza media, sono soltanto 8. Ecco dunque che il vettore della potenza media calcolato in seguito alla generazione degli eventi denominato P_{media}, deve necessariamente contenere 17 valori. Ciò è possibile semplicemente replicando lo stesso valore di potenza media tra un evento e il suo successivo.

Avendo scelto una base tempi pari al secondo e un generico vettore dei tempi la cui origine coincide con il valore zero, sarà possibile ricavare la posizione degli eventi semplicemente osservando il vettore $tempo_{evento}$ in cui sono riportati gli istanti temporali relativi agli eventi.

tempo_evento

8x1 double

	1
1	4
2	5
3	10
4	11
5	13
6	14
7	15
8	16

Figura 6.1 Posizione degli eventi dell'esempio applicativo dello schema combinato doppia soglia.

Dalla Figura 6.1 è chiaro che gli eventi si verificano in corrispondenza delle posizioni: 4, 5, 10, 11, 13, 14, 15 e 16.

E' sufficiente, quindi, replicare il primo valore del vettore P_{media} dalla prima alla quarta posizione, il secondo in quinta posizione, il terzo dalla sesta alla decima posizione e così via come esposto in Figura 6.2.

potenze_array_colonna

17x1 double

	1
1	1.1750
2	1.1750
3	1.1750
4	1.1750
5	1.7000
6	1.0600
7	1.0600
8	1.0600
9	1.0600
10	1.0600
11	1.8000
12	0.7000
13	0.7000
14	1.3000
15	2.4000
16	1.9000
17	1.9000

Figura 6.2 Vettore potenze medie derivanti dalla generazione degli eventi con schema combinato a doppia soglia.

Una volta definiti gli indici necessari, l'elaborazione consiste di una prima parte in cui si verifica se e in caso quali condizioni per la generazione degli eventi sono state raggiunte. In particolare prima si verifica se l'andamento del processo continua ad essere all'interno delle fasce delineate da $\delta_2^{(+)}$ e $\delta_2^{(-)}$ e successivamente se è stata o meno superata la soglia $\delta_{change_and_transmit}$. Nel caso in cui viene raggiunta anche soltanto una delle condizioni, viene inviata l'informazione di generazione dell'evento e si procede al calcolo delle variabili ad esso collegate. Se invece non

si verifica nessuna delle condizioni si passa semplicemente all'analisi dei dati successivi.

In caso di generazione dell'evento possono presentarsi diverse possibilità:

a) Generazione dell'evento in seguito al superamento della soglia $\delta_2^{(+)}$.
b) Generazione dell'evento in seguito al superamento della soglia $\delta_2^{(-)}$.
c) Generazione dell'evento in seguito al superamento della soglia $\delta_2^{(+)}$ e della soglia $\delta_{change_and_transmit}$.
d) Generazione dell'evento in seguito al superamento della soglia $\delta_2^{(-)}$ e della soglia $\delta_{change_and_transmit}$.
e) Generazione dell'evento in seguito al superamento della sola soglia $\delta_{change_and_transmit}$.

Ad ognuna di queste possibilità è stato associato un valore numerico in modo tale da poter individuare immediatamente che tipo di evento si è verificato. Essi sono elencati nella Tabella 6.1. Tali numeri sono stati poi riportati in un vettore denominato $Eventi_{pos\ neg\ CaT}$ in modo tale da poter avere una rappresentazione grafica sottoforma di impulsi delle tipologie di eventi verificatesi.

Tabella 6.1 Numeri identificativi delle possibili condizioni di generazione degli eventi per lo schema combinato doppia soglia.

Condizione	Numero identificativo
a	1
b	-1
c	3
d	-3
e	2

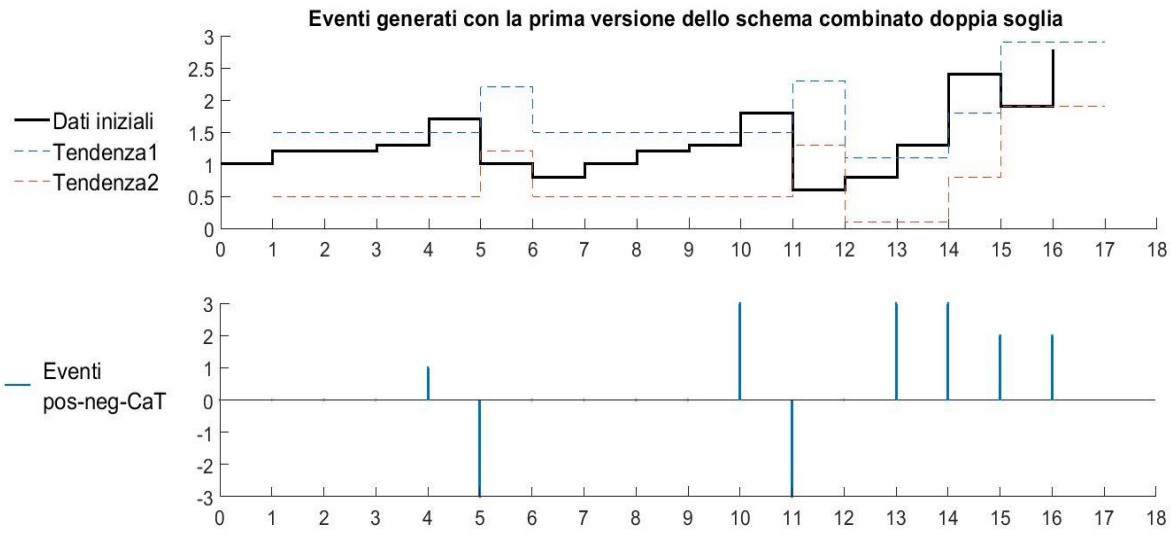


Grafico 6.1 Prima versione schema combinato doppia soglia (ampiezze in kW).

Quanto esposto fino ad ora è riassunto nel Grafico 6.1.

Come già detto, le prime tendenze hanno valori pari rispettivamente a 1.5 e 0.5 e il primo evento si verifica alla posizione 4. Pertanto per la prima versione le tendenze successive diventano:

$$Tendenza1 = P(4) + \delta_2^{(+)} = 1.7 + 0.5 = 2.2 \text{ kW}$$

$$Tendenza2 = P(4) + \delta_2^{(-)} = 1.7 - 0.5 = 1.2 \text{ kW}$$

Mentre per la seconda versione diventerebbero:

$$Tendenza1 = media\big(P(1):P(4)\big) + \delta_2^{(+)} = \frac{1 + 1.2 + 1.2 + 1.3}{4} + 0.5 =$$
$$= 1.175 + 0.5 = 1.675 \text{ kW}$$

$$Tendenza2 = media\big(P(1):P(4)\big) + \delta_2^{(-)} = \frac{1 + 1.2 + 1.2 + 1.3}{4} - 0.5 =$$
$$= 1.175 - 0.5 = 0.675 \text{ kW}$$

Nel Grafico 6.2 è possibile osservare le modificazioni che subiscono le tendenze in seguito alla applicazione della seconda versione dello schema combinato doppia soglia.

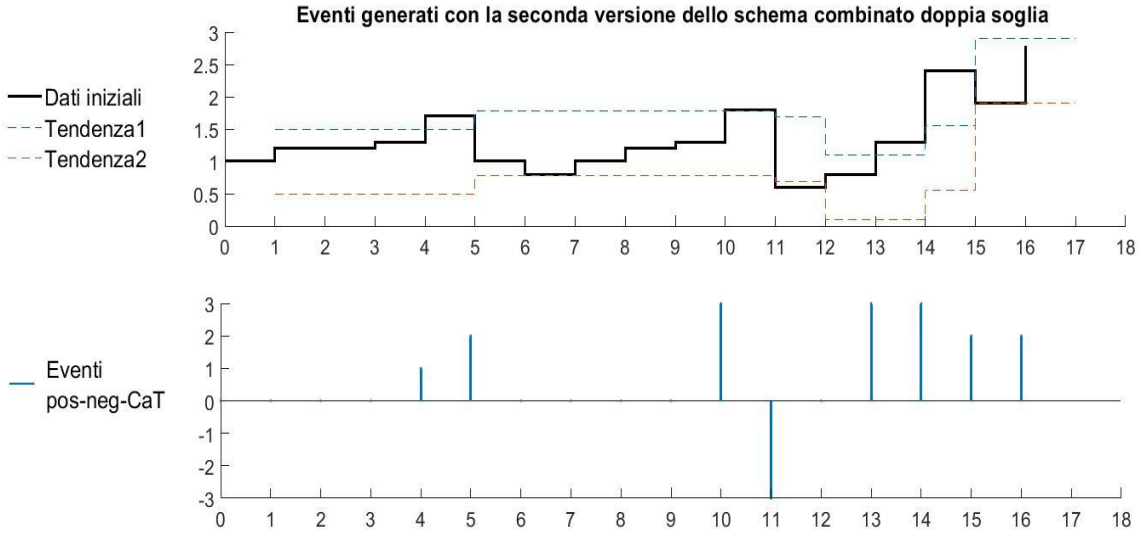


Grafico 6.2 Eventi generati con la seconda versione dello schema combinato doppia soglia (ampiezze in kW).

Una volta definite le tipologie di eventi verificatesi, si procede con i calcoli delle variabili necessarie per la ricostruzione del pattern e della distanza euclidea per poter definire in che misura essa si discosta dal pattern iniziale.

La procedura di calcolo adoperata è stata riassunta in un diagramma di flusso riportato nel Grafico 6.3.

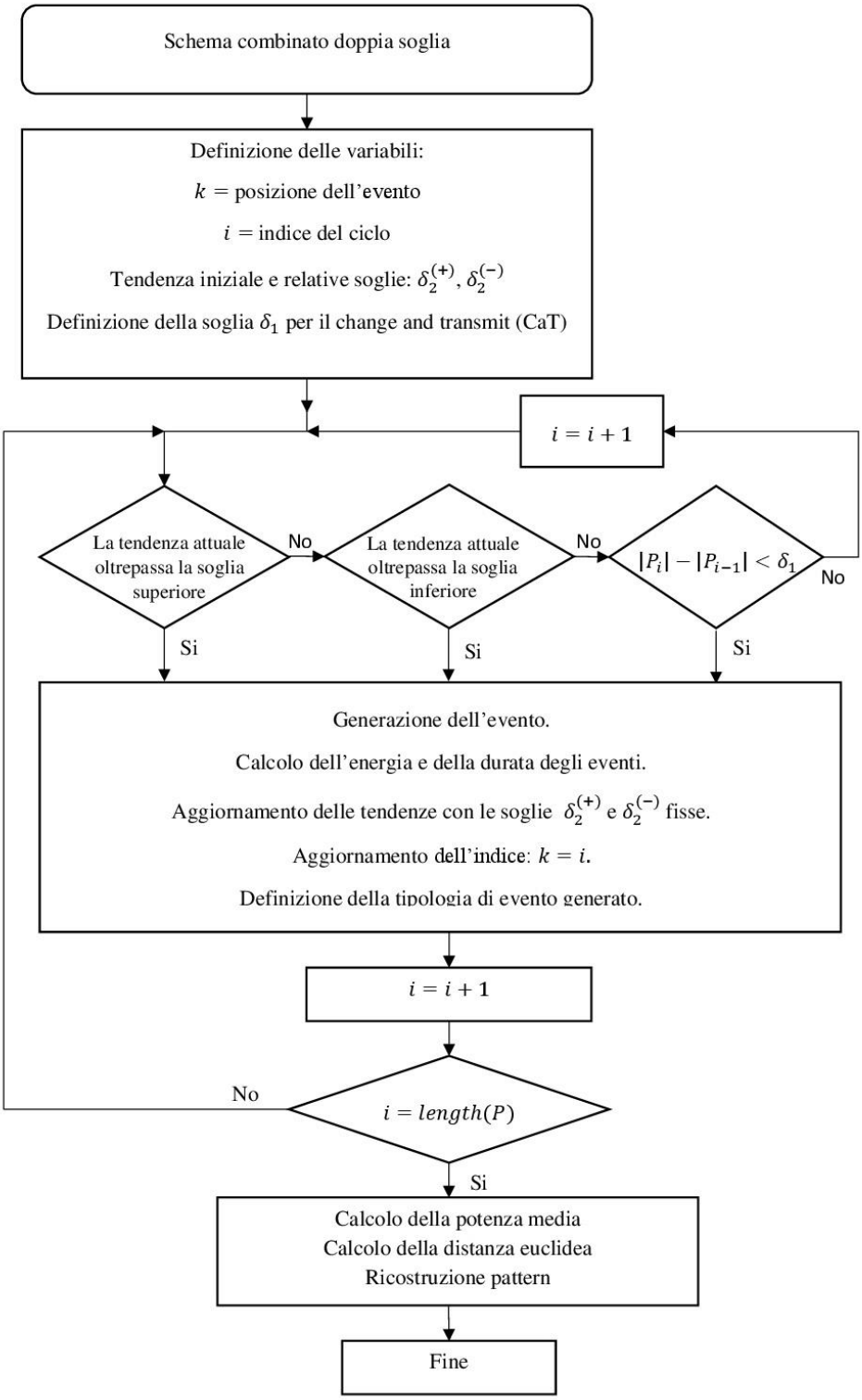


Grafico 6.3 Diagramma di flusso schema combinato doppia soglia.

6.2. Caso Frigorifero

La prima prova è stata effettuata su un frigorifero Whirlpool CB298W. A differenza del caso analizzato nel Capitolo 4 su un altro frigorifero, le misure sono state effettuate con una base tempi di un secondo e per un periodo di tempo di circa tre ore e trentacinque minuti.

Tale prova ha reso possibile esplicare la forza dello schema combinato a doppia soglia.

Il diagramma di carico iniziale è illustrato nel Grafico 6.4. Esso presenta una certa costanza durante tutto il periodo di analisi o comunque oscillazioni molto contenute, eccetto il picco presente nell'istante temporale pari a 61641 s.

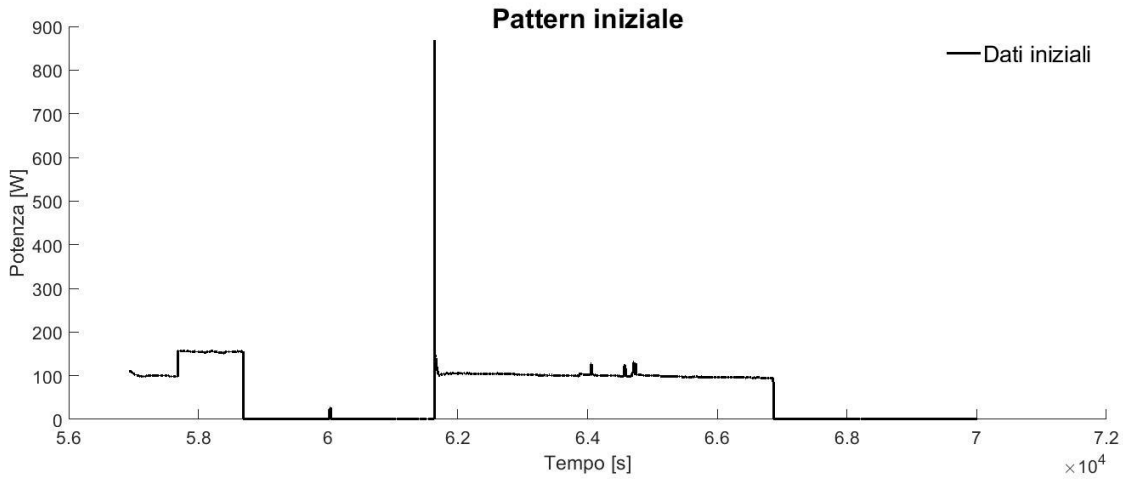


Grafico 6.4 Pattern iniziale di un frigorifero Whirlpool CB298W.

Lo schema combinato a doppia soglia è una metodologia contemporaneamente *stateless* e *stateful*. L'approccio Change and transmit, presente al suo interno, permette di registrare eventi che si discostano dalle aspettative di evoluzione del processo, dato che in un contesto industriale se sono presenti dei picchi è necessario esserne informati tempestivamente. L'analisi svolta sulla variazione dell'energia

accumulata e la costruzione delle tendenze attese permette invece di avere anche uno storico dei dati, cioè di avere memoria di ciò che sta accadendo.

Il caso presente nel Grafico 6.4 è stato scelto proprio perché potrebbe rappresentare le caratteristiche di un qualsiasi carico con un ciclo ripetitivo e per lo più costante, affetto da un picco improvviso, bisogna ricordare infatti che i processi industriali non sono affetti dalle variazioni eccessive caratteristiche degli elettrodomestici, ma da andamenti piuttosto costanti. Osservando il pattern iniziale è possibile notare come il valore di potenza sia quasi sempre pari ai 100 W, esclusi il picco all'istante 61641, la variazione presente nell'intervallo di tempo tra 57800 s e 58300 s e altre piccole oscillazioni presenti tra 64000 s e 65000 s.

Le tre casistiche sono riportate nella Tabella 6.2.

Tabella 6.2 Soglie adoperate per lo schema doppia soglia di un frigorigero.

	δ_2	$\delta_{change_and_transmit}$
Caso 1	10 Ws	20 W
Caso 2	60 Ws	80 W
Caso 3	150 Ws	200 W

Nel Grafico 6.5 sono riportati i singoli pattern con le relative tendenze previste al variare delle soglie imposte.

La scelta delle giuste soglie permette di identificare gli eventi significativi. Il caso 1 permette di individuare sia il picco di maggiore entità che le piccole oscillazioni in entrambi i periodi precedentemente citati. Il caso 2 permette di individuare sia il picco che la variazione relativa al primo periodo, mentre il caso 3 permette di individuare esclusivamente il picco. Quale dei 3 casi adoperare in un contesto industriale dipenderà dagli obiettivi prefissati da ogni produttore.

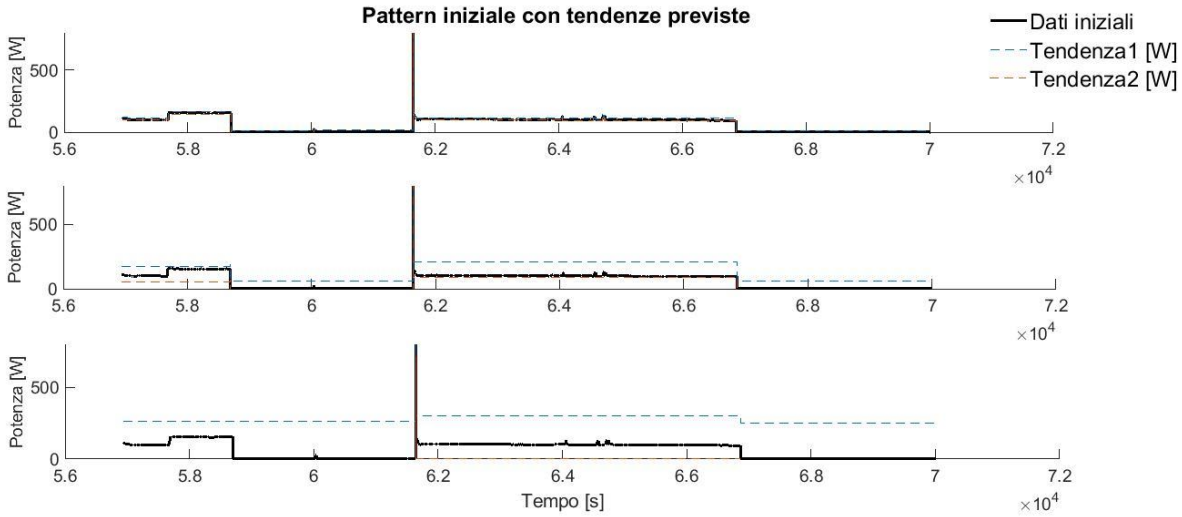


Grafico 6.5 Singoli pattern di un frigorifero con le relative tendenze.

E' possibile visualizzare il verificarsi degli eventi con due tipi di approcci differenti. Nel Grafico 6.6 è possibile osservare sia l'istante temporale in cui si verifica l'evento, sia il rispettivo valore di potenza media registrato.

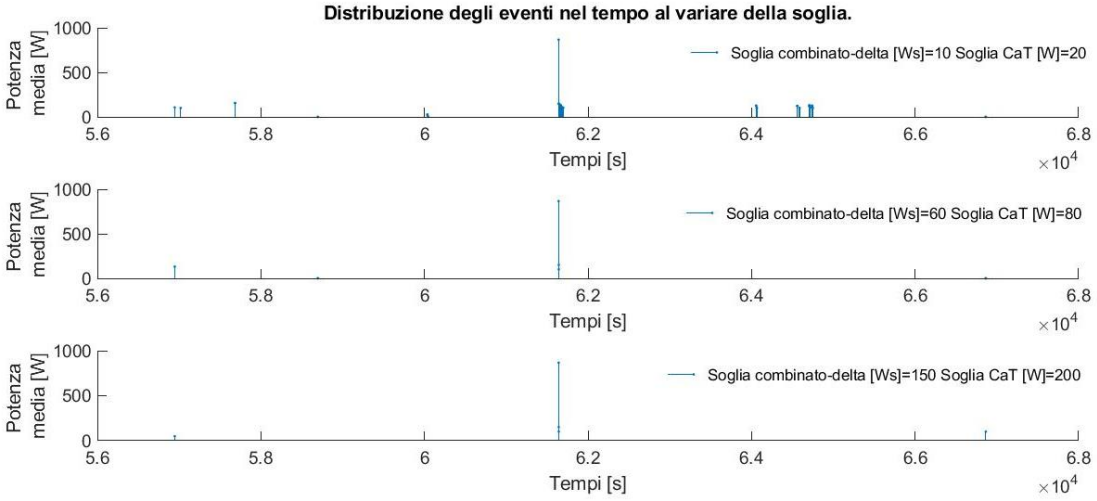


Grafico 6.6 Distribuzione degli eventi nel tempo per un frigorifero con schema combinato doppia soglia.

Il Grafico 6.7, invece, offre delle informazioni riguardanti sia l'istante in cui si è generato l'evento, sia la tipologia di evento registrato. Ad esempio nel primo grafico tutti gli eventi, eccetto il picco che viene identificato sia dalla variazione di

tendenza che dal raggiungimento della soglia del Change and Transmit, sono stati generati dal discostamento dalle tendenze previste. Nel secondo caso sono presenti soltanto altri due eventi dovuti al discostamento dal limite inferiore della tendenza prevista, mentre l'ultimo caso è quello in cui viene registrato esclusivamente il picco, che implica il raggiungimento di tutte le condizioni per la generazioni di eventi: superamento del limite inferiore della tendenza, superamento della soglia superiore e della soglia del Change and Transmit, infatti il segmento rappresentativo di tale evento ha un valore compreso tra -3 e +3.

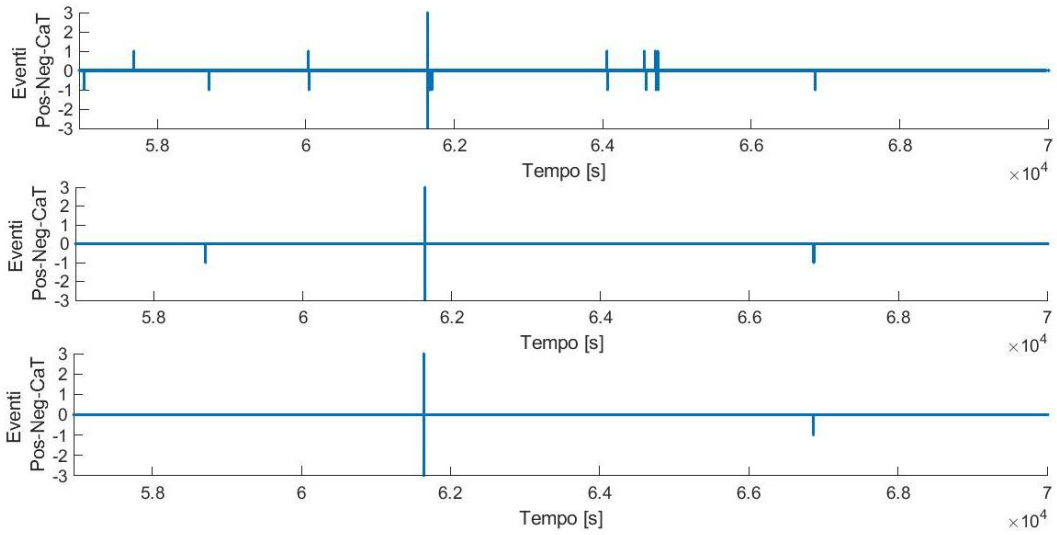


Grafico 6.7 Eventi Pos Neg CaT di un frigorifero

Il grafico relativo alla distanza euclidea può essere ottenuto in due modi:

1. Mantenendo la soglia δ_2 fissa e facendo variare la soglia $\delta_{\text{change_and_transmit}}$.
2. Mantendo la soglia $\delta_{\text{change_and_transmit}}$ fissa e facendo variare la soglia δ_2.

In questo caso è stata scelta la modalità 1 e gli andamenti al variare della soglia $\delta_{\text{change_and_transmit}}$ sono riportati nel Grafico 6.8.

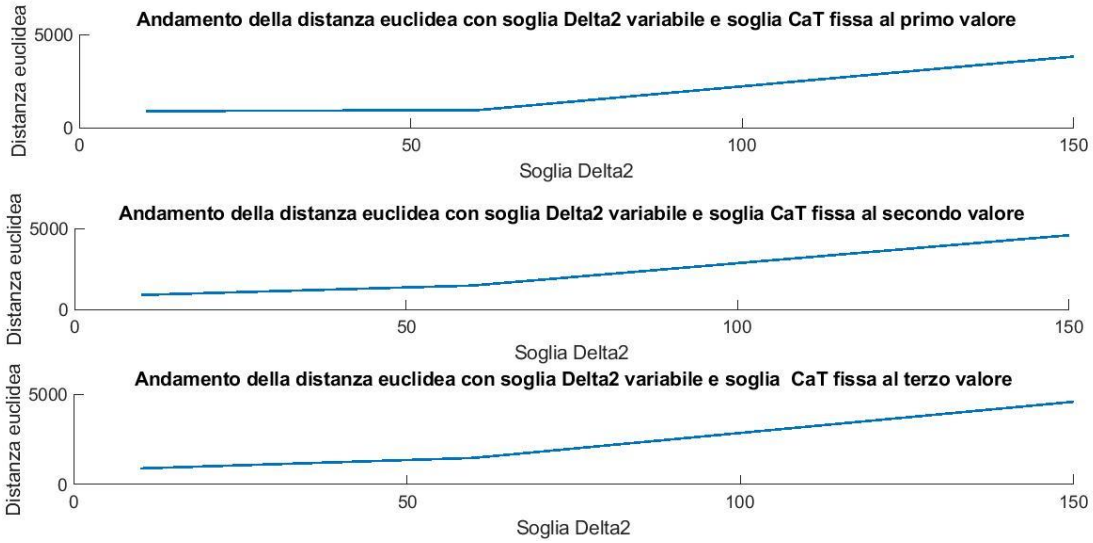


Grafico 6.8 Andamenti della distanza euclidea di un frigorifero ottenuti al variare della soglia CaT.

I valori numerici ottenuti per la distanza euclidea al variare della soglia $\delta_{change_and_transmit}$ sono riportati in Figura 6.3.

Soglia CaT fissa al primo valore

dist_euclidea

1x3 double

	1	2	3
1	889.0702	937.1315	3.8154e+03

Soglia CaT fissa al secondo valore

dist_euclidea

1x3 double

	1	2	3
1	889.0702	1.4706e+03	4.5798e+03

Soglia CaT fissa al terzo valore

dist_euclidea

1x3 double

	1	2	3
1	889.0702	1.4706e+03	4.5798e+03

Figura 6.3 Valori numerici della distanza euclidea al variare della soglia CaT.

Nel Grafico 6.9 è possibile osservare i diagrammi di carico ricostruiti per ognuna delle casistiche esposte nella Tabella 6.2.

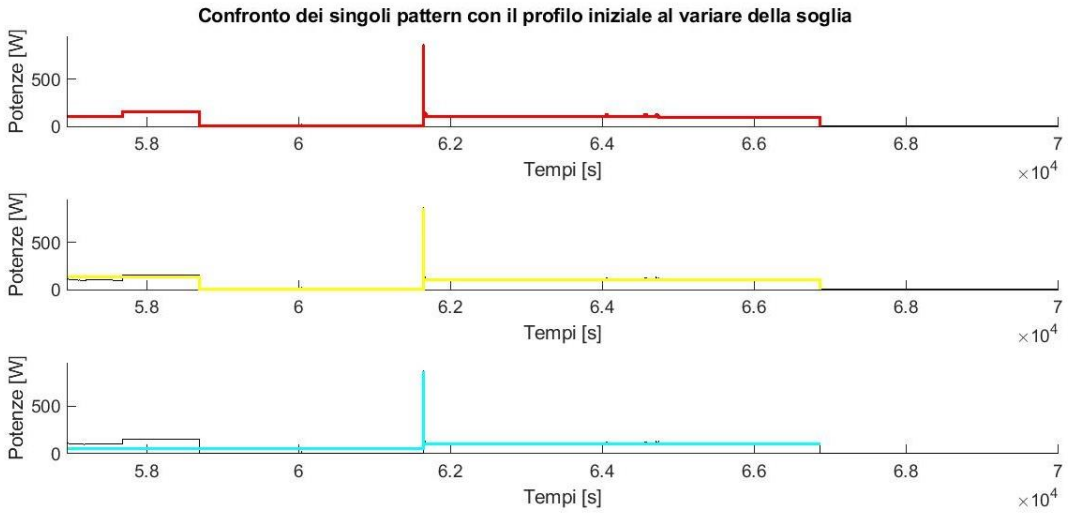


Grafico 6.9 Singoli pattern per un frigorifero con schema combinato doppia soglia.

E' facile notare come il caso 1 offre una ricostruzione del diagramma di carico perfettamente coincidente con il diagramma di carico iniziale, il caso 2 è in grado ricostruire quasi tutto l'andamento eccetto le piccole oscillazioni, mentre l'ultimo caso produce un diagramma mediato prima e dopo il verificarsi del picco.

6.3. Primo caso Lavatrice

Tale prova è stata effetuata utilizzando i dati relativi alla prima prova effettuata sulla lavatrice. E' stato utilizzata inoltre la seconda versione dello schema combinato doppia soglia. Le casistiche affrontate con le relative soglie sono riportate nella Tabella 6.3.

Tabella 6.3 Soglie adoperate per lo schema doppia soglia di una lavatrice.

	δ_2	$\delta_{change_and_transmit}$
Caso 1	100 Ws	130 W
Caso 2	200 Ws	230 W
Caso 3	500 Ws	1500 W

E' possibile notare già dal Grafico 6.10, contenente tutte le ricostruzioni ottenute al variare della soglia come la ricostruzione ottenuta per una certa coppia di valori non sia in grado di ricostruire alcun dettaglio successivo all'ultimo picco di circa 1650 W.

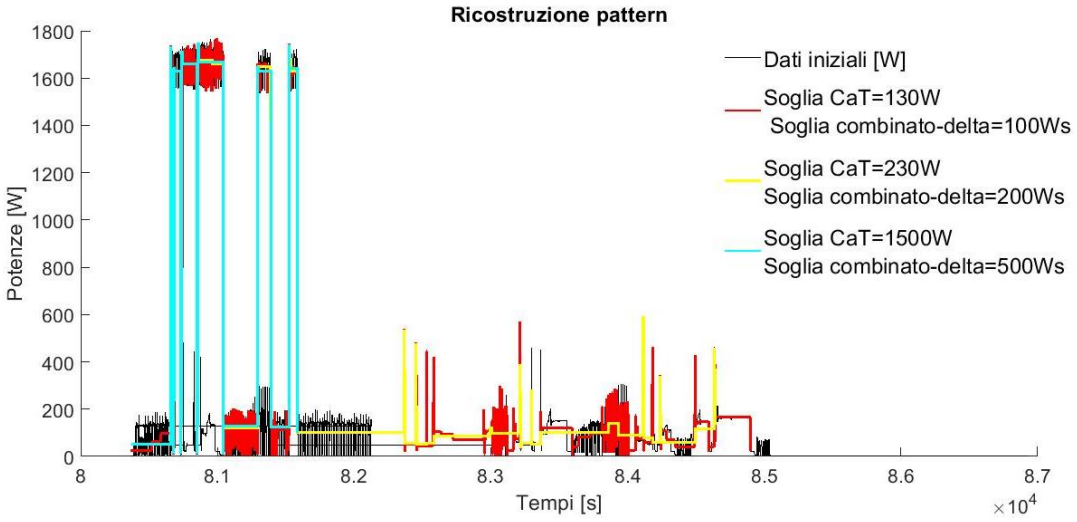


Grafico 6.10 Pattern lavatrice con schema combinato doppia soglia.

Ciò accade perché, come riporta l'ultimo subplot del Grafico 6.11, in base alle soglie adoperate per la creazione delle tendenze nessun evento è stato rilevato da 81600 s circa. Pertanto se l'obiettivo è una ricostruzione più vicina possibile al diagramma di carico iniziale, allora le soglie da adoperare sono quelle relative al caso 1. La ricostruzione in rosso è, infatti, in grado di identificare tutti i picchi presenti e anche le piccole oscillazioni. Se invece l'obiettivo è registrare esclusivamente i picchi improvvisi e le oscillazioni di minore entità, essendo più interessati al contenuto energetico piuttosto che a una riproduzione fedele, allora le soglie giuste da adoperare sono quelle del caso 2. Le soglie del caso 3 costituiscono la giusta scelta se si è interessanti esclusivamente alle ampie oscillazioni.

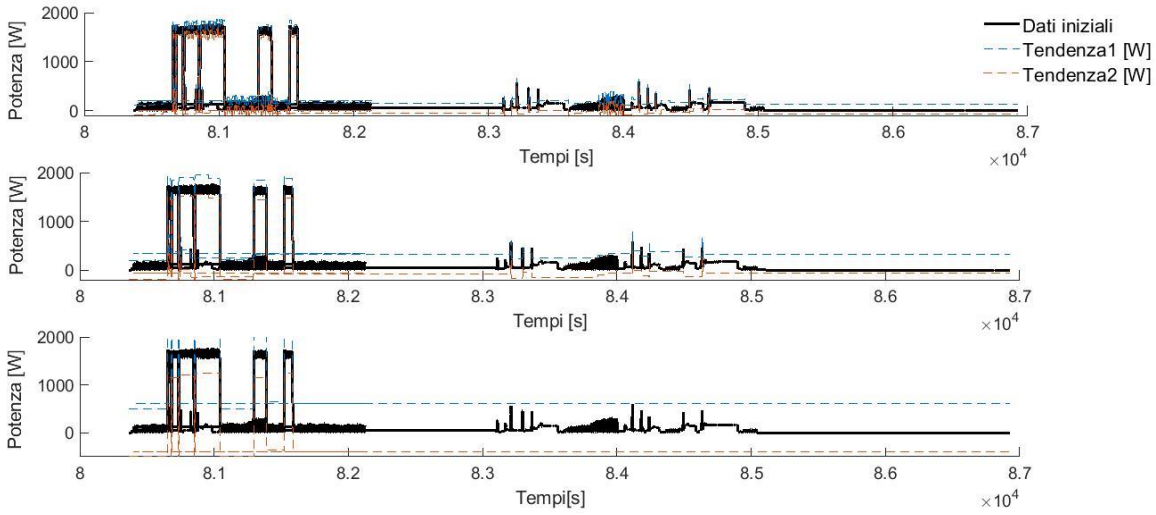


Grafico 6.11 Dati iniziali con le relative tendenze di una lavatrice.

I Grafici 6.12 e 6.13 offrono una panoramica sull'entità e la tipologia degli eventi.

Mentre nel caso 1 e nel caso 2 è possibile osservare degli eventi dovuti esclusivamente al superamento della soglia Change and Transmit, nel caso 3 tutti gli eventi implicano il superamento di uno dei limiti della tendenza.

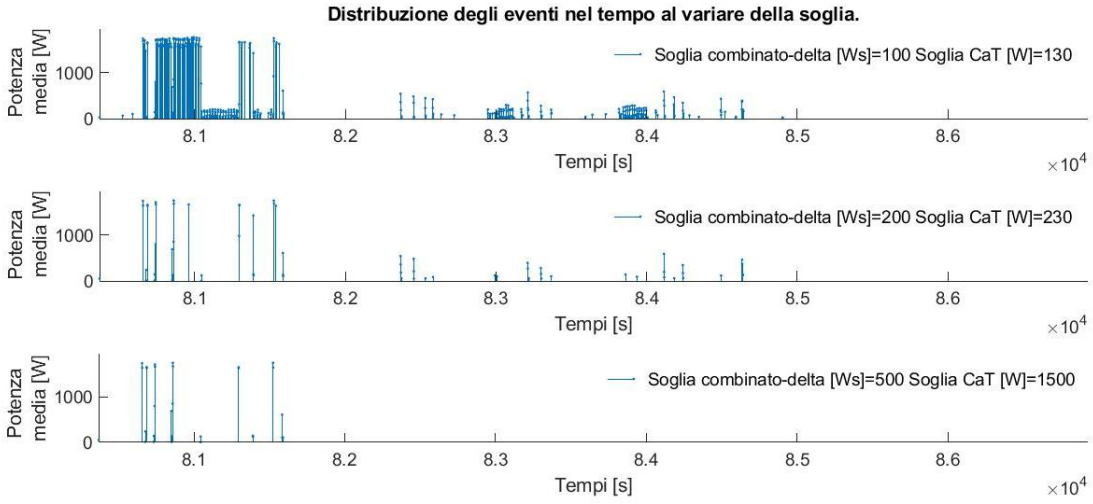


Grafico 6.12 Distribuzione degli eventi nel tempo per una lavatrice con schema combinato doppia soglia.

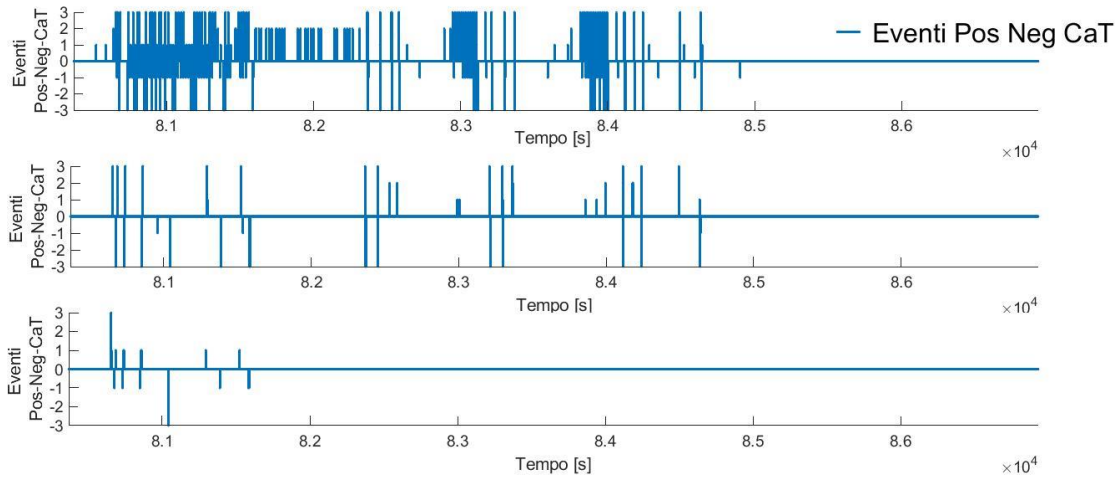


Grafico 6.13 Eventi Pos Neg CaT per una lavatrice.

Il Grafico 6.14 mostra l'andamento della distanza euclidea adoperando la prima modalità esposta nel precedente paragrafo. Gli andamenti sono monotoni crescenti e tutti uguali tra loro, dimostrando che i valori di soglia scelti per tale prova non influiscono sulla qualità della ricostruzione.

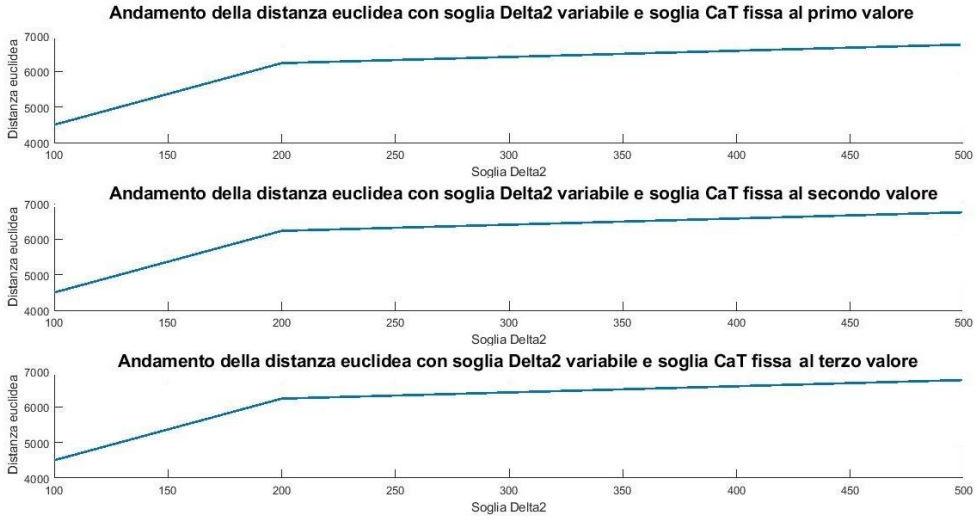


Grafico 6.14 Andamenti della distanza euclidea di una lavatrice ottenuti al variare della soglia CaT.

6.4. Caso Forno

Tale prova è stata affrontata per mettere a confronto i risultati ottenuti, in un caso reale, mediante l'impiego di entrambe le versioni dello schema combinato doppia soglia.

Anche in questo caso le caratteristiche relative all'elettrodomestico sono state già introdotte.

La Tabella 6.4 riporta tutti i valori delle soglie adoperate per ogni casistica.

Tabella 6.4 Soglie adoperate per lo schema doppia soglia di un forno.

	δ_2	$\delta_{change_and_transmit}$
Caso 1	500 Ws	800 W
Caso 2	1000 Ws	1000 W
Caso 3	1500 Ws	1000 W

In ognuna delle due prove sono state introdotte delle forzature per far notare alcune particolarità che si possono verificare nel caso del forno.

Esso ha un diagramma di carico affetto da oscillazioni molto ampie e quasi sempre a cadenza temporale fissa. Diventa così complicato stabilire delle soglie opportune, in quanto la situazione più ovvia che possa verificarsi è che si registrino degli eventi continuamente, come è possibile notare dal primo subplot nel Grafico 6.15.

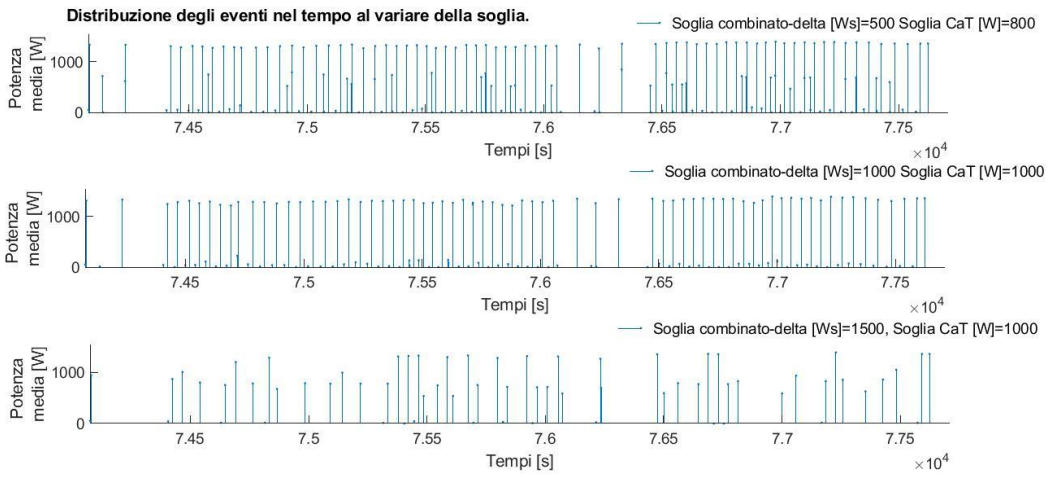


Grafico 6.15 Distribuzione degli eventi nel tempo per un forno con la prima versione dello schema combinato a doppia soglia.

Data la regolarità dell'andamento del diagramma di carico del forno si è pensato di fissare le due tendenze a 1000 W, in quanto è un valore abbastanza comune per tale elettrodomestico e di fissare invece la soglia del Change and Transmit a 1500 W, in seguito all'osservazione del diagramma di carico iniziale.

Il caso 3 è rappresentato nell'ultimo subplot del Grafico 6.16, dove è possibile vedere come l'andamento sia completamente contenuto dalla fascia delineata dalle tendenze, pertanto gli unici eventi registrati si riferiscono al superamento della soglia Change and Transmit, cosa che appare evidente nel Grafico 6.17 dove il vettore $eventi_{\ Pos\ Neg\ CaT}$ ha sempre valore pari a 2.

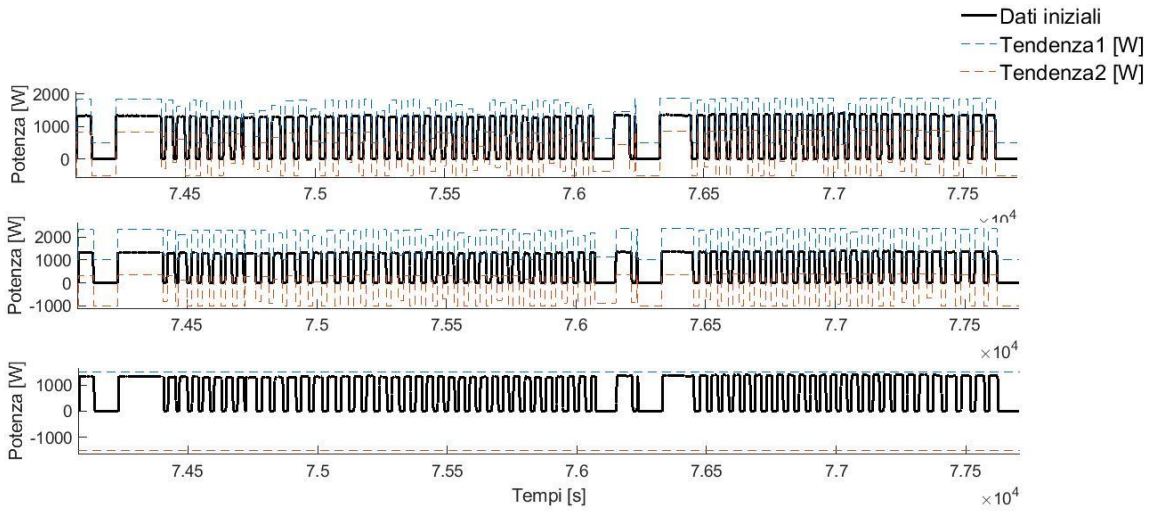


Grafico 6.16 Dati iniziali con le relative tendenze per un forno

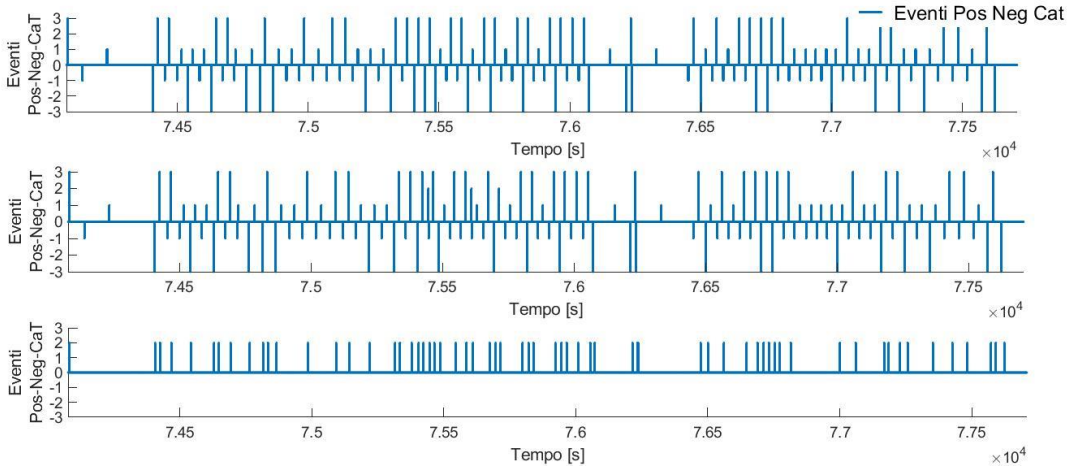


Grafico 6.17 Eventi Pos Neg CaT per un forno.

I diagrammi di carico ricostruiti sono presenti nei Grafici 6.18 e 6.19. La qualità di rappresentazione diminuisce all'aumentare dei valori delle soglie e il caso 3 implica una ricostruzione del diagramma di carico totalmente diversa dall'andamento iniziale, ma energicamente equivalente.

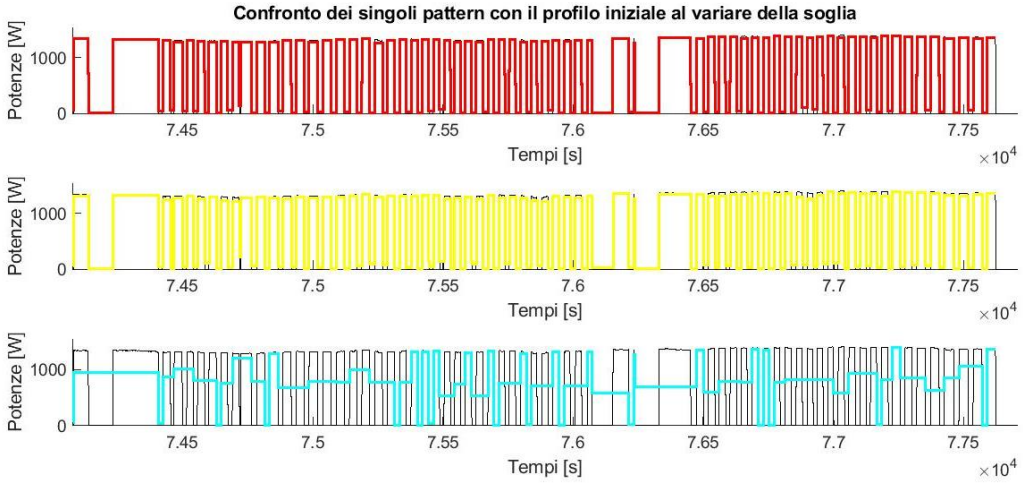


Grafico 6.18 Singoli pattern per un forno con schema combinato doppia soglia.

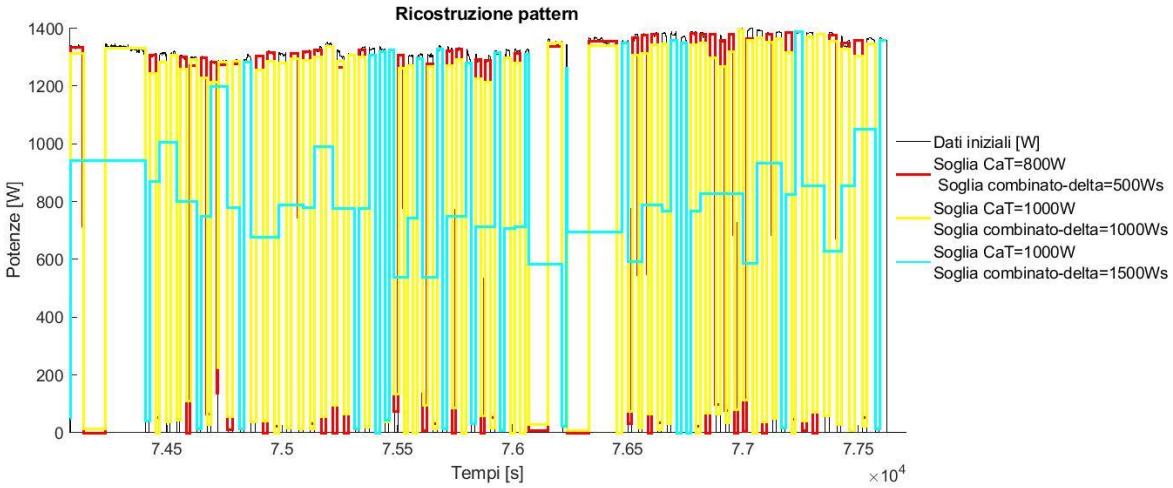


Grafico 6.19 Pattern forno con schema combinato doppia soglia

Per la prima versione del caso del forno è stata utilizzata la modalità due per il conseguimento del grafico relativo alla distanza euclidea, ovvero il grafico è stato ottenuto mantendo la soglia $\delta_{\text{change_and_transmit}}$ fissa, facendo variare invece la soglia δ_2 di cui per i valori numerici si riporta alla Figura 6.4.

DELTA2 fisso al primo valore

dist_euclidea

1x3 double

	1	2	3
1	6.1141e+04	6.1149e+04	6.1149e+04

DELTA2 fisso al secondo valore

dist_euclidea

1x3 double

	1	2	3
1	6.1344e+04	6.1556e+04	6.1556e+04

DELTA2 fisso al terzo valore

dist_euclidea

1x3 double

	1	2	3
1	6.1005e+04	6.0735e+04	6.0735e+04

Figura 6.4 Valori della distanza euclidea di un forno ottenuti al variare della soglia Delta2.

Gli andamenti ottenuti sono tutti monotoni crescenti, eccetto l'ultimo. In questo caso, le soglie sono basse rispetto alle grandezze in gioco e l'uso di una soglia combinato-delta superiore alla soglia del Change and transmit comporta una ricostruzione meno efficace dell'andamento effettivo, come si vede dal Grafico 6.19.

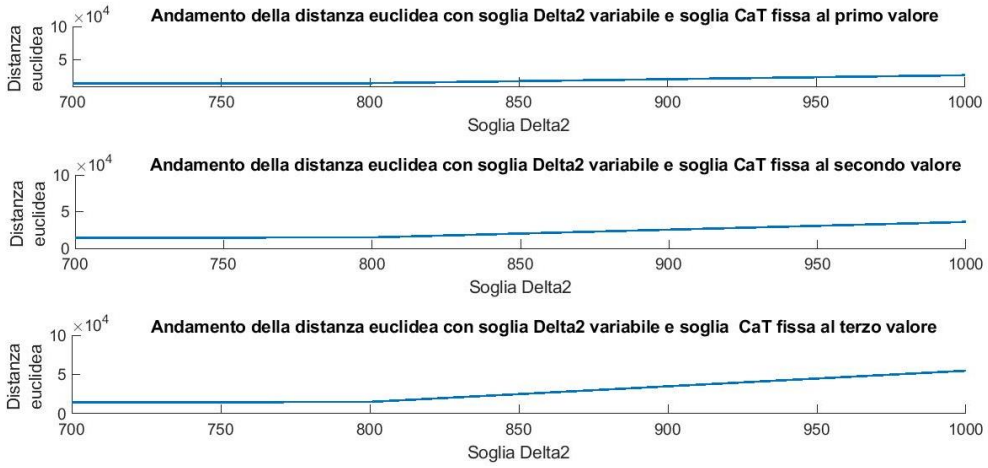


Grafico 6.20 Andamento della distanza euclidea per un forno al variare della soglia Delta2.

Per la seconda versione sono state utilizzate le stesse soglie utilizzate per la prima versione. Essa è rappresentata dai Grafici 6.21, 6.22 e 6.23. A differenza del caso precedente in questo caso gli eventi si verificano esclusivamnte per il superamento della soglia δ_2, come è chiaro dal Grafico 6.23 dove tutti i valori di $eventi_{\ Pos\ Neg\ CaT}$ sono pari a ± 1.

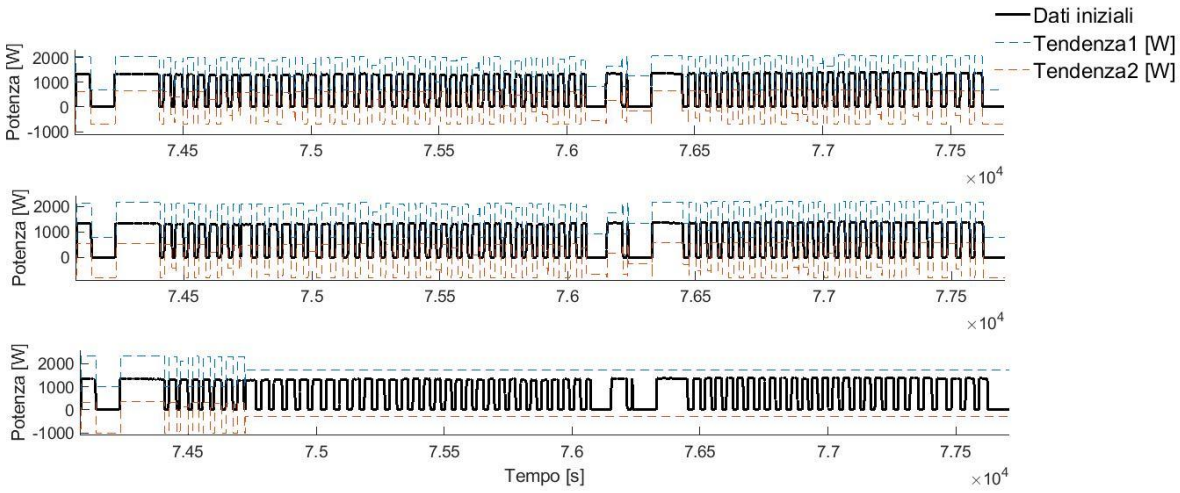


Grafico 6.21 Dati iniziali e relative tendenze per un forno, seconda versione.

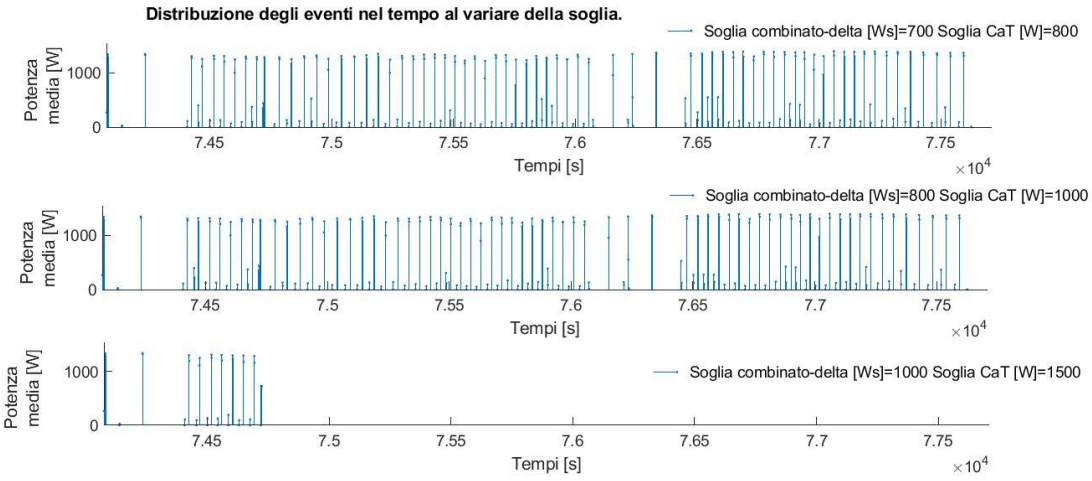


Grafico 6.22 Distribuzione nel tempo degli eventi al variare delle soglie per uno schema combinato doppia soglia, seconda versione.

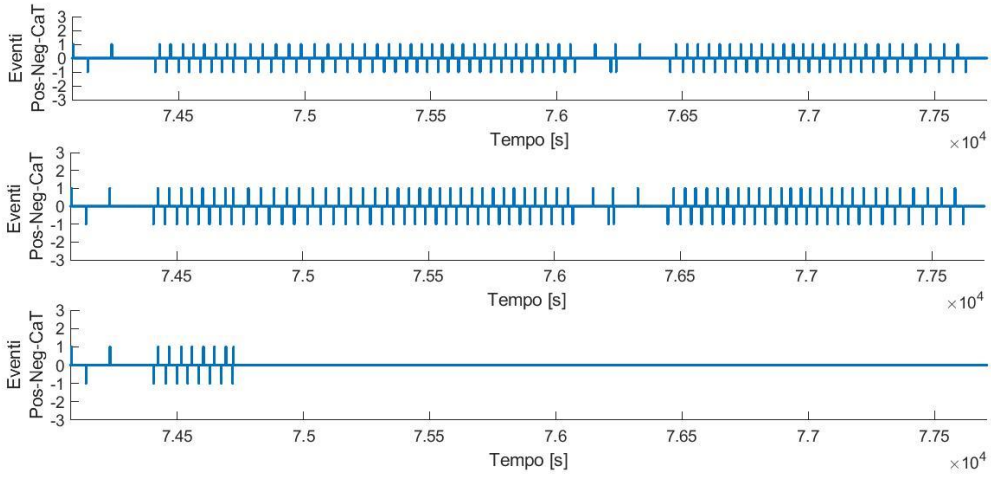


Grafico 6.23 Eventi Pos Neg Cat, seconda versione.

La ricostruzione dei singoli pattern è riportata nel Grafico 6.24, ottenendo un andamento per il terzo sublplot molto simile a quello ottenuto nel primo caso della lavatrice.

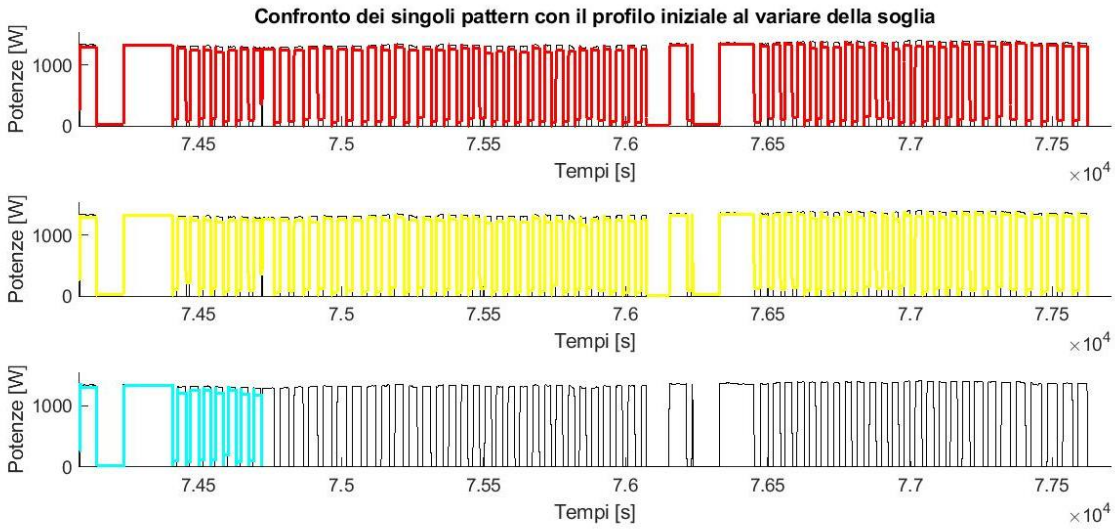


Grafico 6.24 Singoli pattern per un forno con schema combinato doppia soglia.

Per l'ottenimento del grafico relativo alla distanza euclidea è stata adoperata la modalità 1 (Grafico 6.25). Per i valori numerici si rimanda alla Figura 6.5.

Soglia CaT fissa al primo valore

dist_euclidea

1x3 double

	1	2	3
1	1.4373e+04	1.4817e+04	2.6763e+04

Soglia CaT fissa al secondo valore

dist_euclidea

1x3 double

	1	2	3
1	1.4467e+04	1.4908e+04	3.5973e+04

Soglia CaT fissa al terzo valore

dist_euclidea

1x3 double

	1	2	3
1	1.4467e+04	1.5036e+04	5.4768e+04

Figura 6.5 Valori numerici della distanza euclidea ottenuti al variare della soglia CaT.

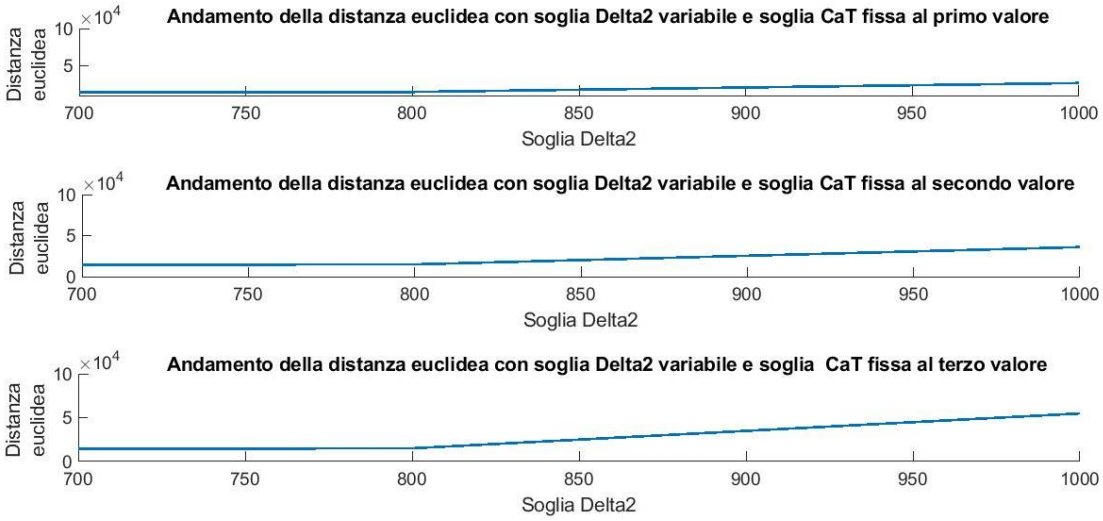


Grafico 6.25 Andamento della distanza euclidea per un forno al variare della soglia CaT.

7. Comparazione tra i vari approcci.

Lo scopo principale della tesi è ottenere uno schema di misurazione molto più efficiente del TDM, che si basa sul rilevamento e l'invio di informazioni ad intervalli di tempo uniformi. La modalità TDM permette, infatti, di inviare esclusivamente informazioni riguardanti il contenuto energetico del processo, non essendo in grado di descriverlo.

I dati relativi agli istanti temporali e all'entità degli eventi permettono una ricostruzione dei diagrammi di carico con una risoluzione temporale uguale a quella del diagramma di carico iniziale.

I diagrammi ricostruiti attraverso la modalità TDM sono ottenuti considerando una potenza media costante tra due intervalli di tempo successivi, anche in questo caso la risoluzione temporale è la stessa del diagramma di carico iniziale.

E' comunque possibile trasformare un contatore ad eventi in un contatore funzionante in modalità TDM, se necessario. E' sufficiente modificare la condizione necessaria per la rilevazione degli eventi, non più basata sul superamento di determinate soglie, ma su eventi "fittizi" generati con una cadenza temporale regolare, pari ad esempio al classico quarto d'ora. Tali eventi non sono considerati all'interno della modalità EDM, in modo da poter mantenere i vantaggi offerti dalla raccolta dati basata sugli eventi.

Effettuando una comparazione tra il diagramma di flusso presente nel Grafico 4.2, rappresentativo dell'approccio Change and transmit e il Grafico 7.1 è facile notare che l'unica differenza presente tra i due è il vettore $pos_{variazione}$, proprio perché nell'approccio TDM è l'operatore stesso a decidere ogni quanto tempo registrare un evento.

Tale capitolo ha pertanto lo scopo di dimostrare che gli approcci EDM presentano una qualità di rappresentazione nettamente superiore rispetto a quella ottenibile mediante un approccio di tipo TDM.

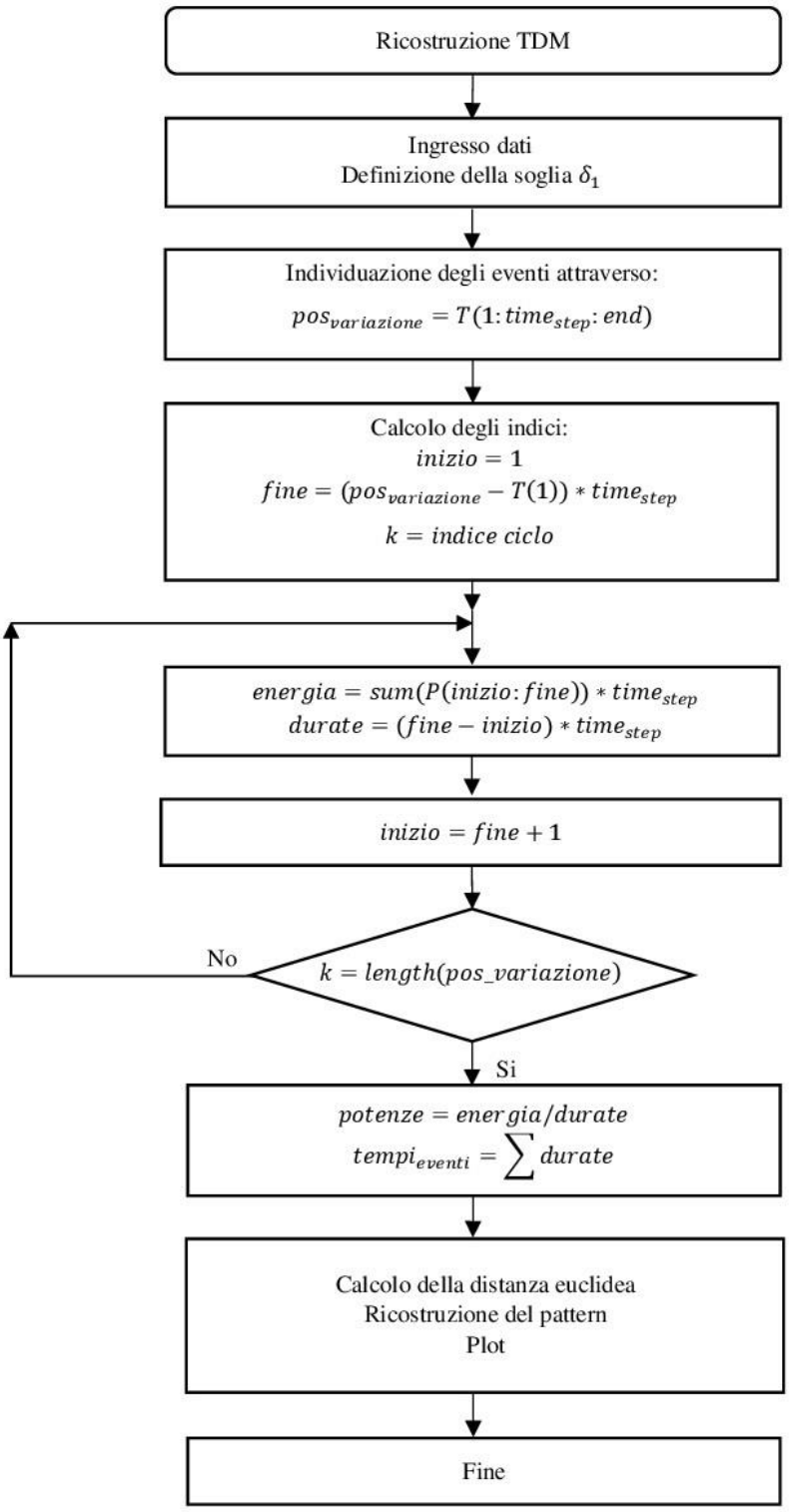


Grafico 7.1 Diagramma di flusso dell'approccio TDM.

Questo capitolo ha lo scopo di confrontare la qualità della ricostruzione del diagramma di carico iniziale offerta dai vari approcci analizzati in precedenza. La variabile utilizzata a tale scopo è la distanza euclidea, calcolata per ogni iterazione di calcolo tra il diagramma di carico iniziale e il diagramma di carico ricostruito.

7.1. Caso Frigorifero

La prima prova è stata svolta sul frigorifero Whirlpool CB298W introdotto nel Capitolo 4. Tale paragrafo ha come scopo quello di sottolineare la differenza tra le varie ricostruzioni del profilo di carico ottenibili mediante l'utilizzo dei vari approcci. Per potere capire le potenzialità di ciascun metodo, è pertanto necessario confrontare cosa si ottiene adoperando un classico contatore con logica TDM e il nuovo tipo di contatore presentato nel corso dell'elaborato, in relazione al tipo di approccio scelto.

Il profilo di carico iniziale è riportato nel Grafico 6.4.

L'algoritmo in grado di replicare la logica della modalità TDM è stato creato sulla base dell'algoritmo rappresentativo dell'approccio Change and Transmit, semplicemente modificando la condizione di generazione degli eventi.

In questo caso gli eventi sono generati con quattro cadenze temporali diverse, pari rispettivamente a: 15 s, 1 minuto, 5 minuti e 15 minuti.

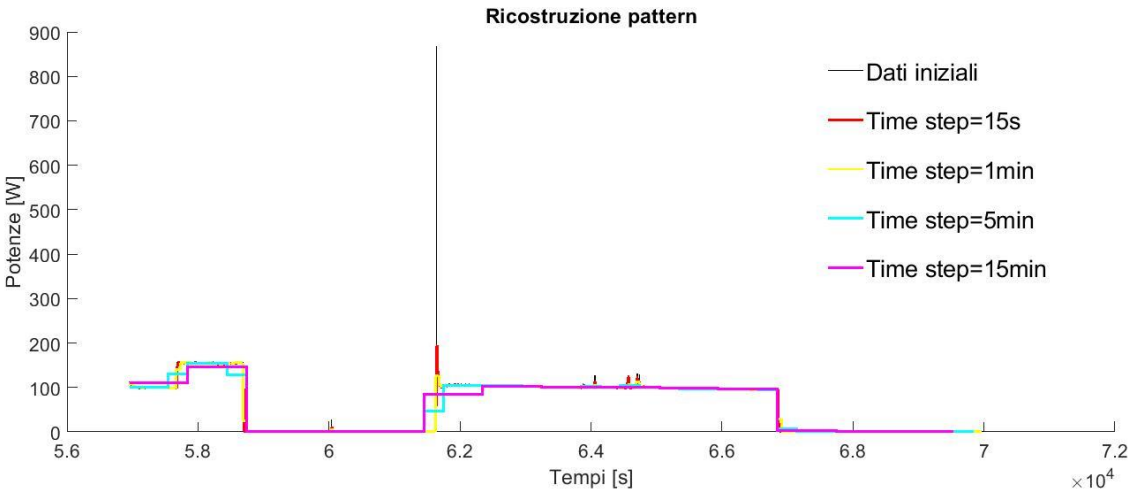


Grafico 7.2 Ricostruzione dei vari pattern relativi ad un frigorifero per diversi valori di cadenza temporale TDM.

Nel Grafico 7.2 è presente una grafica contenente tutte le ricostruzioni ottenibili mediante l'utilizzo di una logica di ricostruzione TDM al variare delle cadenze termporali scelte. E' possibile notare come non si discostino di molto le une dalle altre. La cosa che accumuna tutte le quattro ricostruzioni è che nessuna di essa è stata in grado di individuare il picco di ampiezza 867.1 W, presente tra 61640 s e 61641 s, tale informazione sarebbe stata completamente omessa nel caso in cui si fosse scelto di adoperare tale modalità.

Nel Grafico 7.3 è possibile osservare con precisione in che modo si distribuiscono gli eventi nel tempo adoperando un contatore tradizionale. Tale Grafico potrebbe, però, essere forviante in quanto appare come se in alcuni intervalli di tempo non sono stati rilevati eventi. In realtà tali intervalli rappresentano una condizione di riposo del frigorifero, pertanto la potenza misurata ha ampiezza molto piccola, pari soltanto a 0.6 W. Per una migliore comprenzione nel Grafico 7.4 la scala riferita all'asse delle ordinate è stata modificata, adoperando come valore massimo un valore di potenza pari a 0.6 W, così da mostrare con chiarezza come il TDM rilevi gli eventi con una cadenza temporale regolare e fissa.

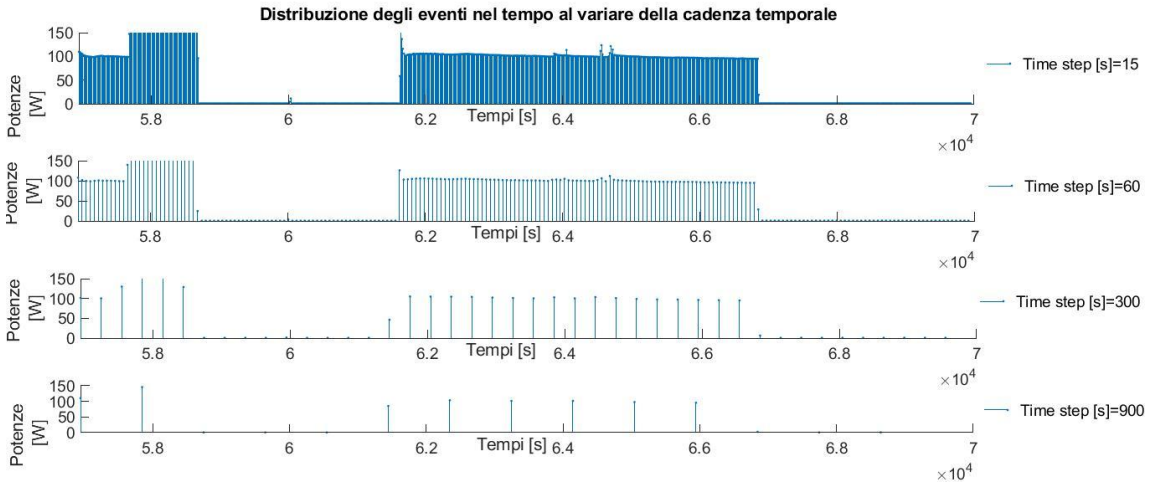


Grafico 7.3 Distribuzione degli eventi nel tempo per un frigorifero con modalità TDM.

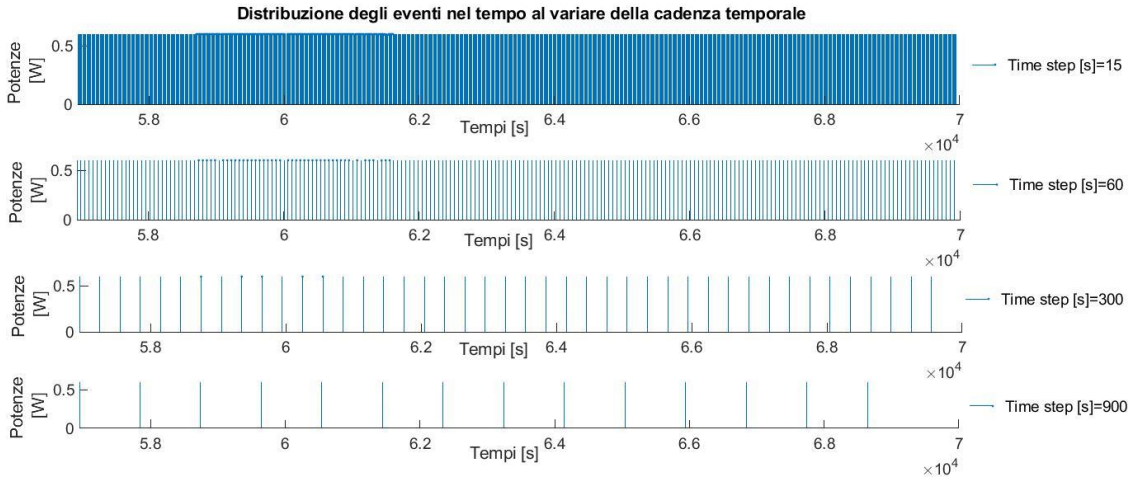


Grafico 7.4 Grafico 7.3 con asse delle ordinate modificato.

A differenza della modalità TDM, l'approccio Change and Transmit è in grado di rilevare il picco presente con qualsiasi valore di soglia, come è possibile notare già nel Grafico 7.5, ma che risulta essere più chiaro operando un confronto visivo tra il Grafico 7.6 e il Grafico 7.7 dove sono presenti tutte le ricostruzioni ottenute rispettivamente, con approccio Change and transmit per ogni valore di soglia e in modalità TDM con le diverse cadenze temporali scelte.

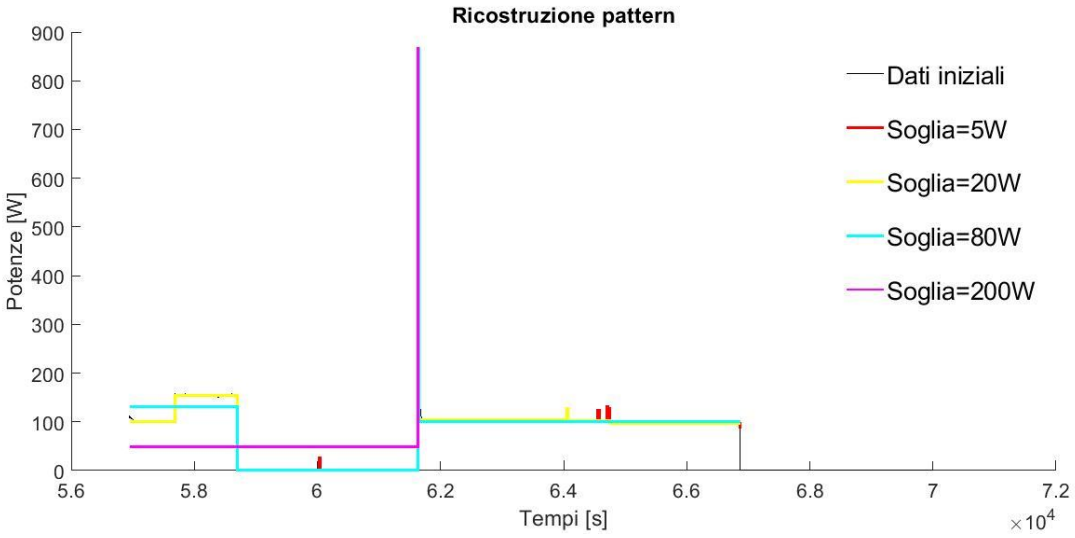


Grafico 7.5 Ricostruzione dei vari pattern relativi ad un frigorifero per diversi valori di soglia con approccio CaT.

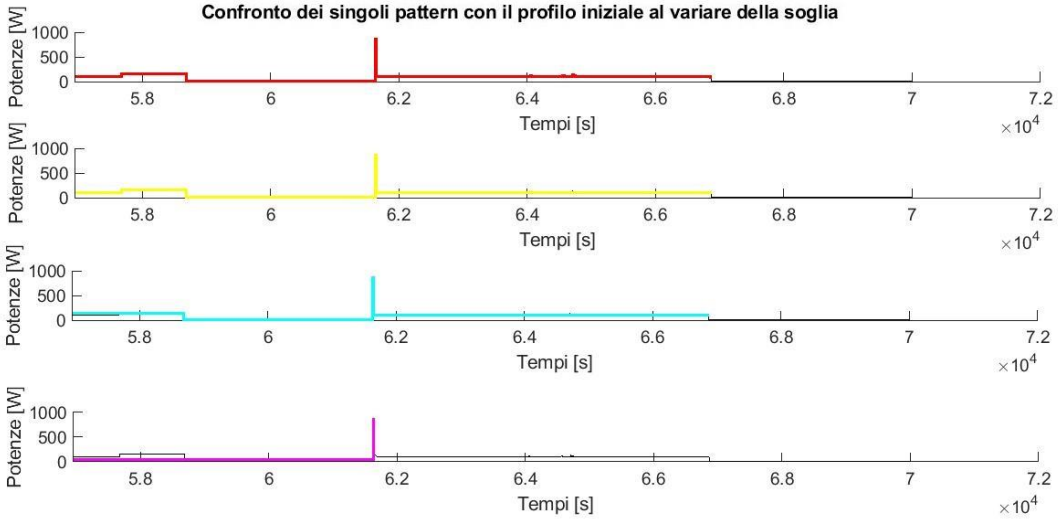


Grafico 7.6 Ricostruzione singoli pattern con approccio CaT.

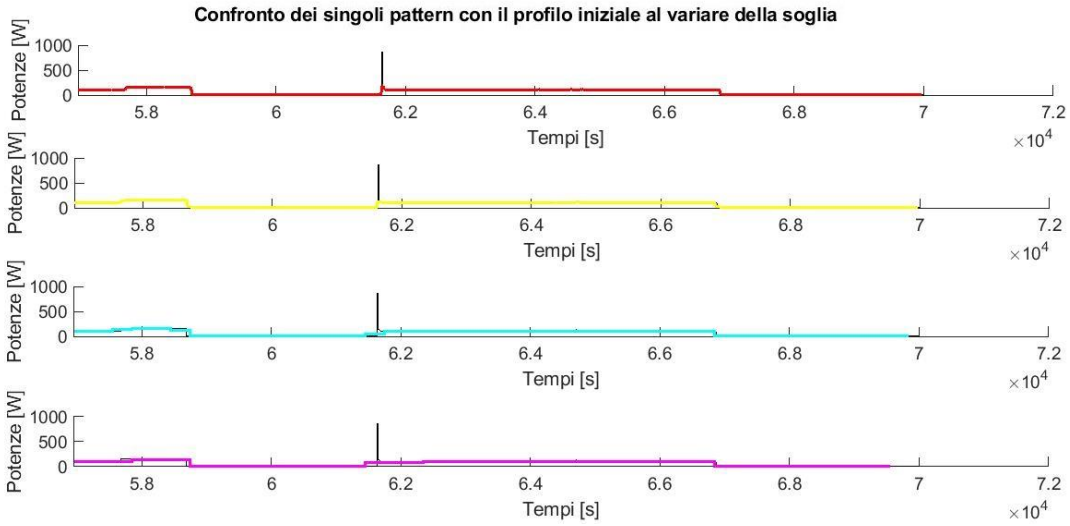
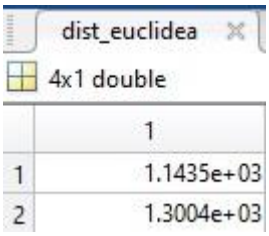
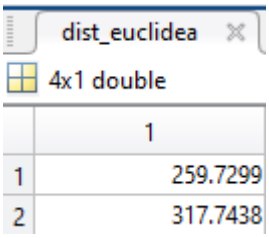
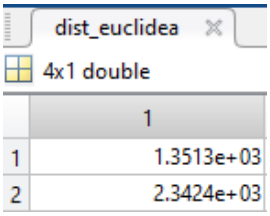
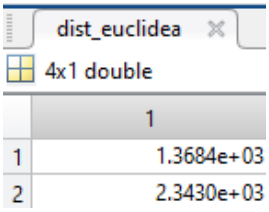
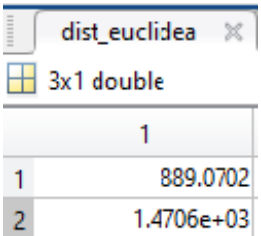


Grafico 7.7 Ricostruzione singoli pattern con modalità TDM.

La Tabella 7.1 offre la possibilità di un confronto diretto tra tutti i valori di distanza euclidea, al variare degli approcci scelti.

Per semplicità di analisi sono stati riportati i valori relativi alle prime due prove. Il Send on delta, in entrambe le sue versioni, conferma di essere il metodo meno affidabile per la ricostruzione dei diagrammi di carico, come era già stato precedentemente introdotto, esso presenta infatti i valori di distanza euclidea più alti. La modalità TDM è rappresentata da valori di distanza euclidea sempre dell'ordine di 10^3, sebbene i primi due campionamenti abbiamo cadenza temporale breve, pari a 15 s e 1 minuto. Il Change and Transmit presenta valori di distanza euclidea più piccoli, offrendo così la migliore ricostruzione possibile. E' bene osservare, però, che lo schema combinato doppia soglia con il primo gruppo di soglie offre una distanza euclidea dell'ordine di 10^2.

Tabella 7.1 Valori relativi alla distanza euclidea al variare dell'approccio utilizzato

TDM	
Change and Transmit	
Send on delta, prima versione	
Send on delta, seconda versione.	
Schema combinato doppia soglia, seconda versione.	

Non essendo interessati unicamente alla migliore ricostruzione del pattern, ma anche alla tipologia di infomazioni inviate per effettuare l'analisi dati, avere una ricostruzione leggermente più imprecisa del pattern, affiancato però da informazioni su quanto e quando il diagramma di carico si è discostato dall'andamento atteso, rappresenta il giusto compromesso.

La Tabella 7.1 può essere utilizzata anche come strumento di verifica per l'operatore per controllare se le soglie adoperate sono corrette o se necessitano di modifiche.

7.2. Secondo caso lavatrice

La seconda prova è stata effettuata con i dati al secondo afferenti alla lavatrice. Il confronto è stato effettuato analizzando le ricostruzioni dei singoli pattern al variare delle soglie e, nel caso della modalità TDM, al variare delle cadenze temporali. Sono stati confrontati i diagrammi di carico ricostruiti attraverso le seguenti metodologie:

- Modalità TDM.
- Change and Transmit.
- Send on delta, prima versione.
- Schema combinato doppia soglia.

Essi sono riportati nei Grafici da 7.8 a 7.12, la legenda alla destra di ogni grafico riporta i colori adoperati per ogni valore di soglia e per ogni cadenza temporale TDM. Tutti i grafici ricostruiti sono confrontati con il diagramma di carico iniziale tracciato in nero.

Il primo valore adoperato per la ricostruzione TDM è di 5 s. Nonostante la cadenza temporale sia molto breve, tale metodo non è in grado di ricostruire nessuno dei picchi presenti. Infatti, mentre la ricostruzione in rosso rappresentativa dell'intervallo di tempo pari a 5 s è in grado di tracciare parzialmente i picchi presenti, per tutti gli altri valori di cadenza temporale essi vengono mediati, perdendo qualsiasi informazione relativa a tali variazioni istantanee. Ciò potrebbe costituire una problematica rilevante a seconda dell'entità dei picchi omessi. Un macchinario in funzionamento potrebbe ad esempio danneggiarsi a seguito di una variazione inaspettata e tale informazione non sarebbe comunicata. Un guasto di lieve entità potrebbe peggiorare nel tempo, fino alla rottura definitiva del macchinario, che si tradurebbe nella necessità di una manutenzione staordinaria e di un inevitabile fermo macchina, comportando così due tipologie di sovracosti.

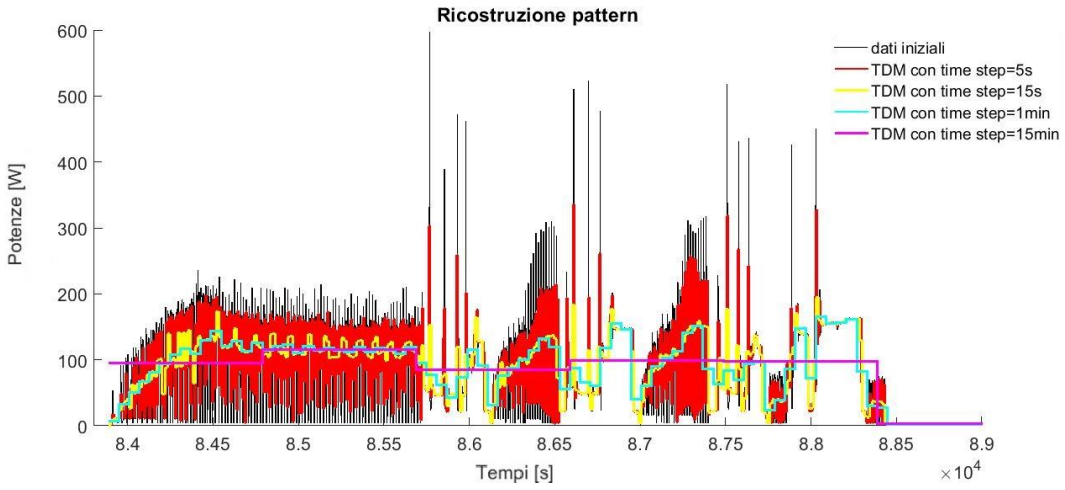


Grafico 7.8 Ricostruzione dei pattern di una lavatrice con modalità TDM

La situazione appare molto diversa con l'utilizzo di un approccio di tipo Change and Transmit. Osservando il Grafico 7.9 potrebbe sembrare che soltanto la soglia pari a 200 W sia in grado di rilevare i picchi, in realtà, dalla Figura 7.10 appare chiaro come ciascun valore di soglia sia in grado di identificare tutti i picchi presenti, pertanto nel grafico complessivo le ricostruzioni si sovrappongono tra loro. La soglia pari a 200 W non è in grado di rilevare esclusivamente il picco presente all'istante temporale di 88033 s, mentre la soglia pari a 150W è in grado di ricostruirlo solo in parte.

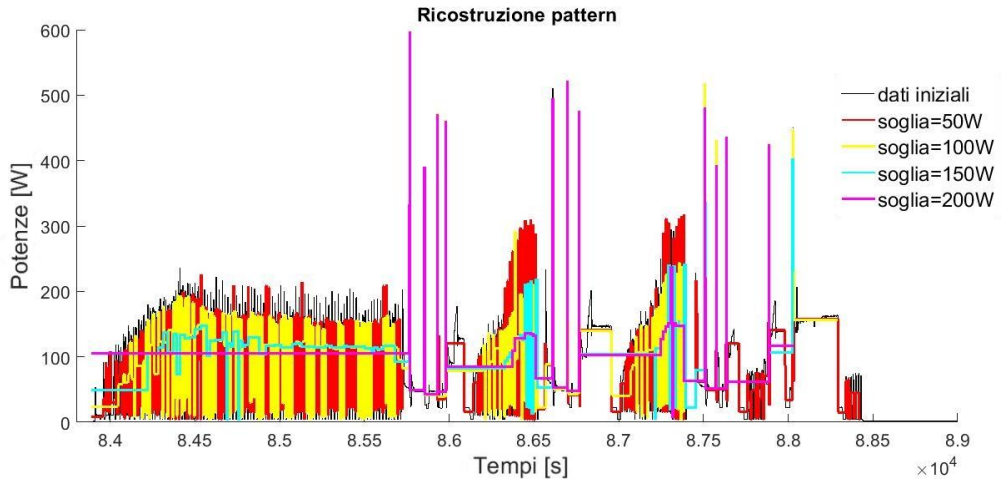


Grafico 7.9 Ricostruzione dei pattern di una lavatrice con approccio Change and Transmit.

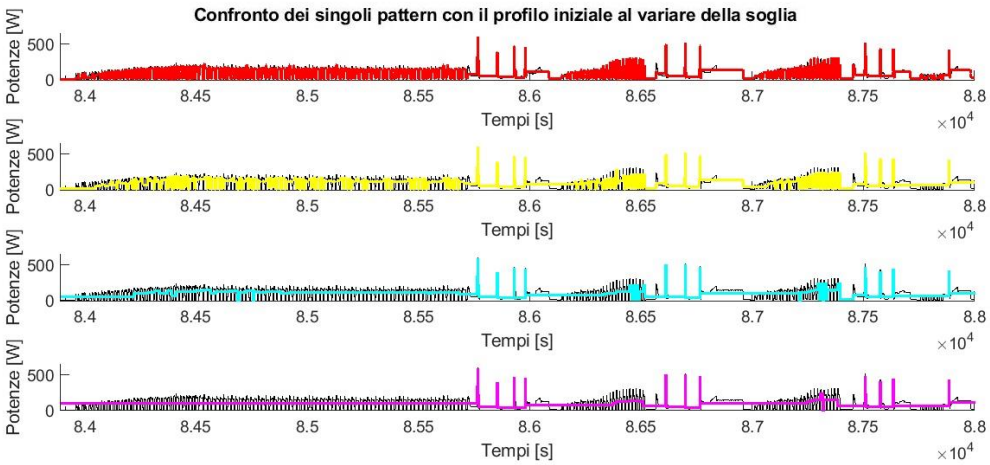


Grafico 7.10 Ricostruzione singoli pattern con approccio Change and Transmit.

La migliore ricostruzione offerta dall'approccio Send on Delta, riportato nel Grafico 7.11, si ha con soglia pari a 500 Ws, seppur risulti avere una scarsa precisione di ricostruzione dei picchi, riuscendo a ricostruirli soltanto parzialmente. Sia la soglia da 2000 Ws che quella a 3000 Ws perdono qualsiasi tipo di informazione relativa ai picchi e ricostruiscono, soltanto in parte, le variazioni di minore entità. Con una soglia di 20000 Ws, invece, il profilo di carico ricostruito risulta essere totalmente differente da quello iniziale.

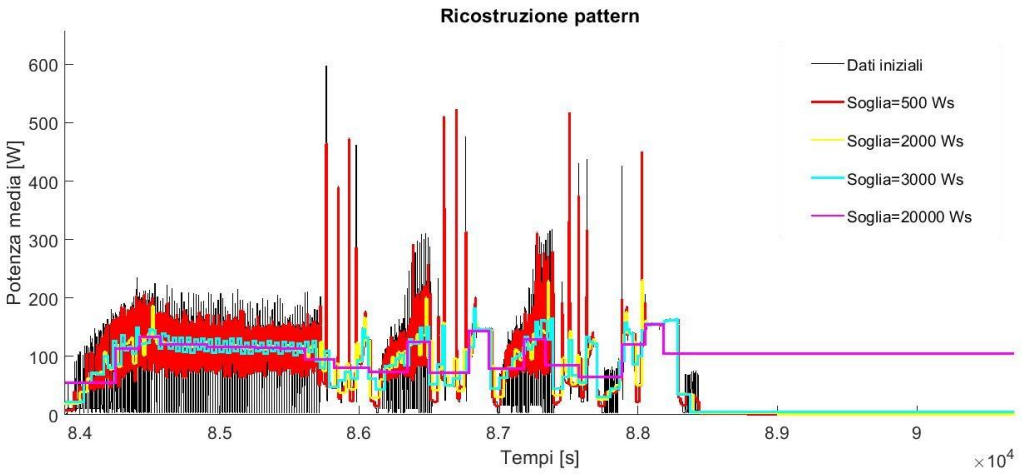


Grafico 7.11 Ricostruzione dei pattern di una lavatrice con approccio Send on delta, prima versione.

L’ultimo confronto si basa sulla ricostruzione ottenuta applicando lo schema combinato a doppia soglia (Grafico 7.12)

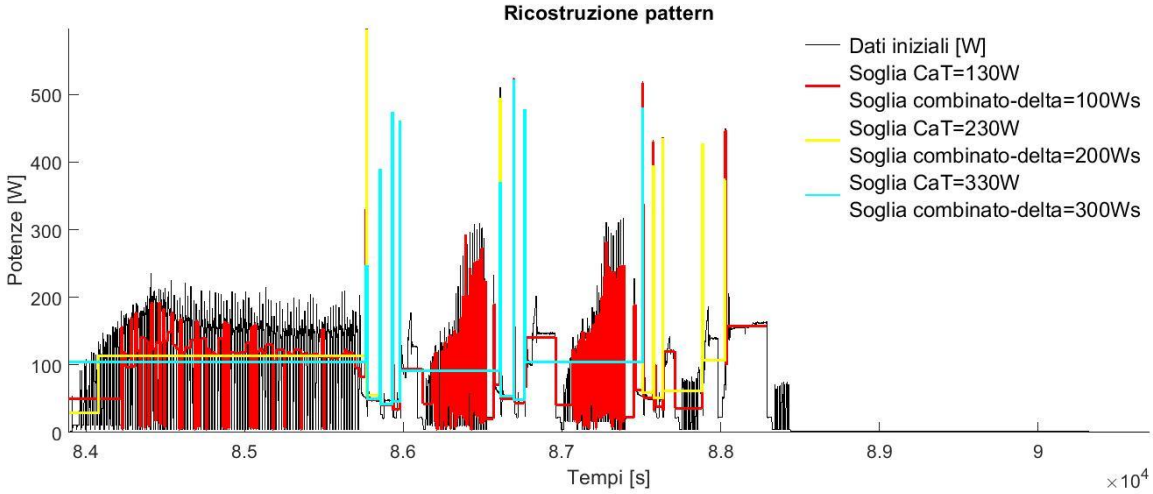


Grafico 7.12 Ricostruzione dei pattern di una lavatrice con Schema combinato doppia soglia.

L’unione dei concetti distintivi del Change and Transmit alle tendenze attese si riconferma essere il metodo ottimale da utilizzare in un contesto industriale. Per esplicare meglio il concetto si rimanda al Grafico 7.13.

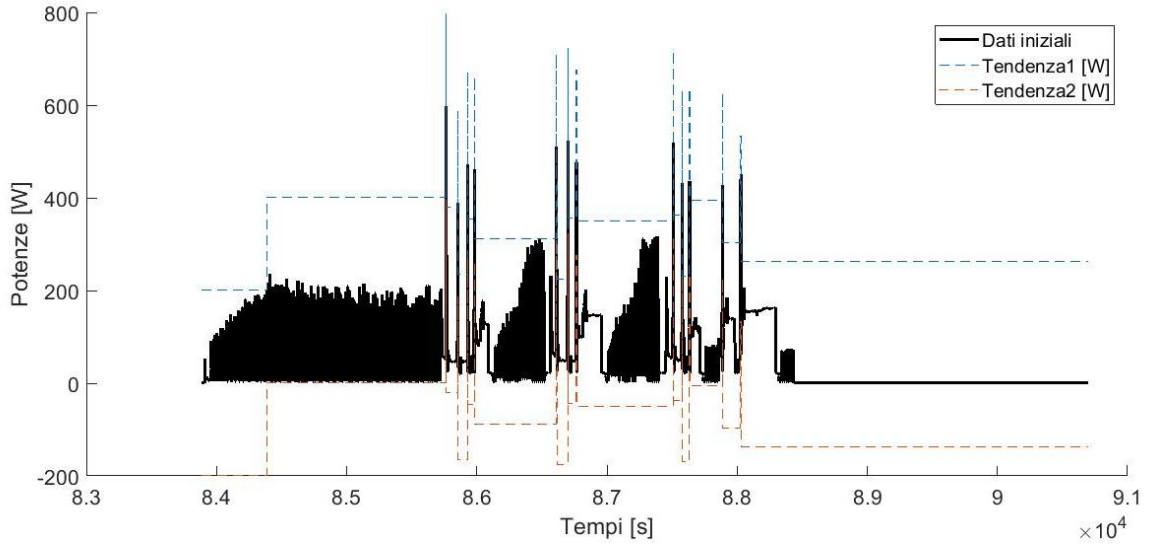


Grafico 7.13 Dati iniziali di una lavatrice con le relative tendenze imposte.

Come riportato nella leggenda, le linee tratteggiate in blu e rosso costituiscono le tendenze previste ed insieme delineano la fascia all'interno della quale ci si aspetta evolva il diagramma di carico. Il diagramma riportato è stato ottenuto con una soglia per il Change and Transmit pari a 230 W e una soglia per le tendenze pari a 200 W.

E' possibile osservare come, attraverso tale metodo, sia stato possibile identificare tutti i picchi presenti e quindi tutte le variazioni di notevole entità, mentre le piccole variazioni, ininfluenti per l'individuazione di possibili problematiche. Il pattern ricostruito, riferito a tali valori di soglia, è quello presente in giallo nella figura 7.12, ottenuto attraverso i 26 eventi presenti nel Grafico 7.13. In questo modo con soltanto 26 dati a fronte dei 6816 dati iniziali, l'operatore incaricato sarebbe in grado di conoscere perfettamente lo stato del sistema. L'ulteriore vantaggio è quello di poter decidere che tipo di informazioni si vuole rilevare. La costruzione della fascia spetta infatti all'operatore che, in base a conoscenze pregresse circa l'andamento usuale del proprio diagramma, imposta i valori delle variabili *tendenza1* e *tendenza2*.

Lo schema combinato doppia soglia risulta così essere la scelta migliore per l'analisi dei dati.

Conclusioni

Nel contesto Industry 4.0 il contatore ad eventi è in grado di offrire informazioni circa l'utilizzo delle materie prime impiegate in un processo di produzione. Esso è in grado di fornire sia informazioni di tipo *stateless* dei dati a disposizione, con conseguente invio dei risultati all'unità centrale, senza il mantenimento di alcuna memoria degli stessi. La differenza tra la potenza media riferita ad un intervallo di tempo elementare e la potenza media dell'intervallo elementare precedente rappresenta, ad esempio, una informazione di tipo *stateless* se la soglia viene superata, con conseguente generazione di un evento, altrimenti il risultato viene ignorato. Un altro tipo di informazione inviata dal contatore ad eventi è l'informazione di tipo *stateful* in questo caso l'invio dei risultati all'unità centrale non avviene in un preciso momento, ma dipende dal verificarsi di una o più condizioni che coinvolgono un certo numero di dati, dei quali si è mantenuta nel tempo una certa memoria. In questo eleborato sono stati esplicati tre tipi diversi di approcci per sottolineare tale concetto teorico, nello specifico il Change and Transmist è stato impostato in modo da ottenere delle informazioni di tipo *stateless*, il Send on Delta per ottenere informazioni di tipo *stateful* e lo Schema combinato a doppia soglia l'unione di entrambe. Ciò è stato fatto per dimostrare che soltanto attraverso la conoscenza di entrambe le tipologie di informazioni è possibile avere una conoscenza completa del processo analizzato, in modo da poter evidenziare eventuali scostamenti del processo industriale analizzato da quello previsto, il tutto in tempo reale.

L'innovazione del contatore ad eventi consiste proprio nel mostrare, non soltanto la quantità di energia, ma anche gli accumuli nel tempo, attraverso l'utilizzo di questa nuova variabile denominata *evento*, associata alla quantità integrale rappresentativa dell'energia misurata.

La potenza media è calcolata ad ogni intervallo elementare e ogni suo valore è memorizzato all'interno del contatore ad eventi, ma viene comunicata solo su richiesta per evitare un invio eccessivo di dati sui canali di comunicazione.

I diagrammi ricostruiti mediante l'utilizzo degli eventi generati dagli approcci scelti permettono di ricostruire i diagrammi di carico in modo energicamente equivalente, con anche l'80% in meno di dati rispetto a quelli iniziali. In un futuro caratterizzato da un flusso di informazioni sempre più ampio, ciò rappresenta un vantaggio senza eguali, in quanto il contatore ad eventi permette di monitorare e analizzare soltanto i dati significativi ai fini della gestione dei processi e non l'intera mole di dati, senza la necessità di dover effettuare nessun ulteriore calcolo.

Tale elaborato ha illustrato, pertanto, i principali vantaggi dell'utilizzo di un approccio EDM rispetto al classico approccio TDM, che può comunque essere simulato, ad esempio per scopi fiscali che richiedono singoli valori di energia per un periodo predefinito, all'interno del contatore ad eventi, attraverso la generazione di eventi programmati nel tempo. Tutte le prove eseguite sugli elettrodomestici hanno avuto come fine ultimo quello di dimostrare come sarebbe possibile ridurre il flusso di dati all'interno dei canali di comunicazione e che, sebbene il numero di dati inviati diminuisca drasticamente, ciò non comporta una perdita di risoluzione nella ricostruzione dei diagrammi di carico.

Il tasso degli eventi, il RoE, permette di avere informazioni circa la volatilità del processo analizzato.

Lo schema combinato a doppia soglia rappresenta, ad oggi, la metodologia più completa e in linea alle esigenze industriali, offrendo la possibilità di fissare le soglie in base alla tipologia di informazione che si vuole ottenere.

Tale elaborato ha analizzato soltanto variabili elettriche ma, le metodologie affrontate, possono essere applicate a qualsiasi tipo di variabile, dalla temperatura di un fluido all'interno di un macchinario al livello di umidità presente nei luoghi di lavoro.

Il contatore ad eventi è in grado di fornire infomazioni tempestive circa anomalie del sistema evitando così di impiegare ingenti somme di denaro in operazioni di manutenzione straordinaria o grosse perdite dovute ai fermi macchina non previsti. La qualità del prodotto è tutelata da un monitoraggio continuo.

Attualmente la maggiore limitazione del contatore ad eventi consiste nella scelta delle soglie da adoperare. Esse infatti possono essere impostate soltanto in seguito ad una conoscenza dettagliata del processo in analisi e del suo andamento usuale. Un possibile sviluppo futuro potrebbe pertanto consistere nella delineazione di una metodologia di impostazione delle soglie automatico. Le soglie, inoltre, potrebbero non essere più fisse, ma cambiare con una logica simile a quella adottata per il cambio delle tendenze previste in un sistema, diventando di fatto adattive.

Il contatore ad eventi permette pertanto non soltanto una gestione dei dati meno onerosa e una qualità dell'informazione maggiore, ma anche la possibilità di una migliore profilazione dei clienti e il rilevamento di caratteristiche nei diagrammi di carico fino ad ora mai rilevate. Il numero minore di dati permette inoltre di impiegare le tecnologie a disposizione per nuovi tipi di calcoli, ottenendo una conoscenza sempre più dettagliata di ciò che succede in tempo reale.

Indice delle figure

Figura I.1 Electric Power Quality Analyzer 6

Figura 1.1 Tecnologie abilitanti per l'Industry 4.0 [S2] 10

Figura 1.2 Open Meter. Fonte: E-distribuzione 15

Figura 1.3 - Data Logger. Fonte: ABB. 17

Figura 1.4 - Schema funzionale Aurora Vision Plant Management Platform. Fonte: ABB. 18

Figura 2.1 Definizione degli intervalli di tempo con approccio TDM e con approccio EDM. Fonte: M. Simonov, G. Chicco, G. Zanetto. 22

Figura 2.2 Applicazione Change-and-transmit con δ_1=0,5 kW. 23

Figura 2.3 Applicazione Send-on-Delta con δ_E=250 kW. Fonte: M. Simonov, G. Chicco, G. Zanetto [R2]. 24

Figura 2.4 Applicazione Schema EDM combinato a doppia soglia con δ_1=0.5 kW e δ_2=0.6 kWs. 25

Figura 2.5 Tasso degli eventi per un impianto fotovoltaico di piccole dimensioni [R4] 26

Figura 2.6 - Istogramma tasso di eventi. Fonte: M. Simonov, G. Chicco, G. Zanetto [R2] 28

Figura 2.7 Andamento di un processo con approccio TDM a 15 min. di ampiezza pari ad 1 pu [R3] 34

Figura 2.8 Confronto tra una ricostruzione effettuata con approccio EDM ed approccio TDM [R3]. 36

Figura 3.1 Wattmetro CLM1000 Professional (plus). Fonte: Manuale Christ Eletktronik 37

Figura 3.2 Presa Shuko. Fonte: Manuale Christ Eletktronik 40

Figura 4.1 Dati Frigorifero Samsung 46

Figura 4.2 Workspace Frigorifero con soglia pari a 60 W. 48

Figura 4.3 Workspace Frigorifero con soglia pari a 40 W. 52

Figura 4.4 Workspace Lavatrice, primo caso lavatrice. 55

Figura 4.5 Workspace secondo caso lavatrice. 61

Figura 4.6 Istanti temporali relativi alla generazione di eventi per l'ultimo valore di soglia1 64

Figura 5.1 Risultati per entrambe le versioni del test per l'approccio send on delta. 73

Figura 6.1 Posizione degli eventi dell'esempio applicativo dello schema combinato doppia soglia. 96

Figura 6.2 Vettore potenze medie derivanti dalla generazione degli eventi con schema combinato a doppia soglia. 97

Figura 6.3 Valori numerici della distanza euclidea al variare della soglia CaT. .106

Figura 6.4 Valori della distanza euclidea di un forno ottenuti al variare della soglia Delta2. 116

Figura 6.5 Valori numerici della distanza euclidea ottenuti al variare della soglia CaT.....119

Indice dei grafici

Grafico 4.1 Profilo di potenza frigorifero Samsung. 47

Grafico 4.2 Diagramma di flusso CaT.....50

Grafico 4.3 Comparazione profilo di carico TDM ed EDM con soglia pari a 60 W. 51

Grafico 4.4 Comparazione profilo di carico TDM ed EDM con soglia pari a 40 W. 53

Grafico 4.5 Comparazione profilo di carico TDM ed EDM con soglia pari ad 8 W. 53

Grafico 4.6 Diagramma di carico lavatrice, primo caso lavatrice. 56

Grafico 4.7 Confronto dei singoli pattern con il profilo iniziale al variare della soglia per una lavatrice, primo caso. 57

Grafico 4.8 Zoom Grafico 4.7. 58

Grafico 4.9 Confronto tra l'andamento della distanza euclidea e quello del numero di eventi verificatesi, primo caso lavatrice. 59

Grafico 4.10 Distribuzione degli eventi nel tempo, primo caso lavatrice. 60

Grafico 4.11 Diagramma di carico iniziale di una lavatrice, secondo caso lavatrice. 62

Grafico 4.12 Singoli pattern lavatrice, secondo caso.....63

Grafico 4.13 Confronto tra l'andamento della distanza euclidea e quello del numero di eventi verificatesi, secondo caso lavatrice.....65

Grafico 4.14 Distribuzione degli eventi nel tempo, secondo caso lavatrice.....65

Grafico 5.1 Diagramma di flusso approccio send on delta.....70

Grafico 5.2 Dati iniziali test send on delta.....71

Grafico 5.3 Confronto tra i dati iniziali e le due versioni del Send on delta. 74

Grafico 5.4 Distribuzione degli eventi nel tempo per un frigorifero con la seconda versione del Send on delta. 76

Grafico 5.5 Confronto tra la distanza euclidea e il numero di eventi registrati con approccio Send on delta, seconda versione. 77

Grafico 5.6 Ricostruzione singoli pattern di un frigorifero con approccio send on delta, seconda versione. 78

Grafico 5.7 Ricostruzione singoli pattern di un frigorifero con approccio send on delta, prima versione. 79

Grafico 5.8 Confronto tra la distanza euclidea e il numero di eventi registrati con approccio Send on delta, prima versione. 80

Grafico 5.9 Distanza euclidea e numero eventi per il secondo caso della lavatrice, prima versione Send on delta. 81

Grafico 5.10 Distanza euclidea e numero eventi per il secondo caso della lavatrice, seconda versione Send on delta. 82

Grafico 5.11 Ricostruzione singoli pattern secondo caso lavatrice, con approccio send on delta, prima versione. 83

Grafico 5.12 Ricostruzione singoli pattern secondo caso lavatrice, con approccio send on delta, seconda versione. 84

Grafico 5.13 Distanza euclidea e numero eventi per il primo caso della lavatrice, prima versione Send on delta. 84

Grafico 5.14 Distanza euclidea e numero eventi per il primo caso della lavatrice, seconda versione Send on delta. 85

Grafico 5.15 Ricostruzione singoli pattern primo caso lavatrice, con approccio send on delta, seconda versione. 86

Grafico 5.16 Ricostruzione singoli pattern primo caso lavatrice, con approccio send on delta, prima versione. 87

Grafico 5.17 Ricostruzione singoli pattern di un forno, prima versione Send on delta. 89

Grafico 5.18 Ricostruzione singoli pattern di un forno, seconda versione Send on delta. 89

Grafico 5.19 Distanza euclidea e numero eventi per un forno, prima versione Send on delta. 90

Grafico 5.20 Distanza euclidea e numero eventi per un forno, seconda versione Send on delta. 90

Grafico 6.1 Prima versione schema combinato doppia soglia (ampiezze in kW). 99

Grafico 6.2 Eventi generati con la seconda versione dello schema combinato doppia soglia (ampiezze in kW). 100

Grafico 6.3 Diagramma di flusso schema combinato doppia soglia. 101

Grafico 6.4 Pattern iniziale di un frigorifero Whirlpool CB298W. 102

Grafico 6.5 Singoli pattern di un frigorifero con le relative tendenze. 104

Grafico 6.6 Distribuzione degli eventi nel tempo per un frigorifero con schema combinato doppia soglia. 104

Grafico 6.7 Eventi Pos Neg CaT di un frigorifero 105

Grafico 6.8 Andamenti della distanza euclidea di un frigorifero ottenuti al variare della soglia CaT. 106

Grafico 6.9 Singoli pattern per un frigorifero con schema combinato doppia soglia. 107

Grafico 6.10 Pattern lavatrice con schema combinato doppia soglia. 109

Grafico 6.11 Dati iniziali con le relative tendenze di una lavatrice. 110

Grafico 6.12 Distribuzione degli eventi nel tempo per una lavatrice con schema combinato doppia soglia. 110

Grafico 6.13 Eventi Pos Neg CaT per una lavatrice. 111

Grafico 6.14 Andamenti della distanza euclidea di una lavatrice ottenuti al variare della soglia CaT. 111

Grafico 6.15 Distribuzione degli eventi nel tempo per un forno con la prima versione dello schema combinato a doppia soglia. 113

Grafico 6.16 Dati iniziali con le relative tendenze per un forno 114

Grafico 6.17 Eventi Pos Neg CaT per un forno. 114

Grafico 6.18 Singoli pattern per un forno con schema combinato doppia soglia. 115

Grafico 6.19 Pattern forno con schema combinato doppia soglia 115

Grafico 6.20 Andamento della distanza euclidea per un forno al variare della soglia Delta2. 116

Grafico 6.21 Dati iniziali e relative tendenze per un forno, seconda versione. ... 117

Grafico 6.22 Distribuzione nel tempo degli eventi al variare delle soglie per uno schema combinato doppia soglia, seconda versione. 117

Grafico 6.23 Eventi Pos Neg Cat, seconda versione. 118

Grafico 6.24 Singoli pattern per un forno con schema combinato doppia soglia. 118

Grafico 6.25 Andamento della distanza euclidea per un forno al variare della soglia CaT. 119

Grafico 7.1 Diagramma di flusso dell'approccio TDM. 121

Grafico 7.2 Ricostruzione dei vari pattern relativi ad un frigorifero per diversi valori di cadenza temporale TDM. 123

Grafico 7.3 Distribuzione degli eventi nel tempo per un frigorifero con modalità TDM. 124

Grafico 7.4 Grafico 7.3 con asse delle ordinate modificato. 124

Grafico 7.5 Ricostruzione dei vari pattern relativi ad un frigorifero per diversi valori di soglia con approccio CaT. 125

Grafico 7.6 Ricostruzione singoli pattern con approccio CaT. 125

Grafico 7.7 Ricostruzione singoli pattern con modalità TDM. 126

Grafico 7.8 Ricostruzione dei pattern di una lavatrice con modalità TDM.....130

Grafico 7.9 Ricostruzione dei pattern di una lavatrice con approccio Change and Transmit. 130

Grafico 7.10 Ricostruzione singoli pattern con approccio Change and Transmit. 131

Grafico 7.11 Ricostruzione dei pattern di una lavatrice con approccio Send on delta, prima versione.....131

Grafico 7.12 Ricostruzione dei pattern di una lavatrice con Schema combinato doppia soglia. 132

Grafico 7.13 Dati iniziali di una lavatrice con le relative tendenze imposte. 132

Indice delle equazioni

Equazione 2.1 Generica quantità misurata con approccio TDM. 21

Equazione 2.2 Passi regolari TDM 22

Equazione 2.3 Durata dell'intervallo temporale relativo all'approccio EDM 22

Equazione 2.4 Intervallo di tempo elementare 31

Equazione 4.1 Generazione evento change and transmit 46

Equazione 4.2 Numero di dati per il frigorifero 47

Equazione 6.1 Formula per il calcolo della variazione di potenza nel Change and transmit. 92

Equazione 6.2 Variazione di energia accumulata in un schema EDM a doppia soglia. 93

Equazione 6.3 Primi valori di tendenza attesi per uno schema combinato doppia soglia. 94

Indice delle tabelle

Tabella 3.1 Intervalli di definizione e risoluzione delle grandezze. 39

Tabella 4.1 Valori della distanza euclidea per ogni valore di soglia, primo caso lavatrice. 58

Tabella 4.2 Valori della distanza euclidea per ogni valore di soglia, secondo caso lavatrice 64

Tabella 5.1 Valori attesi per il primo evento 72

Tabella 5.2 Numero di eventi e distanza euclidea al variare della soglia, seconda versione Send on delta. 76

Tabella 5.3 Numero di eventi e distanza euclidea al variare della soglia, seconda versione Send on delta. 79

Tabella 5.4 Confronto delle distanze euclidee ottenute per il secondo caso della lavatrice con le due versioni del Send on delta. 82

Tabella 5.5 Confronto delle distanze euclidee ottenute per il primo caso della lavatrice con le due versioni del Send on delta. 85

Tabella 5.6 Confronto delle distanze euclidee ottenute per un forno con le due versioni del Send on delta. 88

Tabella 6.1 Numeri identificativi delle possibili condizioni di generazione degli eventi per lo schema combinato doppia soglia. 98

Tabella 6.2 Soglie adoperate per lo schema doppia soglia di un frigorigero. 103

Tabella 6.3 Soglie adoperate per lo schema doppia soglia di una lavatrice. 108

Tabella 6.4 Soglie adoperate per lo schema doppia soglia di un forno. 112

Tabella 7.1 Valori relativi alla distanza euclidea al variare dell'approccio utilizzato 127

Sitografia

[S1] https://it.wikipedia.org/wiki/Industria_4.0 - visitato il 15.03.2018

[S2] https://www.osservatori.net/it_it - visitato il 16.03.2018

[S3] https://www.zerounoweb.it/cio-innovation/pa-digitale/industry-4-0-per-proiettare-il-manifatturiero-europeo-nel-futuro/ - visitato il 16.03.2018

[S4] https://www.escoedilvi.it/efficienza-energetica-pmi/ - visitato il 16.03.2018

[S5] http://em.lovatoelectric.com/energy-management/dove-intervenire/ - visitato il 20.03.2018

[S6] https://www.key4biz.it/mobile-iot-smart-meters-mercato-europeo-connected-energy-22-miliardi-euro-nel-2026/203716/ - visitato il 28.03.2018

[S7] https://www.gsma.com - visitato il 28.03.2018

[S8] https://www.agendadigitale.eu/infrastrutture/ecco-le-vere-innovazioni-dietro-ai-nuovi-contatori-elettrici-smart/ - visitato il 28.03.2018

[S9] https://www.corrierecomunicazioni.it/digital-economy/via-a-open-meter-gentiloni-piano-enel-dara-ossigeno-a-economica-italiana/ - visitato il 28.03.2018

[S10] http://new.abb.com/power-converters-inverters/it/solar/monitoraggio-e-comunicazione/data-logger-e-controllo/vsn700-data-logger - visitato il 28.03.2018

[S11] http://www.ftdichip.com/Drivers/VCP.htm - visitato il 5.04.2018

Riferimenti bibliografici

[R1] M. Simonov, H. Li, G. Chicco, "Gathering Process Data in Low Voltage Systems by Enhanced Event-Driven Metering", IEEE Systems Journal, vol.11, no.3, pp 1755-1766, settembre 2017.

[R2] M. Simonov, G. Chicco, G. Zanetto, "Event-Driven Energy Metering: "Principles and Applications", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 4, pp 3217-3227, luglio-agosto 2017

[R3] G. Chicco, A. Mazza, M. Simonov, "Benefits of Event-based Analytical Energy Accounting for Industry 4.0", 4th International Conference on Event-Based Control, Communication and Signal Processing (EBCCSP 2018), Perpignan, France, 27-29 giugno 2018.

[R4] M. Simonov, G. Chicco, G. Zanetto, "Real-Time Event-based Energy Metering, *IEEE Transactions on Industrial Informatics,* vol. 13, no. 6, pp 2813-2823, dicembre 2017.