



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELL'AQUILA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE E DELL'INFORMAZIONE E DI ECONOMIA

**Dottorato di Ricerca in Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia**

Curriculum Ingegneria elettrica, elettronica e dell'informazione

XXXIII ciclo

Titolo della tesi

## **Soluzioni IoT per incrementare la resilienza dei sistemi elettrici d'utenza**

SSD ING/IND 33

Dottorando

**Andrea Fioravanti**

Coordinatore del corso

Prof. Giuseppe Ferri

Tutor

Prof. Alberto Prudenzi

A.A. 2019/2020



# Abstract

In the electrical field, the term resilience represents the ability of the system to react in the face of severe events and to resume the previous operating state in the shortest possible time. It is known that the term IoT indicates a set of technologies useful for making the system efficient, safe and reliable, providing the possibility of monitoring and control to connected systems. The electrical user system, characterized by hundreds of electrical subsystems and highly delicate machinery, can represent a strategic infrastructure, that must ensure maximum performance even and especially after a severe event. This thesis work is aimed at illustrating the research conducted to analyze the possible applications of IoT to electrical user systems in order to increase the resilience indices in one or more of its components. In particular, the first chapter describes some research activities that led the candidate to develop applications to the system and to the single component. In the second chapter, the IoT environment used for managing the user electrical system is described, indicating possible technological solutions. Finally, the following chapters illustrate some techniques developed during the PhD program aimed at increasing the resilience of the general electrical system and of the individual devices.

# Abstract

Il termine resilienza rappresenta in campo elettrico la capacità del sistema a reagire di fronte a eventi severi e a riprendere lo stato di funzionamento precedente nel minor tempo possibile. È noto che il termine IoT indica un insieme di tecnologie utili per rendere il sistema efficiente, sicuro ed affidabile, fornendo la capacità di monitoraggio e controllo ai sistemi connessi. Il sistema elettrico d'utenza, caratterizzato da centinaia di sottosistemi elettrici e macchinari altamente delicati, può rappresentare un'infrastruttura strategica, che deve garantire le massime prestazioni anche e soprattutto dopo un evento severo. Il presente lavoro di tesi è volto ad illustrare la ricerca condotta per analizzare le possibili applicazioni di IoT ai sistemi elettrici d'utenza al fine di incrementare gli indici di resilienza di una o più sue componenti. In particolare, nel primo capitolo vengono descritte alcune attività di ricerca che hanno condotto il candidato ad approfondire applicazioni al sistema e al singolo componente. Nel secondo capitolo, si descrive l'ambiente IoT utilizzato per la gestione del sistema elettrico d'utenza, indicando possibili soluzioni tecnologiche. Nei capitoli successivi, infine, vengono illustrate alcune tecniche sviluppate durante il percorso di dottorato atte ad aumentare la resilienza del sistema elettrico generale e dei singoli dispositivi.

# Elenco delle abbreviazioni

5G = (5th Generation) insieme di tecnologie di telefonia mobile e cellulare di quinta generazione;

ADC = (Analog to Digital Converter) circuito elettronico in grado di convertire un segnale analogico in una serie di valori discreti;

AF = funzione di attivazione;

AFDD = (Arc Fault Detection Devices) dispositivi elettrici di protezione sviluppati per rilevare la presenza di guasti da arco elettrico nei circuiti;

ANN = (Artificial Neural Network) modelli matematici composti da neuroni artificiali che si ispirano al funzionamento biologico del cervello umano;

APC = (Any Place Connection) dispositivi connessi ovunque;

API = (Application Programming Interface) set di definizioni e protocolli con i quali vengono realizzati e integrati software applicativi;

ASCII = (American Standard Code for Information Interchange) è un codice per la codifica di caratteri;

ATC = (Any Time Connection) dispositivi connessi a qualunque ora;

BNC = (Bayonet Neill Concelman) tipo di connettore elettrico unipolare usato per l'intestazione di cavi coassiali;

BOE = Blocco Operativo di Emergenza;

BT = Bassa Tensione;

CAIDI = (Consumer Average Interruption Duration Index) tempo medio di interruzione per consumatore interessato dall'interruzione per anno;

CCF = (Cross Correlation Coefficients) misura di similitudine di due segnali come funzione di uno spostamento o traslazione temporale applicata ad uno di essi;

CD = Cabina di Distribuzione MT/BT;

CD = Carico Disalimentato;

CNN = (Convolutional Neural Network) architettura di rete neurale artificiale di grande successo nelle applicazioni di visione artificiale;

CS = (Chip Select) segnale per abilitare la periferica SPI allo scambio dei dati;

CSS = (Cascading Style Sheets) linguaggio che gestisce il design e la presentazione delle pagine web;

CVS = (Comma Separated Values) file di testo semplice che contiene un elenco di dati;

DAC = (Digital to Analogue Converter) convertitore digitale-analogico;

DB9 =connettore a 9 pin utilizzato per comunicazioni seriali;

DEA = Dipartimento di Emergenza e di Accettazione ospedaliero;

DFT = (Discrete Fourier Transform) particolare tipo di trasformata di Fourier utilizzata per campionamenti disceti;

DIN = guide metalliche di tipo standard ampiamente utilizzate per il montaggio di apparecchiature di controllo;

DL = (Deep Learning) sottocategoria del Machine Learning che fa riferimento agli algoritmi ispirati alla struttura e alla funzione del cervello chiamate reti neurali artificiali;

DSP = (Digital Signal Processor) processore dedicato e ottimizzato per eseguire in maniera estremamente efficiente sequenze di istruzioni ricorrenti;

ECG = (ElettroCardioGramma) registrazione grafica dell'attività elettrica del cuore durante il suo funzionamento;

EEG = (ElettroEncefaloGramma) misura l'attività elettrica cerebrale;

EEPROM = (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) tipo di memoria non volatile, usata nei computer e altri dispositivi elettronici per memorizzare piccole quantità di dati che devono essere mantenuti quando viene tolta l'alimentazione elettrica;

EMBEDDED = sistema elettronico di elaborazione progettato appositamente per un determinato utilizzo;

EMG = (ElettroMioGrafia) esame che viene utilizzato nella diagnostica neurologica per la valutazione di patologie a carico del sistema nervoso periferico e dell'apparato muscolare;

ENFS = energia non fornita stimata;

FFT = (Fast Fourier Transformation) algoritmo ottimizzato per calcolare la trasformata discreta di Fourier;

$f_{\max}$  = frequenza massima;

$f_s$  = frequenza di campionamento;

GET = metodo usato per ottenere il contenuto della risorsa indicata come URI;

GIC = (Geomagnetically Induced Current) correnti indotte dalle tempeste elettromagnetiche;

GPIO = (General Purpose Input/Output) interfaccia hardware configurabile come ingresso o uscita;

GPRS = (General Packet Radio Service) tecnologie di telefonia mobile cellulare definita come generazione 2.5;

GPS = (Global Positioning System) sistema di posizionamento globale, la cui funzione essenziale consiste nel determinare con precisione la posizione sul pianeta Terra di un ricevitore;

HTML = (HyperText Markup Language) linguaggio che serve a creare e dare uno stile alle pagine internet;

HTTP = (Hypertext Transfer Protocol) protocollo a livello applicativo usato come principale sistema per la trasmissione d'informazioni sul web;

HVAC = (Heating, Ventilation and Air Conditioning) unità di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria;

I2C = (Inter Integrated Circuit) sistema di comunicazione seriale bifilare utilizzato tra circuiti integrati;

IDE = (Integrated Development Environment) ambiente di sviluppo che supporta i programmatori nello sviluppo e debugging del codice di un programma;

IoT = (Internet of Things) è una rete globale costituita da oggetti abilitati per Internet che trasferiscono dati e comunicano l'uno con l'altro;

IT = Trasformatore d'isolamento;

IT-M = Trasformatore d'isolamento ad uso medicale;

ITU = (International Telecommunication Union) organizzazione internazionale che si occupa di definire gli standard nelle telecomunicazioni e nell'uso delle onde radio;

JSON = (JavaScript Object Notation) formato testuale per la strutturazione di dati;

LAN = (Local Area Network) reti con estensione spaziale limitata;

M2M = (Machine 2 Machine) tecnologie e servizi che permettono il trasferimento automatico delle informazioni da macchina a macchina;

MEMS = (Micro Electro-Mechanical Systems) tecnologia che riguarda la miniaturizzazione a livello microscopico dei sensori;

MICROGRID = gruppo localizzato di fonti di elettricità e accumulo che normalmente opera connesso ed in sincronia con la rete elettrica, ma che può essere disconnesso e funzionare autonomamente;

MISO = (Master Input Slave Output) linea di uscita dei dati dallo Slave e di ingresso per il Master nella comunicazione SPI;

ML = (Machine Learning) sottoinsieme dell'intelligenza artificiale (AI) che si occupa di creare sistemi che apprendono o migliorano le performance in base ai dati che utilizzano;

MOSI = (Master Output Slave Input) linea di ingresso dei dati nello Slave e di uscita per il Master nella comunicazione SPI;

MQTT = (Message Queue Telemetry Transport) protocollo di messaggistica leggero di tipo publish-subscribe;

MRI = (Magnetic Resonance Imaging) tecnica di generazione di immagini basata sul principio fisico della risonanza magnetica nucleare;

MT = Media Tensione;

MySQL = relational database management system;

NC = contatto normalmente chiuso;

NFPA = (National Fire Protection Association) organizzazione internazionale senza scopo di lucro dedicata alla riduzione dei danni provocati da incendi, elettricità e rischi correlati;

NILM = (NonIntrusive Load Monitoring) monitoraggio non intrusivo del carico;

NO = contatto normalmente aperto;

NOP = punto normalmente aperto;

P(t) = potenza disalimentata;

P2P = (Peer-To-Peer) modello di architettura logica di rete informatica in cui i nodi sono gerarchizzati sotto forma di nodi equivalenti o 'paritari';

PC = (Personal Computer) computer economico destinato a un utilizzo personale da parte di un singolo individuo;

PCB = (Printed Circuit Board) supporto utilizzato per interconnettere tra di loro i vari componenti elettronici di un circuito tramite piste conduttive incise su di un materiale non conduttivo;

PE = conduttore di protezione;

PHP = (Personal Home Page) linguaggio open source lato server che viene utilizzato per creare pagine web dinamiche;

pHpMyAdmin = applicazione web scritta in PHP che consente di amministrare un database MySQL;

PJM = organizzazione di trasmissione elettrica regionale operante in 13 stati del distretto della Columbia in USA;

POST = metodo usato di norma per inviare informazioni al server;

PQ = (Power Quality) qualità dell'energia;

PULL-DOWN = circuito elettronico per forzare un punto allo stato logico basso;

PULL-UP = circuito elettronico per forzare un punto allo stato logico alto;

R<sub>CD</sub> = indice di resilienza legato al carico disalimentato;

R<sub>EC</sub> = indice di recupero del carico;

RELU = (unità lineare rettificata) tipo di funzione di attivazione;

R<sub>ENFS</sub> = indice di resilienza legato all'energia non fornita stimata;

REST = (REpresentational State Transfer) sistema di trasmissione di dati su HTTP che prevede una struttura degli URL ben definita;

RFID = (Radio Frequency Identification) tecnologia di identificazione automatica basata sulla propagazione nell'aria di onde elettro-magnetiche;

RL = livello di resilienza;

RMS = (Root Mean Square) valore efficace di una funzione continua x(t);

RpiB = (Raspberry pi 3 B) mini PC;

RS232 = standard di trasmissione dati digitale di tipo seriale full-duplex;

RS485 = standard di trasmissione dati digitale di tipo seriale half-duplex particolarmente robusto e flessibile;

RSE = (Ricerca sul Sistema Energetico) società per azioni italiana per lo sviluppo di attività di ricerca nel settore elettro-energetico;

RTU modbus = (Remote Terminal Unit) protocollo di comunicazione che consente lo scambio di dati tra controllori logici programmabili (PLC) e computer;

RX = (Receive) canale UART di ricezione dati;

SAIDI = (System Average Interruption Duration Index) numero di interruzioni per consumatore all'anno;

SAIFI = (System Average Interruption Frequency Index) tempo medio di interruzioni per consumatore all'anno;

SCADA = (Supervisory Control And Data Acquisition) sistema informatico distribuito per il monitoraggio e la supervisione di sistemi fisici;

SCKL = (Serial Clock) canale dedicato al clock che si occupa di scandire tutte le fasi dello scambio dati SPI;



SFRA = (Sweep Frequency Response Analysis) test non distruttivo per l'analisi in frequenza di un componente elettrico;

SGAH = Azienda ospedaliera San Giovanni-Addolorata;

SOC = (System-On-a-Chip) circuito integrato che in un solo chip contiene un intero sistema;

SPAM = (Single Phase Asynchronou Motor) motore asincrono monofase;

SPI = (Serial Peripheral Interface) sistema di comunicazione seriale;

SQL = (Structured Query Language) linguaggio standardizzato per database basati sul modello relazionale;

SSN = (Servizio Sanitario Nazionale) sistema di strutture e servizi che hanno lo scopo di garantire a tutti i cittadini l'accesso universale all'erogazione equa delle prestazioni sanitarie;

SV = dispositivo di supervisione;

T = tempo di acquisizione;

TAC = (Tomografia Assiale Computerizzata) strumentazione diagnostica che utilizza i raggi X;

TERNA = operatore che gestisce le reti per la trasmissione dell'energia elettrica;

TF = funzione di trasferimento;

THD = (Total Harmonic Distortion) parametro che informa sulla distorsione di un segnale;

TTL = (Transistor-Transistor Logic) tecnologia utilizzata per segnali di tipo binario;

TX = (Transmit) canale UART di trasmissione dati;

UART = (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) dispositivo hardware di ritrasmissione asincrona;

UPS = (Uninterruptible Power Supply) apparecchiatura da collocare tra la rete di alimentazione e i dispositivi che si vogliono proteggere, così che questi ultimi continuino a ricevere energia, anche in caso di eventuali interruzioni del sistema di alimentazione;

USB = (Universal Serial Bus) standard industriale di comunicazione seriale;

VF = Variazione di Fase;

WEB = (World Wide Web) principale servizio Internet;

WI-FI = insieme di tecnologie che consentono di poter scambiarsi dati e/o informazioni senza fili;

WOLF = (Wet-snow Overload aLert and Forecasting) sistema utilizzato per la previsione e il controllo dei sovraccarichi da neve;

WPA = (Wi-Fi Protected Access) protocollo di sicurezza e programmi di certificazione di sicurezza sviluppato dalla Wi-Fi Alliance per proteggere le reti di computer wireless;

XF = (X-ray Fluorescence) indagine medica che utilizza le proprietà di un particolare tipo di radiazioni ionizzanti, i raggi X;

# Indice

Abstract.....	2
Elenco delle abbreviazioni .....	4
Introduzione .....	10
Capitolo 1.	
<b>Resilienza di un sistema elettrico.....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 Valutazione della Resilienza .....</b>	<b>18</b>
1.1.1 Valutazione della resilienza anteriore all’evento .....	19
1.1.2 Valutazione della resilienza posteriore all’evento .....	22
<b>1.2 Classificazione degli eventi severi.....</b>	<b>26</b>
1.2.1 Fattori elettrici .....	27
1.2.2 Fattori umani .....	29
1.2.3 Fattori naturali .....	32
<b>1.3 Aumento della Resilienza .....</b>	<b>50</b>
1.3.1 Microgrid .....	62
1.3.2 Aumento della resilienza dell’Ospedale San Giovanni Addolorata .....	70
<b>1.4 Azioni concrete.....</b>	<b>75</b>
Capitolo 2.	
<b>IoT per la gestione degli impianti d’utenza.....</b>	<b>76</b>
Capitolo 3.	
<b>Applicazioni per la gestione del sistema elettrico generale .....</b>	<b>96</b>
3.1 Continuità e qualità del servizio .....	97
3.2 Efficientamento delle risorse e dei consumi .....	110
3.3 Gestione della manutenzione e degli allarmi.....	119
3.4 Predicibilità e programmabilità delle risorse.....	133
3.4.1 Analisi dei carichi attraverso la misura SFRA Online.....	135
3.4.2 NILM basato sulla tecnica SFRA.....	143
Capitolo 4.	
<b>Applicazioni per l’aumento della resilienza dei singoli componenti .....</b>	<b>152</b>
4.1 Analisi spettrale della vibrazione per aumentare la resilienza.....	154
4.2 Piattaforma IoT per la diagnostica dei trasformatori IT-M.....	161
4.2.1 Analisi dei guasti dei trasformatori di isolamento.....	168
4.2.2 Test preliminare sui trasformatori IT-M già installati .....	187
Conclusione .....	191
Bibliografia.....	194

# Introduzione

Il termine resilienza utilizzato ormai in vari campi [1], assume principalmente tre macro significati a seconda dell'area di interesse, ovvero, nell'ambito della tecnologia dei materiali viene utilizzato per indicare la resistenza a rottura per sollecitazione dinamica determinata con un'apposita prova d'urto. Nell'ambito della psicologia e della medicina indica la capacità di reagire a traumi e difficoltà. Infine, nell'ambito elettrico si usa per definire l'attitudine dei sistemi a tornare nello stato originale in seguito a deformazione. Dunque, si può notare che tranne nel primo caso dove la resilienza è indicatore della fragilità, il quale una volta superato, provoca la deformazione irreversibile della parte meccanica sottoposta a stress; negli altri due casi si usa per indicare un riadattamento, inteso come ripristino delle condizioni iniziali sia per i sistemi "umani" che non sottoposti a una prova.

In particolare, in ambito elettrico la resilienza dei sistemi indica la capacità di questi ultimi a reagire ad eventi perturbatori secondo due aspetti distinti, ovvero:

- l'assorbimento dei disturbi con un potenziale di assorbimento che permetta al sistema di adattarsi, manifestando una degradazione funzionale graduale al crescere della severità degli eventi;
- il recupero rapido a seguito dei disturbi con un potenziale di recupero che permetta di limitare il disservizio all'utenza.

I criteri di valutazione del sistema elettrico utilizzati in passato sono stati superati in favore della resilienza, al fine di analizzare nel dettaglio tutte le criticità che si potrebbero presentare sulla rete elettrica. Per [2] la resilienza dei sistemi elettrici deve orbitare intorno a 4 aspetti:

- Controllo dei centri metropolitani: la resilienza deve aumentare soprattutto nei centri metropolitani e dovrà essere in linea con la popolazione e l'economia del luogo;
- Affidabilità delle reti: aumentare la resilienza per le future esigenze elettriche compresi il trasporto, l'illuminazione, il riscaldamento e il raffreddamento
- Interdipendenza tra reti: le reti di energia e di comunicazione sono sempre più una dipendente dall'altra e quindi potrebbero presentare punti di guasto comune;
- Minacce informatiche: il passaggio dello stato della rete online rende il sistema sempre più vulnerabile ad attacchi informatici.

La realizzazione del sistema elettrico, avviata a fine '800, ha avuto un rapido sviluppo nel secondo dopoguerra con l'armonizzazione dei livelli di tensione, delle frequenze e con l'interconnessione delle singole reti nazionali. Infatti, nonostante la rete elettrica sia rimasta simile a quella costruita più di 50 anni fa, il sistema elettrico ha seguito in generale tre sviluppi indipendenti [2]:

- passaggio ad una rete distribuita: il sistema elettrico grazie alla piccola generazione sta passando da un sistema concentrato a un sistema decentralizzato con piccola generazione in bassa tensione;
- riduzione delle emissioni: i nuovi patti per il clima delle nazioni e anche la maggior convinzione degli utenti finali ha avviato la decarbonizzazione del sistema, con l'utilizzo e lo sviluppo di energia pulita o green. Inoltre, c'è stato un grande impegno per la riduzione degli scarti industriali e la diminuzione di rifiuti speciali.
- cambio dello stile di vita: la società è sempre più legata all'elettricità sia per le abitudini quotidiane che per il trasporto, il riscaldamento e la cucina.

Ad esempio le caldaie a gas o i termocamini non funzionano senza l'elettricità che alimenta pompe e schede elettroniche. Negli ultimi anni si è avuto un incremento della percentuale dei fornelli da cucina di tipo a induzione o infrarossi installati rispetto a quelli tradizionali a gas. I forni a gas sono ormai stati soppiantati da quelli elettrici. L'introduzione dei dispositivi di smart-home ha fatto sì che i sistemi meccanici siano stati sostituiti da quelli elettrici, infatti le tapparelle automatiche senza elettricità non potrebbero essere azionate.

Con il termine trasporto elettrico non si intende più solo filobus o treni elettrici, ma anche mezzi di trazione a batteria molto più variegati: treni a batteria, bus elettrici, monopattini e biciclette elettriche e soprattutto le auto elettriche, che hanno avuto un incremento di vendite in Italia maggiore del 100% e rappresentano il 16% del totale delle vendite di auto [3].

L'interazione tra il servizio elettrico e altri tipi di servizi è ormai visibile in ogni attività:

- nel servizio idrico: le attività di pompaggio, filtrazione e trattamento acque richiedono energia elettrica. Inoltre, recentemente sono state installate lungo le condutture degli acquedotti turbine per impianti di mini idroelettrico tarati per ridurre la pressione;
- nei servizi di accesso e domotici: oggi giorno la maggior parte delle porte, serrande e finestre sono motorizzate. In alcuni casi si ha necessità di tornelli e contapersone. L'architettura odierna sta abbandonando le superfici apribili in favore della ventilazione meccanizzata;

- nei servizi bancari: i pagamenti anche di piccoli acquisti vengono effettuati sempre più frequentemente tramite carte di credito, ciò fa sì che il contante presente in giro sia sempre meno, perciò qualora ci fossero guasti ai servizi di pagamento elettronico si avrebbero problemi anche per semplici operazioni di acquisto di generi alimentari o di carburante, che non funzionerebbero;
- nei servizi di comunicazione: l'energia elettrica è fondamentale sia per l'alimentazione di sistemi locali come router e modem, sia a livello nazionale con ponti radio e ripetitori, anche se questi ultimi presentano ormai generatori di back-up;

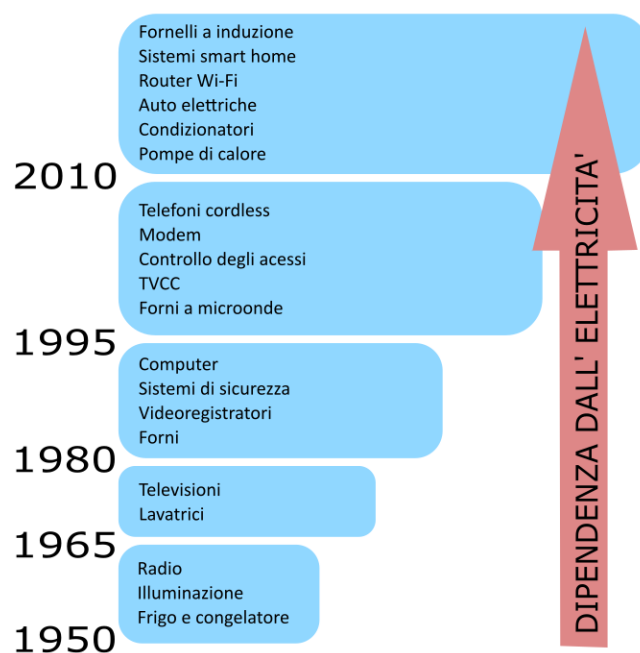


Fig. 1 Dipendenza dall'elettricità nel corso degli anni

- nei servizi energetici: le altre forme di energia sono fortemente legate all'elettricità, come ad esempio le pompe di pressurizzazione o le pompe di benzina;
- nei servizi alimentari: la refrigerazione dei prodotti o la cottura richiede grandi quantità di energia, così come la richiedono anche altri sistemi di vendita e produzione (illuminazione, pagamenti, accesso e pulizia);
- nei servizi di trasporto: l'energia elettrica, oltre ad alimentare treni e filobus, viene utilizzata anche per la segnalazione e la regolazione del traffico (semafori).

Dunque, ciò comporta che una qualsiasi interruzione più o meno lunga del servizio elettrico possa avere un impatto non indifferente sulla società e sulle azioni da intraprendere come mostrato in figura 2.



Fig. 2 Impatto di un blackout elettrico [2]

Si comprende quindi quanto sia importante la continuità del servizio elettrico e il bisogno di una rete resiliente.

# Capitolo 1

## Resilienza di un sistema elettrico

La resilienza di un sistema elettrico è la capacità del sistema a reagire di fronte a eventi severi e a ritornare nello stato di funzionamento precedente nel minor tempo possibile.

In particolare, in un sistema elettrico essa si lega in modo imprescindibile ad altre tre caratteristiche, quali:

- Affidabilità;
- Adeguatezza;
- Sicurezza.

L'affidabilità di un sistema elettrico rappresenta la capacità di fornire con continuità la potenza agli utenti finali con definiti standard di funzionamento.

L'adeguatezza di un sistema elettrico può essere definita come la capacità strutturale del sistema di soddisfare il fabbisogno di energia elettrica nel rispetto di prefissati livelli di sicurezza e di qualità.

La sicurezza di un sistema elettrico è la capacità del sistema di fronteggiare eventi elettrici conosciuti senza che si verifichino violazioni dei limiti di operatività del sistema stesso.

La differenza tra affidabilità e resilienza non è discreta. Infatti, un sistema affidabile può essere sia resiliente che non, mentre è certo che un sistema non affidabile è anche non resiliente. Ad esempio, se si considera il sistema elettrico di un ospedale, si può riscontrare facilmente un'elevata affidabilità grazie a generatori diesel e gruppi UPS, che dividono il sistema in diversi livelli, tuttavia esso potrebbe risultare non resiliente a causa di eventi negativi non considerati.

Le misure di resilienza possono essere definite in molti modi ed attualmente non esiste una metodologia comune adottata nel settore elettrico [2].

Le criticità che sicuramente possono influire sulla resilienza di un sistema elettrico sono le incertezze di carico e di produzione, i cambiamenti climatici, l'invecchiamento degli impianti e l'interconnessione dei sistemi, in quanto potrebbero provocare guasti a cascata.

Nel dettaglio, i fattori che possono avere ripercussione sul funzionamento di un sistema elettrico possono essere suddivisi in tre classi:

- Eventi facilmente prevedibili e conosciuti;
- Eventi previsti, ma non valutabili (es. attacco informatico);
- Eventi non previsti e non valutabili.

È importante sottolineare che eventi di interruzione elettrica, anche se di breve durata, potrebbero comportare disservizi di durata anche molto lunga. Ad esempio i due black-out accaduti nell'agosto 2003 in U.K., durati meno di un'ora [2], portarono i servizi ferroviari e la metropolitana ad un blocco di diverse ore con conseguenti soppressioni di treni e rimodulazione dei trasporti. Inoltre, anche i sistemi di "alert" potrebbero non essere idonei in caso di interruzioni di energia. Infatti, poiché attualmente la maggior parte degli avvisi si basa su sms e email, questi potrebbero essere non consultabili in caso di emergenza improvvisa.

Per quanto riguarda le strategie efficaci per il miglioramento della resilienza, esse possono essere classificate secondo quattro criteri principali:

- Preventivo;
- Correttivo;
- Riparativo;
- Multiplo.

Ciò è dovuto al fatto che il funzionamento di un sistema elettrico si può identificare tramite cinque stati, come visibile in figura 3, riportati di seguito:

- stato normale;
- stato di allarme;
- stato di emergenza;
- stato di emergenza estrema;
- stato di ripristino.

In particolare, nello stato normale il sistema elettrico sta funzionando in modo regolare con un criterio di sicurezza almeno N-1. Nello stato di allerta il sistema sta ancora continuando a funzionare in condizioni nominali, ma ha perso la condizione di sicurezza N-1. Nello stato di emergenza il sistema continua a funzionare, ma si verifica il superamento di qualche limite tecnico come nel caso del sovraccarico di qualche linea. Questo è l'ultimo stadio dove il sistema è ancora integro e si può tornare indietro attraverso manovre correttive. Infatti, se non



si attua prontamente nessuna manovra, si passa allo stadio di non ritorno dell'emergenza estrema, in cui si ha il collasso del sistema elettrico. Una volta raggiunto il massimo livello di disagio che si può verificare sul sistema elettrico, attraverso delle operazioni di ripristino si può tornare al funzionamento della rete elettrica in condizioni normali o di allerta.

L'evoluzione del sistema dallo stato normale allo stato di emergenza estrema non è immediata, infatti sono previsti degli stati di funzionamento intermedi, in cui mediante manovre o azioni il sistema può essere riportato da questo stato "insicuro" allo stato di "massima sicurezza".

Andando ad analizzare nello specifico lo sviluppo di un processo di aumento della resilienza di un sistema elettrico, quest'ultimo può essere espresso secondo le seguenti linee guida:

- Definizione della resilienza;
- Analisi dei fattori di perturbazione ed eventi severi;
- Studio dell'area di rischio;
- Studio di possibili soluzioni di intervento;
- Analisi costi/benefici delle varie soluzioni;
- Realizzazione della lista di interventi scelti per l'aumento della resilienza.

Sebbene siano state proposte diverse definizioni di resilienza per i sistemi elettrici, comunque molto simili tra loro; non sono stati ancora individuati metodi di valutazione delle strategie di miglioramento standardizzati sia per misurare la resilienza dei sistemi di alimentazione che per identificare potenziali soluzioni alternative [4].

Per ovviare a tale problema si può valutare la resilienza rispetto alla sicurezza funzionale (ad esempio in termini di numero di utenti disalimentati) o alla velocità della rialimentazione.

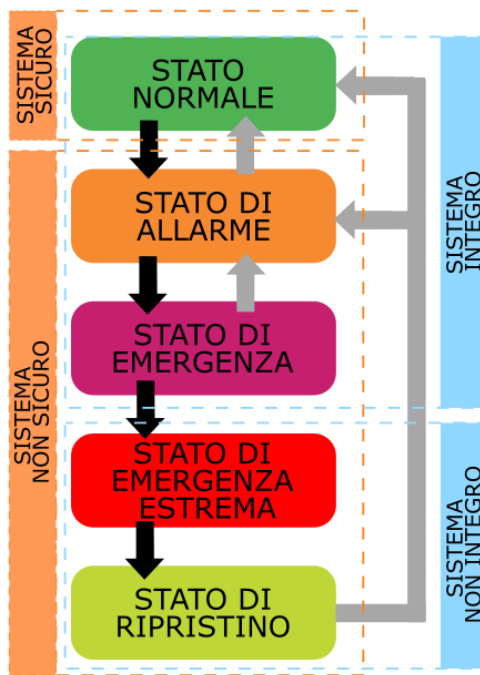


Fig. 3 Schema degli stati di un sistema elettrico [2]

La sicurezza funzionale di un sistema o di un elemento che compone il sistema è la capacità di preservare il proprio funzionamento a seguito di un evento severo e dipende dall'architettura di rete e dagli standard di sicurezza utilizzati in fase di progettazione. In particolare, al crescere della sicurezza funzionale i guasti dovuti all'evento si riducono, infatti come è possibile osservare in figura 4, si riduce il picco della curva rossa.

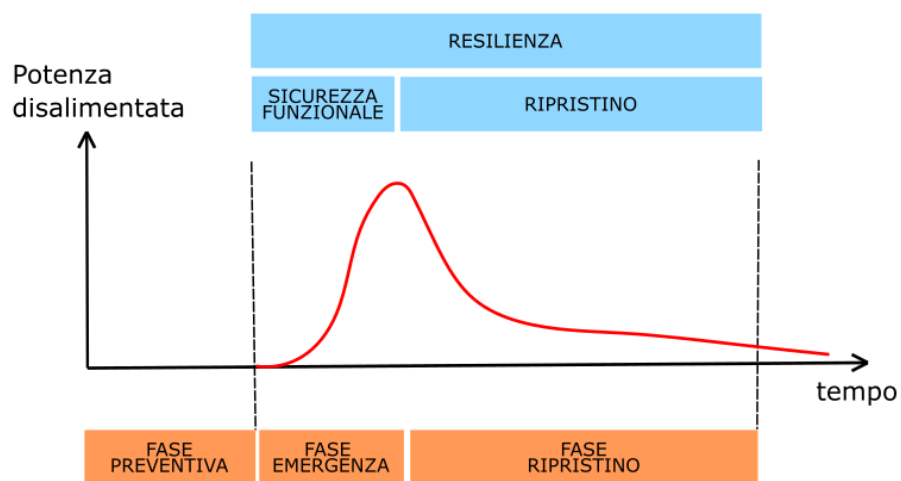


Fig. 4 Valutazione della resilienza rispetto alla sicurezza funzionale

## 1.1 Valutazione della Resilienza

Una valutazione di massima della resilienza può essere fatta considerando la risposta del sistema a parità di intensità degli eventi severi, come mostrato in figura 5.

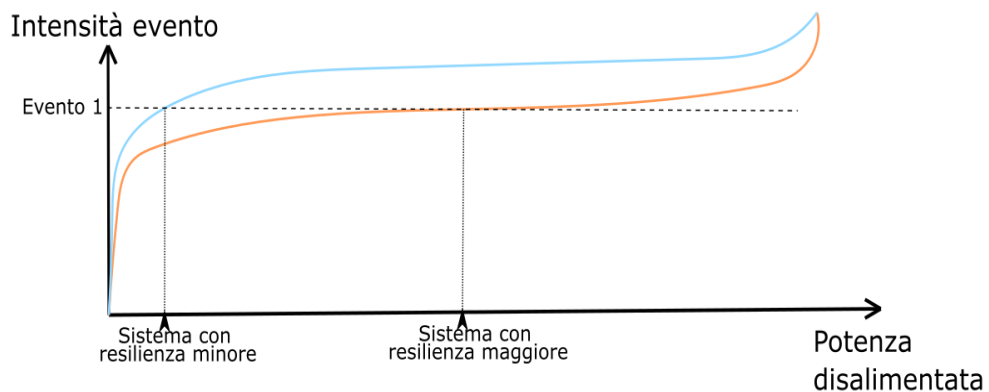


Fig. 5 Valutazione della resilienza di due sistemi

In particolare, quando si valutano gli eventi severi occorre tener conto anche del tempo di ritorno, ossia dell'intervallo di tempo che intercorre tra due eventi climatici della stessa portata, anche se in realtà si preferisce utilizzare l'inverso del tempo di ritorno, detto probabilità annuale.

Un sistema si può ritenere resiliente quando presenta le seguenti caratteristiche:

1. i componenti sono robusti e non si guastano grazie a progettazione e manutenzione idonee;
2. anche se i componenti si guastano, il sistema continua a funzionare in uno stato di allerta grazie a sufficienti ridondanze o elevati valori di sicurezza;
3. a causa di guasti multipli, il sistema degrada lentamente ed in maniera controllata;
4. il ripristino può essere effettuato in maniera rapida.

La valutazione della resilienza può essere fatta anteriormente all'evento o posteriormente.

### 1.1.1 Valutazione della resilienza anteriore all'evento

La valutazione della resilienza anteriore all'evento comporta delle incertezze maggiori, in quanto queste ultime sono legate sia alla valutazione della gravità dell'evento che può accadere, sia alla connessione tra la minaccia e la vulnerabilità di ogni singolo componente. Inoltre, in questo caso gli operatori che devono affrontare l'evento o possibili malfunzionamenti dei sistemi di sicurezza, lavorando sotto pressione, sono soggetti a maggiore stress, in quanto giocano un ruolo fondamentale nell'incertezza della valutazione.

Dunque, per la valutazione antecedente della resilienza del sistema sotto esame, occorre individuare gli eventi che potrebbero portare ad un degrado del sistema, studiare il comportamento del sistema fino al punto peggiore ed infine analizzare possibili tecniche di ripristino. Queste simulazioni, se approfondite, riescono a quantificare il miglioramento di un'azione di resilienza rispetto ad un'altra.

Gli Indicatori di resilienza nella valutazione anteriore si possono riferire o al servizio o alla rete elettrica. I primi possono essere relativi all'assorbimento del disturbo o al recupero dal disturbo, inteso come il tempo necessario a rialimentare una percentuale di carico o l'energia non fornita attesa calcolata in Wh o in euro. Invece, gli indicatori riferiti alla rete valutano sia la probabilità del guasto che quella probabilità dell'evento.

In prima istanza occorre valutare l'indice di rischio, definito come la probabilità dell'evento per l'impatto che esso crea:

$$Rischio_{evento} = probabilità_{evento} * impatto_{evento}$$

Se la resilienza è valutata per più eventi che possono accadere insieme viene considerato l'indice di rischio complessivo calcolato come:

$$Rischio_{ev\ tot} = \sum_{evento} Rischio_{evento}$$

Siccome un evento comporta sempre una percentuale di carico perso o di utenti disconnessi, in tal caso può essere definito il livello di resilienza RL calcolato come l'inverso del rischio:

$$RL = 1 / \text{probabilità}_{evento} * \text{impatto}_{evento}$$

Per agevolare il confronto tra valori molto differenti si può utilizzare il calcolo in decibel ottenuto come di seguito:

$$\begin{aligned} RL &= 10 * \log_{10} \left( 1 / \text{probabilità}_{evento} * \text{impatto}_{evento} \right) \\ &= -10 * \log_{10} (\text{probabilità}_{evento} * \text{impatto}_{evento}) \end{aligned}$$

La potenza disalimentata durante la fase di ripristino di figura 4 si può calcolare come:

$$P(t) = CD * e^{-rt}$$

dove:

- CD è il carico disalimentato
- p è la percentuale di carico non ancora alimentato dopo il tempo massimo di ripristino
- $r = \frac{\ln p}{T_{ripristino}}$

Quindi l'energia non fornita stimata ENFS durante la fase di ripristino è:

$$ENFS = \frac{p - 1}{\ln p} * T_{ripristino} * CD$$

Il costo che può comportare un evento dovuto solamente all'energia non fornita si può calcolare moltiplicando tale valore per il costo unitario €/Wh.

Altri indici di resilienza per valutazioni antecedenti mettono direttamente in relazione le singole minacce con gli esiti finali dei disturbi [5].

$$R_{CD} = \frac{\textit{potenza disalimentata stimata}}{\textit{impatto evento}}$$

$$R_{ENFS} = \frac{\textit{energia non fornita stimata}}{\textit{impatto evento}}$$

## 1.1.2 Valutazione della resilienza posteriore all'evento

La valutazione della resilienza a posteriori risulta essere più rigorosa, in quanto analizza eventi già avvenuti. Essa può riguardare o specifici eventi o le prestazioni del sistema durante un periodo temporale. Nello specifico, permette di evidenziare la porzione di impianto o il componente che presenta difetti e sul quale bisogna agire in modo da incrementare la resilienza. Al fine di realizzare tale valutazione il gestore dell'impianto o del sistema elettrico deve registrare ogni interruzione, ogni causa e come il sistema si è comportato sia nell'evoluzione del disservizio sia nella fase di ripristino.

Gli indicatori di impatto più utilizzati sono i seguenti:

- la potenza di carico persa;
- il numero di utenti coinvolti;
- il numero di servizi coinvolti;
- il tempo di rialimentazione;
- la durata media di disalimentazione.

In tal caso l'Energia non fornita ENS si può ottenere confrontando l'energia fornita con il diagramma previsionale di carico del periodo sottoposto al disturbo, come mostrato in figura 6.

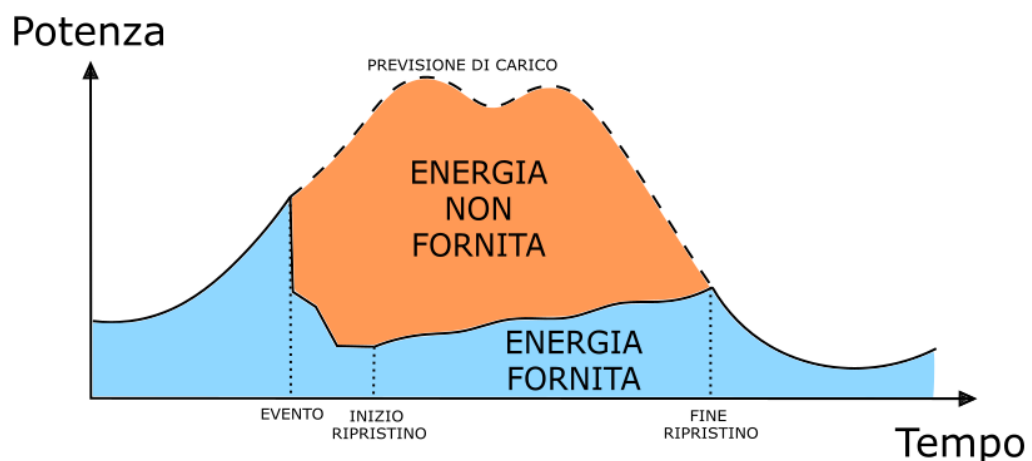


Fig. 6 Energia non fornita rispetto al diagramma provvisionale di carico

Il danno economico dovuto all'evento può essere calcolato moltiplicando l'energia non fornita per il costo unitario €/minuti/kWh, che dipende però da numerosi fattori come ad esempio il numero di utenti coinvolti o le fasce orarie di interruzione.

Durante la fase di ripristino può essere calcolato anche l'indice di recupero del carico disalimentato REC(t) [5], che ha valori compresi tra 0, all'inizio della fase di ripristino, e 1, quando tutti gli utenti sono stati ricollegati, come segue:

$$REC(t) = \frac{\Delta_{carico\ rialimentato}}{\text{Carico perso massimo}}$$

Tuttavia, per una valutazione attenta della resilienza occorre correlare l'impatto del disservizio con l'intensità dell'evento o degli eventi estremi che lo hanno causato. In particolare, l'interruzione può essere valutata in base a diverse caratteristiche come riportato in tabella 1 [6].

Per classificare le diverse interruzioni che possono interessare le reti di distribuzione e di trasmissione, si può far riferimento agli indici utilizzati nello studio della qualità dell'energia elettrica, ossia:

- SAIFI (System Average Interruption Frequency Index);
- SAIDI (System Average Interruption Duration Index);
- CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index).

Il SAIFI è il numero medio di interruzioni che un utente subisce in un periodo temporale di solito annuale. Questo può essere visto come un indice integrale di resilienza relativo alla proprietà di assorbimento dei disturbi [5] e si calcola come:

$$SAIFI = \frac{\sum_i f_i N_i}{N_{Tot}}$$

dove:

- $f_i$  è la frequenza di disalimentazione nell'area  $i$ ;
- $N_i$  è il numero di utenti nell'area considerata;
- $N_{Tot}$  è il numero totale di utenti serviti.



Tabella I. Classificazione delle possibili interruzioni del servizio

Possibile interruzione	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
<b>Per causa</b>	<b>Cause di forza maggiore</b> eventi naturali eccezionali o scioperi	<b>Cause esterne,</b> guasti provocati da clienti, danni provocati da terzi	<b>Altre cause,</b> intese come tutte le altre cause non indicate nei tipi 1 e 2	
<b>Per ambiti territoriali</b>	<b>Alta concentrazione:</b> comuni con popolazione superiore a 50.000 abitanti	<b>Media concentrazione:</b> comuni con popolazione superiore a 5.000 e inferiore a 50.000 abitanti	<b>Bassa concentrazione:</b> comuni con popolazione non superiore a 5.000 abitanti	
<b>Per origine</b>	interruzioni originate sulla <b>rete AAT</b>	Interruzioni originate sulle <b>linee AT</b>	interruzioni originate sulla <b>rete MT</b>	interruzioni originate sulla <b>rete BT</b>
<b>Per durata</b>	<b>Interruzione transitoria:</b> durata non superiore a un secondo	<b>Interruzione breve:</b> durata superiore a un secondo e non superiore a tre minuti	<b>Interruzione lunga:</b> durata superiore ai tre minuti	
<b>Per cliente</b>	<b>Cliente AT:</b> cliente finale alimentato ad alta tensione	<b>Cliente MT:</b> cliente finale alimentato a media tensione	<b>Cliente BT:</b> cliente finale alimentato a bassa tensione	
<b>Per preavviso</b>	<b>Interruzione con preavviso:</b> l'interruzione preceduta da un preavviso di almeno 24 ore	<b>Interruzione senza preavviso:</b> interruzione non preceduta dal preavviso		

Il SAIDI può essere considerato come un indice complessivo di assorbimento e recupero da un disturbo. Di solito è misurato in minuti o ore su base annua, ed indica la durata media delle interruzioni per utente, calcolato come:

$$SAIDI = \frac{\sum_i U_i N_i}{N_{Tot}}$$

dove:

- $U_i$  è la durata dei disservizi nell'area  $i$ .

Il CAIDI indica la durata media di una disalimentazione ed è calcolato come il rapporto degli indici precedenti. Inoltre, si usa per indicare un tempo medio di ripristino del sistema. Viene calcolato come:

$$\text{CAIDI} = \frac{\text{SAIDI}}{\text{SAIFI}}$$

## 1.2 Classificazione degli eventi severi

I fattori che generano eventi severi, che potrebbero influenzare il funzionamento di un sistema elettrico fino a portarlo al collasso, possono essere suddivisi nelle quattro categorie (figura 7) riportate di seguito:

- Fattori elettrici;
- Fattori geopolitici o umani;
- Fattori tecnologici;
- Fattori naturali.



Fig.7 Fattori che influenzano il sistema elettrico

Nei paragrafi successivi vengono brevemente illustrate alcune potenziali minacce che influenzano il sistema elettrico e che quindi occorre mitigare con opere di resilienza.

## 1.2.1 Fattori elettrici

### *Minor inerzia del sistema*

Se un evento interessa la rete elettrica nazionale, l'inerzia del sistema elettrico generale mitiga in gran parte la possibilità di instabilità del sistema. Quest'inerzia in passato veniva garantita soprattutto dall'elevata massa in rotazione dei generatori delle centrali, come nel caso di quelle termoelettriche o idroelettriche. Con il passaggio alle fonti rinnovabili, l'inerzia connessa alla rete è sempre presente seppur in percentuale minore ed un piccolo distacco dalla rete di un carico o di un generatore potrebbero perciò portare ad uno squilibrio rapido e non controllabile. Dunque, per rendere il sistema resiliente occorre aumentare la massa rotante con l'utilizzo di compensatori sincroni o con lo stoccaggio tramite sistemi a volano.

### *Disponibilità di riserve primarie*

Tutte le fonti di energia hanno ormai una forma di stoccaggio e riserva tale da rendere il sistema resiliente in caso di non approvvigionamento della risorsa per brevi periodi. Per quanto riguarda il carbone, l'unica miniera italiana è situata nel bacino carbonifero del Sulcis, in Sardegna, dalla quale è stato estratto solo l'1% di minerale [7]. Mentre, per il gas naturale, l'Italia oltre ad essere un produttore, dal 1964 ha anche bacini di stoccaggio, che consentono di compensare le fluttuazioni di consumi e garantire una riserva strategica. Di solito lo stoccaggio viene fatto immettendo gas all'interno di giacimenti non più produttivi in estate per utilizzarlo nel periodo invernale di maggior richiesta [2].

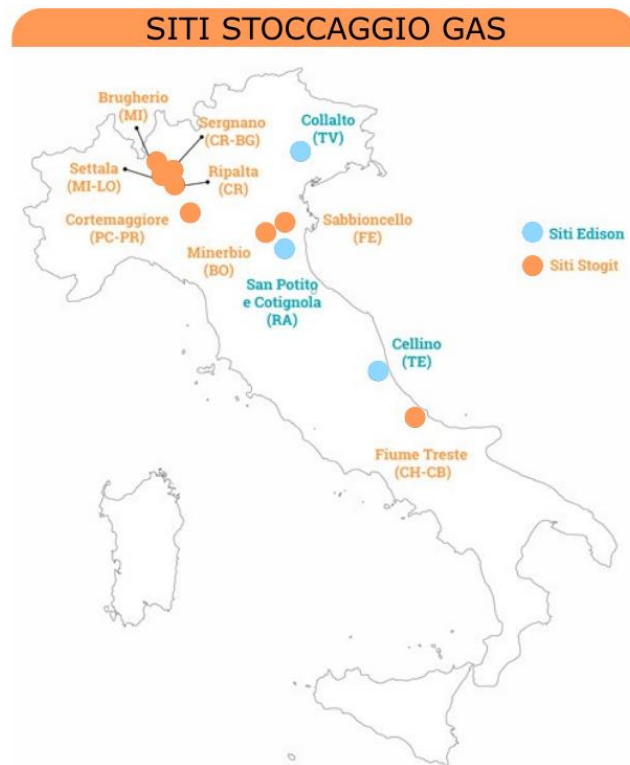


Fig. 8 Siti di stoccaggio gas di Edison e Stogit nel 2015[8]

Per far fronte alle emergenze petrolifere, con l'accordo di Parigi del 7 novembre 1977, l'Italia ha recepito di mantenere scorte di prodotti petroliferi per un consumo pari a 65 giorni. Ma, nel 1981 è stato imposto agli attori della filiera di avere a disposizione sul suolo italiano almeno una scorta utile per 100 giorni e nel 1986 è stato infine deciso che gli importatori di prodotti petroliferi dovevano avere una scorta di almeno il 20% del prodotto importato [9].

Tuttavia, l'utilizzo massivo di energia elettrica e la provenienza anche dall'estero ha creato una riduzione intrinseca della riserva di fonti energetiche. Per tale ragione deve essere incentivato in termini di resilienza lo stoccaggio di energia elettrica sia per le emergenze di natura meteorologica, sia per questioni geopolitiche.

### ***Elettrificazione dei trasporti***

Il governo Italiano sta incentivando la transizione della popolazione verso il trasporto green mediante sconti, incentivi economici, parcheggi gratis, esenzioni da bolli ecc. Inoltre, quasi tutte le case automobilistiche hanno ormai realizzato dei modelli ibridi plug-in o full electric, favoriti anche dalle limitazioni imposte alla circolazione delle auto diesel dentro le grandi

città. Tuttavia, questo contributo alla decarbonizzazione ha comportato un grande stress per le reti elettriche progettate sulla base delle abitudini di decenni di anni fa. Per cui tale sviluppo richiede che il sistema sia resiliente anche alle nuove tecnologie che potrebbero essere riversate sulla rete dal comparto del trasporto elettrico.

## **1.2.2 Fattori umani**

I fattori umani da considerare per l'analisi della resilienza del sistema sono di difficile interpretazione, in quanto legati ad eventi che spesso non si ripetono nel tempo. Tuttavia, alcuni di essi vengono descritti di seguito.

### ***Attacchi Informatici***

Negli ultimi anni si è riscontrato un notevole aumento dei blackout dovuti ad attacchi informatici e problemi tecnici. Ad esempio, l'attacco informatico alla rete elettrica ucraina nel 2015 ha causato interruzioni di corrente a circa 225.000 clienti, mentre il recente blackout (16 giugno 2019) in Sud America ha causato interruzioni di corrente a oltre 48 milioni di clienti. L'ultima interruzione di corrente (3 agosto 2019) nella capitale dell'Indonesia a causa di attacchi informatici ha causato l'interruzione di corrente a più di 10 milioni di clienti [4].

I problemi legati alla sicurezza informatica evolvono velocemente e possono essere numerosi. Il distributore degli USA, PJM, ha subito 8.900 attacchi nel novembre 2013, di cui 4.090 tentativi documentati. PJM ha quindi deciso di triplicare il proprio budget ed ha aumentato le capacità di difesa dei propri sistemi, dato che la probabilità di attacchi informatici è notevolmente in crescita [10].

In particolare, l'attacco pirata più significativo è stato proprio quello alla rete ucraina, infatti quest'ultimo è iniziato alle ore 3:30 del 23 dicembre 2015, quando un hacker è entrato nel sistema del centro di controllo di Prykarpattyaoblenergo portando circa 30 sottostazioni offline. Contemporaneamente sono stati attaccati altri 2 centri di controllo mettendo fuori servizio il doppio delle sottostazioni e provocando in totale la disalimentazione di 230000

utenti. Le operazioni di ripristino dell'energia sono durate poche ore: in alcune zone gli utenti sono stati disalimentati per 6 ore, tuttavia il ripristino funzionale del sistema di telecontrollo è durato mesi, in quanto gli hacker in 16 sottostazioni avevano sovrascritto il codice di controllo eliminando il controllo da remoto degli operatori [11].

## ***Vandalismo***

Il sistema elettrico deve essere resiliente anche agli atti di vandalismo, come nel caso dei danni apportati ai trasformatori BC Hydro a North Vancouver nel 2019 [12].



Fig.9 Atti di vandalismo (tagli) su trasformatori in olio [13]

In pochi mesi, un gruppo di vandali ha messo fuori servizio i trasformatori in diverse zone della città, provocando danni per più di 150.000 dollari e diverse interruzioni di corrente, che hanno comportato la mancanza di energia per 185 utenti privati e diverse attività. Inoltre, durante questi incidenti si è avuta la fuoriuscita dell'olio isolante, che fortunatamente non ha causato alcun impatto ambientale grazie alla presenza della vasca di raccolta sotto i trasformatori, mentre il surriscaldamento di questi ultimi è stato evitato grazie alle protezioni di livello sul cassone. Ciò è stato possibile grazie al fatto che i trasformatori, essendo progettati per essere affidabili e sicuri, hanno a bordo una serie di sensori di protezione che portano anche alla disalimentazione in caso di anomalia grave, però potrebbe comunque accadere che uno di questi sensori non funzioni perfettamente, provocando danni irreversibili al trasformatore.

Per tale ragione il concetto di resilienza deve focalizzare l'attenzione anche su una maggiore sicurezza fisica degli apparecchi e degli impianti.

### *Attacchi terroristici*

Infine, gli impianti elettrici possono essere anche facile bersaglio di attacchi terroristici, come nel caso della sottostazione di trasmissione Metcalf della Pacific Gas and Electric Company a Coyote, in California, il 16 aprile 2013, quando una banda armata ha messo fuori uso 17 trasformatori, causando danni per un valore superiore a 15 milioni di dollari. I quartieri nelle vicinanze sono stati momentaneamente disalimentati, tuttavia si è evitato il blackout totale drenando energia dalle vicine stazioni della Silicon Valley [14].



Fig.10 Attacco terroristico alle sottostazioni Metcalf in California nel 2013[15]



### 1.2.3 Fattori naturali

Negli ultimi anni si è avuto un significativo aumento della frequenza di eventi meteorologici estremi come uragani, terremoti e allagamenti. Queste calamità hanno causato elevate perdite economiche, la maggior parte dovute ai lunghi tempi di interruzione e ai blackout delle reti elettriche.

In figura 11 sono illustrati i principali eventi estremi mondiali dal 2003 al 2019 [4], che hanno avuto un grande impatto sul sistema di alimentazione e che perciò sono utili per la valutazione della resilienza degli impianti elettrici. Si osserva come gli uragani, i terremoti e le tempeste rappresentano le maggiori cause dei disservizi elettrici dopo i blackout dovuti a fattori umani ed elettrici.

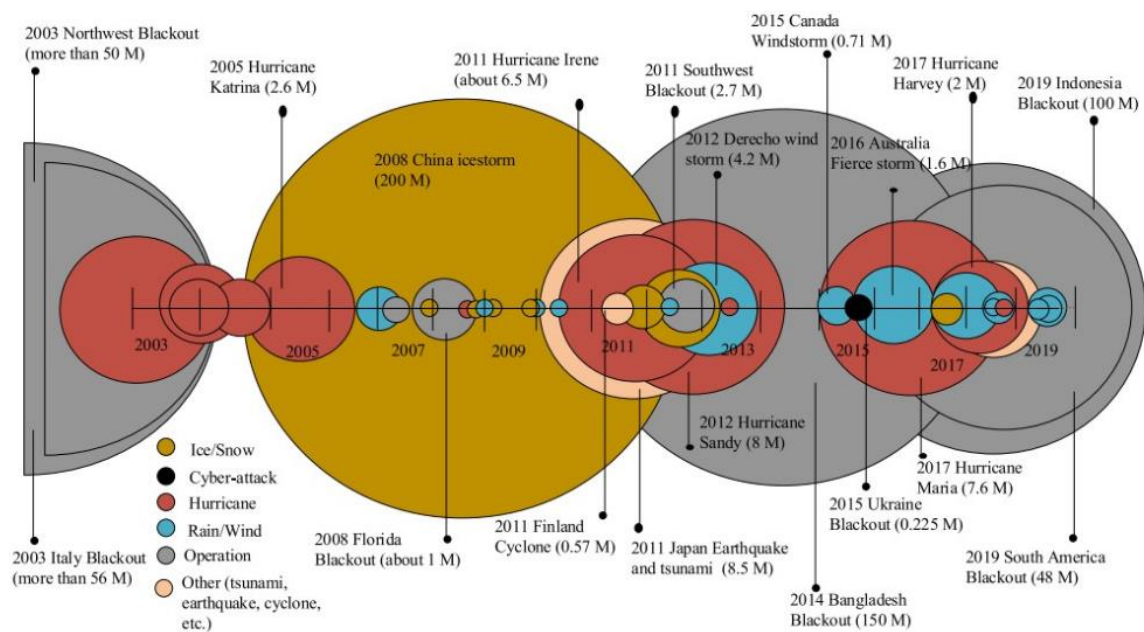


Fig. 11 Eventi severi mondiali dove M sono di utenti disconnessi dal servizio elettrico in Milioni

Nella figura 12 vengono mostrati i maggiori eventi accaduti in Italia dal 2001 al 2015, secondo i database TERNA, a causa di alluvioni, neve, vento e inquinamento salino.

Si osserva che le maggiori quantità di energia non fornita dipendono dagli eventi nevosi/ghiaccio e dall'inquinamento salino.

	2001-2007	2008-2011	2012-2013	2014	2015	Totale ENF [MWh]
<b>Neve/Ghiaccio</b>	Feb 2004 – Veneto, Emilia Romagna Gen 2005 – Abruzzo	Gen 2011 – Abruzzo Dic 2008 – Cuneo, Torino, Belluno	Dic 2013 – Belluno (Cortina) Feb 2012 – Centro Italia		Feb 2015 – Emilia Romagna, Lombardia Mar 2015 – Abruzzo	<b>5.563*</b>
<b>Alluvioni</b>	Giu 2003 – Applicazione Pesse		Dic 2013 – Pescara	Mag 2014 – Recanati Ott 2014 – S. Colombano Nov 2014 – Novara		<b>142**</b>
<b>Vento forti/ Trombe d'aria</b>			Nov 2012 – Taranto	Ott 2014 – Monselice		<b>668</b>
<b>Inquinamento salino</b>	Set 2001 – Sardegna			Ott 2014 – Sardegna		<b>2.043</b>

Fig. 12 I maggiori eventi meteorologici estremi Italiani degli ultimi 15 anni che hanno colpito la rete TERNA [16]

### *Neve e ghiaccio*

I danni causati dalla neve sono ormai noti e possono essere molto insidiosi, in quanto possono causare fuori servizi addirittura su intere regioni per lungo tempo. Infatti, nel 2008, una tempesta di neve ha costretto 200 milioni di persone della Cina centrale (in particolare le province di Gizou, Jiangsu e Shandong) a rimanere a lungo senza energia elettrica, provocando danni diretti per 5 miliardi di euro. Inoltre, 5.8 Milioni di persone sono rimaste bloccate nelle stazioni ferroviarie per la mancanza di energia elettrica, per l'enorme quantità di neve sui binari e per i dispositivi di scambio binari rimasti bloccati [4, 17].

Ciò è dovuto al fatto che l'abbondanza di nevicata provoca l'accumulo della neve sul conduttore, la temperatura bassa ne causa il ghiacciamento ed il vento esercita su questo manicotto una forza tale da aumentare il carico applicato sul conduttore stesso, fino a poterne causare la rottura.

Oltre a ciò, l'accumulo di ghiaccio nella parte superiore del conduttore rispetto alla parte inferiore comporta una rotazione del cavo a causa del suo peso. Il ripetersi di questo meccanismo porta all'aumento della forza di tiro che potrebbe provocare la rottura del cavo.



Fig.13 Manicotti di ghiaccio sui conduttori nudi [18]

Infatti, durante la nevicata del gennaio 2017, che ha interessato le zone di Abruzzo e Marche, questi manicotti di neve si sono formati intorno ai conduttori della rete di trasmissione. Il sistema anti-ghiaccio non ha funzionato a causa del tipo di neve con alto contenuto di acqua, che quindi è stata gelata velocemente dal vento freddo.

Per altro il problema neve si riversa anche sul servizio della rete di telecomunicazione. Infatti durante la nevicata del 2017, solo nella provincia di Teramo sono stati danneggiati più di 13mila linee telefoniche. Tuttavia, il danno più grave riscontrato sulla rete elettrica è stato causato dall'isolamento di 110 ripetitori della rete mobile. Questi ultimi, anche se dotati di generatori di emergenza e gruppi UPS per la continuità del servizio, hanno smesso di funzionare sia a causa della disalimentazione elettrica che perdurava da diversi giorni, sia per il mancato rifornimento dei combustibili. Ciò ha comportato seri problemi ai servizi di ripristino delle reti elettriche, in quanto le squadre sul posto non riuscivano a comunicare con le loro sedi operative.

I danni alla rete telefonica hanno continuato a verificarsi anche durante lo scioglimento delle nevi, a causa dei volumi di acqua che si sono riversati all'interno dei quadri elettrici.

È doveroso sottolineare che la difficoltà ad intervenire in loco è stata dovuta anche all'impercorribilità delle strade a causa della neve. Infatti, in alcune zone il livello di quest'ultima ha superato i 200 cm, perciò alcune frazioni sono rimaste isolate per diversi giorni. Di conseguenza, tratti di linee elettriche da ripristinare sono stati raggiunti solo grazie a mezzi quali elicotteri, turbine e spazzanevi forniti da altri enti statali.



Fig.14 Linea MT caduta per sovraccarico neve nell'evento del 17/01/2017. Fonte: Rete8 Abruzzo

Inoltre, durante quei giorni, il disservizio elettrico è stato talmente esteso che neanche attraverso l'utilizzo di generatori da parte dell'ente distributore si è riusciti a alimentare tutti i clienti elettrici. Per tale ragione, i generatori di piccola potenza ad uso privato erano diventati introvabili, nonostante l'invio di quantità significative da altre parti di Italia, ed i pochi che hanno avuto la fortuna di reperirli li hanno pagati anche il triplo rispetto al loro valore commerciale.

Tornando al problema principale legato alle abbondanti nevicate, ossia i manicotti di neve sui conduttori delle linee elettriche, va specificato che essi sono causati dall'insieme di più fattori meteorologici come nevicate umide, nubi basse trasportate dal vento e pioggia sopraffusa.

Le nevicate possono essere distinte in:

- dry snow (neve asciutta) che avviene con temperature inferiori a 0 C e con fiocchi di neve con basso contenuto di acqua liquida.
- wet snow (neve umida) che si formano quando nevicata con una temperatura dell'aria compresa tra 0 C e 2 C e il fiocco ha un elevato contenuto di acqua.

La neve asciutta presenta una densità molto bassa ( $100\text{kg/m}^3$ ) a differenza della neve umida, essa invece ha una densità che può arrivare a  $600\text{ kg/m}^3$ . La pericolosità per le reti di trasmissione e distribuzione quindi è molto diversa a seconda del tipo di neve, infatti la neve asciutta depositata sui conduttori nella maggior parte dei casi si distacca senza causare danni, mentre l'elevato contenuto di acqua (anche 40%) della wet snow aiuta l'accrescimento del manicotto.

Inoltre, a causa del vento la neve si deposita tra i singoli trefori e con l'accrescimento del manicotto si ha la rotazione del manicotto per lo squilibrio di peso rispetto all'asse, ciò favorisce l'attecchimento di ulteriori fiocchi di neve e quindi l'accrescimento del manicotto come è possibile vedere in figura 15.

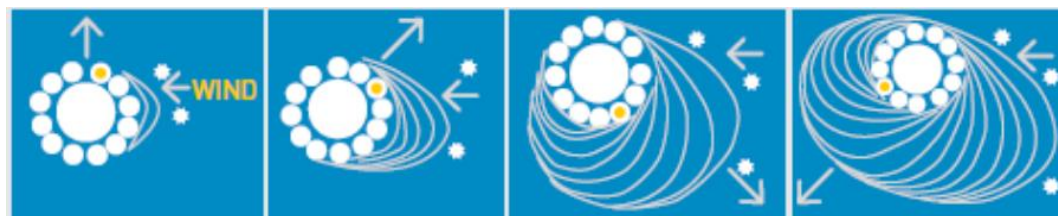


Fig. 15 Meccanismo di accrescimento del manicotto di neve

I manicotti possono portare ad un sovraccarico delle linee anche di 20 kg/m, che portano al collasso dei conduttori, delle funi di guardia, ma anche dei tralicci e degli isolatori. Se inoltre il manicotto si distacca in maniera repentina dal conduttore, quest'ultimo subisce una spinta violenta verso l'alto che può causare un cortocircuito temporaneo o permanente.

In Italia sono prevalenti i danni provocati dalle nevicite umide, mentre nei paesi del nord Europa sono prevalenti i danni provocati dal ghiacciamento delle componenti elettriche. La neve oltre ai manicotti potrebbe causare cortocircuiti per la diminuzione dell'isolamento degli isolatori ed in alcuni casi il fuori servizio di alcuni quadri elettrici a causa di allagamenti o di fiocchi che riescono ad entrare nelle feritoie di raffreddamento delle cabine.

## ***Terremoti***

La penisola Italiana è una zona altamente sismica, infatti terremoti di elevata intensità si verificano frequentemente e producono danni su larghe zone. Le elevate vibrazioni mettono a dura prova i componenti, provocano diversi danni che vanno dal cedimento di infrastrutture, a scatti intempestivi degli interruttori, fino a smottamenti che inglobano componenti di rete. Durante i terremoti quindi possono verificarsi sia interruzioni brevi, che interruzioni lunghe. Le interruzioni brevi sono dovute principalmente allo scatto intempestivo degli interruttori e l'energia viene ripristinata in pochi secondi dai dispositivi di riarmo automatici, ma purtroppo

questa condizione può mettere in serio pericolo i cittadini, che si ritrovano al buio in un momento di panico.

La vulnerabilità sismica dipende principalmente dalla robustezza dei componenti delle stazioni elettriche piuttosto che delle linee. Gli isolatori a colonna risultano come componenti più colpiti a causa della loro forma geometrica snella ed elevata.

La figura 16, che mostra una sottostazione cinese colpita dal terremoto de 12 maggio 2008, evidenzia come le strutture maggiormente colpite siano le strutture di supporto dei componenti elettrici e la recinzione esterna.

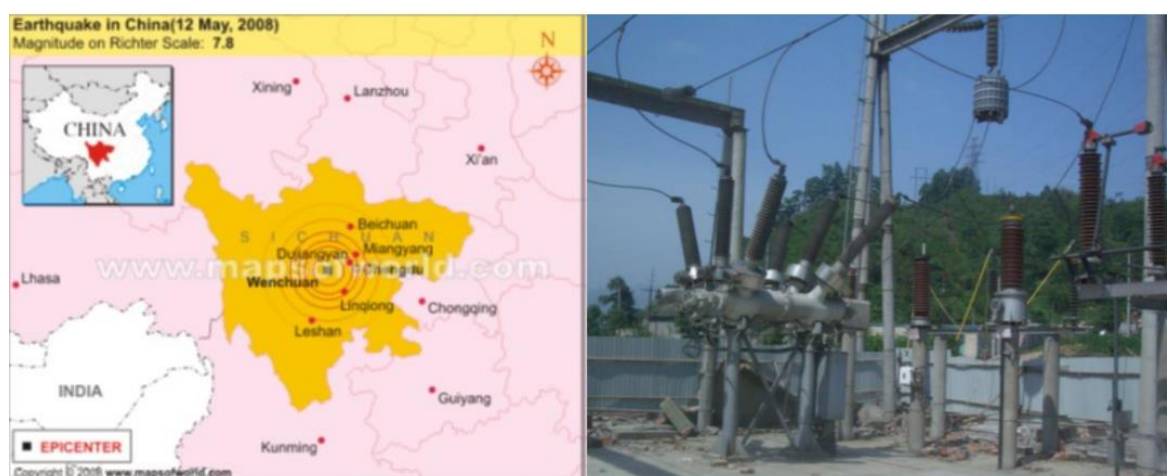


Fig. 16 Danni ad una sottostazione a causa del terremoto del 12 maggio 2008

Quindi, al fine di prevenire i danni alle apparecchiature elettriche, si ricorre a tecniche ingegneristiche come isolatori sismici, ma anche all'analisi sismica degli elementi finiti e a test su piattaforme che simulano le accelerazioni tipiche dei terremoti.

### ***Maremoto***

Il maremoto è un evento che si riesce a prevedere con largo anticipo, tuttavia esso può causare comunque danni qualora vada ad interessare apparati elettrici collocati vicino alle coste.

Un esempio recente è stato il terremoto e maremoto del Tōhoku dell'11 marzo 2011, che ha messo fuori servizio la distribuzione elettrica di 3 milioni di clienti ed ha causato lo

spegnimento automatico di 11 centrali nucleari da parte dei sistemi di emergenza. Inoltre, dopo un'ora dall'evento è avvenuta l'esplosione del reattore numero 1 della centrale Fukushima Dai-ichi a causa dell'impianto di raffreddamento danneggiato. Il reattore 3 e il reattore 2 sono stati irrorati con acqua marina per contenere i danni, partendo rispettivamente il 12 e 14 marzo. Infine il 15 marzo c'è stata l'esplosione del reattore 4. Nella centrale nucleare di Onagawa si è sviluppato un incendio, fortunatamente subito estinto. Mentre nella centrale nucleare di Tokai, il 14 marzo, ha smesso di funzionare il sistema di raffreddamento del reattore 2 e due su tre dei generatori diesel utili al sistema di raffreddamento sono stati messi fuori uso [19].



Fig. 17 Tsunami alla Centrale nucleare di Fukushima

### ***Tempeste di sabbia***

Il fenomeno delle tempeste di sabbia avviene quando il vento soffia su regioni aride o semiaride sollevando particelle di sabbia asciutta. L'Avanzata del fronte della tempesta di sabbia è assimilabile ad un muro largo diversi chilometri e alto fino a 3 km e può portare con sé anche precipitazioni. Se i rovesci di pioggia sono presenti dentro la nuvola di sabbia si produce il fenomeno delle piogge di fango, cioè precipitazioni di acqua mista a polvere di sabbia desertica molto dannosa e fastidiosa [20].

La polvere non solo oscura il sole, abbassando la produttività o addirittura spegnendo gli impianti fotovoltaici, ma può provocare perdite a causa dell'azione abrasiva o dello sporco depositato sulle apparecchiature elettriche, portando ad un incremento dei costi di manutenzione. Le particelle di sabbia sugli isolatori riducono la tensione di scarica dei materiali isolanti. Questa riduzione della tensione di flashover sarà tanto più elevata quando le particelle di sabbia vengono caricate con tensioni CA più alte. Inoltre, si ha una maggiore riduzione della tensione di flashover quanto più il caricamento delle particelle di sabbia avviene con tensione continua [21].

In Iran, la tempesta di sabbia del 20 febbraio 2017 ha provocato per esempio l'interruzione temporanea di energia elettrica e del servizio idrico su gran parte della provincia del Khuzestan e ha ridotto la produzione di petrolio di 700.000 barili al giorno [22].



Fig.18 Tempesta di Sabbia su Phoenix (USA) [20]

Per ovviare a questi problemi e mitigare i rischi dovuti a tempeste di sabbia, i ricercatori francesi stanno sviluppando un modello di previsione a 5 giorni al fine di capire i movimenti di polvere nel deserto ed essere quindi in grado di informare preventivamente i gestori di centrali elettriche [23].



## *Tempeste elettromagnetiche*

Le eruzioni solari, anche se sono fenomeni che accadono di rado e con una frequenza di decine di anni, possono provocare variazioni di campo magnetico che causa a sua volta delle correnti geomagnetiche indotte (in inglese GIC: Geomagnetically induced Current), le quali possono fluire sulle parti elettriche e creare dei fenomeni di sovraccorrente in diversi punti come mostrato in figura 19 [16].

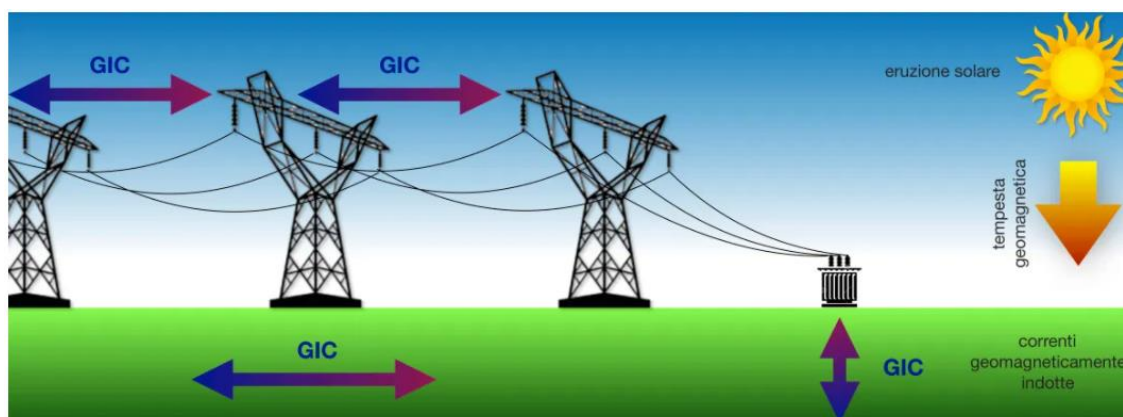


Fig.19 Le correnti geomagneticamente indotte [16]

Queste correnti possono richiudersi sul neutro del trasformatore che è collegato a terra, determinando anche la rottura dello stesso. Da ciò si deduce che le tempeste magnetiche possono provocare non solo danni ai sistemi di distribuzione elettrica, ma anche ad impianti elettrici ed elettronici militari, civili, sistemi di navigazione e sistemi satellitari. Inoltre, possono provocare malfunzionamento dei misuratori di flusso negli impianti idrici.

L'effetto negativo è dovuto principalmente all'oscillazione della corrente e non all'energia dell'onda ed è massimizzato su impianti o condutture a lunga percorrenza come le linee ferroviarie o oleodotti e gasdotti.

Il fenomeno storicamente più significativo è quello avvenuto in Quebec il 13 marzo del 1989, quando l'intera regione è stata investita da una forte tempesta geomagnetica dovuta ad un'esplosione di massa coronale avvenuta il 9 marzo. Il fenomeno ha generato inizialmente delle interferenze delle comunicazioni a onde corte e la perdita di controllo dei satelliti. Successivamente la variazione di campo elettromagnetico ha causato lo scatto intempestivo degli interruttori della rete elettrica Hydro-Quebec portandola offline in meno di 90 secondi e

provocando un blackout durato 9 ore [24]. Questi eventi sono stati amplificati dal tipo di rete presente, ossia linee elettriche molto lunghe a 735 kV provenienti dalle centrali idroelettriche, e dal terreno prevalentemente roccioso che ha fatto sì che il percorso delle GIC a minore resistenza fosse quello delle linee AAT. Lo scoppio di potenza ha avuto effetti anche negli Stati Uniti dove si sono registrati oltre 200 problemi sulla rete elettrica. Per esempio la New York Power e la New England Power Pool hanno perso rispettivamente 150 e 1410 MW di produzione. È stato interrotto il servizio di energia a 96 aziende elettriche del New England, però fortunatamente tutto il sistema non è collassato grazie alle riserve di energia e alla prontezza del distacco dei grandi carichi [25]. Inoltre, la disalimentazione del sistema elettrico ha causato anche il malfunzionamento e il blocco dei sistemi di riscaldamento, vitali a quelle latitudini.



Fig.20 Trasformatori della rete di distribuzione elettrica del Sud Africa, danneggiati a seguito della tempesta magnetica dell'Ottobre 2003

Altri effetti collaterali delle tempeste magnetiche hanno interessato i sistemi elettrici di diverse nazioni del mondo. In particolare, si ricorda la tempesta di Halloween di ottobre del 2003, che ha provocato danni a diversi trasformatori dello stato del Sud Africa ed un blackout localizzato alla città di Malmö, nella Svezia meridionale, che ha causato la disalimentazione del servizio elettrico per 50000 persone. Anomalie sono state rilevate anche sulla rete elettrica ferroviaria della Russia e fu registrato un aumento delle vibrazioni e del rumore dei trasformatori presenti nella sottostazione di Shanghe e nella centrale nucleare di Ling'ao [26]. In figura 20 è

mostrato un trasformatore della rete elettrica di distribuzione del Sud Africa danneggiato dalle GIC a seguito della tempesta magnetica di ottobre 2003 [16].

In conclusione, poiché tale fenomeno risulta legato alla lunghezza delle linee aeree, la mitigazione del rischio ed il conseguente aumento della resilienza del sistema elettrico può essere raggiunto interrando i cavi di trasmissione e modificando il sistema attraverso l'utilizzo di linee corte.

### ***Inquinamento salino***

L'inquinamento salino è un fattore naturale estremamente importante e temuto se gli impianti elettrici sono collocati in prossimità di aree marine, in quanto la presenza di agenti contaminanti conduttivi sulla superficie delle parti isolanti uniti ad un'umidità elevata può comportare la diminuzione della tenuta dielettrica e quindi causare archi elettrici parziali, che possono evolvere fino alla scarica totale e quindi alla disconnessione dell'impianto.

Le sostanze che si posano sugli isolatori possono essere sostanze non solubili come le argille, sostanze oleose o sostanze solubili come nitrati e cloruri, che in presenza di acqua si dissociano in ioni con caratteristiche conduttive.

Di solito le piogge abbondanti rimuovono tali sostanze dal conduttore, ma in particolari condizioni di siccità, con mancanza di piogge, si potrebbe avere un elevato deposito di materiale.

Il cedimento dell'isolamento in Italia è dovuto prevalentemente alla deposizione del sale marino, ma in alcuni casi viene provocato anche da processi umani come attività agricole e industriali o zone a traffico elevato.

In figura 21 è possibile osservare che le coste italiane dove possono verificarsi più frequentemente questi fenomeni sono le coste tirreniche e le coste mediterranee della penisola e le coste delle Isole.

Infine, è importante sottolineare che l'inquinamento salino provoca l'ossidazione di tutti i componenti metallici che compongono un sistema elettrico, come si vede in figura 22.

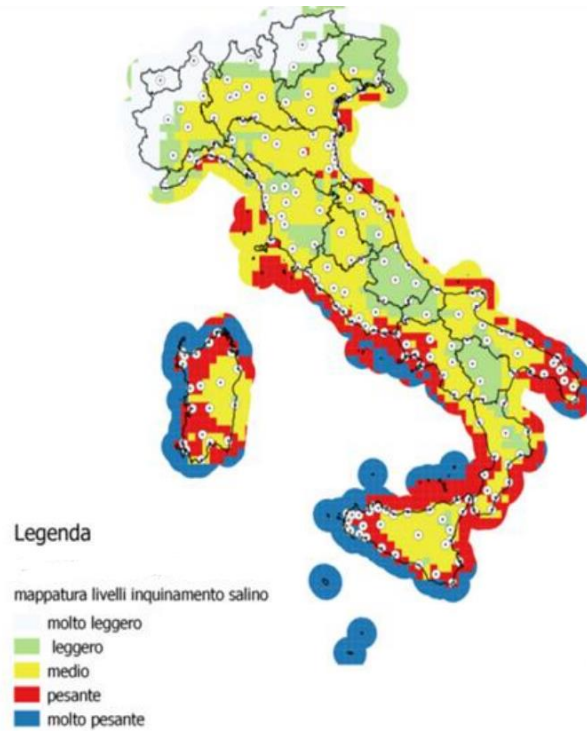


Fig. 21 Mappa dell'inquinamento salino Italiano



Fig. 22 Ossidazione di una parte metallica dell'isolatore dovuto ad inquinamento

### ***Incendi boschivi***

I danni provocati dagli incendi boschivi possono causare disservizi al sistema elettrico o sono legati al fatto che occorre disalimentare un'area per intervenire sull'incendio con operazioni di spegnimento. Questo tipo di evento tende a verificarsi principalmente nel periodo estivo, durante i giorni più caldi. L'incendio può durare anche diversi giorni, provocando un

disservizio di lunga durata. Nel caso in cui l'incendio colpisca la rete di trasmissione e distribuzione, occorre ripartire la potenza su altre linee non interessate dal fuoco, ma questo potrebbe comportare il superamento dei limiti massimi di corrente supportata a causa anche delle alte temperature ambientali che già riducono la portata dei conduttori. Il fuoco potrebbe arrecare gravi danni qualora vengano colpiti i tralicci per un tempo superiore alla temperatura di ricottura dei materiali che lo compongono. Inoltre, le alte temperature potrebbero persino rovinare i conduttori nudi qualora venga superata la temperatura di ricottura del rame. Ovviamente, nel caso di altri servizi, ad esempio quello telefonico, che utilizzano tralicci in legno i danni provocati possono essere sicuramente peggiori.



Fig. 23 Incendio boschivo che lambisce una linea elettrica

### ***Danni di origine animale***

I danni più severi di origine animale sono quelli provocati dai roditori, che rodendo i cavi possono interrompere o mettere in corto le linee elettriche. Inoltre, le interruzioni dovute a tali fenomeni potrebbero risultare di difficile individuazione. Altri guasti comuni sono dovuti a folgorazioni dell'animale qualora vada a toccare con il proprio corpo due parti attive dell'impianto elettrico. Infatti, la temperatura più alta dovuta alla dissipazione intrinseca degli interruttori fa sì che non sia raro trovare nidi di animali dentro i quadri elettrici. Un altro pericolo è rappresentato dagli uccelli, sia perché il loro guano potrebbe causare il deterioramento degli isolatori con conseguenti scariche parziali, sia perché gli uccelli di grossa taglia andando a colpire con le loro ali due parti dell'impianto a tensione diversa potrebbero

causare dei guasti. Inoltre, anche la ripartenza veloce di stormi di uccelli appollaiati sui conduttori potrebbe far oscillare il cavo provocando dei corti di breve durata.

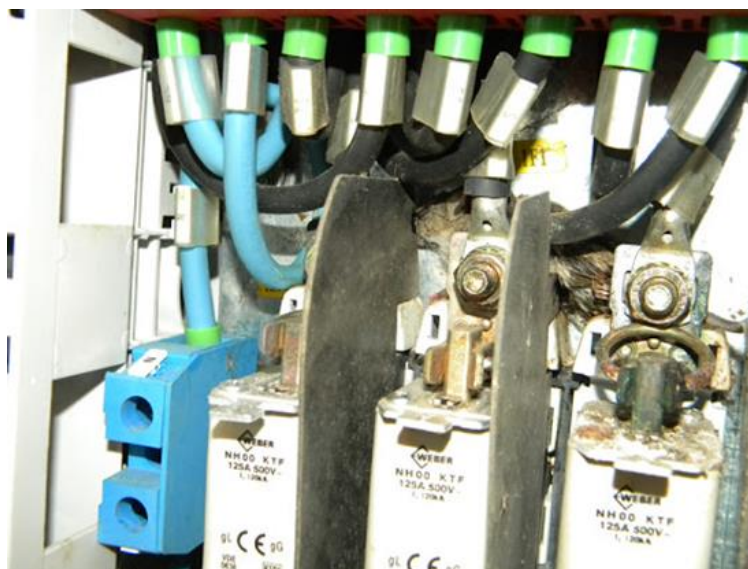


Fig. 24 Roditore folgorato dentro un quadro elettrico

### ***Vento e uragani***

Trombe d'aria, vento forte e uragani possono provocare ingenti danni alle linee elettriche, senza considerare che se il vento supera la velocità di cut-off delle pale eoliche l'intero parco si arresta e quindi la produzione eolica viene azzerata. È importante sottolineare che già il solo vento forte può provocare cortocircuiti o perché causa il contatto tra conduttori o per quello che potrebbe esserci tra questi ultimi e gli alberi. Inoltre, se la sua velocità è molto elevata può addirittura sradicare alberi e tralicci o scaraventare cartelloni o tetti in lamiera sulle linee.

In Italia, la tromba d'aria di Trezzo D'Adda del 29 luglio 2013 ha causato danni per 15 milioni di euro, provocando persino il guasto di una linea a 380kV a causa della caduta sulla stessa di un tetto in lamiera, come visibile in figura 25.



Fig. 25 Guasto alla linea 380kV dovuto alla tromba d'aria di Trezzo d'Adda del 29/07/2013

Invece, la tempesta che ha colpito il sud-ovest della Francia il 24 gennaio 2019 ha causato danni a 69 linee con 35 supporti abbattuti e 141 compromessi e persino un blackout locale dovuto allo spegnimento di 115 sottostazioni e 116 linee aeree con un'energia non fornita di 10.1 GWh.

Tuttavia, mentre per il continente europeo i venti forti rimangono eventi sporadici, questi sono assai frequenti sul continente americano. In particolare, si ricordano l'uragano Irene che nel 2011 ha causato l'interruzione di corrente per 6,5 milioni di persone, e l'uragano Harvey che nel 2017 ha causato l'interruzione di corrente a più di 2 milioni di clienti. Per quanto riguarda gli altri continenti, nel 2016 in Australia una violenta tempesta ha causato l'interruzione di corrente a 1,7 milioni di persone, nel 2015 in Canada una tempesta ha provocato l'interruzione di corrente a più di 710 mila clienti.

Infine, si menzionano il ciclone Dagmar, una potente tempesta di vento europea, che ha causato la perdita di interruzione di corrente a 570mila clienti, e l'uragano Sandy che nel 2012 ha provocato l'interruzione della fornitura di energia elettrica a 8.5 milioni di utenti, intesi come POD. In particolare, in quest'ultimo caso, solo il giorno dopo il passaggio dell'uragano si potevano contare 8.2 milioni di utenti disalimentati, come osservabile in figura 26, ed il 90 % delle utenze sono state riconnesse solo dopo ben 11 giorni. Questo evento ha fatto sì che anche le linee di trasmissione e distribuzione poste in infrastrutture sotterranee, come nel caso della città di New York, non siano rimaste esenti dai guasti provocati per lo più dagli eventi secondari, come le inondazioni, indotti dall'uragano [27].

Ovviamente, i danni causati dagli uragani risultano peggiori se accadono in nazioni povere o comunque non economicamente forti, come nel caso dell'uragano Maria, che ha colpito il Puerto Rico il 20 settembre del 2017, provocando guasti importanti agli apparati elettrici con

conseguente disalimentazione di regioni addirittura per oltre 9 mesi [2]. Inoltre, in quel caso i guasti elettrici hanno peggiorato anche altri servizi fondamentali quali l'acquedotto e le fognature. Inoltre, gli abitanti non avendo l'acqua di rubinetto sono dovuti ricorrere ad altre sorgenti, che in qualche caso erano contaminate o non potabili, contraendo malattie e infezioni. Ciò ha provocato l'affanno delle strutture ospedaliere, già messe a dura prova dall'inutilizzabilità di diversi dispositivi medici per la mancanza di energia [2].

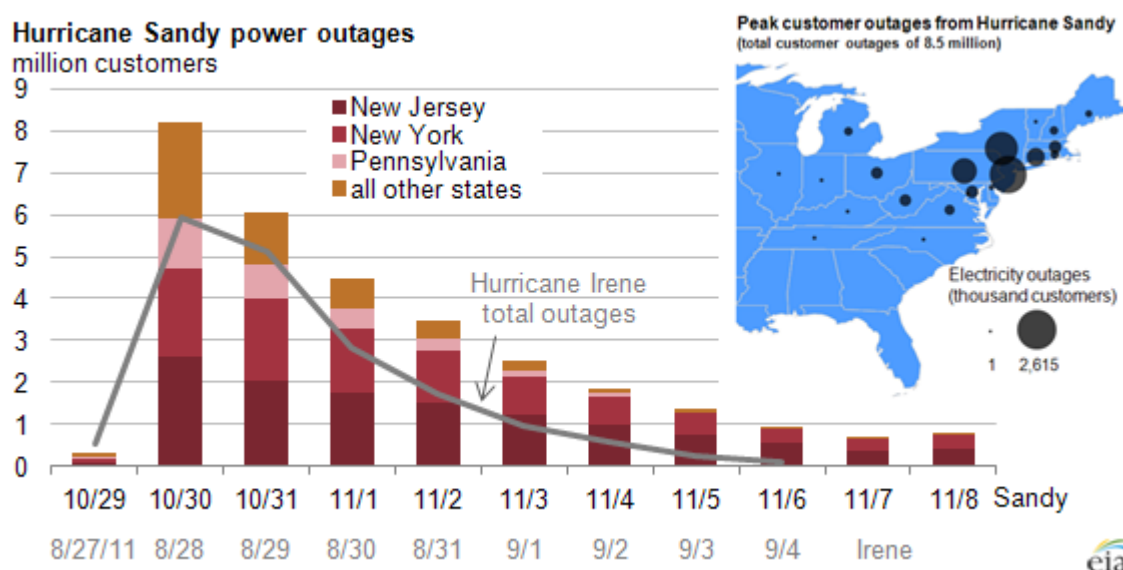


Fig.26 Numero di contatori senza servizio a causa dell'uragano Sandy [27]

### *Alte temperature*

Il cambiamento climatico fa sì che le condizioni ambientali giornaliere siano molto variabili rispetto alle medie storiche del periodo, di conseguenza le ipotesi di progettazione e di erogazione di energia risultano spesso non verificate o non idonee. Ciò fa sì che le temperature più elevate registrate nel periodo estivo, ma anche in quello primaverile e autunnale, mettano a dura prova i sistemi elettrici.

In particolare, nel periodo estivo, i sistemi elettrici possono risultare stressati non solo dalle alte temperature, ma anche da lunghi periodi di siccità. Questo perché la climatizzazione o il raffreddamento di vari sistemi come i mediacenter o i gruppi frigo possono richiedere un incremento della potenza necessaria. Ad esempio, l'ondata di caldo che ha colpito la Scozia ed il Galles il 23 giugno 2018 ha fatto sì che la temperatura aumentasse di 3.3°C rispetto alla



settimana precedente, comportando un consumo di elettricità di 860MW superiore, pari alla domanda media di 2.5 milioni di famiglie. Nella figura è riportato il rapporto tra temperatura ed energia elettrica riferito a tale evento [28].

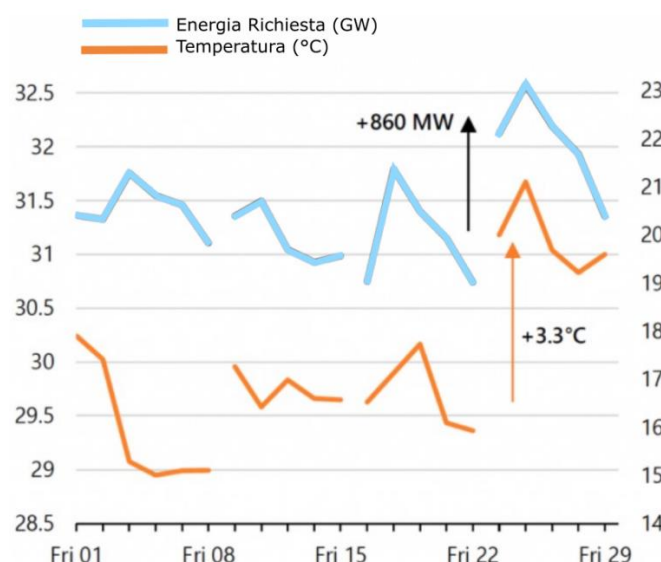


Fig. 27 Temperatura media ed energia richiesta durante il weekend di giugno 2018 [28]

I componenti elettrici ad elevata inerzia termica come i trasformatori solitamente utilizzano il periodo notturno, dove lavorano a carico ridotto, per smaltire il calore accumulato durante il giorno, ma dei valori elevati di temperatura anche nelle ore notturne possono influire negativamente su tale meccanismo di raffreddamento andando a compromettere il funzionamento di questi dispositivi, rendendolo delicato e da attenzionare.

Inoltre, l'elevato calore influisce anche sulla produzione elettrica, infatti le centrali idroelettriche ad acqua fluente funzionano a regime ridotto a causa della minore portata di acqua di fiumi e torrenti. I laghi delle centrali a bacino non hanno più affluenti che permettono di ricaricarli, quindi si rende necessaria una operazione giornaliera di ripompaggio. Il servizio idrico di acqua potabile potrebbe funzionare a regime ridotto e quindi le microcentrali poste sulle tubazioni potrebbero non essere in regime di funzionamento. Le centrali termiche risulterebbero colpite in quanto sia quelle turbogas che quelle termoelettriche andrebbero a fornire meno potenza a causa della variazione del ciclo termodinamico, arrivando perfino ad essere spente qualora venisse a mancare l'acqua necessaria per il raffreddamento del ciclo.

L'aumento della temperatura del terreno potrebbe renderlo asciutto con conseguente aumento della sua resistività, causando perciò un peggioramento delle condizioni di protezione delle persone. Per altro, il surriscaldamento e l'inaridimento del suolo possono peggiorare anche le condizioni della portata dei conduttori e causare problemi meccanici sulle linee interrate. Infatti, le temperature elevate dei conduttori di linea dovute alle elevate correnti e alle condizioni ambientali, accentuate magari dall'assenza di vento, oltre all'allungamento dei conduttori e alla riduzione delle distanze di sicurezza, possono causare il fenomeno della "ricottura", che espone i conduttori stessi a rottura.



Fig. 28 Invaso per il raffreddamento di una centrale termoelettrica asciutto a causa della siccità prolungata nel 2003

## 1.3 Aumento della Resilienza

L'aumento della resilienza può essere ottenuto irrobustendo i componenti che compongono il sistema elettrico tramite strategie di controllo o strategie operative. Tuttavia, poiché il rafforzamento del sistema richiede grandi investimenti, le strategie intraprese risultano efficaci solo se si verificano determinati eventi ed in tal caso si parla di metodi di resilienza "hard". Invece, se l'aumento della resilienza viene raggiunto tramite la formazione delle persone, la disponibilità di giuste informazioni e di procedimenti, si parla di resilienza "soft"[29]. È bene sottolineare che questi ultimi consentono un miglioramento significativo della resilienza.

Inoltre, la complessità degli eventi estremi ha evidenziato la necessità di classificare i difetti in base alle loro cause e a partire da questa classificazione si possono suddividere le azioni di mitigazione della contingenza in operazioni resilienti o pianificazioni resilienti.

L'interdipendenza delle infrastrutture critiche aumenta la complessità della pianificazione, anche perché un'operazione di resilienza ad un'infrastruttura andrebbe comunque ad aumentare la resilienza dell'infrastruttura dipendente.

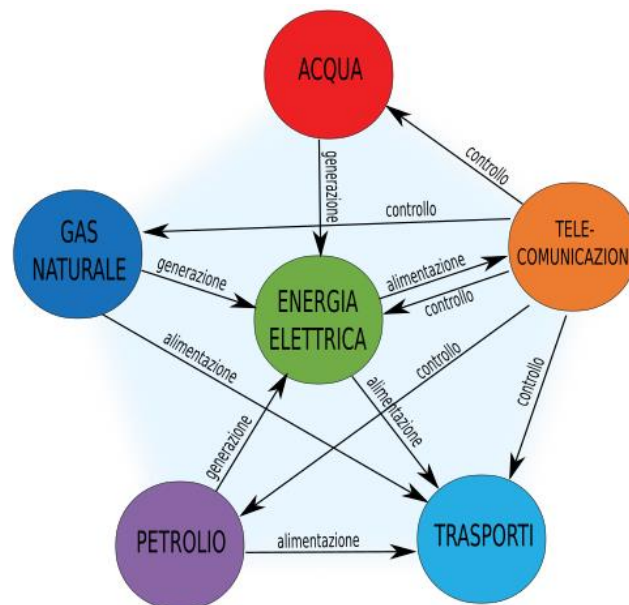


Fig.29 Interconnessione delle infrastrutture critiche

Le azioni da compiere per migliorare la resilienza del sistema si possono suddividere in:

- azioni preventive;
- azioni in fase di emergenza;
- azioni di ripristino.

In realtà, siccome il 90% delle interruzioni di energia elettrica derivano dalla rete di distribuzione, in letteratura spesso sono elencate tecniche di miglioramento che riguardano direttamente i suoi componenti. Di seguito vengono descritti alcuni esempi.

Per la prevenzione dei manicotti di ghiaccio, le diverse soluzioni si basano su quattro principi:

- metodi passivi;
- rivestimenti attivi;
- rivestimenti icephobic;
- metodi termici.

I metodi passivi includono i dispositivi antirotazionali, gli snow ring e i conduttori a conci Z. In particolare, i dispositivi antirotazionali sono delle masse metalliche eccentriche, che si avvitano in maniera solidale al conduttore per evitarne la continua rotazione a causa del peso squilibrato dal manicotto. La loro efficacia è ormai consolidata, ma non sono utili nel caso di sovraccarico della campata a causa dell'eccessivo peso aggiunto dalla neve. Ad esempio, nella regione abruzzese, durante le operazioni di manutenzione straordinaria del 2016, sono stati installati circa 5000 dispositivi [30].



Fig.30 Dispositivo antirotazionale [16]

Gli snow ring, cioè anelli avvolti al cavo, hanno lo scopo di non far scivolare la neve lungo il trefolo evitandone l'ammassamento e quindi la conseguente formazione del manicotto.

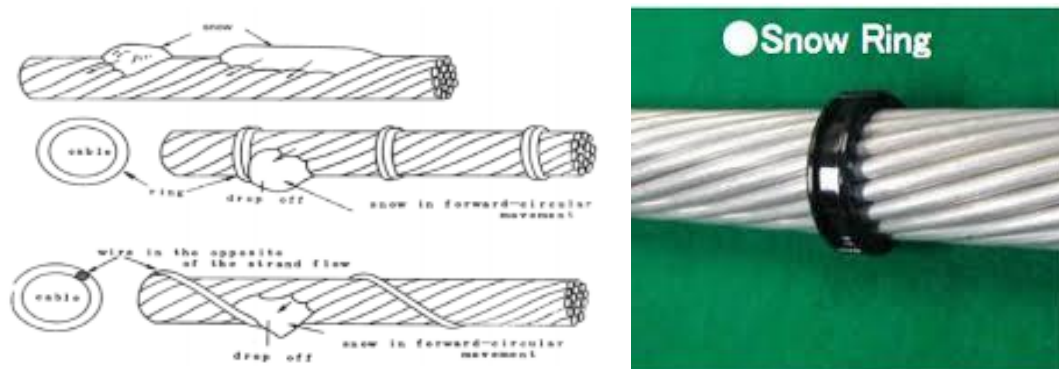


Fig.31 Snow ring

Negli ultimi anni Terna sta sperimentando contro il fenomeno della wet snow il conduttore aereo a conci Z, già installato per prova su due campate sperimentali della linea Demonte-San Rocco, in Piemonte, al confine con la Francia. In questo caso la massa eccentrica di neve provoca una veloce rotazione della parte esterna del cavo, che riesce perciò a scaricarla, riposizionandosi al punto di partenza [31].

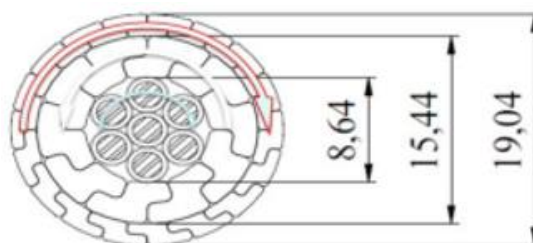


Fig.32 Cavo aereo a conci Z

I rivestimenti attivi prevedono la copertura del cavo o con particolari vernici o con materiali ferromagnetici. Questi ultimi, utilizzati in Giappone da più di 20 anni, mantengono la superficie del conduttore a una temperatura superiore al punto di congelamento sfruttando le correnti parassite indotte dal campo magnetico. Le vernici attive invece sfruttano le perdite nel rivestimento dielettrico e possono essere alimentate da una fonte esterna come un segnale AC in alta frequenza.



Fig.33 Cavo rivestito con materiale ferromagnetico

Con l'avvento dei materiali nanotecnologici, si sta sperimentando contro il fenomeno dei manicotti, l'utilizzo di speciali rivestimenti o vernici, che in prevalenza riducono l'aderenza del ghiaccio sul conduttore grazie ad evidenti proprietà idrofobiche.

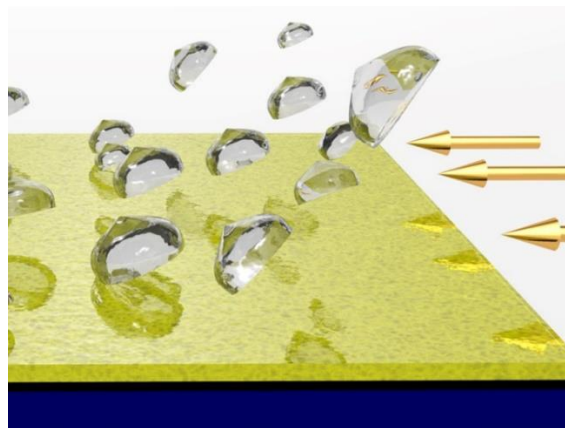


Fig.34 Rivestimento idrofobico

Il metodo termico sfrutta l'effetto joule, perciò è necessario il riassetto della rete al fine di far scorrere la giusta corrente nel ramo considerato. Tale metodo si utilizza anche per deghiacciare la fune di guardia andando ad alimentare il cavo in questione con la media tensione, ma ciò è possibile solo dopo aver modificato la rete di trasmissione, in quanto bisogna dotare la fune di isolatori idonei rispetto ai pali e di corna spinterometriche.

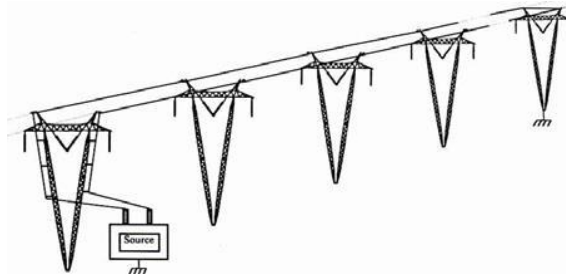


Fig. 35 Sistema di deghiacciamento della fune di guardia

Inoltre, il riassetto della rete deve essere previsto con largo anticipo, in modo da analizzare il flusso su ogni nodo della rete. Questo vuol dire che le aziende distributrici devono avere delle previsioni puntuali delle condizioni meteo delle zone interessate dalle strutture elettriche. Un esempio di sistema di previsione sviluppato da RSE e TERNA è il sistema predittivo WOLF (Wet-snow Overload aLert and Forecasting), che fornisce in uscita le situazioni di rischio che potrebbero portare alla formazione di manicotti di ghiaccio su una griglia composta da celle larghe 7 km.

I metodi meccanici per la rimozione del peso eccessivo sui conduttori da manicotti di neve sono i seguenti:

- Scraping method: sistema di raschiamento trascinati lungo le linee in modo manuale fino a 25kV e da robot nelle linee AT;
- Shock wave method: onda d'urto che si propaga lungo la linea generata da un martello pneumatico;
- Vibrating devices: sistema rotante eccentrico che genera onde tra 2 e 8Hz che si propagano lungo la linea;
- Ice-shedder devices: sistema che utilizza l'energia elastica accumulata durante la torsione del conduttore e il successivo rilascio improvviso.

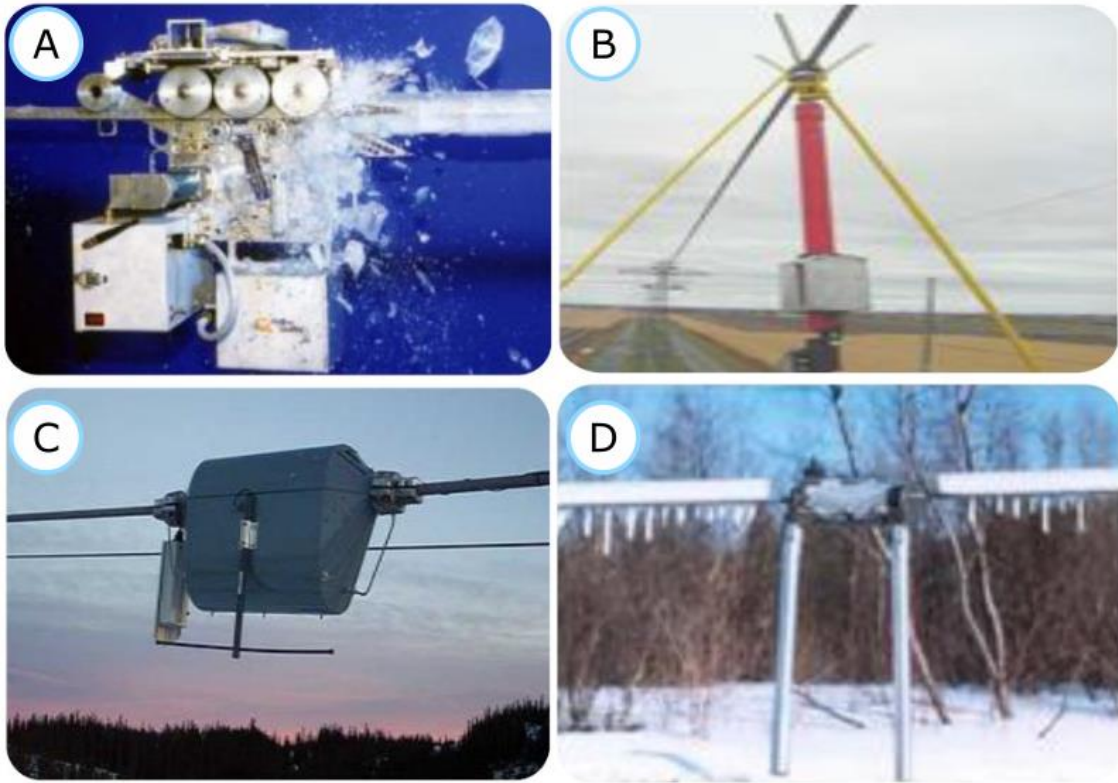


Fig. 36 A: scraping method, B: shock wave method, C: vibrating devices, D: ice-shedder devices.

Un altro metodo che può essere utilizzato per rompere i manicotti di ghiaccio è l'utilizzo di uno scuotitore portatile di derivazione agricola. Questo può essere portato agevolmente sul campo da un operatore per essere utilizzato in fase di emergenza.

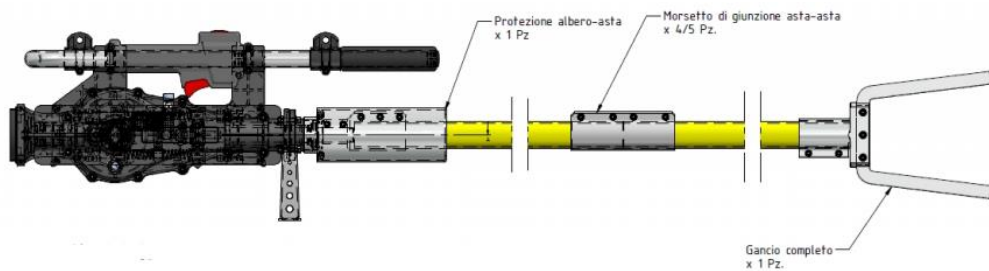


Fig. 37 Prototipo scuotitore meccanico di Terna

Infatti, durante una situazione di emergenza, le prime azioni da effettuare sono la determinazione dello stadio di emergenza e la scelta delle priorità di intervento. Inoltre, in questi casi si rivelano molto utili i dispositivi di localizzazione dei guasti ed i sistemi di motorizzazione e teleconduzione della rete, in quanto essi possono migliorare il grado di



resilienza del sistema, soprattutto in termini di tempo di ripristino in seguito ad una veloce riconfigurazione della rete o ad un isolamento anche da remoto del tratto guasto. Le azioni di ripristino possono essere ad esempio la rialimentazione della rete AT dalla rete MT per le operazioni del lancio di tensione o per il funzionamento ad isola.

Per mitigare i disagi nelle condizioni di forti nevicate si può ricorrere all'acquisto di nuovi mezzi operativi come fuoristrada o mezzi speciali e strumenti di telefonia satellitare in modo che le squadre rimangano in contatto anche durante eventuali black-out delle linee di telecomunicazione o dei ponti radio.

Di seguito vengono elencati gli interventi che possono essere attuati sulle linee di distribuzione:

- sostituzione dei conduttori nudi con cavi aerei;
- interrimento delle linee elettriche aeree;
- aumento della magliatura della rete elettrica;
- dispositivi antirotazionali ecc.;
- nuovi tipi di sostegni con migliori caratteristiche meccaniche;
- miglioramento dei dispositivi di telecontrollo con diversificazione delle reti di comunicazione.

Per garantire qualità e continuità del servizio elettrico in situazioni ordinarie e maggiore solidità di impianto in caso di intemperie, evitando scariche e corti di breve durata, le aziende distributrici stanno ristrutturando le linee con conduttori nudi, ormai vetuste, attraverso l'installazione di nuovi sostegni e cavi elicord [32].



Fig. 38 Cavo elicord MT [33]

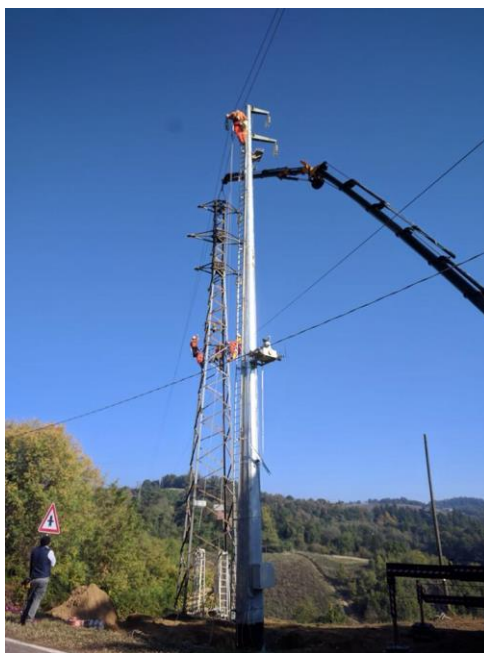


Fig. 39 Sostituzione pali e linee con cavo elicord e pali monostelo [34]

Il cavo elicord è un cavo costituito da tre cavi singoli elettrici isolati tra loro e arrotolati ad elica attorno ad una fune portante, capace di sostenere il peso dell'intera struttura da traliccio a traliccio. Il diametro esterno dell'elicord è di 59-73 millimetri. Dato il maggior peso dell'elicord rispetto ai conduttori nudi, il suo impiego comporta la necessità di sostituire l'intera linea e di riavvicinare la distanza dei sostegni. Questo permette anche di abbassare il rischio di elettrocuzione per l'avifauna.

Lungo le linee aeree è presente una fascia disboscata e mantenuta costantemente pulita chiamata fascia di asservimento larga 3.5 metri. Durante le nevicate, l'appesantimento dei rami può provocare lo sradicamento degli alberi più alti della fascia e per questo anche se situati esternamente ad essa, questi riescono a colpire i cavi provocando un guasto franco a terra ed il taglio dei cavi stessi.

In tal caso, per aumentare la resilienza può essere necessario aumentare la larghezza della fascia oppure spostare le linee lungo aree con vegetazione bassa e quindi facilmente raggiungibili.

Per quanto riguarda invece la protezione da attacchi umani, negli ultimi anni sono state investite notevoli risorse per proteggere gli apparati elettrici di estrema importanza da attacchi vandalici e le strutture da cyber-attacchi. Ad esempio le sottostazioni sono state protette con recinzioni e sistemi di videosorveglianza. In alcune proprietà si è ricorso al servizio di

portierato, a custodi o a servizi di vigilanza privata. In ogni nodo di rete come nei data center, nelle sottostazioni o nei centri di controllo, c'è un sistema informatico di gestione contenente un vero e proprio PC con un sistema operativo suscettibile alla pirateria informatica.



Fig. 40 Conduzione elettrica con fascia asservimento

In particolare, per proteggere i sistemi elettrici da attacchi umani, soprattutto al fine di evitare eventi a cascata, risulta molto importante la suddivisione e la protezione di sottosistemi, separando fisicamente parti d'impianto in modo da isolare possibili incendi e utilizzare la restante parte di impianto per alimentare gli utenti. Tutte queste strategie però comportano un significativo aumento dei costi perciò occorre valutare in modo opportuno il rapporto costi-benefici.

L'iter necessario per l'aumento della resilienza di un sistema elettrico potrebbe richiedere la divulgazione di informazioni riservate, che purtroppo potrebbero favorire gli attacchi. Per tale motivo alcune tecnologie utili ad incrementare la resilienza del sistema elettrico d'utenza non possono essere pubblicate.

Infine, poiché i materiali isolanti sono assai delicati e piccole deformazioni potrebbero portare a scariche che evolverebbero in fuori servizio di lunga durata, essi potrebbero risultare facili obiettivi di atti vandalici, senza considerare che potrebbero essere colpiti accidentalmente da cacciatori. Ciò ha fatto sì che negli ultimi anni gli isolatori e gli involucri in porcellana e vetro siano stati sostituiti da isolatori in materiale composito. Tali materiali sono stati testati al poligono al fine di valutare il tipo di frattura che si viene a creare a seguito di un colpo da arma da fuoco [35].



Fig. 41 Prova isolatore da lesione da arma da fuoco

Per migliorare invece la resilienza del sistema elettrico d'utenza dai terremoti occorre considerare tre aspetti fondamentali:

- progettazione adeguata dei componenti attraverso software di simulazione;
- monitoraggio continuo dei componenti;
- studio di soluzioni a rapida installazione.

A questo scopo i produttori di componenti elettrici simulano gran parte dei dispositivi a catalogo per analizzare le risposte a sismi di diversa potenza e testano gli apparati elettrici di prova in simulatori reali [35]. La protezione parasismica della rete di distribuzione di energia viene adeguata ed anche verificata secondo la norma IEC 60068-2-6.

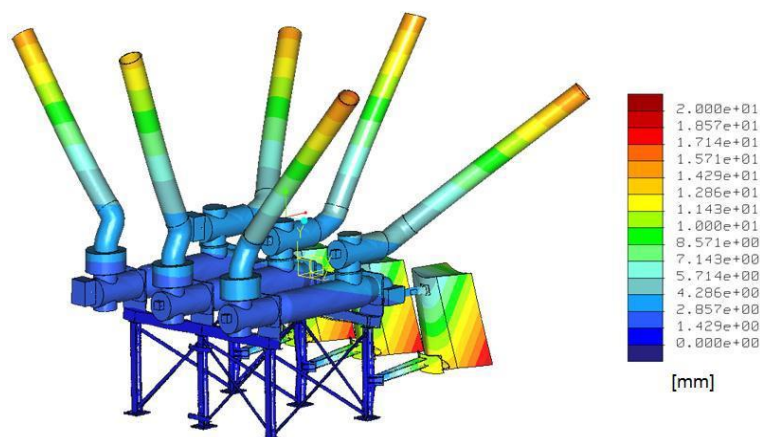


Fig. 42 Simulazione delle oscillazioni su interruttori trifase AT

Le operazioni di resilienza più utilizzate sono il fissaggio dei quadri elettrici nella parte alta, il bloccaggio di supporti con ruote, il ricorso a smorzatori di vibrazione, a dispositivi di antiribaltamento dei pacchi batterie di emergenza e a rompitratte di condutture orizzontali mediante tratti di condutture verticali [36].

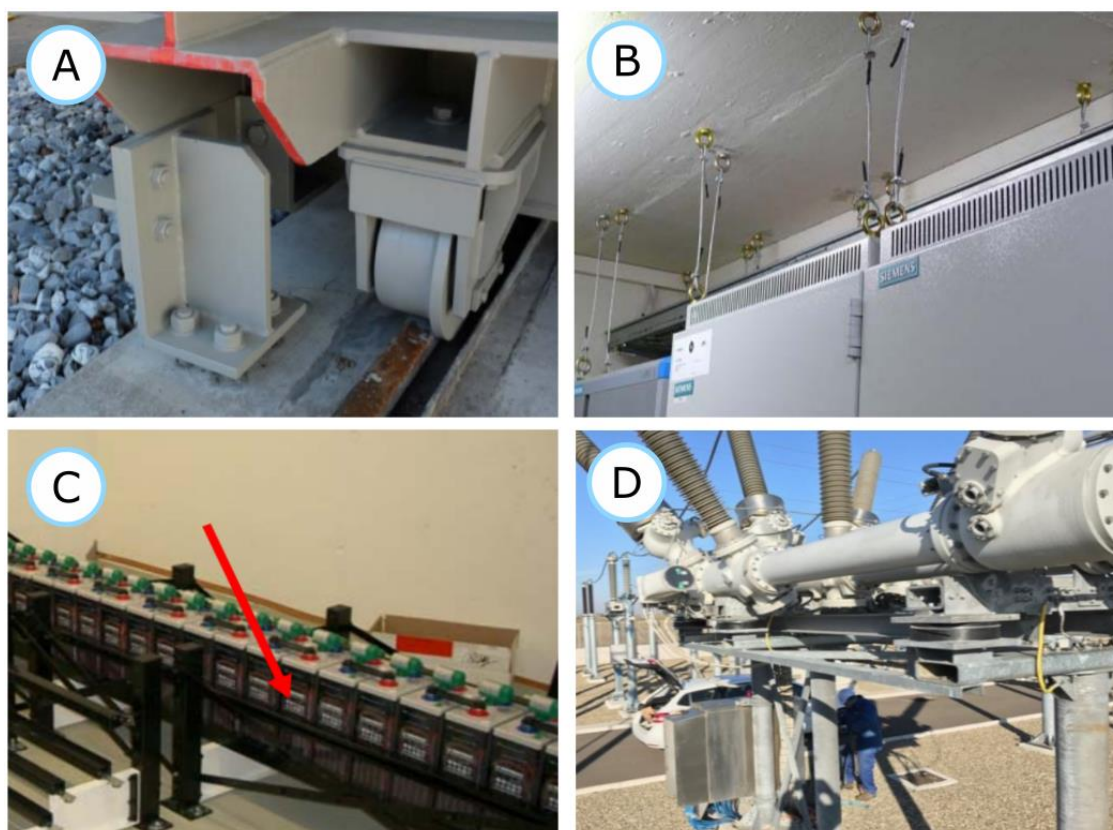


Fig. 43 A) Ancoraggio rimovibile delle ruote; B) Staffaggio al soffitto di quadri elettrici; C) dispositivi antiribaltamento delle batterie; D) supporti smorzatori in gomma

Infine, nel caso di aumento di resilienza da tempeste magnetiche, trattandosi di eventi sporadici con basso fattore di ripetibilità, nessuna azienda o Stato ha investito ingenti somme per lo studio del fenomeno e per l'individuazione di soluzioni valide.

Gli effetti dovuti alle tempeste magnetiche sono rappresentati da correnti continue che circolano nel sistema e da un aumento delle armoniche, che si ripercuote negativamente anche sulle tensioni.

Kapperman in [10] ha proposto l'utilizzo di trasformatori GIC tolleranti e dispositivi di blocco per filtrare e annullare l'effetto delle correnti GIC. Queste soluzioni però devono ancora essere studiate e quindi i risultati sull'effettivo funzionamento non sono ancora noti. Emanuel Bernabeu in [10], di Dominion Virginia Power, ha proposto 3 strategie per rendere il sistema elettrico più resiliente alle tempeste magnetiche:

- testare i trasformatori per scoprire possibili punti caldi con l'aumento di correnti continue;
- migliorare le caratteristiche delle apparecchiature per resistere a squilibri di tensione e armoniche;
- procedure operative e informazioni in tempo reale per comandare le azioni necessarie.

Infine, alcune aziende oltre a misurare i campi magnetici effettivi, monitorano anche le componenti delle correnti AC e DC, la potenza reattiva, le armoniche e le vibrazioni del trasformatore.

### 1.3.1 Microgrid

La microgrid è costituita da un gruppo di carichi interconnessi e di risorse di energia distribuite, che agiscono come un'unica entità controllabile, che può funzionare quindi sia in modalità grid connected che “island”. La possibilità di scollegare intenzionalmente la porzione di rete dal sistema impedisce l'evoluzione totale di un black-out e riduce il tempo necessario a ripristinare l'alimentazione.

Ciò rende facilmente comprensibile come il concetto di microgrid aumenti il grado di resilienza di un sistema elettrico d'utenza [10]. Inoltre, va sottolineato che in questo caso i dispositivi di controllo IoT giocano un ruolo importante, in quanto devono tenere sotto controllo l'intero sistema e devono scegliere le strategie opportune di funzionamento.

In particolare, nel caso di una microgrid avanzata, oltre a un completo sistema di gestione della potenza, essa include anche la possibilità di accumulo funzionale alla gestione del sistema energetico. Le microgrid avanzate permettono di reagire alle crescenti minacce dovute ad eventi severi e lo sviluppo di microgrid su diversi livelli di rete riesce senz'altro ad accrescere il benessere dell'utente e a limitare i danni economici. Infatti, se la tecnologia viene sfruttata correttamente può rappresentare anche un'utile risorsa economica.

Le migrogrid vengono trattate di seguito in maniera esaustiva, in quanto durante il corso di dottorato è stato ampiamente studiato l'aumento della resilienza di un sistema elettrico ospedaliero attraverso l'utilizzo di microgrid e generazione distribuita.

Un sistema elettrico ospedaliero è tipicamente complesso e deve avere una disponibilità del servizio prossima al 100% nelle 24 ore per 365 giorni all'anno. Spesso questa caratteristica viene data per scontata in altre strutture edilizie, ma potrebbero verificarsi disastri ambientali o attacchi che nel caso degli ospedali andrebbero a mettere a repentaglio vite umane. Per tale ragione, l'impianto elettrico di un ospedale nasce già per essere affidabile e con un grado di sicurezza intrinseco tale da poter far fronte a perdite di potenza.

La maggior parte delle apparecchiature mediche utilizzate nelle cure dei pazienti sono di tipo elettrico, collegate alla rete o a batteria, ed anche l'assistenza sanitaria fornita alla popolazione prevede l'utilizzo di apparecchiature o servizi che hanno bisogno di energia elettrica per funzionare in modo efficiente e sicuro.

Nonostante non sia difficile capire quanto sia importante l'energia elettrica per la salute e per il servizio sanitario, ancora oggi si trovano poche informazioni e scarsa letteratura che permetta di mettere in relazione la perdita di potenza con la diminuzione dell'indice di salute [37], ma soprattutto risulta arduo stimare la correlazione tra salute e impatti estremi che si riversano sul sistema elettrico [38]. Questo aspetto rende ostico valutare un'operazione di resilienza e rende difficile programmare i piani operativi per mitigare o prevenire possibili guasti e disservizi.

I sistemi alimentati più critici, oltre agli apparecchi vitali, sono i sistemi HVAC, i sistemi di comunicazione e di gestione dei dati, i sistemi di sicurezza, i gruppi frigo ed anche gli ascensori e i sistemi di accesso [39]. Dunque, al fine di soddisfare tale alimentazione con la massima affidabilità, l'impianto elettrico ospedaliero deve seguire delle specifiche normative che prevedono raggruppamenti di utenze elettriche alimentate con diversa ridondanza.

Infatti, la normativa e le leggi prevedono sia generatori di riserva che gruppi statici di continuità, in grado sia di fornire elettricità in caso di guasto per un tempo determinato, sia di entrare in funzione entro limiti ben stabiliti.

Purtroppo però, questi sistemi presentano delle evidenti criticità:

- durata del funzionamento limitata;
- uso raro.

In particolare, a causa del ridotto utilizzo potrebbero essere mantenuti in maniera non conforme, e quindi in fase di emergenza potrebbero non essere in grado di sopperire alla mancanza di alimentazione. Oltre a ciò, i moto-generatori presentano una fornitura di carburante in sito limitata e se la condizione di emergenza perdura per più tempo occorre trovare altre provvigioni, ma questo potrebbe essere difficile sia per questioni legate al trasporto che alla scarsità della materia [40].

Un aiuto ai generatori, per aumentare la resilienza del complesso, può essere dato dall'installazione di fonti di energia rinnovabili e unità di stoccaggio che possono funzionare anche in isola e che quindi potrebbero fornire energia ininterrottamente anche in presenza di black-out sulla rete esterna.

Ad esempio, gli impianti che operano a ciclo continuo presentano sistemi di produzione propria e risultano venditori netti di energia. Nella maggior parte dei casi si tratta di grandi impianti solari sui manti di copertura e sui parcheggi, impianti di cogenerazione o



microturbine accoppiati a loro volta con sistemi di accumulo di energia e sistemi di bilanciamento del carico [41].

Basandosi su questi metodi, l'ospedale San Giovanni di Roma, allo scopo di aumentare la resilienza del suo sistema elettrico, ha provveduto ad installare a fine 2016 un importante impianto fotovoltaico da 190 kWp con una produzione stimata di oltre 200.000 kWh.

Va sottolineato che lo sviluppo del progetto di aumento della resilienza di una struttura di questo tipo richiede un costo elevato e dei tempi di realizzazione lunghi, dovuti soprattutto ai processi di finanziamento di carattere regionale, nazionale e internazionale e all'approvazione di tutti i pareri degli enti necessari.

Siccome gli ospedali in fase di emergenza estrema sono costretti a lavorare con un carico maggiore, in quanto sono le principali strutture che devono effettuare operazioni di primo soccorso e che quindi rendono un servizio ancora più delicato, devono avere un'affidabilità elevata [39].

Sulla base di queste riflessioni, il ministero della salute britannico ha ritenuto di considerare l'elettricità come il più vitale di tutti i servizi infrastrutturali della nazione [42] e in [43], l'energia elettrica viene descritta come prodotto o servizio esterno da cui l'ospedale dipende maggiormente e che ne provoca il maggior degrado nel minor tempo, come mostrato in tabella II.

Tabella II. Percentuale di degrado degli ospedali e tempo di degrado (fonte: [43])

Prodotto	Servizio	% Degradazione	Tempo di degrado
<i>Acqua</i>	99%	70-100	2 ore
<i>Acque reflue</i>	97%	70-100	2 ore
<i>Comunicazioni</i>	95%	35-70	10 minuti
<i>IT</i>	95%	70-100	10 minuti
<i>Energia elettrica</i>	100%	100	5 minuti
<i>Gas naturale</i>	78%	0-35	4 ore

In un sondaggio condotto in Giappone, mostrato in [44], si è rilevato che per gli ospedali da campo, cioè gli ospedali che vengono utilizzati in supporto agli ospedali di base in caso di disastro, l'energia elettrica era per il 65% dei casi indispensabile per il funzionamento e l'aiuto al soccorso. Inoltre, il servizio elettrico è stato considerato necessario anche per apparecchiature di sterilizzazione, di screening e per le apparecchiature dei servizi di laboratorio. Addirittura, il 60% delle aziende ospedaliere ritiene di dover interrompere

operazioni di chirurgia d'urgenza o di emodialisi in caso di mancata alimentazione da generatori di supporto.

Dunque, in condizioni di calamità estrema, l'utenza elettrica ospedaliera media aumenta notevolmente perché oltre alla normale utenza, si devono assistere i feriti causati dal disastro e i pazienti cronici che non possono più continuare la cura nella propria abitazione [45, 46]. Oggigiorno si ricorre spesso alla cura domiciliare che prevede l'utilizzo di respiratori, nebulizzatori, materassini antidecubito e altre apparecchiature, che in condizioni normali possono essere utilizzati tranquillamente in casa, ma che possono mettere in serio pericolo il paziente se non alimentati per diverse ore [47].

La salute della persona passa anche attraverso la conoscenza delle patologie pregresse, lo storico delle cure o le allergie dell'individuo e ormai questi dati sono tutti digitalizzati. Infatti, le cartelle cliniche sono salvate in un database nazionale e i risultati dei test medici vengono forniti tramite comunicazioni informatiche. Quindi, la mancanza di energia elettrica comporterebbe la perdita momentanea di tali dati o la non possibilità di aggiornamento [48].

Anche la refrigerazione e il mantenimento di farmaci a temperature comprese tra 4°C e -25°C determina un'elevata dipendenza del sistema sanitario e farmaceutico rispetto alla continuità del servizio elettrico. Inoltre, le celle frigorifere e i sistemi di criocongelamento potrebbero andare a lavorare in punti critici durante ondate di calore o estati torride, cioè quando già il sistema elettrico nazionale è molto provato con temperature dei dispositivi elettrici fuori range e scatti intempestivi degli interruttori.

Gli ospedali per legge sono accessoriati con generatori di riserva [49], ma questi non sono dimensionati in modo da alimentare tutti i carichi dell'azienda, bensì vengono collegati sotto "l'alimentazione di emergenza" solo quei carichi che devono essere ripristinati entro decine di secondi.

I carichi elettrici all'interno della struttura ospedaliera vengono classificati secondo un sistema di priorità. Ad esempio, l'alimentazione elettrica dei PC ha maggiore priorità rispetto all'alimentazione del sistema di aria condizionata, ma in caso di temperatura ambiente elevata, la mancanza di ricambio di aria o raffrescamento della stanza potrebbe portare la temperatura della CPU a superare i limiti di funzionamento, anche per l'eventuale presenza di filtri intasati, e quindi allo spegnimento automatico dei pc, come si è verificato a seguito del black-out causato dal terremoto in alcuni ospedali del Giappone come descritto in [44].

Ciò fa sì che sia in fase di progettazione che di gestione di un ospedale, sia particolarmente importante suddividere i carichi in critici, di sicurezza e di non vitale importanza. Essi andranno poi trattati in maniera adeguata e collegati sotto le rispettive linee di alimentazione, ossia normale, di emergenza e di continuità.

I sistemi di sicurezza da mantenere alimentati rappresentano una piccola parte del carico totale e comprendono tutti i sistemi di evacuazione delle persone, illuminazione di emergenza, sistemi di allarme antiincendio, sistemi di allarme gas medicali ecc.

Le parti di ospedale che possono essere considerate critiche e che quindi hanno bisogno di essere alimentate da un sistema di alimentazione di emergenza possono rappresentare anche più del 25% del carico totale e comprendono l'alimentazione dei testamento, le sale di terapia intensiva, le sale operatorie, le sale post-anestesia, i locali infermieristici e farmaceutici, i laboratori e le banche sangue e tutti i luoghi dove i pazienti possono essere curati, assistiti e trattati. Va sottolineato che i testamento risultano un carico critico per la presenza di prese a cui sono collegate le macchine salvavita e di dialisi.

Come già visto anche gli impianti di riscaldamento e quelli di climatizzazione, i sistemi di ventilazione e rimozione del fumo possono essere importanti e perciò vanno collegati all'alimentazione di emergenza. Per questo tipo di carichi occorre però una giusta valutazione anche in relazione al reparto di utilizzo: il sistema di ventilazione del reparto di malattie infettive per esempio è più importante rispetto ad altri reparti. Inoltre, anche i sistemi elettrici per lo smaltimento di rifiuti, acque reflue o servizi mensa e lavanderia possono portare a situazioni di gestione emergenziali se disalimentati per troppo tempo. Quindi, oltre ai carichi critici, la presenza di un elevato numero di aspiratori e ventilatori, ascensori, cappe, sterilizzatori, macchine di riscaldamento e climatizzazione ecc. può rappresentare un ulteriore 30% del carico elettrico.

In conclusione, in base alla vulnerabilità e alla sicurezza che si vuole fornire all'ospedale oggetto dello studio si può prevedere che l'alimentazione di emergenza possa rifornire fino al 60% del carico elettrico totale e tale potenza deve essere sostenuta anche per più giorni in caso di guasti ed emergenze severe. Purtroppo la maggior parte dei generatori diesel hanno serbatoi in grado di fornire alimentazione per periodi abbastanza brevi [45-53].

Per ovviare a ciò la norma italiana CEI 64-8 sez. 710 ha imposto che la riserva di carburante in loco deve garantire almeno un'alimentazione di riserva per 24 ore e deve essere in grado di alimentare il sistema entro 15 secondi [49]. Invece, altri stati hanno previsto l'alimentazione

a potenza nominale per molte più ore: studi coreani propongono 50 ore mentre per il Giappone un buon compromesso è 120 ore [54]. Per la Joint Commision, organizzazione no-profit che raggruppa più di 22.000 aziende sanitarie, gli ospedali USA devono essere in grado di funzionare con generatori di emergenza per almeno 72 ore, mentre lo Standard NFPA110 (National Fire Protection Association) suddivide i sistemi di alimentazione di emergenza e rimanda la decisione delle ore tipiche di funzionamento di ogni classe alle autorità locali. Dunque, a partire da tali informazioni e a seconda dei potenziali pericoli si individua un range di funzionamento compreso tra 24 e 96 ore.

Tali generatori, anche se dimensionati per coprire anche più del 50% del carico totale per più giorni consecutivi, rimangono comunque un punto debole del sistema di alimentazione affidabile di un ospedale, in quanto sono presenti in numero limitato all'interno della struttura e rappresentano una delle maggiori cause di mancanza di energia elettrica durante un'emergenza. Essi sono dotati di centraline automatiche di accensione che verificano mensilmente l'accensione e lo stato della batteria di avviamento, ma si stima che il 23% dei generatori non funziona quando viene chiamato ad entrare in funzione per coprire parte del carico [55]. Per avvalorare questa tesi basta analizzare lo storico degli eventi successivi all'uragano Sandy, infatti, anche se anche tutti gli ospedali di New York erano forniti di gruppi di emergenza, la maggior parte di loro non ha funzionato o perché si era guastata proprio a causa dell'uragano o perché non aveva riserve sufficienti per funzionare per un'emergenza prolungata di quel tipo, ciò ha impedito agli ospedali di prestare le prime cure che servivano e i pazienti sono stati spostati in altri ospedali limitrofi [56, 57]. Quindi, anche dal punto di vista sanitario la gestione dell'emergenza si è rivelata un vero e proprio disastro.

Al fine di aumentare la resilienza dell'ospedale, il suo impianto elettrico può essere sviluppato come una microgrid, dove il normale sistema formato da trasformatori connessi alla rete e generatori diesel può essere soppiantato da un sistema formato da impianti combinati, storage e sistemi ad energia rinnovabile, che riesce ad autosostenersi durante gli eventi severi e a fornire energia alla rete nazionale creando anche un ulteriore utile economico per l'azienda. I sistemi di cogenerazione e di trigenerazione sono estremamente utili per questi complessi dove oltre ad un elevato consumo di elettricità si hanno anche grandi assorbimenti di energia termica ed energia frigorifera. Quindi, la gestione della microgrid migliora l'affidabilità del sistema e minimizza i costi di gestione con vantaggi anche in termini ambientali [50].

Durante il normale funzionamento le centrali di cogenerazione forniscono il carico base per massimizzare l'efficienza energetica e minimizzare i costi. Il rendimento di un impianto di

trigenerazione può essere pari anche all'80% e quindi molto alto rispetto al 45% della rete elettrica e della generazione termica con caldaie a gas.

Infatti, in caso di emergenza estrema, le microgrid con cogenerazione possono mantenere alimentate le utenze isolate dalla rete senza fare distinzione tra carichi normali e carichi critici. In particolare, le microgrid con funzionamento ad isola possono essere realizzate anche in tempi molti ridotti rispetto all'imminenza di un disastro annunciato al fine di evitare che alcuni danni si ripercuotano sulla struttura e possono essere mantenute fino al ripristino della piena funzionalità dell'intera rete. Inoltre questa tecnologia permette di ottenere potenza termica di riscaldamento e raffrescamento anche operando in condizioni di pieno regime.

Il vantaggio dell'utilizzo della cogenerazione per continuità di alimentazione di infrastrutture più o meno complesse è stato già testato l'uragano Sandy [51]. Tuttavia, occorre prestare particolare attenzione al calcolo delle potenze elettriche e termiche necessarie durante la fase di progettazione.

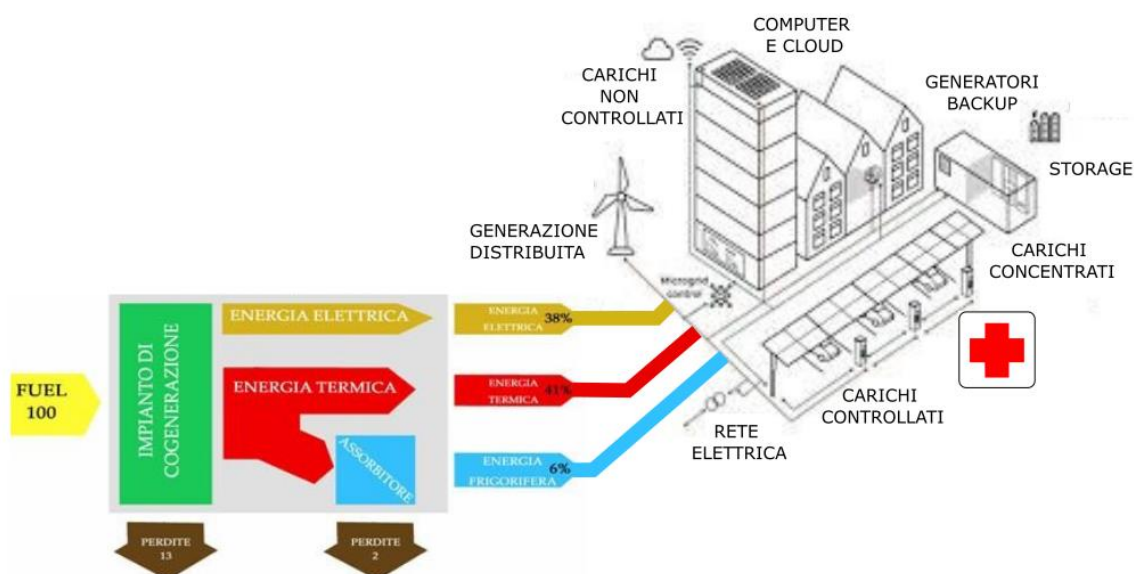


Fig. 44 Microgrid con impianto di cogenerazione

Gli impianti fotovoltaici possono essere facilmente installati in un ospedale, in quanto solitamente esso è caratterizzato da ampie superfici piane sopra gli edifici e parcheggi estesi per personale, pazienti e familiari. Per tale ragione essi possono essere un importante generatore della microgrid, tuttavia va sottolineato che non sono naturalmente in grado di

funzionare in tutte le condizioni avverse, soprattutto durante eventi meteorologici severi, ma possono alimentare il sistema e ricaricare lo storage subito dopo, perciò risultano fondamentali per velocizzare la fase di ripristino ed aumentare la resilienza. Inoltre, la caratteristica curva di produzione di un impianto fotovoltaico suggerisce di combinare questa tecnologia con un efficiente accumulo a batteria utile anche per brevi interruzioni [52]. Infatti, lo stoccaggio consente agli impianti di generazione rinnovabili di accrescere la resilienza del sistema fornendo servizi di risposta a problemi di rete, gestendo la potenza locale e controllando la tensione di nodo.

Quindi, indipendentemente se la cogenerazione è utilizzata insieme alla realizzazione di una microgrid ospedaliera o meno, questi sistemi offrono comunque numerosi vantaggi rispetto ai generatori di backup, ma fino a che non sarà effettuata una revisione delle leggi nazionali tali generatori devono essere necessariamente installati.

Gli impianti di cogenerazione operando continuamente durante l'anno sono mantenuti in maniera conforme a differenza dei generatori diesel, che utilizzati raramente risultano poco attenzionati dal punto di vista manutentivo. Ciò fa sì che non sia raro che questi ultimi presentino difficoltà a funzionare o addirittura ad avviarsi durante eventi severi a causa della scarsa riserva di carburante, dell'olio sotto il livello minimo, di batterie scariche o con tensione bassa e di temperature del liquido di raffreddamento basse.

Infine, si riportano di seguito altri vantaggi dei sistemi di cogenerazione rispetto ai generatori diesel:

- tempi di avvio nullo perché essi sono già funzionanti al carico base mentre i generatori diesel hanno dei tempi di avvio dell'ordine dei 10-20 secondi, quindi in tal modo si evitano buchi di tensione per i sistemi critici;
- se opportunamente dimensionati oltre al carico elettrico riescono a gestire e mantenere anche il carico termico durante eventi severi;
- la cogenerazione è alimentata a gas naturale, una fonte più pulita e meno inquinante rispetto al diesel ed acquistabile a costi inferiori. Inoltre, l'alimentazione del gas metano non ha bisogno di continui rifornimenti, in quanto sfrutta la rete sotterranea che è raramente influenzata da eventi meteorologici o gravi disastri se questi non danno luogo a fenomeni di smottamento, invece la riserva diesel è limitata e di difficile reperibilità in caso di mancanza di energia elettrica in zona o di viabilità interrotta.

### 1.3.2 Aumento della resilienza dell'Ospedale San Giovanni Addolorata

L'ospedale San Giovanni di Roma, tipico sistema elettrico d'utenza, per l'aumento della propria resilienza ha realizzato un nuovo impianto fotovoltaico ed ha fatto ricorso ad altre misure a basso costo finanziate dall'Unione Europea.

Esso rappresenta un'eccellenza dal punto di vista sanitario, in quanto offre tutte le specialità cliniche e chirurgiche con ottime competenze assistenziali e tecnologiche. Le attività e i reparti sono distribuiti su più complessi situati in un'area che copre un intero quartiere del centro di Roma compreso tra Via Dell'Amba Aradam e Via Santo Stefano Rotondo. Si tratta di un'area molto importante dal punto di vista archeologico, infatti a pochi metri sono situati il Colosseo, la Basilica di San Giovanni in Laterano, la Basilica di Santo Stefano e vari obelischi egizi. Inoltre, lo stesso Ospedale San Giovanni è stato costruito sui resti della "Domus Annorum", la casa di Domithia Lucilla, madre dell'imperatore Marco Aurelio e questi sono visibili nel piano semiinterrato e nei giardini. In figura 45 è possibile osservare l'estensione del complesso ospedaliero.



Fig. 45. Complesso ospedaliero San Giovanni-Addolorata

L'intera struttura, ampliata soprattutto nel dopoguerra, ospita circa 800 posti letti, risultando quindi uno dei più grandi ospedali del centro Italia.

Negli ultimi anni l'Ospedale è stato sede di importanti ristrutturazioni e potenziamenti soprattutto degli impianti tecnici e tecnologici, attuando anche attività di miglioramento della resilienza dell'impianto elettrico.

In particolare, nel 2016, a copertura del parcheggio interno dell'Addolorata sono stati installati 792 pannelli fotovoltaici disposti su 33 supporti con 4 pensiline ciascuno poste ai vertici come mostrato in figura 46. Questo impianto fotovoltaico copre una superficie di 1306m<sup>2</sup> con una potenza di picco di 190kWp.



Fig. 46 Impianto fotovoltaico costruito sul parcheggio dell'Addolorata.

I supporti sono costituiti da 4 archi realizzati con un profilo tondo saldati al centro ad un tubo verticale e controventati da tiranti tubolari. La copertura delle pensiline avvitata all'estremità dell'arco ha struttura reticolare e alloggia 6 pannelli ciascuna. Tutta la struttura metallica è stata zincata e verniciata in conformità alla UNI EN 1090-1 ex C2 per allungare la vita della struttura ed evitare manutenzioni straordinarie. Alle pensiline sono stati fissati moduli fotovoltaici bifacciali che hanno il vantaggio di assorbire energia solare da entrambi i lati. Questo tipo di modulo comporta un incremento di produzione rispetto ai moduli tradizionali che dipende da tre fattori fondamentali [58]:

- altezza del pannello rispetto al suolo;
- inclinazione del pannello;
- coefficiente di riflessione del suolo (albedo).



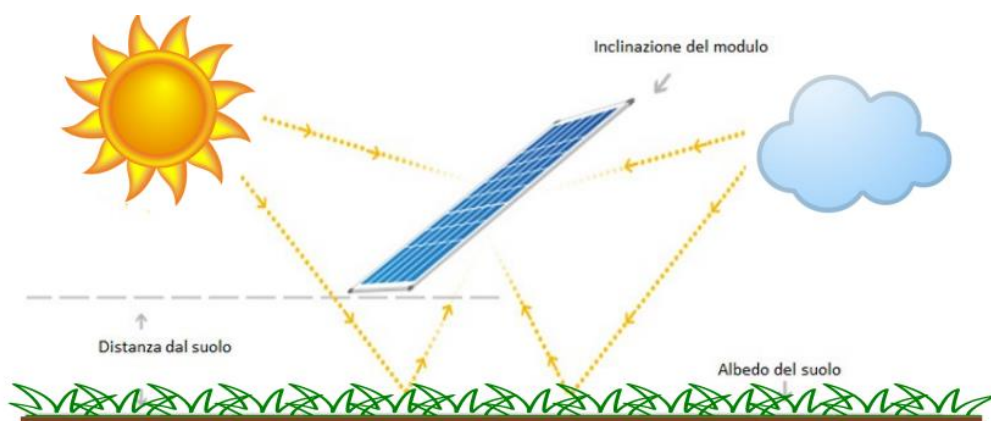


Fig.47. Pannello bifacciale

In base a queste caratteristiche si può avere un incremento dell'efficienza del pannello rispetto ad un pannello monofacciale di stessa dimensione dal 4% al 30% [58]. I valori dei coefficienti di riflessione sono riportati in tabella III.

Tabella III Valori di albedo su varie superfici [59]

Tipo di superficie	Albedo
<b>Prato</b>	10-25%
<b>Calcestruzzo</b>	20-40%
<b>Cemento verniciato bianco</b>	60-80%
<b>Ghiaia bianca</b>	27%
<b>Materiale di copertura bianco</b>	56%
<b>Membrana grigia per tetti</b>	62%
<b>Membrana bianca per tetti</b>	80%
<b>Sabbia</b>	20-40%
<b>Sabbia Bianca</b>	60%
<b>Neve</b>	45-95%
<b>Acqua</b>	8%

L'impianto fotovoltaico installato permette una produzione fino a 214.204 kWh annui che corrispondono ad un risparmio di CO<sub>2</sub> di 107.000 kg. Tale energia è in grado di alimentare il fabbisogno annuale di apparecchiature radiologiche, tomografi, risonanze magnetiche, acceleratori lineari ma anche ascensori e parte dell'illuminazione interna dell'Ospedale Addolorata.

L'aumento della resilienza di un sistema elettrico è un processo lungo e costoso e non applicabile in alcune aziende senza finanziamenti pubblici; ma questi richiedono tempi più

lunghe di progettazione e di approvazione per l'elargizione di fondi. Inoltre, la diminuzione di fondi al sistema sanitario nazionale (SSN) purtroppo ha rallentato maggiormente la realizzazione di alcuni progetti di miglioramento della resilienza, nonostante i notevoli vantaggi economici che ne deriverebbero. Infatti, anche l'efficienza energetica può essere vista come un'azione di miglioramento della resilienza stessa, in quanto essa permette di ridurre il fabbisogno energetico globale dell'Ospedale, andando per esempio ad incrementare il tempo di funzionamento del sistema elettrico di emergenza [51], ciò è come se fossero state aumentate le riserve di carburante stoccate.

Data l'importanza della riserva di carburante in un ospedale, si comprende facilmente quanto sia essenziale aumentare la sicurezza di approvvigionamento, le aziende devono perciò procurarsi accordi di acquisto prioritario di carburante per ovviare a interruzioni di lunga durata o realizzare piani di razionamento del consumo.

Il monitoraggio continuo dei carichi è consigliato per la classificazione dei carichi e della priorità di alimentazione. Questo permette di aumentare puntualmente i requisiti di efficienza energetica e quindi permette di perseguire l'autosostentamento.

Un altro metodo per gestire o rimodulare i carichi in modo manuale o automatico al fine aumentare la resilienza è rappresentato dal controllo remoto. In tal modo tutti i carichi potrebbero essere collegati ad un'unica sbarra sotto alimentazione di emergenza, andandoli via via a distaccare in base a delle priorità per sopperire alle condizioni di sovraccarico e a rialmentarli quando questa condizione viene meno, fino alla completa riattivazione quando si ritorna in condizioni normali.

Per aumentare la resilienza dell'Ospedale in questione sono state previste più alimentazioni in media tensione provenienti da diversi quartieri della città, quindi l'impianto è stato diviso in zone alimentate ognuna con una propria cabina MT di arrivo, ma attraverso un anello in MT che attraversa tutti i complessi, in seguito a guasti locali di piccola entità, è possibile alimentare gli edifici anche da altre zone. Oltre a ciò sono stati previsti punti di alimentazione che facilitano l'installazione di generatori di emergenza esterni e le aree critiche sono state accessoriate anche con motogeneratori portatili (10-20kVA). Tali soluzioni hanno reso l'impianto elettrico in alcune zone ridondante e con sicurezza N-x, dove x è maggiore sicuramente di 1.

Si potrebbe ricorrere anche a sistemi di controllo carico, i quali permettono di alimentare i carichi come quelli della climatizzazione o del riscaldamento in maniera alternata o con avvio

sequenziale per evitare sovracorrenti di spunto e quindi l'intervento dei dispositivi di protezione.

Dei vantaggi in termini di resilienza si potrebbero avere anche mediante l'utilizzo di motogeneratori a doppia alimentazione tipo gasolio e gas naturale, che permettono di diversificare la fonte di approvvigionamento e di avere un doppio grado di sicurezza; infatti essi sono alimentati normalmente a gas collegati alla rete cittadina, ma qualora questa fonte venisse a mancare, essi continuerebbero a funzionare per un tempo limitato dalle capacità del serbatoio diesel.

Tutte queste tecniche possono essere implementate in un ospedale di medie-grandi dimensioni in modo da aumentare la resilienza complessiva e la capacità di resistenza ad eventi estremi. Infatti, grazie all'utilizzo di microgrid, cogenerazione, stoccaggio e generazione distribuita il sistema diventerebbe più affidabile e i carichi potrebbero essere gestiti in maniera efficiente.

## 1.4 Azioni concrete

È possibile distinguere le azioni concrete per l'aumento della resilienza di un sistema elettrico in:

- Azioni per l'aumento della sicurezza fisica e per la mitigazione delle inondazioni dei siti elettrici;
- Azioni resilienti preventive.

Le prime vengono riassunte si seguito:

- ridondanza dei sistemi;
- sistemi di identificazione dei punti di guasto;
- aumento della sicurezza informatica;
- azioni per aumentare la velocità di ripristino e di riavvio del sistema;
- presenza di generatori di back-up e rete dati alternative.

Le azioni resilienti preventive principali sono:

- alimentazione dei servizi ausiliari anche da batterie e pannelli fotovoltaici;
- sistemi di comunicazione migliorati;
- miglioramento delle caratteristiche degli apparati nei confronti di condizioni climatiche avverse.

# Capitolo 2

## IoT per la gestione degli impianti d'utenza

L'internet delle cose, in inglese Internet of Things (IoT), è la rete degli oggetti e dei dispositivi fisici come veicoli, edifici, oggetti con elettronica embedded, software, sensori e connettività di rete, che permette lo scambio e la raccolta di dati per trasmettere informazioni sul proprio stato o sull'ambiente esterno.

L'evoluzione dei sistemi elettrici ed elettronici è cominciata dai primi anni '90 basandosi sui concetti di ATC (Any Time Connection), cioè dispositivi connessi a tutte le ore del giorno, e APC (Any Place Connection), ossia dispositivi connessi ovunque. L'acronimo IoT è stato coniato nel 2005 dall'International Telecommunication Union (ITU) per indicare la possibilità di connettere tutti i dispositivi tra loro.

Tuttavia, nel corso degli anni, il concetto dei dispositivi connessi è stato identificato anche con altre nomenclature a seconda dell'azienda che lo sviluppava o del tipo di funzionamento o in base a concetti futuristici. Ciò spiega perché spesso il termine IoT sia legato ad altri concetti quali M2M (Machine to Machine), Internet of Everything per Cisco Systems, World Size Web (Bruce Schneier) o venga addirittura utilizzato in film sui sistemi intelligenti come Skynet in Terminator.

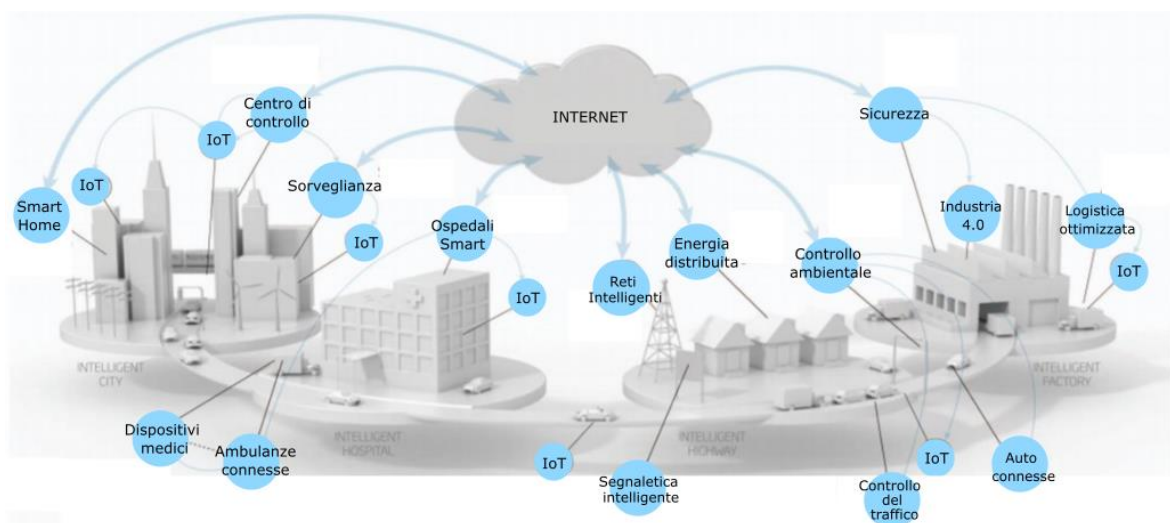


Fig.48 Rete di sensori IoT

Il potenziamento del settore dei dispositivi IoT ha conosciuto un rapido sviluppo, fino ad ottenere nel 2020 circa 6.5 dispositivi connessi per persona, con un mercato che solo in Italia nel 2015 valeva 1.47 Miliardi di € per i dispositivi connessi alla rete cellulare e 2 Miliardi di € per i dispositivi basati su altre tecnologie di telecomunicazione.

Tabella IV Aumento della popolazione e dei dispositivi IoT

	2003	2010	2015	2020
<b>Popolazione mondiale</b>	6.3 Miliardi	6.8 Miliardi	7.2 Miliardi	7.6 Miliardi
<b>Dispositivi connessi</b>	500 milioni	12.5 Miliardi	25 Miliardi	50 Miliardi
<b>Dispositivi connessi per persona</b>	0.08	1.84	3.47	6.58

I dispositivi connessi sono ormai installati in ogni ambiente e servizio, come si evince da figura 49, sia per il benessere pubblico, come i dispositivi installati nel settore ambientale, medico, dei trasporti e della sicurezza, sia per applicazioni strategiche per il paese, come quelli installati nei settori industriali, dell'edilizia, dell'agroalimentare, del turismo e dell'energia.

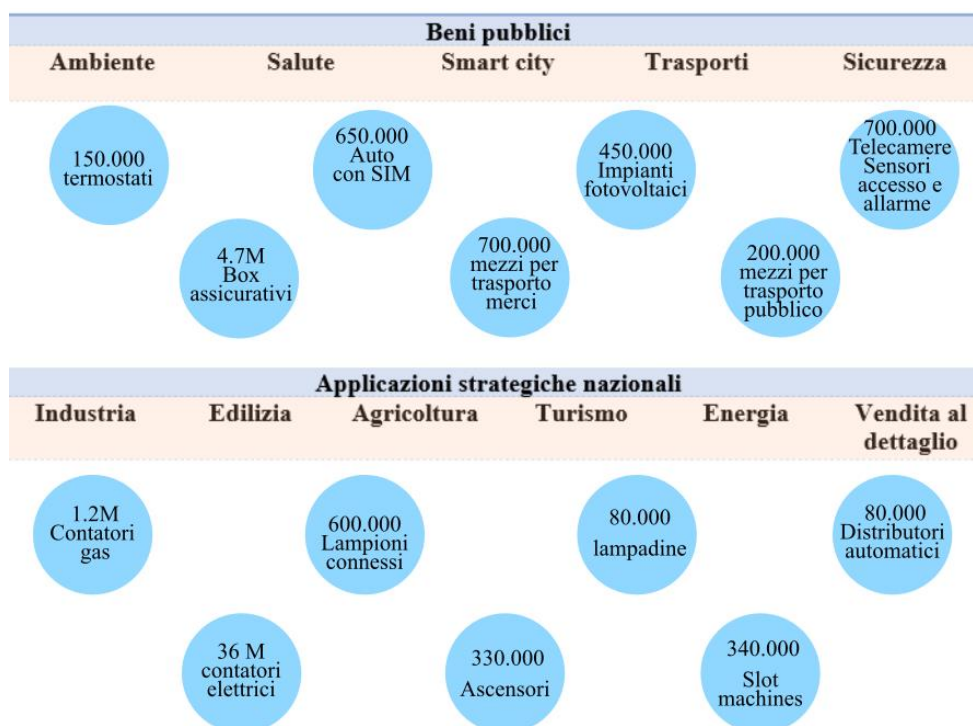


Fig. 49 Dispositivi connessi

Lo sviluppo dell'IoT nei sistemi elettrici ha portato all'avvento della quarta rivoluzione industriale (Industria 4.0). Gli impianti industriali, automatici e non che tradizionalmente agivano come impianti separati, sono stati aggiornati ricorrendo all'uso delle applicazioni IoT per aumentare la sicurezza e la produzione.

I benefici attesi da tale rivoluzione, incentrata proprio sulla sicurezza del lavoro, sono i seguenti:

- miglioramento dei prodotti;
- risparmio su spese operative ed energetiche;
- minimizzazione dei tempi di inattività degli impianti;
- incremento della produttività;
- sviluppo di nuovi modelli di business;
- garanzia di risposte immediate alla volatilità della domanda.

La catena di sviluppo dei sistemi IoT si basa su quattro concetti chiave:

- raccolta dei dati attraverso dispositivi e sensori;
- comunicazione dei dati ad altre piattaforme;
- analisi dei dati e ricerca informazioni;
- azioni intelligenti da compiere.

Mentre, i quattro elementi portanti dei dispositivi IoT che erano stati inizialmente stabiliti dall'ITU erano:

- i) identificazione dei dispositivi attraverso tecnologia RFID;
- ii) utilizzo di sensori per rilevare le grandezze fisiche;
- iii) intelligenza incorporata;
- iv) utilizzo di nanotecnologie per ridurre le dimensioni.

Invece, per quanto riguarda i parametri critici di IoT, essi sono la bassa latenza, l'affidabilità e il limitato consumo energetico.

In un tale contesto si rivelano molto importanti per realizzare reti intelligenti di controllo e monitoraggio le reti di telecomunicazione.

In figura 50 si possono osservare quali sono attualmente le tecnologie di trasmissione presenti e che vengono utilizzate per i dispositivi Smart.

Tra queste tecnologie, quelle che sicuramente avranno un largo utilizzo sono le reti 5G, nate appositamente per creare città connesse.

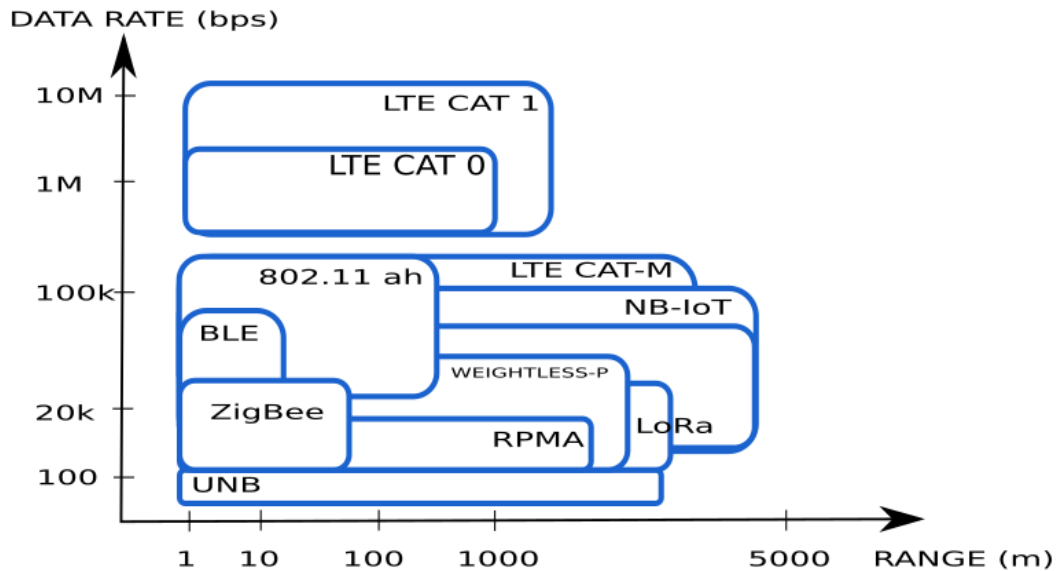


Fig. 50 Tecnologie di trasmissione dati

Attualmente, la maggior parte dei dispositivi sono connessi alla rete internet fissa attraverso Modem, Switch e router Wi-Fi.

L'architettura del sistema può basarsi sul:

- Cloud computing
- Fog Computing

In passato la scelta delle aziende sviluppatrici delle piattaforme IoT è stata indirizzata verso la spedizione di tutti i dati a Cloud remoti, dove venivano anche processati tramite il modello client/server. Invece ora si sta ripensando l'architettura generale, spostando almeno le operazioni semplici sulle piattaforme locali, questo perché un aspetto critico del rapido sviluppo dei componenti IoT potrebbe essere l'intasamento dei canali di comunicazione con conseguenti ritardi ed errori di comunicazione.

Nel fog computing i dispositivi comunicano peer-to-peer per condividere informazioni in modo locale. Si preferisce tale soluzione perché il salvataggio dei dati risulta più vicino alla sorgente che li genera, mentre l'infrastruttura di calcolo risulta essere nella periferia della rete,



così si minimizzano i flussi di dati se questi sono troppo grandi o se occorre monitorare i dati in modo real-time.

In particolare, il fog computing è un'architettura orizzontale che minimizza la latenza, permette di risparmiare banda ed aumenta la sicurezza della struttura. Gli utenti possono accedere direttamente ai dati di altri utenti fungendo direttamente da client e da server. Le reti peer-to-peer sono utilizzate soprattutto per la condivisione di file di grandi dimensioni, infatti in passato si usavano per lo scambio di film e musica come i Torrent. Gli utenti possono avere una copia intera dei file o porzioni di essa.

Nell'architettura client/server, i server mettono a disposizione risorse come capacità di calcolo o storage offerte come servizi ai client. I dati e le applicazioni sono salvati solo sul server, quindi basta solo una copia di backup per aumentare la sicurezza della rete ed evitare la perdita di dati. Inoltre, anche l'installazione, la manutenzione e gli aggiornamenti sono più veloci, in quanto richiedono di lavorare su un'unica macchina.

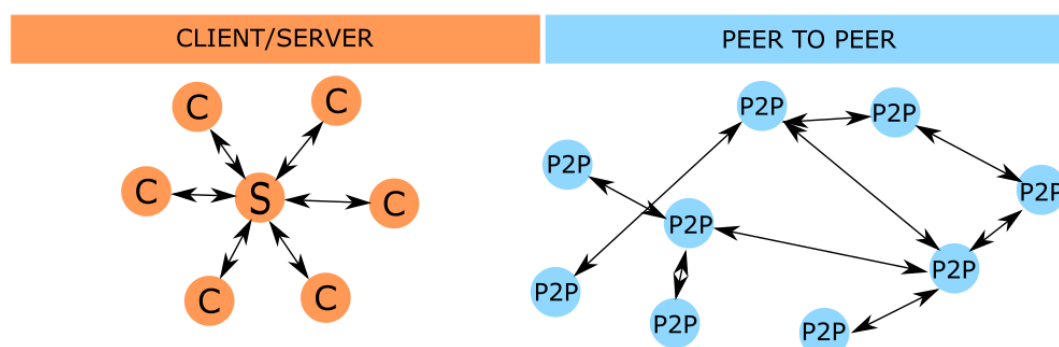


Fig. 51 Architettura Client/Server e Peer-to-peer

Nel modello client/server la comunicazione avviene sempre attraverso lo scambio di messaggi, ma l'esecuzione di un applicativo può avvenire lato client, ovvero il programma viene scaricato ed eseguito sul dispositivo locale, oppure lato server, ovvero il software viene eseguito direttamente sul server che poi comunica i risultati al client.

Le strutture dati nei database rappresentano il modo in cui gli utenti analizzano le loro informazioni e come i dati vengono acquisiti ed elaborati. I dati salvati possono essere grezzi oppure già opportunamente trattati per ridurre le dimensioni degli archivi o per essere utilizzati in azioni successive.

La scelta più comune per lo scambio dati tra client e server è il binomio HTTP/REST. HTTP (Hyper Text Transfer Protocol) rappresenta il protocollo ASCII di comunicazione utilizzato per la connessione che si basa sul pattern *request/response*, mentre REST (REpresentation State Transfer) rappresenta l'architettura dei metodi di richiesta. Nel protocollo HTTP, oltre al messaggio da scambiare (BODY), vengono trasferite anche informazioni di contorno dette HEADER.

Spesso, la quantità di dati da manipolare rappresenta un problema per un dispositivo embedded, soprattutto in termini di memoria per gestire l'Header, ma anche per la quantità di dati trasferita, che potrebbe incidere sulla durata della batteria e sul costo del traffico dati, specie quando viene utilizzata una SIM GPRS. In questi casi vengono perciò preferiti i protocolli binari che utilizzano il pattern PUBLISH/SUBSCRIBE, in quanto garantiscono un trasferimento minimo di dati oltre a quello del BODY.

Tra i protocolli binari più utilizzati quello di maggior rilievo è il protocollo MQTT (Message Queue Telemetry Transport), perché essendo nato specificatamente per lo scambio di misure, risulta molto leggero ed affidabile soprattutto su reti non perfette in termini di stabilità della connessione. In questa architettura il sensore invia (publish) il dato legato ad un argomento al sistema centrale (broker). Tutti i sensori che si iscrivono (subscribe) ad un certo argomento (topic) ricevono il nuovo dato quando questo è disponibile.

Tra i vantaggi di questa architettura c'è il disaccoppiamento spaziale, temporale e di sincronizzazione tra sensore e visualizzatore. La produzione del dato non deve essere sincrona con il suo utilizzo e chi genera il dato non deve essere attivo o direttamente connesso nello stesso momento di chi lo utilizza. Infatti i dispositivi a basso consumo energetico possono attivarsi per inviare il dato al broker con cadenza periodica e sarà quest'ultimo a girare il messaggio ai subscriber quando questi saranno online.

Rispetto al MQTT, l'HTTP è statelessness, cioè può non mantenere informazioni tra client e server tra una connessione e la successiva. Se la chiamata è stata chiusa, il client deve rinviare tutti i dati necessari per ricreare la connessione. Tuttavia, le connessioni persistenti hanno il vantaggio di ridurre le connessioni TCP abbreviando l'attesa di risposta e minimizzando il flusso di dati.

Sebbene il protocollo MQTT sia molto importante nelle applicazioni IoT, di seguito si è scelto di descrivere solo il protocollo HTTP, in quanto utilizzato durante il lavoro di dottorato per sviluppare le piattaforme connesse.

Nell'HTTP il sistema di rappresentazione del dato è indipendente e il formato dati basta dichiararlo nell'Header, perciò si presta a inviare messaggi HTML come binari, eseguibili o altre strutture dati più o meno complesse. La connessione è attivata dal client che ha anche il compito di richiedere il servizio, mentre il server accetta la connessione, identifica il client, risponde alla richiesta e infine chiude la connessione.

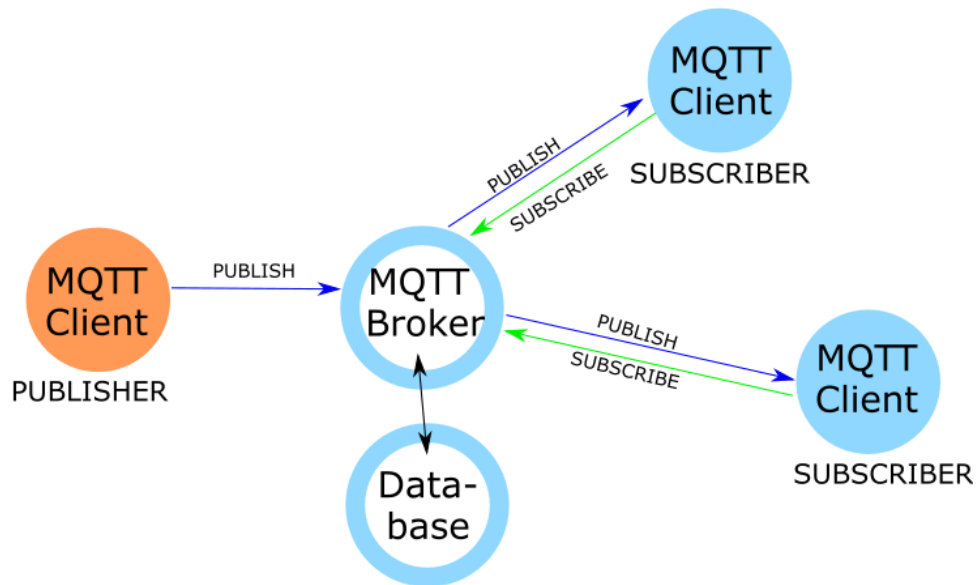


Fig.52 Architettura rete MQTT

Nell'HTTP 1.1, per ottimizzare i tempi di risposta e diminuire il traffico rete è stato implementato il PIPELINING, cioè la trasmissione di più richieste senza l'attesa della risposta delle richieste precedenti. Naturalmente le risposte in questo caso devono essere date nello stesso ordine in cui sono state richieste.

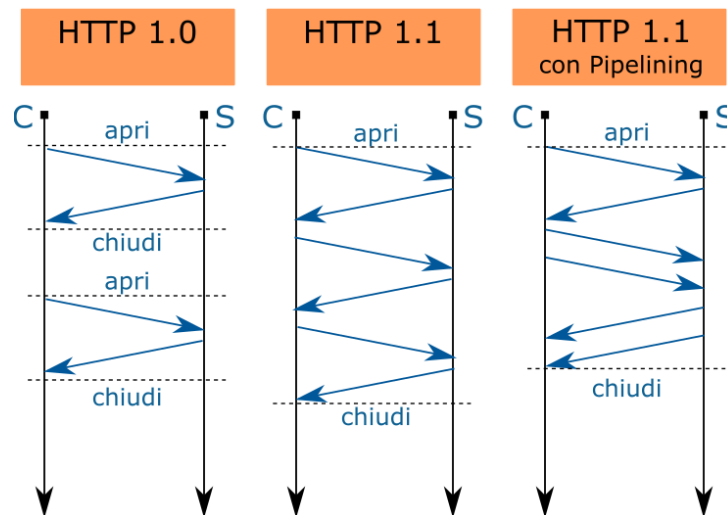


Fig.53 Chiusura e apertura connessione HTTP nelle varie versioni

Le API REST consentono di sviluppare qualsiasi tipo di applicazione web con tutte le possibili operazioni. I metodi della richiesta possono essere:

- GET;
- POST;
- PUT;
- DELETE;
- HEAD;
- OPTIONS;
- TRACE;
- CONNECT.

Nell'applicazione oggetto dello studio sono stati utilizzati solo i primi quattro metodi. La richiesta GET serve per richiedere una risorsa al server. Il metodo PUT si usa per trasmettere delle informazioni dal client al server, creando o sostituendo la risorsa specificata. Il metodo POST serve per trasmettere delle informazioni dal client al server, aggiungendole ad un argomento, mentre il DELETE permette di eliminare dal client una risorsa sul server.

Le piattaforme più utilizzate per lo sviluppo di dispositivi IoT si basano su ESP 8266, ESP 32, Particle e Raspberry Pi, perché sono dispositivi dotati almeno di connettività Wi-Fi, che permette di scambiare i dati acquisiti ad un database remoto.

L'ESP 8266 è un microcontrollore a basso costo (circa 3 €), dotato di 16 pin GPIO, un pin ADC a 10 bit, diverse interfacce di comunicazione (SDIO 2.0, SPI, UART, I2C, I2S, IRDA, PWM, GPIO) e la connettività Wi-Fi compatibile con lo standard 802.11 b/g/n a 2.4 GHz, con stack TCP/IP integrato, potenza di uscita di +20 dBm e supporta la sicurezza WPA/WPA2 e la crittografia WEP/KTIP/AES.

L'ESP 32 è un chip microcontrollore WI-Fi/ bluetooth/ bluetooth low energy potente e versatile, che integra anche una vasta gamma di periferiche, tra cui interfacce per sensori touch capacitivi, sensori Hall, interfaccia per schede SD, interfaccia Ethernet ed interfacce ad alta velocità come SDIO / SPI, UART, I2S e I2C. Il costo della piattaforma di sviluppo si aggira intorno agli 8 euro.

Oltre al chip principale, i principali componenti dei moduli DevKit (mostrati in figura 54) sono i rispettivi convertitore USB/seriale TTL e i regolatori di tensione da 5V a 3.3V.

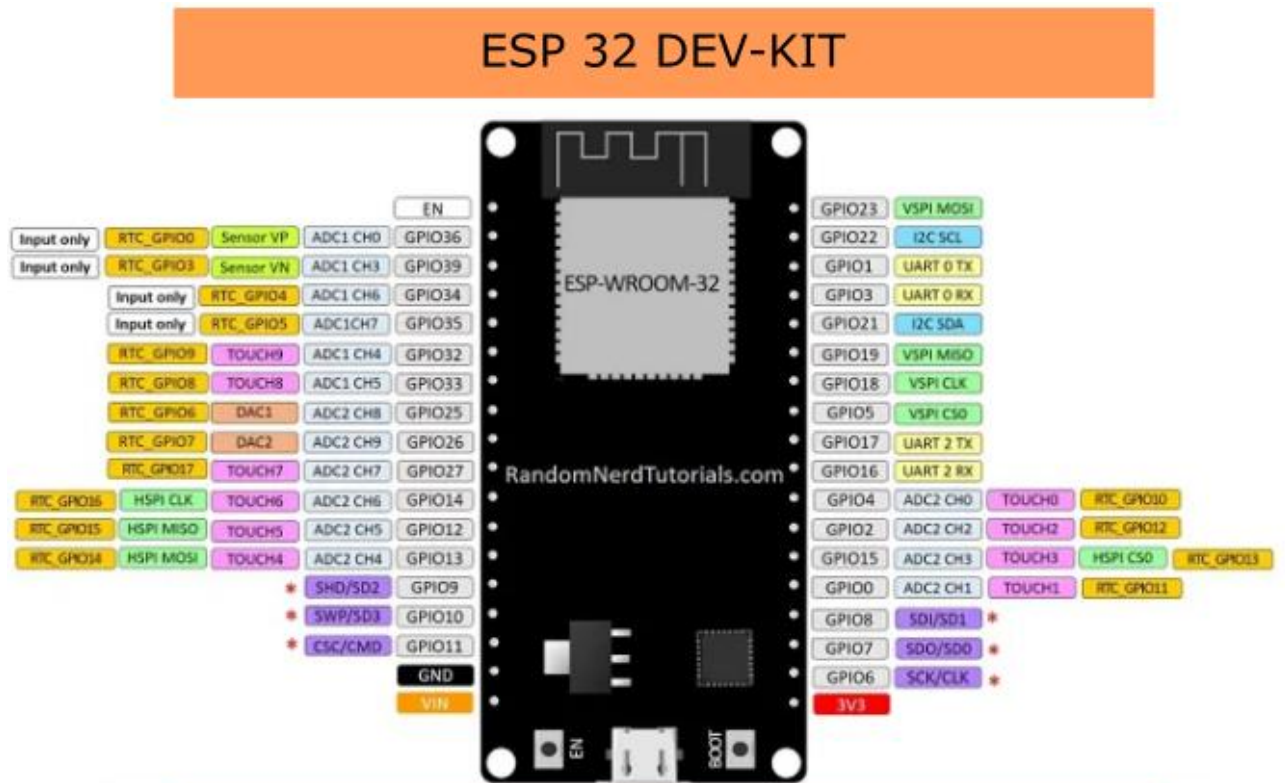
Il particle Photon è una scheda di piccole dimensioni (3,6 x 2) cm, che racchiude la connettività data dal chip Broadcom Wi-Fi e un potente processore ARM Cortex a 32 bit, utile per progetti più avanzati con una completa integrazione dell'ambiente cloud. Il cloud IDE è basato su Wiring, il che significa che può essere programmato con un codice facile da usare come Arduino, con la potenza e la flessibilità del C ++.

Il Raspberry, invece, è un piccolo PC basato su un "system-on-a-chip" di fabbricazione Broadcom, che incorpora un processore ARM e una GPU, il cui principale vantaggio è di avere un connettore con dei GPIO di uscita. Questa piattaforma nasce nel 2012 come strumento didattico, per svolgere la sola funzione di interprete Python. Ma il vantaggio di essere open-source, di avere un sistema operativo basato su linux e di avere un gran numero di connettori lo ha fatto diventare famoso tra i maker, per cui si è creata un'importante community di sviluppatori.

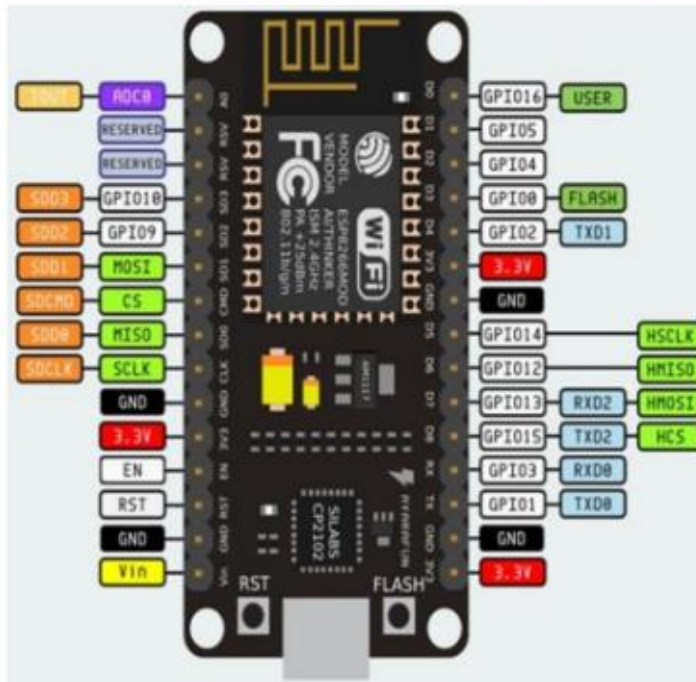
In commercio si possono trovare diverse versioni con differenti caratteristiche:

- Modello A;
- Modello A+;
- Modello B;
- Modello B+;
- Modello Zero;

- Computer module.



### ESP 8266 DEV-KIT



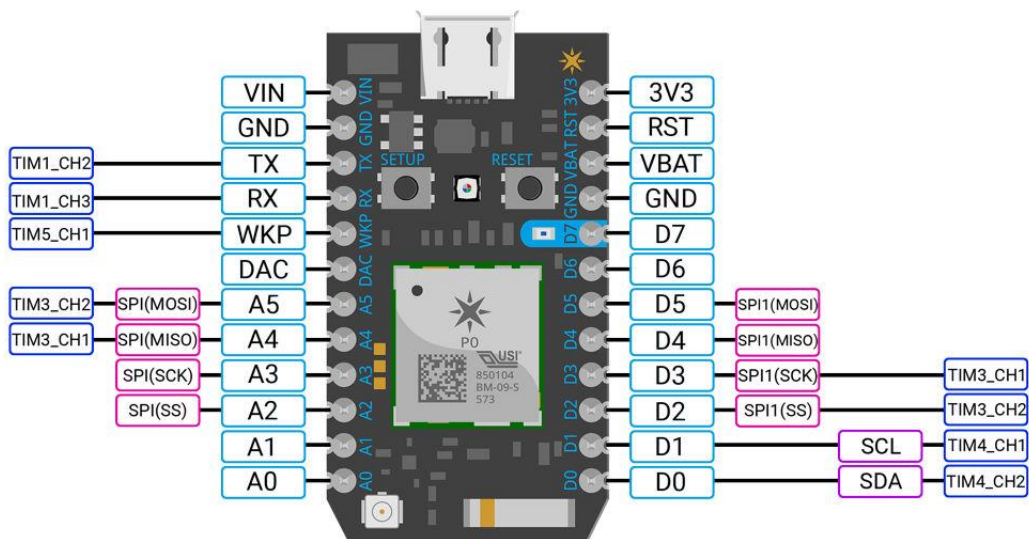


Fig.55 Piattaforma di sviluppo Particle Photon

Questo microcomputer non ha unità di memoria, ma viene sfruttata una microSD per il boot e la memoria non volatile. Le caratteristiche del Raspberry pi4 sono:

- Processore: Broadcom BCM2711, quad-core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1.5GHz;
- Memoria: 1GB, 2GB o 4GB (a seconda del modello);
- Connettività: Rete locale wireless IEEE 802.11b / g / n / ac di 2,4 GHz e 5,0 GHz, Bluetooth 5.0, BLE, Gigabit Ethernet, 2 × porte USB 3.0, 2 × porte USB 2.0;
- GPIO: Header GPIO standard a 40 pin (compatibilità ascendente con le schede precedenti);
- Video & audio: 2 × porte micro HDMI (fino a 4Kp60 supportato), porta di display MIPI DSI a 2 vie, porta di videocamera MIPI CSI a 2 vie, porta audio stereo e video composite a 4 poli;
- Multimedia: H.265 (decodifica 4Kp60), H.264 (decodifica 1080p60, codifica 1080p30), OpenGL ES, 3.0 graphics;
- Supporto SD: Slot per scheda Micro SD per la carica del sistema operativo e lo storage di dati.

La scheda può essere alimentata tramite caricatore esterno inserendo la presa microSD, oppure tramite pin 2 o 4 e un pin GND tramite un alimentatore a 5V, addirittura le ultime versioni sono alimentabili anche attraverso la porta LAN tramite tecnica POE (Power over Ethernet).

Il costo in Italia si aggira sui 30/40 euro per la versione con Ram da 1GB. A questo costo vanno aggiunti quelli dell'alimentatore e della microSD, in quanto non forniti.

La caratteristica principale, per cui viene utilizzato principalmente il Raspberry, è il connettore di collegamento che vanta la presenza di 40 PIN per l'attacco di schede ed interfacce aggiuntive. Qualsiasi pin GPIO può essere impostato tramite software come pin digitale di input o output e utilizzato per un'ampia gamma di scopi oppure per implementare protocolli di comunicazione. Durante la programmazione, occorre tener presente che la numerazione dei pin GPIO non è in ordine numerico di disposizione sul connettore. Ad esempio in posizione 8 si trova il GPIO14 software. Inoltre sul connettore si trovano i pin di alimentazione 5V, 3.3V e GND. I pin 27 e 28, invece, non sono utilizzati per le applicazioni IoT, perché servono per la programmazione dell'Eeprom.

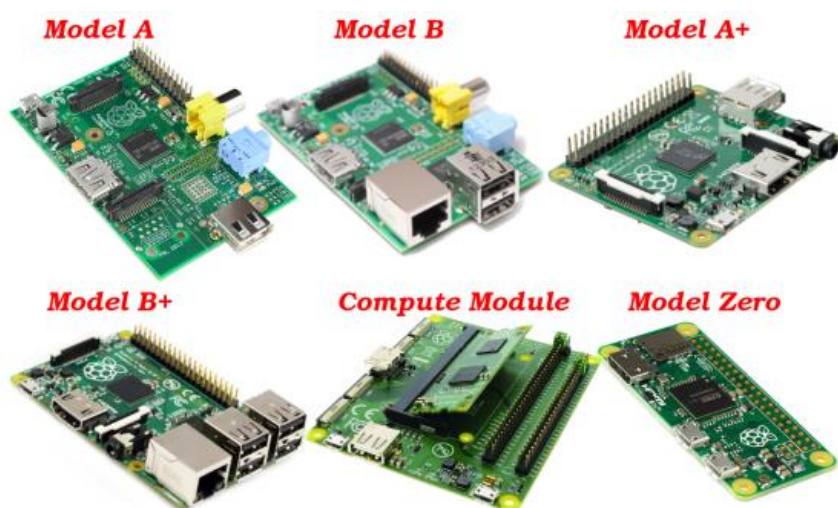


Fig.56 Versioni del Raspberry Pi

I singoli GPIO sono 3V3 tolleranti, ciò significa che la massima tensione ammessa è circa 3.3 V. I GPIO impostati come uscita possono essere comandati a livello logico alto (ON/ACCESO/livello 1) in cui presentano una tensione di 3.3V o a livello logico basso (OFF/SPENTO/livello 0) in cui presentano una tensione prossima allo zero.

Se invece sono configurati come ingressi è possibile leggere un livello alto se la tensione presente è vicina a 3.3 V o basso se la tensione è prossima allo zero.

Per evitare errori di lettura e non lasciare i PIN flottanti, vengono utilizzati dei circuiti PULL-UP o PULL-DOWN, dove tramite delle resistenze si fissa il livello logico rispettivamente al



potenziale alto o basso. Questi circuiti sono già installati sul Raspberry e per attivarli basta una semplice configurazione software. Solo i GPIO 2 e 3 hanno resistori di pull-up fissi.

I pin possono essere configurati anche per la comunicazione dati tra dispositivi. A tal fine alcuni pin vengono collegati ad hardware dedicato e quindi presentano:

- Hardware PWM disponibile su GPIO12, GPIO13, GPIO18, GPIO19;
- SPI0: MOSI (GPIO10), MISO (GPIO9), SCLK (GPIO11), CE0 (GPIO8), CE1 (GPIO7);
- SPI1: MOSI (GPIO20), MISO (GPIO19), SCLK (GPIO21), CE0 (GPIO18), CE1 (GPIO17), CE2 (GPIO16);
- I2C1: Dati (GPIO2), Clock (GPIO3);
- I2C EEPROM: Dati (GPIO0), Clock (GPIO1);
- Seriale: TX (GPIO14); RX (GPIO15).





















Pin#	NAME		NAME	Pin#
01	3.3v DC Power		DC Power 5v	02
03	GPIO02 (SDA1 , I2C)		DC Power 5v	04
05	GPIO03 (SCL1 , I2C)		Ground	06
07	GPIO04 (GPIO_GCLK)		(TXD0) GPIO14	08
09	Ground		(RXD0) GPIO15	10
11	GPIO17 (GPIO_GEN0)		(GPIO_GEN1) GPIO18	12
13	GPIO27 (GPIO_GEN2)		Ground	14
15	GPIO22 (GPIO_GEN3)		(GPIO_GEN4) GPIO23	16
17	3.3v DC Power		(GPIO_GEN5) GPIO24	18
19	GPIO10 (SPI_MOSI)		Ground	20
21	GPIO09 (SPI_MISO)		(GPIO_GEN6) GPIO25	22
23	GPIO11 (SPI_CLK)		(SPI_CE0_N) GPIO08	24
25	Ground		(SPI_CE1_N) GPIO07	26
27	ID_SD (I2C ID EEPROM)		(I2C ID EEPROM) ID_SC	28
29	GPIO05		Ground	30
31	GPIO06		GPIO12	32
33	GPIO13		Ground	34
35	GPIO19		GPIO16	36
37	GPIO26		GPIO20	38
39	Ground		GPIO21	40

Fig.57 Intestazione dei pin GPIO del Raspberry Pi3

Se questi canali di comunicazione non dovessero essere sufficienti, i metodi di trasmissione dati possono essere aumentati attraverso la tecnica del Bit-banging, ovvero l'utilizzo di qualsiasi GPIO per generare o analizzare i segnali trasmessi e ricevuti mediante lo sviluppo del codice. In questo caso il codice deve gestire la temporizzazione della comunicazione e i buffer dati. Il vantaggio di avere più porte viene compensato dallo svantaggio di rallentare il ciclo principale per gestire queste operazioni di trasmissioni e di consumare più risorse energetiche.

Nel Raspberry un altro metodo per implementare ed incrementare i canali di comunicazione è rappresentato dall'utilizzo di adattatori USB opportuni. In commercio possiamo trovarne diversi tipi come:

- USB/RS485;
- USB/RS232;
- USB/UART;
- USB/I2C.

In particolare, il primo si utilizza nel caso in cui bisogna comunicare con un energy meter o un inverter, che ormai hanno quasi sempre incorporate le prese DB9 o i pin A,B,GND. La stessa interfaccia del Raspberry si può implementare con una schield che converte il segnale RS485 in UART, come mostrato in figura 58.

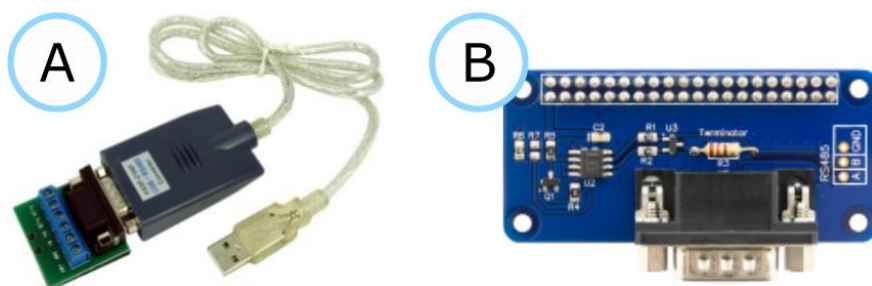


Fig. 58 A) Adattatore USB/RS485; B) Adattatore UART/RS485

Nel caso oggetto del lavoro di tesi, la programmazione della piattaforma fisica è stata fatta in ambiente Python. Per sviluppare in modo efficiente il codice e programmare il Raspberry Pi 3, il codice è stato scritto tramite l'IDE (Integrated Development Environment) Geany. L'IDE è uno strumento software composto solitamente da:

- un editor di codice sorgente;

- un compilatore e/o un interprete;
- un tool di building automatico;
- un debugger.

Inoltre Geany permette di avere:

- evidenziazione della sintassi;
- terminale virtuale integrato;
- supporto a documenti multipli e a progetti.

Python è un linguaggio di programmazione orientato agli oggetti di alto livello, adatto a sviluppare applicazioni. Il vantaggio nell'uso di questo linguaggio è dato dalla velocità di scrittura e di lettura degli script. Inoltre, i codici sviluppati su un tipo di PC possono essere facilmente eseguiti su un altro tipo di PC con poche o nessuna modifica. Ciò è utile se oltre che su Raspberry il codice viene utilizzato anche in ambiente Windows.

Sul Raspberry sono stati caricati, quindi, 2 codici, il primo si avvia dopo 20 secondi dall'accensione dello stesso, controlla la connessione Wi-Fi, controlla la disponibilità di un nuovo aggiornamento del secondo codice e se disponibile lo scarica, lo salva nella SD e lo avvia. Inoltre, ogni 5 minuti controlla un valore nel database per vedere se è necessario un riavvio del RpiB. Il riavvio da remoto è stato implementato per permettere al programmatore di riavviare qualsiasi RpiB appunto da remoto, semplicemente gestendo il cloud, ed è utile quando si vuole rendere operativo un aggiornamento del secondo codice o quando il RpiB si è bloccato per qualche errore.

Una parte del codice 1 è mostrata in figura 59, in particolare sono mostrate 3 funzioni utilizzate:

- salvataggio del mac address del Raspberry pi 3 B: utilizzato come codice univoco di identificazione di ogni piattaforma hardware installata;
- funzione di riavvio: se durante il ciclo principale ci sono stati problemi, questa funzione riavvia il RpiB per sbloccare la piattaforma;
- funzione di riavvio dell'interfaccia Wi-Fi ed ethernet: riavvia le rispettive interfacce in caso di connessioni fallite.

```

def getMAC(interface='eth0'): # Return the MAC address of the specified interface
    try:
        str = open('/sys/class/net/%s/address' %interface).read()
    except:
        str = "00:00:00:00:00:00"
        str=str.upper()
    return str[0:17]

def reboot():
    global time_restart_connection_interval
    if time.time()>time_restart_interval:
        os.system('sudo reboot')
    if time.time()>time_restart_connection_interval:
        restart_eth_wifi()
        time_restart_connection_interval=time.time()+device_restart_connection_interval

def restart_eth_wifi():
    os.system('sudo ifconfig wlan0 down')
    os.system('sudo ifconfig eth0 down')
    time.sleep (2)
    os.system('sudo ifconfig wlan0 up')
    os.system('sudo ifconfig eth0 up')

```

Fig. 59 Parte del codice 1 per riconnettere il Wi-fi, per riavviare il Rpi3B e per trovare il Mac Address.

In figura 60 invece è mostrata la funzione REST POST per salvare il nuovo dato registrato dalla piattaforma sul database tramite messaggio JSON. Se la comunicazione non va a buon fine viene scritto un messaggio di errore all'interno del file Errori.txt salvato nella SD.

```

151 def rest_post(UUID,VALS,I):
152     global count
153     global val_sens_in_mem
154     task = {"sensorLogSensorUUID": "%s" %UUID, "sensorLogValue": "%s" %VALS}
155     done = 0
156     sito=device_api_host+device_sensor_write_log_host
157     while done == 0:
158         try:
159             resp = requests.post(sito, json=task, headers=header, timeout=device_timeout_interval)
160             led_on_bip_invio()
161             if resp.status_code == 200:
162                 done = 1
163                 count=1
164                 val_sens_in_mem[I]=val_sens_in[I]
165             else:
166                 salvaerrore("rest post",str(resp.status_code))
167                 time.sleep(device_timeout_interval)
168         except Exception as e:
169             salvaerrore("rest post except",e)
170             led_fault_bip()
171             time.sleep(device_timeout_interval)
172     count=count+1
173     if count==50:
174         restart_eth_wifi()
175     if count==100:
176         os.system('sudo reboot')
177     if count%5!=0:
178         return

```

Fig. 60 Funzione REST POST del codice 2 per salvare il nuovo valore letto dalla piattaforma

La stessa funzione POST viene invece tradotta in linguaggio C per l'ESP8266 e l' ESP32, come mostrato in figura 61.



```
POST | Arduino 1.6.7
File Modifica Sketch Strumenti Aiuto

POST

String url = "/test/survparametricrest?table=SENSORS_LOGS&operationCode=sensorDataWrite";
String data="{\"sensorLogSensorUUID\": \"12345678900013\", \"sensorLogValue\": \"1\" }";
Serial.println(data.length());
Serial.print("requesting URL: ");
Serial.println(url);

/*
client.print(String("GET ") + url + " HTTP/1.1\r\n" +
             "Host: " + host + "\r\n" +
             "Connection: close\r\n\r\n");
*/

client.println("POST " + url + " HTTP/1.1");
client.println("Host: " + (String)host);
//client.println("User-Agent: ESP8266/1.0");
client.println("Connection: close");
client.println("Content-Type: application/x-www-form-urlencoded;");
client.print("Content-Length: ");
client.println(data.length());
client.println();
client.println(data);

Serial.println("request sent");
while (client.connected()) {
  String line = client.readStringUntil('\n');
  if (line == "\r") {
    Serial.println("headers received");
    break;
  }
}
```

Fig. 61 Funzione REST POST scritta in C, per il NodeMCU

Tutte le funzioni sono state testate anche con il software POSTMAN per controllare che le comunicazioni tra database e client non dessero errori o che i messaggi fossero scritti nel modo giusto. Postman è un tool utile che permette di verificare le API in maniera veloce e semplice attraverso un'interfaccia web. In figura 62 si osserva un esempio di richiesta del servizio GET sul database online. Nello specifico, dal menu a tendina è stato scelto il tipo di chiamata, nella barra URL è stato inserito l'indirizzo relativo al database usato e al dato da richiedere e poi si è stato premuto il tasto invio. Nella finestra inferiore il programma ha visualizzato il corpo del messaggio di risposta. Come si evince in figura, il messaggio JSON di risposta è molto semplice da leggere, infatti è organizzato in un insieme di coppie nome/valore e questo aiuta nella trasmissione di dati da client a server e viceversa.

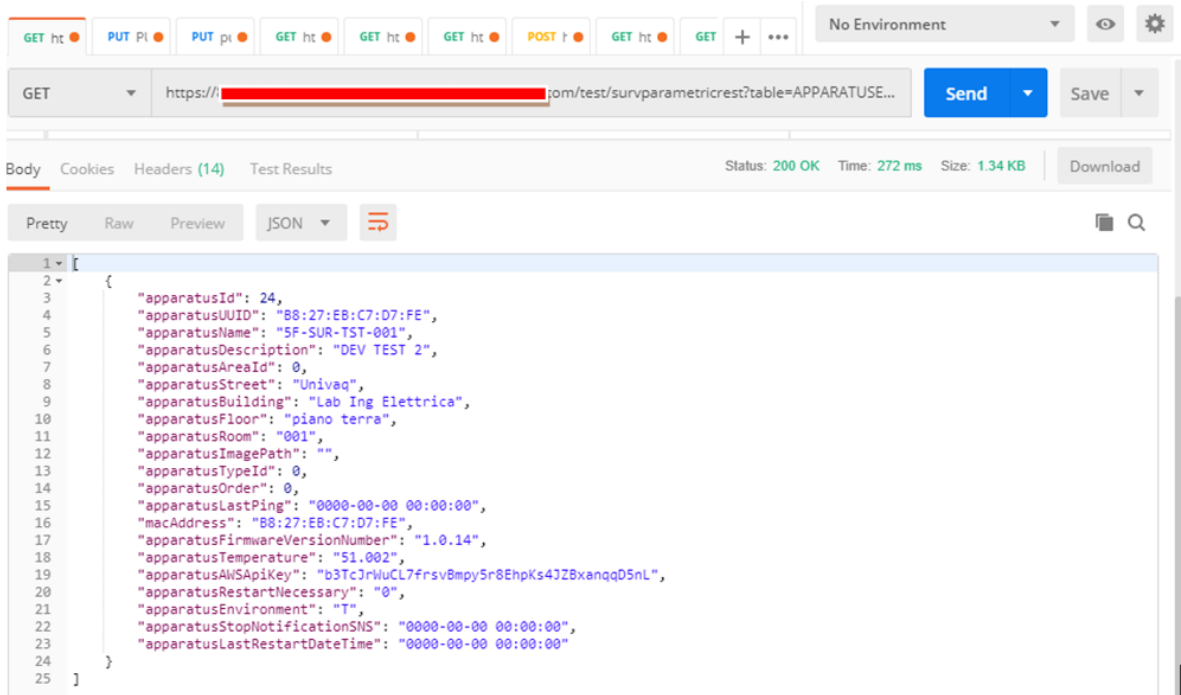


Fig. 62 Esempio di richiesta GET e di risposta ottenuta con POSTMAN

Il database relazionale utilizzato per i progetti realizzati durante il corso di dottorato è organizzato secondo tabelle connesse tra loro come mostrato in figura 63.

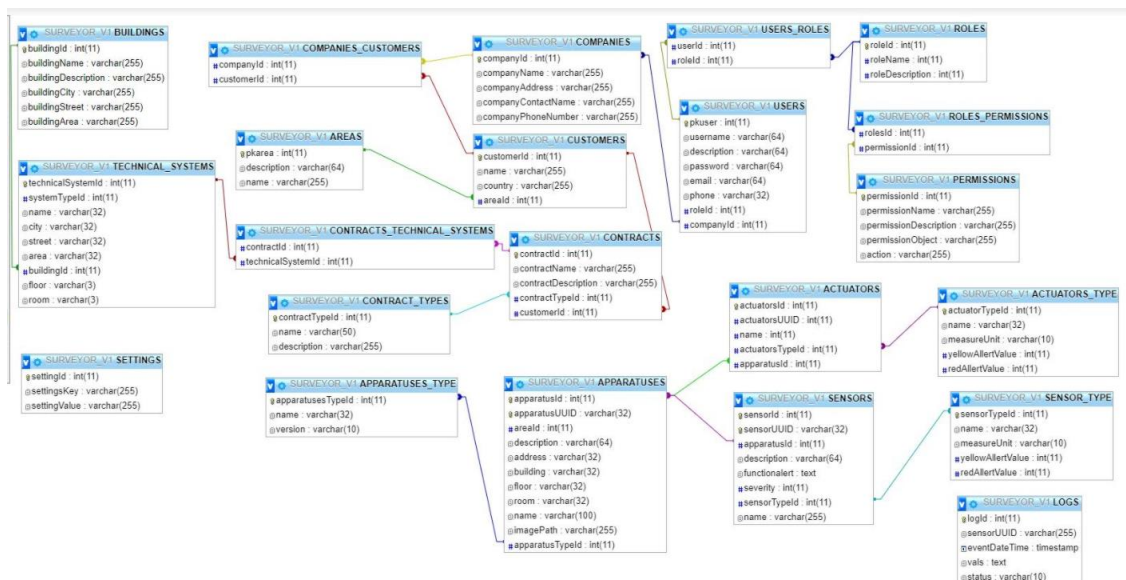


Fig. 63 Organizzazione Database relazionale

Il database organizzato in questo modo è utile per salvare informazioni aggiuntive come:

- informazioni dell'azienda installatrice dell'apparato IoT;
- localizzazione del sistema tecnologico da monitorare;
- localizzazione dell'apparato IoT;
- informazioni sull' Apparato IoT e sui sensori in ingresso;
- dati letti dai sensori o azioni da compiere attraverso gli attuatori.

Un esempio dei dati che possono essere salvati dentro al database e che risultano utili per un'azienda distributrice ed installatrice di dispositivi IoT in sistemi di utenza sono mostrati in figura 64.

Azienda installatrice		Localizzazione sistema tecnologico				Localizzazione apparato				Funzionale										
Nome	Paese	Macro Area	Commissa	Opz1	Citta	Via	Area	Edificio	Zona	Piano	Stanza	Tipologia sistema	Via	Edificio	Piano	Stanza	Tipologia apparato	ID apparato	Sensori	Attuatori

Esempi

Nome	Italia	Centro-Italia	1 anno	Regione	Pescara	Via rossi	Ospedale	A,b,c	Ingresso, locale	0,1,2,3	1,2,3,4,5,6	Quadro, ura, ascensori, ups, frigoriferi, gas medicali, illuminazione	Via rossi Contrada Gialli Piazza Loreto	A,b,c	0,1,2,3	1,2,3,4,5,6	Monitoring, surveillor, surveillor v4	1,2,1000-00,2000-00	...	...	Attuatori
------	--------	---------------	--------	---------	---------	-----------	----------	-------	------------------	---------	-------------	-----------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------	-------	---------	-------------	---------------------------------------	---------------------	-----	-----	-----------

Esempio Università

Azienda installatrice		Localizzazione sistema tecnologico				Localizzazione apparato				Funzionale											
Nome	Paese	Macro Area	Categoria contratto	Commissa	Opz1	Citta	Via	Area	Edificio	Zona	Piano	Stanza	Tipologia sistema	Via	Edificio	Piano	Stanza	Tipologia apparato	ID apparato	Sensori	Attuatori

Esempio settore terziario/industria

Nome	Italia	Centro-Italia	6 mesi	Commissa	Avezzano	via rolo	Plastech.sr	uffici	F	Lab elettrica	0		Quadro elettrico	Via Montelucio	f	0		monitoring	100224	1 tensione, 2 Corrente, 3 Potenza, 4 PF, 5 Frequenza, 6 energia	1 sirena, 2 Guasto, 3 allagam, 4, 5, 6	Attuatori
------	--------	---------------	--------	----------	----------	----------	-------------	--------	---	---------------	---	--	------------------	----------------	---	---	--	------------	--------	-----------------------------------------------------------------	----------------------------------------	-----------

Fig. 64 Informazioni utili per la gestione di un complesso apparato di supervisione



# Capitolo 3

## Applicazioni per la gestione del sistema elettrico generale

Il percorso di dottorato è stato incentrato sullo sviluppo di diverse tecniche di aumento della resilienza di utenti di utenza. Tali tecniche hanno richiesto l'utilizzo di dispositivi IoT, in quanto utili per la supervisione di intere aziende o di singoli dispositivi.

In particolare, già nel primo capitolo si è potuto osservare quanto in impianti complessi, una tecnica di aumento della resilienza sia rappresentata dal monitoraggio continuo del sistema elettrico e della gestione del carico. I problemi di power quality possono essere risolti attraverso lo studio delle loro cause e a tale scopo le piattaforme IoT possono giocare un ruolo importante. Inoltre, perfino la manutenzione può essere influenzata e migliorata tramite la supervisione degli allarmi, che possono risultare vari e posizionati in zone distanti tra loro.

Il monitoraggio continuo dei flussi energetici e del carico aiuta l'utente a intervenire in caso di guasto e ad operare per mitigare i danni causati da eventi severi. In questa analisi, gli algoritmi di identificazione possono disaggregare le informazioni dei singoli carichi dalle misure globali, inoltre l'uso di tali algoritmi permette di valutare puntualmente l'utilizzo dei carichi, infatti è possibile realizzare diverse simulazioni della durata delle risorse di emergenza alimentando o meno un certo carico.

Di seguito sono analizzate la continuità e la qualità del servizio elettrico attraverso una piattaforma di monitoraggio dei disturbi di power quality per poi passare alla descrizione di una piattaforma utile per l'efficientamento delle risorse e dei consumi attraverso l'utilizzo di contatori commerciali o contatori smart. L'importanza di questa piattaforma è dovuta al fatto che, con opportune modifiche, si può utilizzare anche per la gestione della manutenzione e degli allarmi. Infine, viene illustrato il primo metodo proposto per analizzare gli impianti attraverso la tecnica SFRA, utile per aumentare la resilienza del sistema elettrico attraverso la predicibilità e la programmabilità delle risorse disponibili.

## 3.1 Continuità e qualità del servizio

Si stima che in un anno circa 10 miliardi di dollari vengono persi a causa di eventi di Power quality che coinvolgono sistemi di controllo automatizzati [60]. La suscettibilità dei processi d'utenza ai disturbi della qualità dell'alimentazione (PQ) è tipicamente elevata a causa di possibili danni che si potrebbero verificare sui componenti interni sensibili, in quanto in tal caso si renderebbero necessarie riparazioni costose e tempi di inattività indesiderati [61]. I dispositivi più sensibili ai disturbi PQ sono tipicamente contatori, PLC, computer e azionamenti a velocità regolabile. Negli impianti elettrici d'utenza ci sono apparati elettrici che possono essere messi fuori servizio anche da un abbassamento di tensione minore all'80% del valore nominale e della durata di pochi cicli. Un caso tipico può essere l'impianto di un ospedale dove vi sono molti macchinari suscettibili come la risonanza magnetica (MRI), la tomografia computerizzata a raggi X (TAC), i raggi X (XF) o altre apparecchiature correlate, che forniscono informazioni critiche nella diagnosi e nel trattamento di lesioni e malattie.

Ciò avvalorava l'importanza di trattare i problemi di qualità dell'alimentazione nelle strutture mediche, poiché essi avrebbero conseguenze serie, specialmente se si verificassero in aree operative o in terapia intensiva. Senza considerare che la loro riparazione potrebbe portare a fermi prolungati anche per diversi giorni e richiedere costi significativi per le aziende ospedaliere.

Una conseguenza dei guasti del sistema di alimentazione sono i buchi di tensione, ossia dei disturbi nell'alimentazione di tensione caratterizzati da un'improvvisa riduzione dell'ampiezza della tensione, seguita dal ripristino della tensione dopo un breve periodo di tempo [62]. Le loro caratteristiche in un dato sito di rete dipendono dalla posizione del guasto e dal tipo di guasto, di rete e dei sistemi di protezione. Poiché i guasti del sistema di alimentazione si verificano in modo random nel tempo e nel luogo, gli abbassamenti di tensione hanno una natura stocastica [63] e non possono essere completamente eliminati, né l'apparecchiatura può essere resa completamente immune da tutti gli eventi, o almeno a costi accettabili [64].

La comunità della qualità dell'energia ha stimato che in un anno vengono persi almeno 10 miliardi di dollari quando i sistemi di controllo automatizzati negli impianti industriali sono sconvolti da eventi di interruzione di tensione. Tali numeri non sono stati stimati specificamente per le strutture sanitarie, ma si può presumere che in tal caso il costo dei tempi di inattività include anche l'eventuale messa a rischio di uno o più pazienti. Pertanto, gli ospedali richiedono una straordinaria affidabilità dei loro sistemi di alimentazione. I sistemi

di supporto vitale, così come i sistemi di infrastrutture ausiliarie critiche come HVAC, sistemi di comunicazioni, gestione dei record e sicurezza, devono rimanere tutti online durante un'interruzione di corrente. Per tale ragione, le direzioni degli ospedali negli ultimi anni hanno promosso attività tecniche incentrate sul miglioramento della resilienza del sistema di alimentazione e sull'aggiornamento della qualità dell'energia al fine di migliorare l'affidabilità e la qualità della distribuzione dell'elettricità nell'ospedale [65, 66].

In particolare, poiché durante l'estate 2018 l'Azienda ospedaliera San Giovanni-Addolorata (SGAH) è stata interessata da molti guasti per interruzioni dell'alimentazione, soprattutto nel periodo compreso tra giugno e agosto, è stata avviata un'indagine sulla qualità dell'alimentazione al fine di determinare l'origine dell'interruzione [67]. A tal fine, durante il corso di dottorato sono stati analizzati gli eventi di disturbo significativi dell'alimentazione dell'ospedale, che hanno causato guasti costosi all'elettronica installata sia su diversi sistemi tecnici (ascensori e autoclavi) che su apparecchiature diagnostiche critiche (TAC e MRI).

L'impianto elettrico a servizio della zona SGAH è alimentato da varie cabine di distribuzione MT/BT, che collegano singoli edifici o aree di carico. Ogni sottostazione di distribuzione è dotata di uno o più generatori di emergenza provvisti di controllo automatico per trasferire l'impianto dalla rete al generatore alternativo in 15 secondi, come da norme. Ognuno di questi generatori è in grado di fornire potenza sia ad apparecchiature critiche di supporto vitale, sia ad apparecchiature di sicurezza in caso di interruzione prolungata. Il sistema di generazione dell'emergenza è impostato per avviare i generatori quando la tensione scende al di sotto dell'80% e la durata dell'abbassamento (o interruzione) è pari o superiore a 1,5 secondi. La presa del carico avviene, tramite l'apertura degli interruttori principali "normali" a 400 V e la chiusura degli interruttori di "emergenza", in pochi secondi. Oltre ai generatori di emergenza, le sbarre del carico critico sono alimentate anche da due grandi unità UPS da 250 kVA ciascuna. Le cabine MT/BT di distribuzione includono ognuna due o più trasformatori (20 / 0,4 kV, 630 - 1600 kVA), collegati D-yg, e la rete viene distribuita utilizzando un sistema di messa a terra TN-S.

L'ambiente ospedaliero, oltre alle apparecchiature mediche, include carichi elettronici tipici di qualsiasi altra struttura, quali carichi commerciali (come computer, server e sistemi di illuminazione) e carichi industriali (come attrezzature per la preparazione del cibo e attrezzature per lavanderia), ma anche carichi residenziali per il funzionamento della struttura e per il benessere dei pazienti.

I disturbi dell'alimentazione interessano anche le apparecchiature informatiche, provocando il riavvio dei computer, con conseguente perdita di lavoro se non salvato e perdita di produttività. Attualmente, dentro al SGAH ci sono circa 1200 dispositivi digitali tra computer e stampanti, ma a causa delle interruzioni di corrente dell'estate scorsa, diversi monitor sono stati danneggiati (molto probabilmente a causa di transitori dovuti alla caduta di tensione). Le apparecchiature di monitoraggio fisiologico sono vulnerabili ai segnali pulsanti. Infatti, alcune apparecchiature mediche sono collegate direttamente al paziente, al fine di rilevare piccoli segnali fisiologici (ECG 1 mV, EEG 100  $\mu$ V, EMG 10  $\mu$ V). Inoltre, anche le apparecchiature alimentate dalla rete, inclusi ventilatori, macchine per anestesia e pompe a siringa, possono essere vulnerabili alle interferenze indotte dall'alimentazione di rete. Infine, altri malfunzionamenti nelle apparecchiature mediche causati da eventi di qualità dell'alimentazione includono: distorsione dei segnali umani dovuta a dati alterati; risultati diagnostici errati (a causa di interferenze elettromagnetiche o cattiva messa a terra), blocco dell'apparecchiatura (a causa di picchi di tensione o abbassamenti) e malfunzionamenti dei controlli e degli allarmi a causa di guasti al microprocessore interno.

Le caratteristiche delle apparecchiature mediche per quanto riguarda le emissioni e l'immunità ai disturbi elettromagnetici sono definite dalla norma IEC60601-1-2 [68, 69]. Questo standard è stato adottato da molte nazioni attraverso le loro norme nazionali (EN60601-1 nell'UE, UL60601-1 negli USA, ad esempio).

Al fine di identificare l'origine dell'interruzione nei mesi di luglio e agosto 2018, sono stati analizzati i dati forniti dal distributore comunale di energia elettrica (AReti): data e ora dell'evento, livello di tensione, durata e tensione residua relativi all'uscita della cabina primaria di S. Paolo di AReti, che alimenta il SGAH. In questo periodo sono state registrate 32 interruzioni brevi, si riportano in tabella V i 14 maggiori eventi che presentavano un livello di tensione residua minore del 50 %.

Nel grafico a dispersione livello-durata in figura 65 si evince chiaramente come gli abbassamenti di tensione registrati abbiano valori di grandezza e durata molto simili e siano posizionati inferiormente alla curva di suscettibilità.

Nei tre mesi successivi al periodo suddetto (agosto-ottobre) è stata organizzata un'attività di monitoraggio della Power Quality attraverso l'analizzatore Dranetz 8010. In concomitanza con queste misurazioni, gli utenti finali e il personale addetto alla manutenzione elettrica della struttura si sono impegnati a tenere registri di qualsiasi evento o guasto verificatosi sulle apparecchiature.

Tabella V Cadute di tensione principali (VN< 50%) registrate presso le sbarre MT della Sottostazione Primaria S. Paolo nel periodo dal 23 luglio al 31 agosto 2018

DATA/TIME	DURATION	Vn [kV]	RESIDUAL Vn [kV]	RESIDUAL Vn [%]	RS	ST	TR
27/07/2018 16:30:12:14	00:00:00:12	20.00	6.5	32.27	0	0	0
27/07/2018 16:30:12:84	00:00:00:11	20.00	6.2	31.18	0	0	0
01/08/2018 19:29:39:02	00:00:00:12	20.00	6.4	31.81	0	0	0
01/08/2018 19:29:39:71	00:00:00:11	20.00	6.6	32.77	0	0	0
03/08/2018 18:21:59:58	00:00:00:12	20.00	6.2	30.79	0	0	0
03/08/2018 18:22:00:27	00:00:00:11	20.00	6.3	31.53	0	0	0
12/08/2018 00:16:54:91	00:00:00:12	20.00	6.2	30.93	0	0	0
13/08/2018 17:13:42:59	00:00:00:13	20.00	6.3	31.36	0	0	0
13/08/2018 17:13:48:18	00:00:00:10	20.00	6.4	32.04	0	0	0
25/08/2018 16:59:47:94	00:00:00:12	20.00	6.2	30.78	0	0	0
27/08/2018 06:29:08:91	00:00:00:12	20.00	6.2	31.17	0	0	0
29/08/2018 08:56:33:73	00:00:00:16	20.00	3.5	17.29	0	0	0
30/08/2018 13:54:52:62	00:00:00:13	20.00	6.2	31.22	0	0	0
30/08/2018 13:54:53:42	00:00:00:11	20.00	6.3	31.55	0	0	0

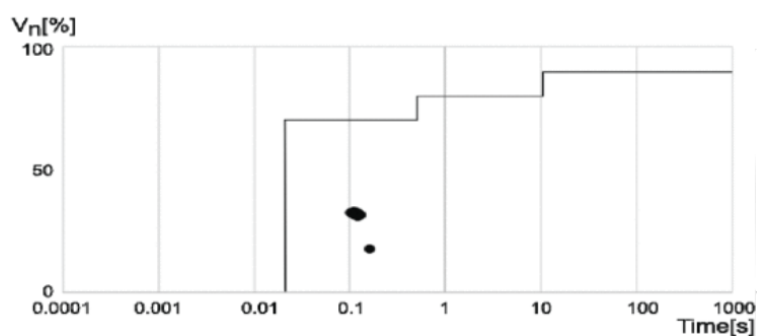


Fig. 65 Grafico a dispersione livello-durata degli abbassamenti di tensione principali per il periodo dal 23/07/2018 al 31/08/2018

L'analizzatore, con risoluzione di 128 campioni/ciclo, è stato configurato per acquisire:

- i) disturbi della forma d'onda;
- ii) disturbi RMS;
- iii) disturbi impulsivi, di tensione e corrente.

Di seguito si riportano i risultati più significativi. In particolare, in figura 66 è possibile osservare le registrazioni della tensione RMS effettuate durante l'attività di monitoraggio tra il 5 settembre e il 23 ottobre, in cui si possono identificare facilmente diversi eventi di abbassamento di tensione. Infine, gli eventi di abbassamento evidenziati in figura 66 sono stati riportati in un tipico grafico a dispersione livello-durata in figura 67.

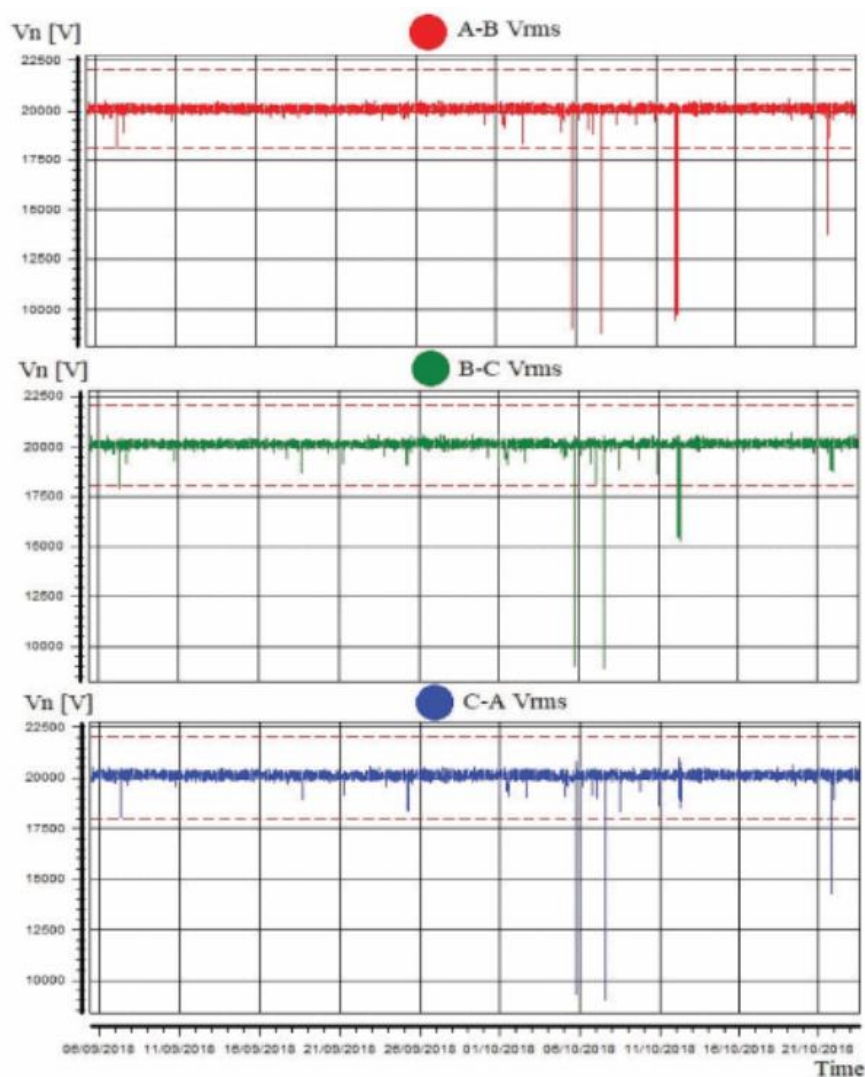


Fig. 66 Grafico della tensione registrata nel periodo dal 05/09/2018 10:19:34,0 al 23/10/2018 12:20:00,0

Alcuni eventi non riescono ad essere classificati nella curva ITI (Information Technology Industry), che fornisce indicazioni di progettazione delle apparecchiature per la suscettibilità ai disturbi di tensione [70].

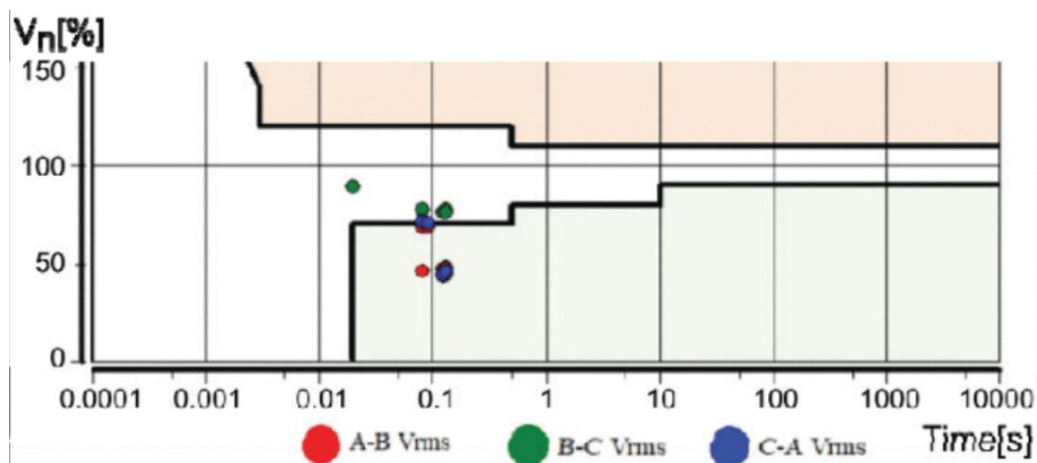


Fig. 67 Grafico di dispersione livello-durata per il periodo dal 05/09/2018 10:19:34,0 al 23/10/2018 12:20:00,0

Nella tabella VI sono stati riportati gli eventi forniti da AReti nel suddetto periodo per confrontarli con i dati campionati dall'analizzatore. Il simbolo "X" indica che l'evento di buco di tensione della relativa fase è stato registrato anche dallo strumento di monitoraggio PQ installato all'ingresso MT del SGAH.

Tabella VI Cadute di tensione principali ( $V_n < 50\%$ ) registrate presso le sbarre MT della Sottostazione Primaria S. Paolo nel periodo settembre-ottobre 2018

DATA/TIME	DURATION	$V_n$ [kV]	RESIDUAL $V_n$ [kV]	RESIDUAL $V_n$ [%]	RS	ST	TR
03/09/2018 18:01:44:47	00:00:00:12	20.00	6.2	31.18	O	O	O
03/09/2018 18:01:45:16	00:00:00:11	20.00	6.3	31.54	O	O	O
05/09/2018 18:17:11:03	00:00:00:13	20.00	9.1	45.28	O	O	O
05/09/2018 18:17:12:90	00:00:00:07	20.00	9.4	47.00	O	O	
07/10/2018 14:28:07:51	00:00:00:12	20.00	8.9	44.35	X	X	X
12/10/2018 04:35:29:03	00:00:00:12	20.00	9.5	47.56	X	X	
12/08/2018 06:04:53:35	00:00:00:11	20.00	9.5	47.25	X	X	
12/10/2018 06:44:38:82	00:00:00:12	20.00	9.7	48.39	X	X	
12/10/2018 09:10:52:32	00:00:00:11	20.00	9.7	48.60	X	X	
21/10/2018 18:52:01:98	00:00:00:08	20.00	13.9	69.36	X		X
21/10/2018 18:52:03:10	00:00:00:08	20.00	13.9	69.73	X		X

Per valutare i costi diretti e indiretti degli eventi PQ negli impianti industriali sono tipicamente utilizzate le linee guida IEEE 1346-1998 [71], [72]. Lo studio condotto in [73] mostra che l'impatto economico degli eventi di PQ possono portare a perdite del 4% del fatturato nell'industria e dello 0,15% nelle aziende di servizi. Un'analisi del costo per valutare le azioni di resilienza può essere effettuata a partire dalla valutazione dei disservizi che i guasti possono provocare. I problemi di Power Quality possono avere un impatto finanziario pesante sul funzionamento dei sistemi di imaging dovuto a diversi fattori [74]:

- lista delle prenotazioni saltate;
- test interrotti o risultati errati;
- riavvio dei sistemi;
- apparecchiature danneggiate.

Ai costi sostenuti per la riparazione della strumentazione medica è anche necessario aggiungere il costo associato alla perdita di entrate per disservizi, in quanto le apparecchiature diagnostiche sono una fonte significativa di entrate per gli ospedali. In tabella VII si confrontano i costi dei test medici svolti presso il Servizio Sanitario Nazionale (SSN) con quelli svolti presso un centro diagnostico privato.

Tabella VII Costi medi nazionali delle scansioni TAC e MRI[75]

DATA/TIME	TAC	MRI
<b>Range nazionale</b>	100-500 €	100-500 €
<b>Media nazionale</b>	200 €	150 €
<b>Durata operazione</b>	10-15 minuti	20-60 minuti
<b>Numero di visite per ora</b>	4-6	1-3
<b>Incasso orario</b>	800-1200 €	150-450 €

La disponibilità di dispositivi connessi intelligenti e a basso costo, in grado di monitorare continuamente i principali indici PQ come IHD, THD, abbassamenti, sbalzi e interruzioni, rende possibile configurare una rete di misuratori distribuiti in vari nodi di distribuzione BT. I quadri elettrici BT sono componenti fondamentali della distribuzione secondaria nel sistema di alimentazione del cliente e sono distribuiti con capillarità all'interno degli utenti finali.

Per tale ragione un'ulteriore attività di ricerca ha riguardato l'implementazione di un sistema di monitoraggio PQ distribuito, strutturata nelle tre seguenti componenti chiave:



- una scheda hardware basata sul chip di power quality ADE 9000 e sulla piattaforma di sviluppo NodeMCU DevKit 1.0;
- una piattaforma Cloud utilizzata per registrare i dati da remoto;
- un sito web per la gestione e la visualizzazione da parte dell'utente finale.

Lo schema funzionale del dispositivo hardware è mostrato in figura 68. La rete elettrica è collegata al chip di misurazione PQ ADE9000 attraverso circuiti di adattamento della tensione, realizzati con partitori resistivi e filtri passa-basso con una frequenza di taglio di 7 kHz. Le correnti sono misurate attraverso dei TA collegati a resistenze di shunt calibrate per ottenere segnali differenziali che non superino 1V di picco ( $0.770 V_{rms}$ ). In questo modo è possibile collegare TA con uscita secondaria standard industriale 5A come 100 / 5A, 50 / 5A ecc. L'utilizzo di TA apribili è ideale per una facile installazione senza scollegare i cavi di impianti e quadri elettrici esistenti.

Il NodeMCU DevKit 1.0, utilizzata per lo sviluppo della piattaforma hardware, è una scheda di sviluppo open source a basso costo basata su SOC ESP-12E WI-fi, ideale per lo sviluppo di applicazioni IoT. La scheda incorpora anche un convertitore USB-TTL per la programmazione e l'invio di dati tramite USB, un regolatore di tensione 3,3 V-5 V e un pulsante di reset. Il codice è stato sviluppato in linguaggio simil C++ utilizzando l'ambiente di sviluppo integrato (IDE) di Arduino.

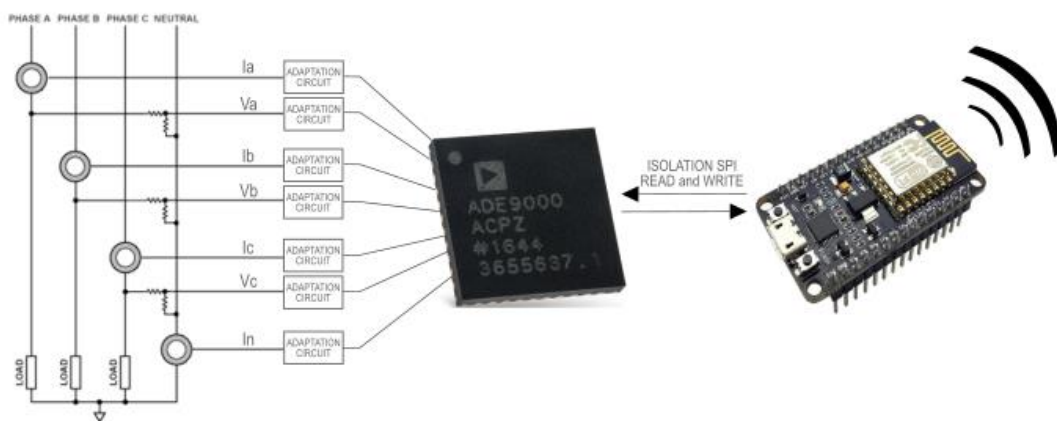


Fig. 68 Schema a blocchi del sistema hardware di Power quality

Il NodeMCU imposta l'SSID e la password della rete Wi-Fi a cui deve essere connesso, gestisce la connessione in completa autonomia: si connette autonomamente alla rete e si riconnette in caso di connessione Internet debole. I dati di misurazione richiesti, a intervalli

regolari, dal master al chip PQ vengono quindi inviati al cloud tramite una stringa JSON utilizzando il metodo HTTP POST.

L'ADE9000, che opera in modalità slave, è collegato al NodeMCU attraverso un collegamento SPI, il quale funge da master e quindi avvia la connessione impostando la velocità di trasmissione dei dati. L'ADE9000 permette di monitorare: buchi e sovratensioni, frequenza, angolo di fase, distorsione armonica totale di tensione e di corrente (VTHD, ITHD), fattore di potenza [76]. L'ADE9000 può essere utilizzato su un sistema trifase o su tre sistemi monofase grazie a sette canali ADC dedicati, che incorporano convertitori  $\Sigma\Delta$  a 24 bit, con campionamento simultaneo.

Il calcolo del THD, disponibile sui canali IA, IB, IC, VA, VB e VC, e il fattore di potenza vengono aggiornati una volta al secondo (aggiornamento ogni 1.024 sec.) utilizzando i valori RMS totali e fondamentali, come di seguito:

$$THD_V = \sqrt{\frac{V_{RMS}^2 - V_{FRMS}^2}{V_{FRMS}^2}}$$

Il chip può controllare se la tensione scende al di sotto di una soglia specificata per un numero di cicli configurato dall'utente o al contrario se la tensione ha superato una soglia per un numero specificato di cicli. Il valore RMS $\frac{1}{2}$  minimo misurato durante il buco viene memorizzato nei corrispondenti registri A, B e C e analogamente il valore di tensione RMS $\frac{1}{2}$  massimo misurato durante lo il superamento della soglia viene memorizzato nei registri corrispondenti. Inoltre, quando la tensione supera il limite minimo in discesa o quello massimo in salita viene generato un interrupt, ciò consente all'utente di calcolare con precisione la durata dello swell o del sag, utilizzando il timer del microcontrollore esterno. Abilitando la funzione di sovracorrente, se una corrente RMS $\frac{1}{2}$  supera la soglia massima, il valore RMS $\frac{1}{2}$  viene memorizzato nel registro corrispondente e viene generato un interrupt. Quando l'utente legge il registro il suo valore viene ripristinato.

Nella modalità “ricampionamento” i dati dei sette canali vengono calcolati e memorizzati nel buffer delle forme d'onda. Con una frequenza di linea di 50 Hz il buffer contiene 80ms di dati campionati, il che implica che il buffer può contenere quattro cicli di linea completi di dati. Nella modalità “trigger base mode” i dati dei sette i canali vengono memorizzati nel buffer in modalità continua fino a quando non si verifica un evento di trigger come un calo o uno sbalzo di tensione. In questa modalità è possibile sincronizzare il buffer della forma d'onda di 32ms,

in modo che il buffer sia centrato attorno all'evento o che il buffer registri solo la forma d'onda prima dell'evento.

Le forme d'onda campionate semplificano l'esecuzione in un processore esterno dell'analisi armonica, come nel caso della Trasformata di Fourier (FT). Quest'ultima converte il segnale nel dominio del tempo in un segnale rappresentato nel dominio della frequenza. Con il segnale acquisito in valori discreti è possibile calcolare la Trasformata di Fourier Discreta (DFT), ideale per essere elaborata ad esempio nei Web server. La DFT di una sequenza  $x_i$  di lunghezza  $N$  è definita dalla seguente equazione [77]:

$$X_K = \sum_{i=0}^{N-1} X_i e^{-j2\pi ik/n}$$

per  $k = 0, 1, 2, \dots, n-1$ .

Per ridurre la complessità computazionale è possibile utilizzare la trasformata rapida di Fourier (FFT). L'uso della FFT per l'analisi della frequenza implica che la frequenza più alta analizzabile ( $f_{max}$ ) rispetto alla frequenza di campionamento ( $f_s$ ) sia calcolata utilizzando il teorema di Nyquist, dove:

$$f_{max} = \frac{f_s}{2}$$

La risoluzione in frequenza è legata al tempo totale di acquisizione  $T$  in maniera inversa:

$$\Delta f = \frac{1}{T} = \frac{f_s}{N}$$

Il chip, che fornisce 512 campioni in 80ms, ha una frequenza di campionamento di 6,4 kHz, che si traduce in  $\Delta f = 12,5$  Hz e  $f_{max} = 3,2$  kHz. L'output dello spettro FFT è complesso. Ogni componente di frequenza ha un'ampiezza e una fase. Dove non è necessaria l'informazione di fase, come nel caso degli analizzatori di spettro, viene visualizzato il contenuto energetico del segnale alle sue frequenze.

Il server è una parte essenziale di qualsiasi applicazione IoT che mira a sfruttare il potenziale di Internet fornendo un meccanismo di comunicazione da applicazione ad applicazione. A tal fine, in questa piattaforma è stato sviluppato un server web insieme a un database SQL per memorizzare tutte le informazioni che il server riceve dall'hardware progettato. Il web server permette di far interagire applicazioni sviluppate con diversi linguaggi di programmazione, funzionanti su sistemi operativi eterogenei. Il RESTful Web Service scelto ha il compito di fornire le risorse richieste dai client attraverso le operazioni di base dell'HTTP per eseguire query di lettura e/o scrittura sulle tabelle del database. Il principio di utilizzo esplicito dei metodi HTTP legati all'approccio REST permette di sfruttare i metodi predefiniti di questo protocollo, ovvero GET, POST, PUT e DELETE per raccogliere, modificare, aggiungere o cancellare i dati presenti nelle tabelle di un database.

Il database MySQL è stato impostato e popolato tramite il programma phpMyAdmin. Il sito web che permette di rendere fruibili tutte le informazioni salvate nel database, dandone una rappresentazione mirata ed efficace sia per la valutazione in tempo reale che per lo studio e l'analisi dei fenomeni rilevati, permette anche di esportare i dati in formato CSV. Nella home è possibile visualizzare contemporaneamente gli ultimi dati salvati e lo storico, infatti è possibile scegliere mediante un menu a tendina l'intervallo tra 1 ora, 1 giorno, 1 settimana, 1 mese e 1 anno. La realizzazione della pagina web è stata implementata attraverso i classici quattro linguaggi di programmazione [78]:

- HTML (HyperText Markup Language): linguaggio di formattazione che determina come deve essere strutturata la pagina;
- CSS (Cascading Style Sheets): permette di definire la formattazione delle pagine html separatamente dal loro contenuto e dalla loro struttura;
- JavaScript: linguaggio di programmazione lato client che gestisce le operazioni dell'utente con la pagina;
- PHP: utilizzato nelle pagine html per la creazione di pagine web dinamiche. I codici in PHP vengono utilizzati per richiedere e / o offrire servizi REST.



Fig.69 Sistema IoT di Power Quality

La figura 70 mostra la forma d'onda della tensione acquisita durante un'interruzione quando il dispositivo era impostato in modalità ricampionamento. Questa funzione non è implementata propriamente per acquisire guasti, infatti lo scopo principale della modalità è di acquisire 4 cicli del segnale per inviarli alla piattaforma di calcolo DFT. Una volta acquisiti e salvati i dati dei 4 cicli, il NodeMCU deve abilitare l'acquisizione di ulteriori 4 cicli. In figura 71 viene illustrato un buco di tensione. Quando il valore di tensione RMS scende al di sotto del valore di soglia, l'Ade9000, impostato in "Center capture Around trigger", continua a campionare il segnale dopo l'evento trigger per ulteriori 16 ms prima di fermarsi e genera un segnale di interrupt per comunicare l'evento al NodeMCU.

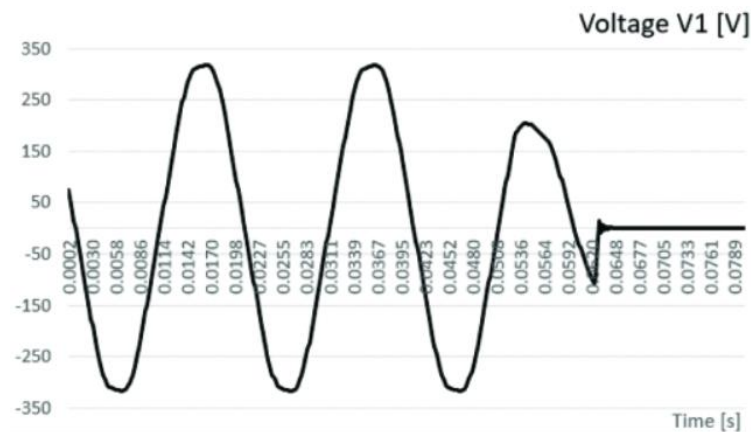


Fig. 70 Forma d'onda registrata in modalità ricampionamento per un evento di interruzione.

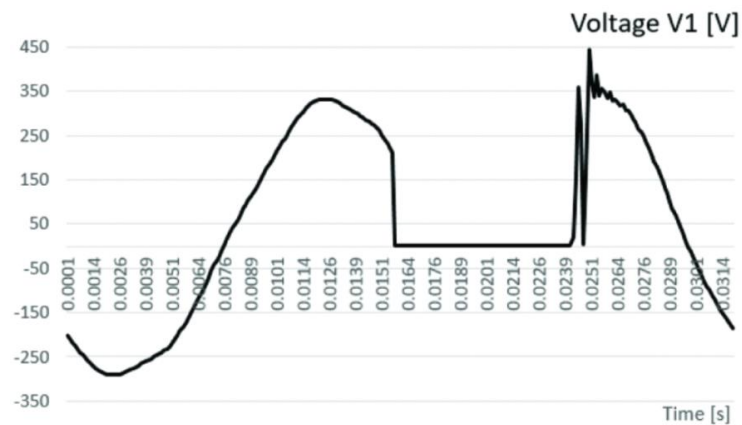


Fig. 71 Buco di tensione registrato in modalità trigger base mode

In conclusione, questa piattaforma basata sull'IoT, utilizzata per implementare a basso costo una rete di monitoraggio PQ distribuita in un sistema di distribuzione elettrica d'utenza, permette facilmente di mettere a disposizione dei dati registrati attraverso il monitoraggio in tempo reale degli eventi sulla forma d'onda di tensione e corrente. Ciò è finalizzato a supportare attività di diagnostica, particolarmente focalizzate sulle zone di carico critiche, in modo da aumentare la resilienza complessiva del sistema e diminuire le possibilità di guasti.

## 3.2 Efficientamento delle risorse e dei consumi

Gli obiettivi principali richiesti dai clienti, ossia il minor numero possibile di interruzioni e la loro più breve durata ammissibile, hanno spinto i principali operatori elettrici ad automatizzare e controllare a distanza le reti elettriche. Ciò ha portato all'aggiornamento e ad un notevole ammodernamento della rete elettrica, rendendola capace di supportare la generazione distribuita e presentare colonnine di ricarica per la mobilità elettrica. In passato, i progettisti elettrici BT garantivano l'affidabilità degli impianti attraverso un sovradimensionamento della rete elettrica e la ridondanza sia degli apparecchi che della rete capillare. Oggigiorno, gli obiettivi di massimizzazione dei risultati e di riduzione dei costi possono essere raggiunti con l'utilizzo di nuove tecnologie IoT, dotate di semplici controlli remoti, o di logiche di automazione [79].

La Direttiva Europea 2012/27/UE, che mirava a promuovere l'efficienza energetica attraverso misurazioni energetiche più dettagliate e la consapevolezza dei consumi, è stata recepita con il Decreto Legislativo 102/2014. Con la delibera 646/2016/R/eel, pubblicata in data 11 novembre 2016, l'AEEGSI (Autorità per l'Energia Elettrica, il Gas e il Sistema Idrico) ha approvato i criteri per il riconoscimento tariffario dei costi nello smart metering di seconda generazione (2G smart metering). Dopo 15 anni, e-distribuzione SpA, il distributore italiano di energia elettrica, ha iniziato a sostituire i propri contatori intelligenti di prima generazione con la versione 2.0, che rendeva disponibili le misure ogni quindici minuti su base giornaliera. Questi nuovi dispositivi permettono, oltre alla telelettura e al distacco da remoto, anche di inviare dati ai dispositivi del cliente attraverso la tecnologia power-line in modo da conoscere istantaneamente la potenza assorbita e dando la possibilità di scaricare i dati. Entro il 2024 dovrebbero essere sostituiti 41 milioni di contatori intelligenti.

Il governo del Regno Unito ha posticipato il termine per la fornitura di nuovi contatori intelligenti di energia da 13 miliardi di sterline di 4 anni al 2024 [80]. A giugno 2019 Smart Energy GB, la società incaricata della campagna dei contatori intelligenti, aveva già installato in Gran Bretagna 15 milioni di contatori intelligenti ed avanzati. In totale, il progetto prevede l'installazione di oltre 53 milioni di contatori intelligenti sia nelle case che nelle piccole imprese del Regno Unito.

Nei sistemi elettrici d'utenza possono essere posizionati anche dei sistemi di supervisione, che permettono di monitorare lo stato degli impianti tecnici comodamente dalla sala controllo e di rispondere prontamente alle richieste di modifica dei parametri. Questa tecnologia aumenta

in modo esponenziale non solo la produttività, ma anche la resilienza, in quanto consente di intervenire senza remore su qualsiasi anomalia o guasto. La piattaforma è stata realizzata al fine di monitorare gli impianti tecnologici, riducendo sensibilmente i costi operativi e le risorse umane.

Per tale ragione, i vari nodi dell'impianto come le cabine e i quadri devono essere controllati monitorando i segnali provenienti da sensori locali, temperatura ambiente, sensori di allagamento, contatto magnetico per porte e finestre, rilevatore di fumo, sensore di presenza e sensore di livelli di illuminazione, ed attraverso la misura delle principali grandezze elettriche. Per raggiungere tale obiettivo, durante il dottorato sono state sviluppate due piattaforme: la prima utilizzava dei contatori commerciali con interfaccia di uscita, la seconda integrava il contatore intelligente.

Il primo progetto completo del sistema di supervisione prevedeva un singolo dispositivo di supervisione installato in maniera poco invasiva all'interno dei quadri elettrici e connesso tramite una rete locale (LAN) o Wi-Fi, che è tipicamente disponibile negli edifici. Se le distanze da coprire con la rete IoT sono maggiori è possibile adottare facilmente antenne wireless punto-punto o punto-multipunto in quanto i cavi di collegamento Ethernet non possono trasferire in modo affidabile i dati a distanze superiori a 100 m.

La piattaforma IoT in questo caso è composta da:

- Apparato di supervisione su base Raspberry sviluppato per connettersi con i contatori digitali;
- server centralizzato con database;
- app Web e app mobili.

L'algoritmo che viene eseguito dal Raspberry è stato scritto in ambiente Python: questo legge sfruttando la libreria PyModbus i valori dei contatori di energia tramite la porta RS485. Successivamente salva questi dati nella scheda SD interna e inoltre li invia tramite la connessione Internet al server centrale. Ciò fa sì che in caso di collasso della rete internet o di problema del server i dati sono disponibili localmente ed il sistema continua a monitorare i vari ingressi.

Il contatore scelto per l'applicazione è il contatore di energia trifase EASTRON 630MCT che utilizza trasformatori di corrente con rapporto di trasformazione  $x/5$  A, dove  $x$  è la corrente massiva che circola nella linea monitorata. I dispositivi di supervisione così sviluppati sono in grado di monitorare tensioni, correnti, potenza attiva/reattiva/apparente ed energia e di



trasferire dati ad un database centralizzato. Il vantaggio di questo energy-meter, oltre al costo contenuto, è la presenza della porta RS485 da cui è possibile prendere i dati.

L' RS485 è lo standard di trasmissione seriale usato che fornisce una trasmissione half-duplex su una linea bilanciata per distanze fino a 1.2 km, mentre il protocollo Modbus RTU viene usato per l'implementazione della comunicazione RS485. Il protocollo Modbus offre al master la scelta di indirizzare i messaggi a specifici dispositivi slave o di comunicare con tutti gli slave simultaneamente tramite dei messaggi composti. Ogni dispositivo slave ha un ID Modbus unico. La richiesta Modbus, inviata solo dal master, è composta dall'indirizzo del dispositivo, dal codice funzione che definisce l'azione richiesta, dai dati inerenti la richiesta e da un campo di controllo per gli errori come il CRC. La risposta Modbus sarà data invece data dagli Slave.

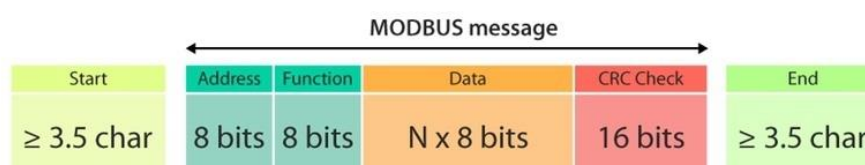


Fig. 72 Messaggio Modbus

Per poter testare il sistema IoT di controllo, due dispositivi di supervisione sono stati collocati nei principali quadri elettrici BT dell'edificio amministrativo di ingegneria e del Laboratorio di Sistemi Elettrici e Motori Elettrici. A causa del terremoto del 2009, la struttura del sito di ingegneria dell'Aquila ha subito gravi danni. I laboratori di ingegneria elettrica come gli uffici amministrativi sono stati trasferiti in diverse sedi temporanee. Nella zona industriale della città si trovano gli Uffici e il Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica, mentre nei pressi della sede storica è tornato il Laboratorio di Sistemi di Energia e Motori Elettrici. La struttura organizzativa come la manutenzione e la gestione delle soluzioni è rimasta la stessa di prima del disastro, ma gli elettricisti incaricati del servizio di manutenzione del reparto elettrico attualmente devono gestire due sedi a circa 13 km di distanza come visibile in figura 73. Per tale ragione il personale di manutenzione non può visionare ed intervenire tempestivamente sull'intero sistema universitario.

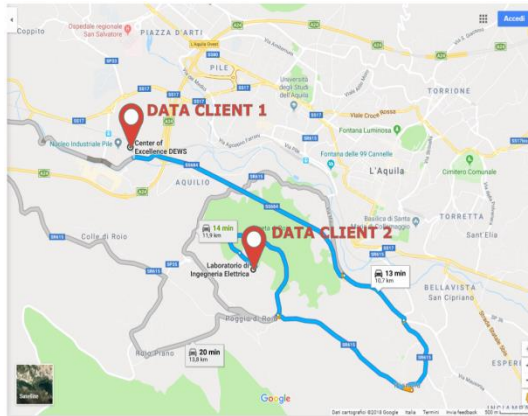


Fig. 73 Geolocalizzazione dei dispositivi di supervisione

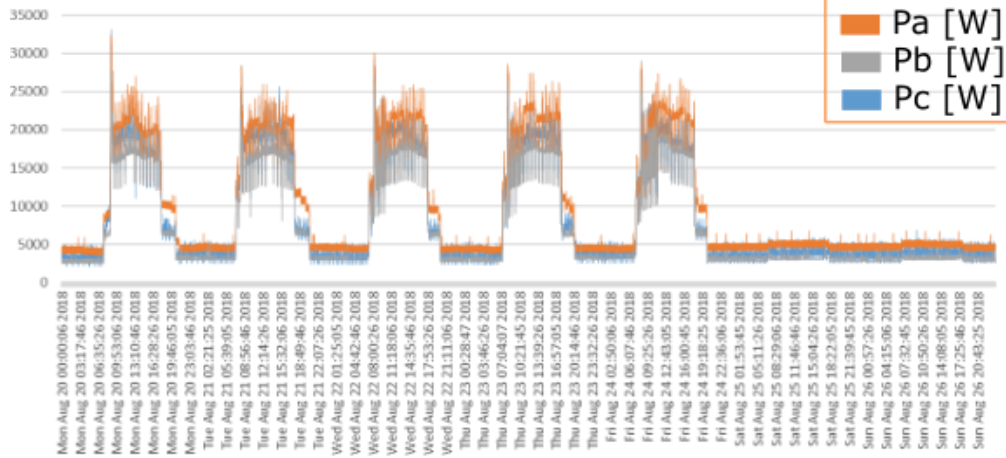
I dispositivi sono stati connessi alla rete Wi-Fi di Ateneo con protezione WPA2-Enterprise tramite un processo di autenticazione. Questa soluzione, che ha occupato pochissimo spazio all'interno del quadro elettrico, è stata installata in loco in poche ore ed ha già portato grandi vantaggi. Infatti, il manutentore ha potuto vedere il corretto funzionamento degli impianti direttamente dal suo ufficio, notando in alcune ore basse tensioni e dalla visualizzazione della cronologia dei dati il sistema ha mostrato come la rete d'utenza sia molto sfasata di notte, quando il servizio di illuminazione esterna è il carico maggiore e non è richiesta alcuna persona per monitorare le installazioni elettriche.



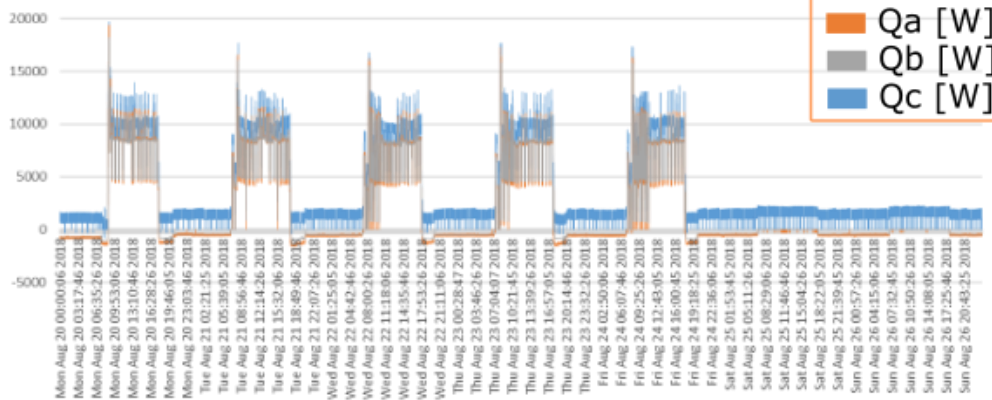
Fig. 74 Dispositivo di supervisione installati nel quadro elettrico del laboratorio Edison dell'Università degli Studi dell'aquila.

La potenza attiva, reattiva e il fattore di potenza, registrato dal dataclient 1 nel periodo 20-26 agosto 2018 sono illustrate in figura 75. I dati sono stati campionati a 1 Hz con frequenza di aggiornamento del contatore di circa 1.5 secondi.

## POTENZA ATTIVA



## POTENZA REATTIVA



## FATTORE DI POTENZA

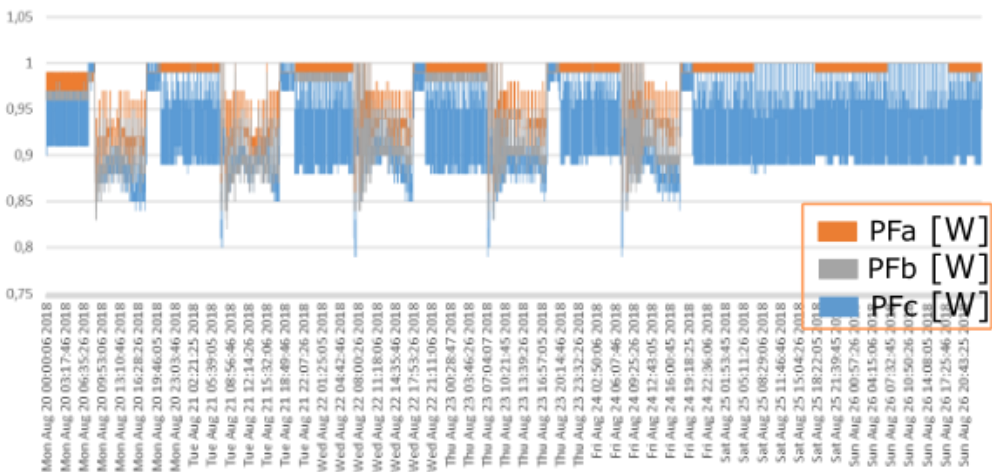


Fig. 75 Potenza attiva, potenza reattiva e fattore di potenza registrati dal dataclient 1 nel periodo 20-26 agosto2018

In commercio esistono diversi contatori di energia monofase e trifase, tuttavia solitamente sono realizzati con sistemi chiusi e hanno interfacce utente standard, che non possono essere modificate in base alle esigenze di un grande sistema elettrico. Tra gli articoli di ricerca, si trovano molte piattaforme che sviluppano applicazioni energy-meter IoT monofase e trifase tramite l'uso di microcontrollori e SOC (System On Chip). La maggior parte di queste schede utilizzano gli ADC integrati nel SOC per risparmiare sui componenti, ma ciò va a discapito della qualità del dato campionato.

Nel caso in esame, per aumentare la risoluzione, invece di utilizzare l'ingresso analogico dei microcontrollori, è stato utilizzato il chip Analog Device ADE 9000, appositamente progettato per essere usato in applicazioni di contatori di energia. Per evitare la perdita di dati e ridurre le incertezze di misura, al microcontrollore è stata lasciata solo la possibilità di leggere i risultati finali calcolati dall' ADE9000 ed il compito di gestire la connessione Wi-Fi ed inviare i dati pacchettizzati in una stringa JSON utilizzando HTTP / Server REST.

Per fornire una soluzione ai problemi di monitoraggio, è stata scelta la stessa soluzione hardware della Power Quality vista precedentemente, dove è stato modificato opportunamente il codice del NodeMCU e l'interfaccia grafica delle pagine WEB. La piattaforma hardware per il primo test è mostrata in figura 76.

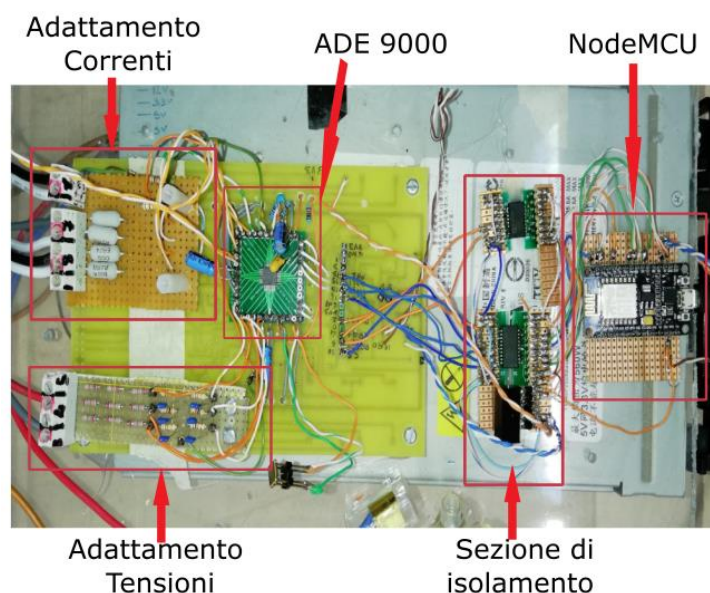


Fig.76 Contatore intelligente per il primo test

L'ADE 9000 fornisce le misurazioni RMS calcolate a metà ciclo ( $RMS_{1/2}$ ) o su un intervallo di 10 cicli secondo lo standard IEC 61000-4-30 classe S. I dati calcolati vengono quindi

registrati e sono disponibili per la lettura tramite SPI da parte del NodeMCU rispettivamente ogni 10ms e 200ms. I valori RMS di corrente e tensione vengono calcolati elevando al quadrato il segnale in ingresso, poi filtrando attraverso filtri passa-basso il risultato ottenuto ed infine calcolando la radice quadrata del risultato dell'integrale, come mostrato nelle seguenti equazioni:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt}$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt}$$

La potenza attiva totale viene ottenuta moltiplicando le rispettive forme d'onda di tensione e corrente e successivamente filtrando il risultato. La potenza reattiva, invece, viene calcolata moltiplicando il segnale di tensione per il rispettivo segnale di corrente sfasato di 90° rispetto alla fondamentale e a tutte le armoniche, poi il risultato viene filtrato con un filtro passa basso. La potenza apparente viene ricavata moltiplicando la tensione efficace RMS per la corrente RMS corrispondente e quindi applicando una correzione del guadagno. Infine, l'ADE9000 utilizza un algoritmo proprietario per estrarre le componenti alla frequenza fondamentale di 50 Hz.

L'ADE9000, che opera in modalità slave, invia i dati tramite SPI richiesti dal master NodeMCU. Utilizzando l'ADE il codice che è stato implementato non deve preoccuparsi di fare calcoli complessi o di rispettare i tempi di campionamento, ma ha solo il compito di fare da mezzo di trasporto dei dati dall'ADE al Cloud gestendo la connessione Wi-Fi.

Lo strumento è stato tarato durante le prove di laboratorio con il FLUKE CALIBRATOR 5100B per impostare i registri di guadagno ed i fattori di correzione influenzati dalle caratteristiche intrinseche del chip e dal circuito di adattamento. La calibrazione con lo strumento ha risolto la maggior parte dei problemi legati all'accuratezza dei risultati di misura e ha consentito una valutazione degli algoritmi di elaborazione dati implementati nel software DSP integrato, con i relativi errori che incidono sul deterioramento dell'accuratezza dello strumento.



Fig.77 Calibratore FLUKE CALIBRATOR 5100B

La scheda hardware e il servizio WEB permettono di analizzare le forme d'onda inviate da remoto e di creare grafici opportuni al servizio di supervisione. I messaggi scambiati tra NodeMCU e il Web Server sono stati ottimizzati per ridurre al minimo le risorse di rete e il consumo dei dispositivi. A tal fine è stata ridotta anche la frequenza di trasmissione continua dei dati energetici. Questa frequenza può essere modificata anche direttamente dall'utente modificando un valore sul database, tuttavia si è visto che inviare tutte le misure con un aggiornamento dei grafici nell'ordine della decina di secondi è un buon compromesso.

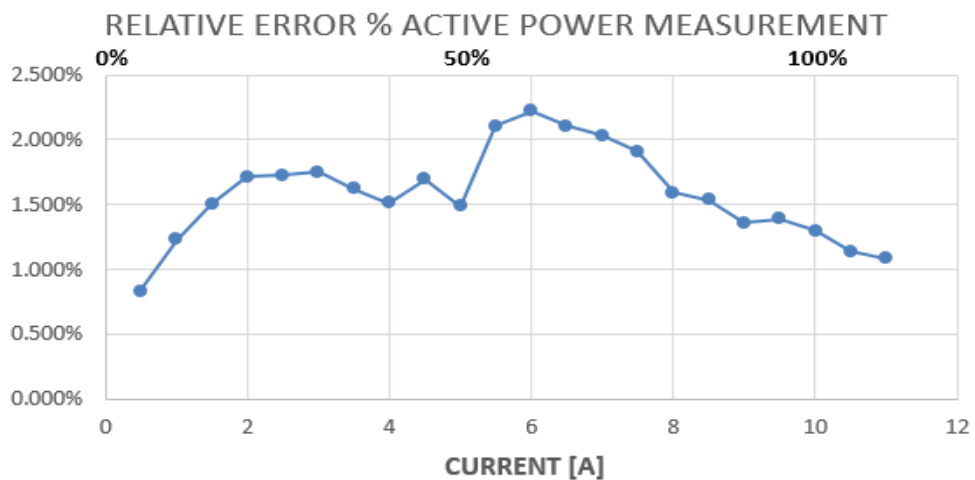


Fig.78 Risultato dei test di valutazione dell'errore di misura della potenza attiva

In conclusione, le piattaforme sviluppate possono essere considerate un supporto significativo alle attività di gestione della manutenzione, in quanto consentono di migliorare la disponibilità di potenza e l'affidabilità dei sistemi di alimentazione di grandi clienti, al fine di rendere il sistema elettrico d'utenza resiliente. I vantaggi che possono derivare da una gestione intelligente e informatizzata dei vari sistemi tecnologici dell'azienda sono oltremodo evidenti e di facile comprensione, quali:

- miglioramento del comfort;
- praticità del controllo delle reti tecnologiche presenti;
- miglioramento della sicurezza;
- risparmio sui costi di manutenzione.

Inoltre, il passaggio alle rinnovabili ha inevitabilmente portato ad una complessità nella gestione della rete elettrica e dei servizi di bilanciamento, pertanto la digitalizzazione dei flussi energetici, abbinata ai sistemi di accumulo e all'intelligenza artificiale, sarà fondamentale per la gestione degli impianti prosumer al fine di sfruttare al meglio le principali tendenze tecnologiche nel prossimo futuro dell'energia.

La ricerca della caratterizzazione del carico può essere di grande utilità per le seguenti figure:

- progettista: per evitare il sovradimensionamento del sistema;
- progettista e distributore: per scegliere le strategie di sviluppo della rete elettrica;
- prosumer: per avviare attività di controllo, monitoraggio, risparmio e accumulo.

### 3.3 Gestione della manutenzione e degli allarmi

Per soddisfare le richieste di sicurezza, comfort, affidabilità ed efficienza di un impianto di utenza sono necessari sistemi tecnologici interconnessi e ad alta resilienza. Molti sistemi elettrici già presenti hanno propri standard e protocolli di comunicazione specifici dell'azienda o del settore.

Nelle aziende, così come nelle strutture commerciali e industriali, dove è presente un gran numero di persone contemporaneamente, si ha la necessità di garantire tutte le forme di energia come quelle elettrica e termica, anche per garantire il funzionamento dei sistemi di sicurezza e protezione antincendio 24 ore su 24. Oltre a ciò, i malfunzionamenti tecnici devono essere rilevati immediatamente e chiaramente segnalati al responsabile del servizio di manutenzione, al fine di ridurre i disservizi, bloccare il progressivo fermo degli impianti e ripristinare tutto nel minor tempo possibile.

All'interno delle aziende di medie e grandi dimensioni si trovano anche più di 100 tipologie di apparati elettrici eterogenei monitorati, azionati e gestiti separatamente come impianti per la sicurezza, sistemi di allarme, controlli di accesso, alimentazione di emergenza, ventilazione, sorveglianza, raffreddamento, ma anche ascensori, scale mobili, sistemi di pompaggio e filtrazione acque [81]. Risulta evidente quindi che l'interazione tra l'automazione dell'edificio, la gestione del rischio intrinseca alla tecnologia e il giro di informazioni importanti sia altamente consigliata [82]. In questa direzione, la rete Internet potrebbe essere un buon mezzo per veicolare tutti i dati provenienti da questi sistemi in un unico sistema centrale a costo contenuto e a prestazioni elevate.

La supervisione dei sistemi di controllo e comando consente di mantenere l'apparecchiatura remota costantemente monitorata, inoltre presenta numerosi vantaggi, che possono essere così riassunti [83]:

- riduzione/annullamento dei fuori servizio: la segnalazione immediata di malfunzionamenti, l'analisi da remoto ed i telecomandi rendono gli interventi più tempestivi e mirati, evitando spesso l'invio di personale tecnico;
- maggiore sicurezza: la telediagnosi evita situazioni che compromettono la sicurezza del personale e dell'ambiente;
- miglioramento dei piani di manutenzione;
- definizione più razionale degli aspetti di natura contrattuale;



- organizzazione migliore del personale di sorveglianza, di intervento e di manutenzione;
- analisi delle prestazioni degli impianti;
- individuazione delle interdipendenze tra i difetti.

Quindi, la necessità di monitoraggio remoto di tali sistemi tecnologici per fornire agli utenti rilevamenti di guasti, anomalie, avvertenze e classificazioni del carico per la manutenzione predittiva, al fine di aumentare la resilienza, deve essere perseguita con sistemi IoT aperti e facilmente riconfigurabili per adattarsi alle varie esigenze. A tale scopo, durante il percorso di dottorato è stato sviluppato un sistema di supervisione a basso costo progettato intorno al Raspberry pi3. Questa piattaforma è nata per connettere le uscite digitali e non di vari sistemi tecnologici a un PC server, implementando così un file sistema di supervisione distribuito. Il sistema nasce con l'obiettivo principale di raccolta istantanea di guasti o segnalazioni di allarme dalle varie centrali di allarme e di controllo dei numerosi apparati elettrici presenti nella struttura. Il server centrale aggrega tutti gli eventi dei client distribuiti e permette l'accesso remoto simultaneo in tempo reale a tutti gli operatori registrati. In questo modo il centro operativo della struttura, può acquisire, elaborare e visualizzare dati anche da migliaia di dispositivi e fonti in maniera facilitata e visivamente più performante.

La piattaforma hardware di supervisione è progettata per essere collegata al connettore GPIO del Raspberry Pi 3B, consentendo di rilevare e controllare qualsiasi sensore dotato di un relè o contatto di uscita. Ciò permette di rilevare lo stato di un interruttore, ad esempio di in finecorsa o di un sensore a pressione, dei sensori di temperatura o dei rilevatori di fumo. Una volta individuato questo stato, il software caricato sul server determina come risponderà il sistema. Inoltre, tutti i cambi di stato del sensore sono memorizzati nella scheda SD locale con l'orario dell'evento al fine di essere disponibili da remoto in qualsiasi momento [84].

Partendo dalla disposizione dei 40 pin, è stata sviluppata una scheda PCB dotata di un'uscita RS485, 16 ingressi digitali collegabili tramite pratici morsetti e due relè di potenza con contatti NC e NO. L'intera piattaforma è stata racchiusa all'interno di una scatola di plastica con pratico supporto DIN 8 moduli. Nella figura 79 è riportato il dispositivo di supervisione che è la componente elementare della piattaforma. Il sistema di supervisione è alimentato direttamente dalla tensione di linea 230V, in quanto all'interno della scatola è stato posizionato anche l'alimentatore switching da 2,5A che alimenta la scheda a 5V. Nella parte superiore della scatola, visibile dal quadro elettrico ospitante, tre led indicano il normale funzionamento, anomalie del sistema di supervisione o guasti catturati sui pin di ingresso

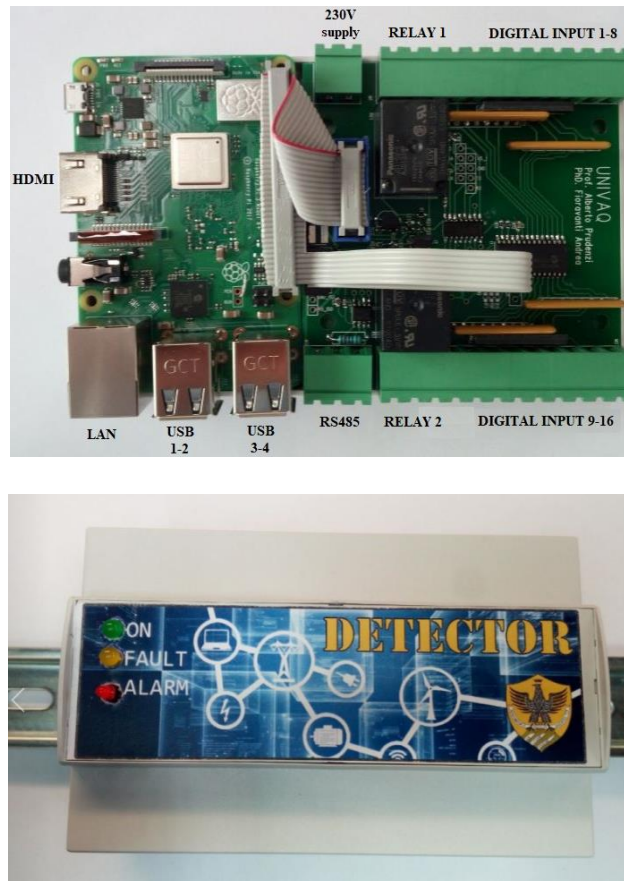


Fig.79 Sistema di supervisione Detector.

In figura 80 viene mostrato un layout semplificato del sistema di supervisione che prevede un dispositivo di supervisione singolo (SV) installato vicino al dispositivo del sistema tecnologico, che deve essere collegato al sistema di supervisione. Questi dispositivi vengono collegati a loro volta tra loro tramite una rete locale (LAN) in configurazione a stella via cavo e via Wi-Fi.

L'architettura del software cloud è basata su un database SQL associato a un servizio REST scritto in Python accessibile sia da un'applicazione mobile che da un'applicazione web Javascript. Il servizio è basato su architettura REST che stabilisce un insieme di principi con cui è possibile progettare i servizi Web. Nel progetto in esame, il servizio REST è basato sul protocollo HTTP (s) in modo da fornire le API basate sui metodi standard (GET, POST, ...) (figura 81).

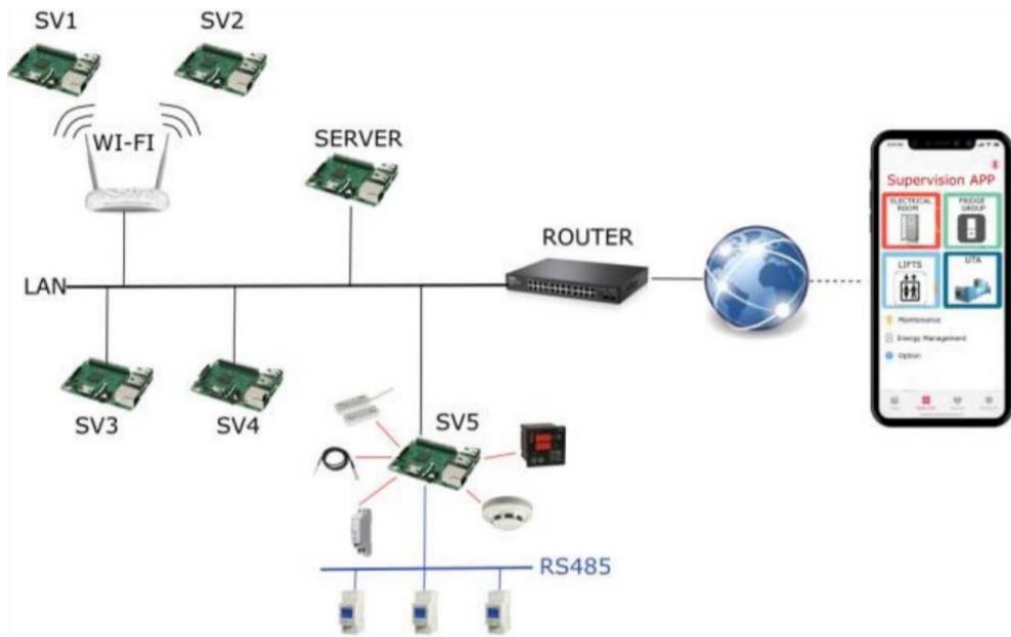


Fig.80 Layout del sistema di supervisione proposto

L'intera architettura IoT è strutturata nelle parti seguenti:

- piattaforma hardware;
- struttura di back-end;
- interfaccia front-end.

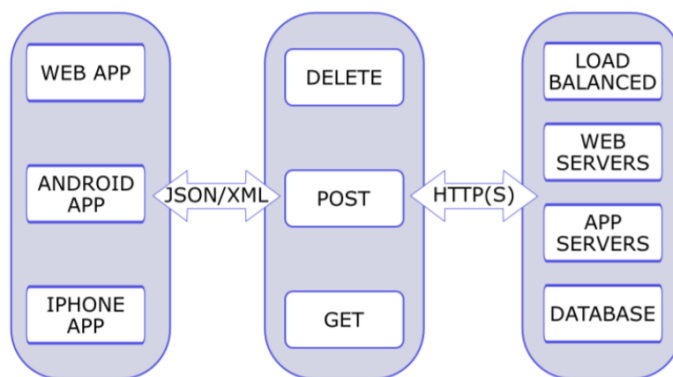


Fig. 81 - Architettura API REST

In un'infrastruttura complessa sono molti i dispositivi tecnologici che possono essere supervisionati attraverso tale sistema IoT sovrapposto. Per semplificare la distribuzione della piattaforma a più apparecchi è stato considerato di collegare il sistema solo ai contatti puliti (del tipo a relè) a disposizione dell'utente per segnalare anomalie, guasti interni o allarmi, in quanto presenti in tutte le centraline di controllo installate; a parte HVAC (riscaldamento,

ventilazione condizionamento e trattamento aria), che tipicamente implementano sistemi di telecontrollo più complessi.

Queste uscite possono essere facilmente raccolte ed elaborate dal sistema di supervisione proposto senza la necessità di conoscere alcun protocollo di comunicazione o standard tecnologici proprietari. Per fornire maggiori dettagli di seguito vengono riportati degli esempi per l'implementazione del sistema di supervisione proposto.

#### A. Sistema di distribuzione elettrica

La distribuzione dell'elettricità tipica di un impianto d'utenza prevede l'utilizzo di diverse cabine di distribuzione MT / BT (CD). Un tipico schema del sistema di distribuzione è riportato in figura 82.

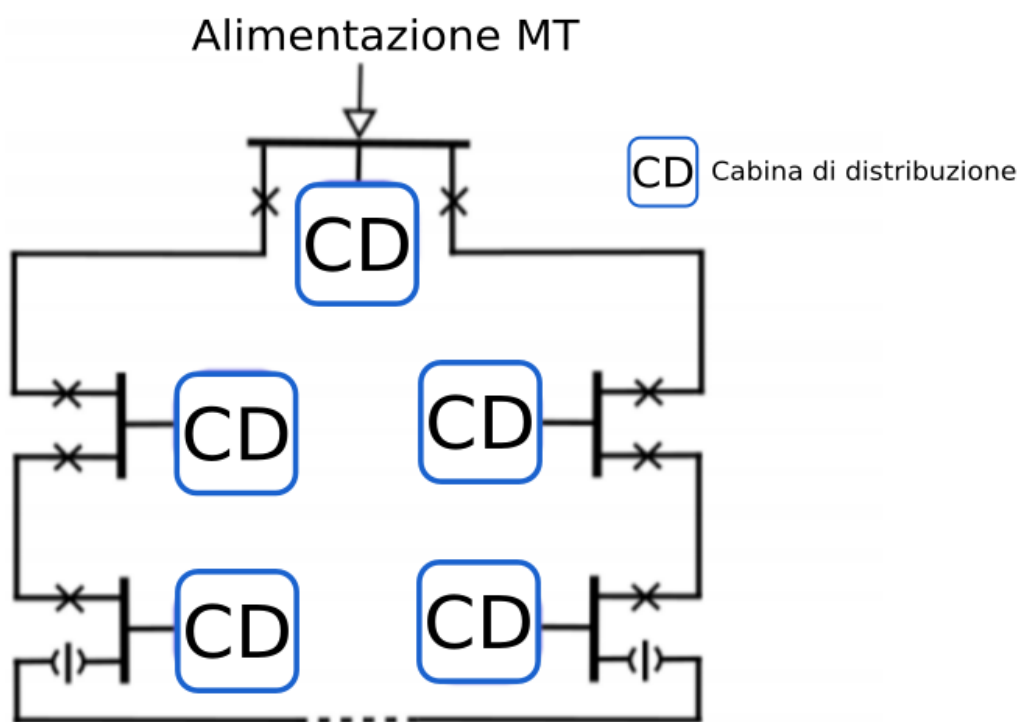


Fig. 82 Tipico schema di distribuzione MT/BT

L'anello di distribuzione di media tensione, che collega le varie cabine di distribuzione MT/BT, è gestito con un punto normalmente aperto (NOP), che divide l'anello in due reti radiali, le quali collegano le diverse CD attraverso uno schema entra/esci. Il principale scopo del NOP è di garantire la selettività per i sistemi di protezione e di ridurre l'impatto dei guasti di rete limitando il numero di CD influenzate dall'intervento di una protezione.

La cabina di distribuzione è formata tipicamente da un quadro MT (20kV), trasformatori MT/BT (duo o più in configurazione parallelo e non) e un quadro principale di bassa tensione strutturato in due o tre sbarre separate ma interconnesse, la prima è detta sbarra di alimentazione normale, la seconda sbarra di alimentazione di emergenza, quest'ultima viene generalmente connessa anche ad un motogeneratore diesel, la terza detta sbarra di continuità, viene connessa a un gruppo di continuità locale (UPS). Lo schema elettrico tipico di una CD è illustrato in figura 83.

Il sistema di supervisione proposto deve controllare il corretto funzionamento della CD e allarmare quando si verificano anomalie o guasti. A questo scopo sono stati connessi i seguenti componenti della cabina [85]:

- relè di presenza tensione sulle sbarre MT (V1), realizzato con un relè con bobina a 100V connesso all'uscita del TV;
- segnale di allarme dalla centralina di controllo della temperatura dei trasformatori di tipo a secco (A1);
- relè di monitoraggio della tensione minima, tensione massima, inversione delle fasi e mancanza di una fase sulle sbarre BT normali (V2);
- segnali di allarme del sistema di rifasamento automatico (A2);
- segnali di allarme dalla scheda di comando del gruppo elettrogeno (A3);
- relè di monitoraggio della tensione sulle sbarre di emergenza (V3);
- segnali di allarme dalla scheda di controllo dell'UPS (A4);
- relè di monitoraggio della tensione sulla sbarra alimentata da UPS (V4).

I punti di monitoraggio sopra menzionati vengono illustrati nel dettaglio in figura 83.

#### B. Gruppi elettrogeni diesel

Le aziende e le industrie di grandi dimensioni, in genere, dispongono di generatori di backup in loco per la fornitura di elettricità in caso di guasti alla rete locale. L'alimentazione di emergenza va così ad alimentare solo quei carichi che devono essere ripristinati entro decine di secondi in modo da mantenere i servizi essenziali o di maggior tutela. Il gruppo elettrogeno è tipicamente dotato di un pannello di controllo composto da un microcontrollore che analizza i parametri di feedback della macchina dati dai vari sensori installati, in modo da autoregolarsi e stabilizzare il funzionamento tramite regole di controllo precompilate.

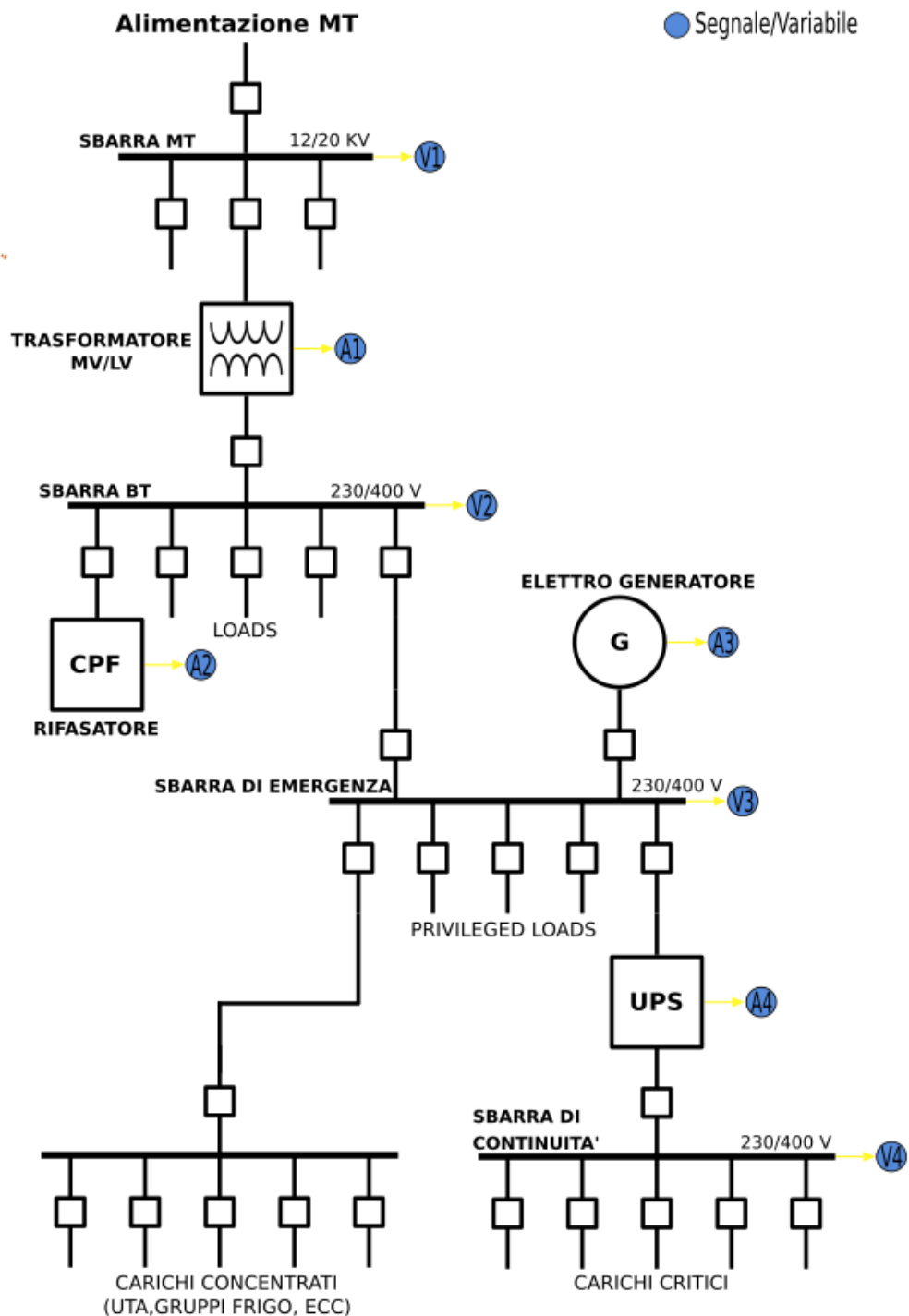


Fig. 83 Tipico schema di una cabina MT/BT

Questi pannelli prevedono diverse uscite digitali con differenti protocolli di comunicazione in modo da poter dialogare con sistemi di controllo remoti e sistemi SCADA. I contatti a relè presenti possono essere collegati all'impianto di supervisione oggetto del presente studio considerando i seguenti allarmi [86]:

- allarme di velocità;
- allarme generatore;
- allarme di pressione olio;
- allarme della temperatura liquido refrigerante;
- allarme livello carburante;
- allarmi sensori di feedback;
- allarmi per guasti all'alimentazione elettrica d'uscita.

### C. gruppo di continuità (UPS)

Le frequenti cadute di tensione, i guasti sui circuiti di potenza e le fluttuazioni di tensione possono danneggiare le apparecchiature delicate o possono causare fermi a sistemi di produzione che devono lavorare in modo continuo. La maggior parte dei sistemi UPS ha disponibile sul pannello di controllo posteriore alcuni contatti di uscita che possono fornire informazioni riguardanti le condizioni di stato seguenti [87]:

- UPS guasto;
- riepilogo allarmi;
- bypass attivo;
- batteria scarica;
- UPS acceso;
- perdita di linea.

Tra le diagnostiche sopra citate, l'allarme generale di guasto della macchina è tipicamente presente anche per gli UPS più semplici.

### D. Gruppo di rifasamento

La maggior parte dei sistemi di rifasamento automatico mettono a disposizione presso le proprie schede elettroniche dei contatti che forniscono informazioni relative alle seguenti condizioni di stato [88]:

- temperatura interna troppo alta;
- corrente troppo alta o troppo bassa;
- tensione troppo alta o troppo bassa;
- sovracompensazione o sottocompensazione;
- sovraccarico del condensatore;
- microinterruzioni;

- potenza reattiva insufficiente dell'apparecchiatura;
- potenza reattiva errata sugli array del condensatore.

Tra le diagnostiche citate precedentemente, almeno l'allarme di guasto generale è di solito disponibile e nel sistema di supervisione è indicato come (A2).

#### E. Sistemi di allarme antincendio

Il sistema di allarme antincendio di un edificio deve essere in grado di fornire allarmi sufficientemente rapidi, in modo da consentire un controllo celere per mitigare l'evento e non farlo espandere verso altri reparti. In un impianto industriale di grandi dimensioni, sviluppato e ingrandito in più fasi, si possono trovare svariate tipologie di sistemi di allarme antincendio, tipicamente di diversi produttori, installati durante la costruzione della struttura oppure durante interventi di ristrutturazioni di aree locali avvenute in tempi successivi. Ciò fa sì che sia molto raro il controllo di tutti gli impianti di allarme attraverso una soluzione unica e uniproprietaria.

Il sistema di supervisione proposto prevede l'utilizzo di uno o più dei seguenti contatti normalmente resi disponibili al controllo dentro ai pannelli di comando dei sistemi antiincendio [89,90]:

- pre-allarme;
- allarmi antincendio;
- guasto del sistema antiincendio.

#### F. Celle frigo e sistemi di refrigerazione

Questo tipo di attrezzatura include frigoriferi, congelatori, celle frigo necessarie per alimenti o prodotti che devono essere mantenuti a una temperatura bassa o inferiore allo zero. In alcuni specifici casi le centraline di controllo di queste unità, oltre a regolare la temperatura interna e a gestire lo sbrinamento, devono anche mantenere le informazioni della temperatura nel tempo, al fine di analizzare possibili guasti avvenuti o temperature anomale che potrebbero aver fatto deteriorare il sistema. In alcuni casi questi sistemi tecnici sono già attrezzati con sistemi di controllo remoto, ma nella maggior parte dei casi tipicamente sono privi di un sistema di supervisione unificato, che colleghi ogni macchina specifica, ciò è riconducibile anche alla diffusione di macchine frigo in zone lontane.



Pertanto, tra i seguenti allarmi, che tipicamente sono disponibili sul pannello di controllo dei frigoriferi, la supervisione proposta può essere in grado di rilevare rilevanti eventi fuori specifica della macchina, quali [88]:

- temperatura alta o bassa;
- mancanza di corrente di alimentazione;
- porta aperta o porta socchiusa;
- guasto generale;
- guasto della sonda di temperature;
- condizione antigelo;
- batteria della centrale di controllo scarica;
- condensatore intasato.

#### G. Sistemi di allarme antintrusione

Le aziende possono essere molto suscettibili ai furti, sia per quanto riguarda i beni materiali che quelli immateriali, quali brevetti, documenti ecc. Per tale ragione i sistemi di rilevamento antiintrusione e di controllo accessi sono di solito installati. Questi ultimi possono prevedere rilevatori di presenza interni, sensori a contatto su porte e finestre, raggi infrarossi soprattutto sul perimetro e sensori a barriera o a tenda. Per tali sistemi sono valide le stesse considerazioni degli allarmi antiincendio, infatti, anche in questo caso si trovano facilmente sistemi plurimarca. I contatti di uscita dalle schede elettroniche solitamente presenti sono:

- allarme intrusione;
- pre-allarme;
- guasto del sistema.

#### H. Scheda di controllo dell'ascensore:

La scheda di controllo dell'ascensore necessaria per controllare le sue varie funzionalità, quali apertura porte e autolivellamento, di solito permette anche il monitoraggio in tempo reale locale o remoto (tramite internet LAN o GSM) del suo stato. Il front-end di questo controllo è solitamente presente all'interno della cabina o nel locale tecnico. I segnali principali (ingressi/uscite, registri di chiamata, movimento cabina, posizione, stato porte) sono quindi gestiti tipicamente da questi specifici sistemi di controllo proprietari. I produttori di queste schede forniscono sempre dei contatti di uscita per fornire informazioni aggiuntive. Questi contatti possono essere collegati alla piattaforma IoT in modo da riportare nel Cloud [91]:

- allarme guasto generale (la pressione dell'olio è troppo bassa/alta, guasto elettrico, temperatura massima degli avvolgimenti del motore);
- condizione di funzionamento anomalo (mancata chiusura dei contatti di sicurezza delle porte, numero massimo di rilivellamenti piano, tempo massimo di percorrenza tra due piani, tempo massimo in movimento a bassa velocità).

In conclusione, è evidente che in un ambiente industriale e non di grandi dimensioni sono presenti molti sistemi elettrici eterogenei e di marche diverse. Le schede di controllo di questi impianti sono black-box e possono avere interfacce locali o remote, ma che utilizzano sempre protocolli chiusi e non modificabili. Tuttavia, la presenza di contatti di uscita su queste schede elettroniche favorisce la realizzazione del lavoro oggetto della tesi.

Una piattaforma Internet of Things (IoT) integrativa, che permette di monitorare ogni sistema di controllo, ottenendo così a costi contenuti un sistema di supervisione unificato, rappresenta quindi un ottimo componente capace di aumentare la resilienza e la sicurezza complessiva del sistema.

L'interfaccia utente per telefoni cellulari Android, illustrata in figura 84, è stata creata con l'ambiente di sviluppo Android Studio. In particolare nella figura vengono riportate, a titolo di esempio, diverse finestre della piattaforma sviluppata per un ambiente ospedaliero, comprendente cabine di distribuzione, UPS, ascensori, frigo medicinali, sistemi antiintrusione e allarmi antiincendio.

Ogni sottosistema o componente è contrassegnato da un relativo pallino colorato, che funge da spia e segnala il normale funzionamento (colore verde), una condizione di avvertenza (colore arancione) o una condizione di guasto (colore rosso). Cliccando sul sottosistema selezionato, una finestra mostra lo stato di ogni segnale/allarme monitorato ed in fondo alla nuova schermata anche la cronologia di tali allarmi.

Nella barra grigia è possibile selezionare diverse opzioni come il tasto per tornare indietro, il pulsante informazioni (per l'utente che vuole scrivere un testo), il tasto per tornare alla schermata principale, l'opzione per la geolocalizzazione dove salvare un'immagine (ad esempio la mappa dell'ospedale) e le sue coordinate GPS ed infine il pulsante delle impostazioni, per permettere di cambiare le varie opzioni del dato sottosistema.

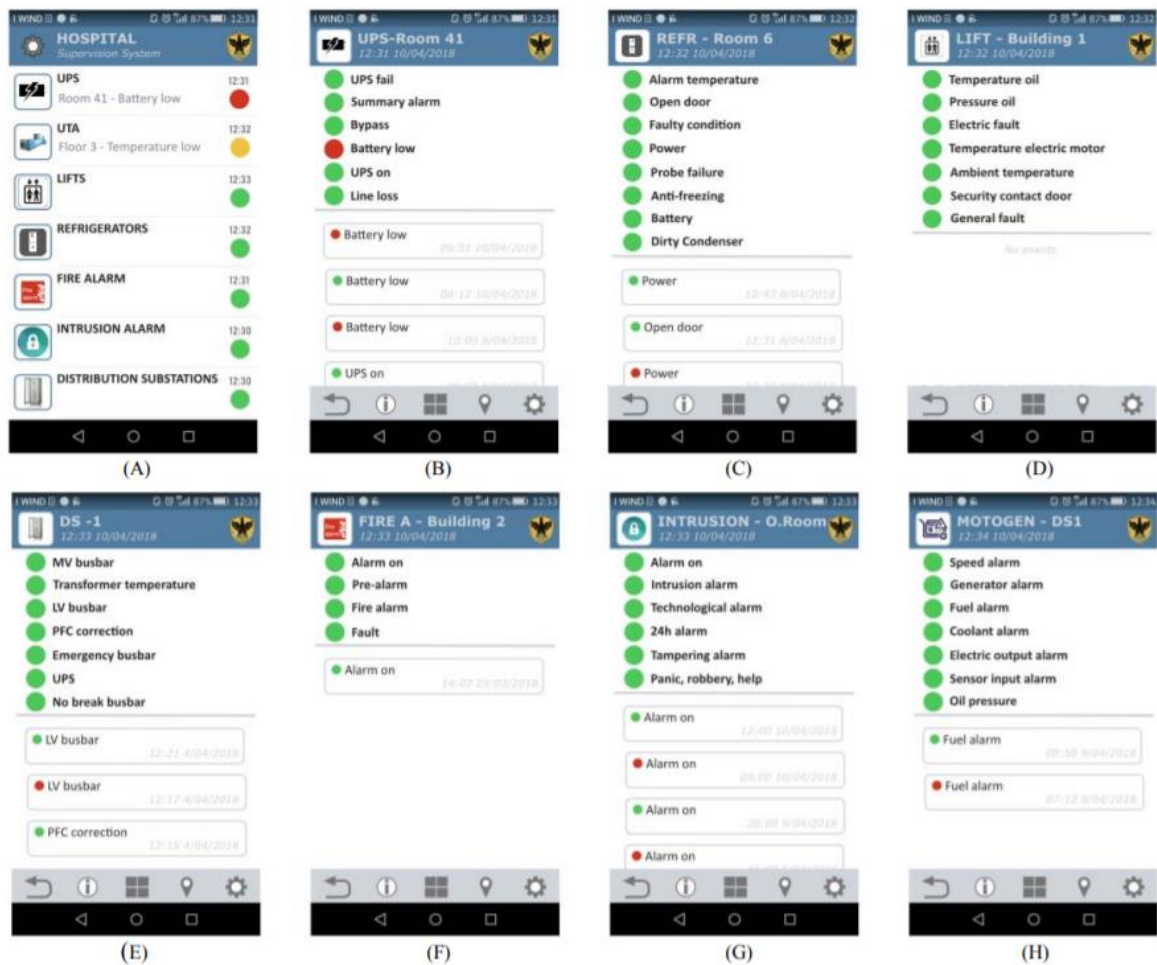


Fig. 84 Varie schermate dell' app per cellulare realizzate per un applicazione ospedaliera: (A) Menu principale, (B) Stanza UPS 41, (C) Stanza frigo 6, (D) Ascensore edificio 1, (E) Cabina di distribuzione 1, (F) Allarme antincendio Edificio 2, (G) Allarme anti-intrusione Sala operativa, (H) Elettrogeneratore diesel Cabina di distribuzione 1.

Nella seconda versione è stata aggiunta la funzione di monitoraggio anche dell'energia, letta da vari contatori posti sul campo, utilizzando il medesimo apparato di supervisione. Nella finestra dedicata al monitoraggio dell'energia, scorrendo lo schermo, è possibile visualizzare i grafici di tensione, corrente, potenza attiva e reattiva e fattore di potenza. Inoltre, in alto ci sono i tasti per scegliere la scala temporale dei diagrammi selezionata (1 ora, 1 giorno, 1 settimana ecc.).



Fig. 85 Schermate della seconda versione dell' app di supervisione

La stima complessiva del possibile costo di tale applicazione, facendo riferimento a un particolare caso di studio, è dovuta principalmente alle caratteristiche della rete locale (LAN) richiesta. Il costo di un dispositivo di acquisizione dati remoto (riassunto nella tabella VIII) è di circa 82€ [92]. I prezzi indicati sono stati calcolati per la realizzazione di 10 pezzi. Nel caso in cui la richiesta di dispositivi fosse di 100 o più pezzi, il prezzo scenderebbe considerevolmente, anche della metà. Il costo più impattante è quello del Raspberry. Per tale ragione sono state valutate anche altre soluzioni, ma il Rpi3B era l'unico dispositivo che oltre al wireless integrato, che riusciva a gestire agevolmente le reti WPA Enterprise, aveva a bordo la LAN e l'interfaccia grafica. Ciò lo ha reso un attraente mini-computer per collegare il dispositivo IoT oggetto dello studio a reti wireless protette e LAN già presenti nei complessi industriali.

Tabella VIII. Costo della piattaforma proposta

Componenti	Prezzo
<b>Raspberry pi 3B</b>	35.95 €
<b>Alimentatore 230V/5V</b>	9.60 €
<b>Scheda di supervisione</b>	25.44 €
<b>Scatola in plastica</b>	10.37 €
	<b>TOT: 81.36 €</b>

Il costo dei relè, come richiesto per l'interfaccia dei componenti monitorati al dispositivo di supervisione, è compreso tra circa 20-50 € ciascuno (relè di monitoraggio della tensione, contatti ausiliari, fili ecc.). I costi di installazione sono esclusi, ma possono essere facilmente stimati facendo riferimento alle ore di lavoro necessarie per l'implementazione.

Più che in termini di costi evitati, la piattaforma di supervisione proposta consente un enorme miglioramento dell'efficienza di manutenzione determinando così sia la disponibilità che il miglioramento della resilienza della distribuzione elettrica.

## 3.4 Predicibilità e programmabilità delle risorse

L'aumento della complessità del sistema elettrico ha reso sempre più difficile definire le tipologie di carico connesse e la valutazione del tempo di utilizzo. In termini di aumento della resilienza è di estrema importanza conoscere lo stato del sistema, i carichi connessi, i cicli di funzionamento, anche nell'ottica di prevedere l'ordine di disconnessione degli stessi a seguito di una perturbazione. L'andamento dell'energia assorbita da ogni carico permette la giusta considerazione dei tempi di funzionamento dei gruppi di emergenza.

I classici sistemi di monitoraggio del carico non intrusivi, chiamati semplicemente NILM, hanno lo scopo di misurare il consumo energetico di singole apparecchiature elettriche e/o elettrodomestici collegati attraverso piattaforme plug-in. L'analisi dell'energia consumata da ogni singolo dispositivo consente di identificare i dispositivi meno efficienti o malfunzionanti e di attuare le opportune azioni volte alla riduzione dei consumi. Le classiche soluzioni non intrusive richiedono la misura di una tensione e di una corrente o spesso anche solo della corrente. La complessità del sistema è dovuta alla sezione di elaborazione dei dati, che deve identificare gli assorbimenti dei singoli dispositivi attraverso l'utilizzo dei cosiddetti algoritmi NILM. Tuttavia, spesso i sistemi di misura non intrusivi sono utili anche quando è necessario acquisire altre informazioni dagli apparecchi alimentati in un certo istante, indipendentemente dalle informazioni legate al consumo, al fine di soddisfare le esigenze di controllo dei moderni sistemi di smart-home e gestione dell'energia.

Il presente lavoro di tesi descrive alcune valutazioni primarie riguardanti il possibile utilizzo del metodo di analisi SFRA per ricavare il modello di utilizzo dell'energia. La tecnica SFRA viene quindi applicata al problema dell'identificazione della firma degli elettrodomestici, proponendo un sistema basato su una rete neurale convoluzionale (CNN).

Le tecniche NILM sono diventate una delle alternative più rilevanti per la disaggregazione energetica, in quanto forniscono un metodo per separare i consumi individuali per determinati elettrodomestici. Esse permettono di ottenere informazioni utili per lo studio della resilienza, perché consentono di indagare sul tipo di utilizzo, sul tempo di utilizzo e sul modo di utilizzo degli apparecchi elettrici.

Le prime ricerche sulla disaggregazione del carico sono datate 1990. Nel corso degli anni, sono stati apportati miglioramenti significativi e in letteratura sono state proposte varie tecniche, spesso basate su elaborazione dei dati massicce. La maggior parte dei sistemi NILM

esegue il rilevamento degli eventi e la classificazione del carico attraverso algoritmi tradizionali o tramite algoritmi di intelligenza artificiale, anche chiamati machine learning (ML). I sistemi ML continuano a migliorare nel tempo seppur con un minimo intervento umano: sono altamente automatizzati e via via che apprendono utilizzando più dati, si modificano automaticamente, imparando dai dati forniti il modo di svolgere determinati compiti. Il deep learning (DL) è un tipo di ML che addestra un computer a eseguire attività simili a quelle umane, come il riconoscimento vocale, l'identificazione di immagini o la creazione di previsioni. Il DP è in grado di risolvere problemi di apprendimento automatico senza la necessità di un pre-processamento dei dati. Se un sistema ML fa una previsione imprecisa, un ingegnere deve intervenire e apportare modifiche, mentre nel modello DL l'algoritmo stesso è in grado di determinare se una previsione è accurata o meno.

Purtroppo, non esiste ancora una tecnica adeguata per la discriminazione inequivocabile dei carichi elettrici e le caratteristiche valutabili dipendono soprattutto dal tipo di installazione. Il sistema di elaborazione non intrusivo può essere posizionato sia direttamente sul quadro elettrico, sulla stessa piattaforma che misura i parametri elettrici, sia sul cloud, predisponendolo per elaborazioni remote di dati provenienti dal contatore intelligente. I sistemi di monitoraggio non intrusivo possono essere ulteriormente raggruppati in base al loro scopo in due diverse categorie. Questi sistemi, infatti, possono essere utilizzati sia per la disaggregazione del consumo energetico di un utente, sia al solo scopo di indagare quali dispositivi sono alimentati in un dato momento. Nel secondo caso, il sistema di misura non è tenuto a monitorare continuamente il sistema, ma deve effettuare solo l'analisi quando questa è richiesta da altri dispositivi di controllo o dagli utenti stessi. Nei paragrafi seguenti si analizza un sistema di monitoraggio che può essere installato sulla rete di un utente finale. Il sistema è in grado di definire quali apparecchiature sono alimentate dal sistema attraverso la tecnica Sweep Frequency Response Analysis (SFRA). La soluzione descritta nel presente lavoro di tesi è un algoritmo DL, che utilizza un particolare tipo di ANN, chiamato Convolutional Neural Network (CNN).

### 3.4.1 Analisi dei carichi attraverso la misura SFRA Online

Nel presente capitolo si illustra come la tecnica SFRA (sweep frequency analysis response) può essere utilizzata per il monitoraggio continuo dell'utente, allo scopo di analizzare e identificare i carichi collegati.

Gli elementi capacitivi e induttivi che costituiscono l'impedenza dell'impianto elettrico sono intimamente legati alla costruzione fisica dell'apparato. Variazioni della risposta in frequenza della rete dimostrano possibili variazioni dell'impedenza, per tale ragione, studiando la variazione della risposta in frequenza si può risalire al motivo che ha causato la variazione.

La tecnica SFRA è già impiegata con successo per il rilevamento dei guasti del trasformatore [93,94] e negli ultimi anni anche per analizzare i guasti sui motori a induzione [95], che hanno la stessa rete equivalente dei trasformatori [96], utilizzando strumentazione offline, seguendo la norma IEC 60076-18 [97]. Per il monitoraggio della rete, lo strumento di misura deve essere collegato durante il normale isolamento, perciò lo strumento è stato modificato al fine di essere in grado di funzionare sotto tensione.

Il basso costo di realizzazione della piattaforma che realizza questa misura è stato incentivante per la realizzazione di un apparato IoT di misura. Lo strumento di test invia un segnale a frequenza variabile e inoltra i dati acquisiti al Cloud tramite una stringa JSON. La piattaforma digitale di elaborazione effettua un confronto tra il segnale in ingresso e il segnale in uscita valutando l'attenuazione del segnale e calcola la funzione di trasferimento (TF) e la variazione di fase (VF) tra segnale di ingresso e segnale di uscita. In seguito il programma confronta la TF e VF nuova con le TF e VF salvate nel Cloud precedentemente.

La piattaforma di test è stata sviluppata partendo dalla scheda di sviluppo Digilent Analog Discovery 2 NI Edition collegata alla sezione di accoppiamento BNC: Analog Discovery BNC Adapter Board. Questa presenta quattro pin che possono essere utilizzati come ingressi differenziali di un oscilloscopio a due canali, con risoluzione a 14 bit, con ampiezza massima del segnale in ingresso  $\pm 25$  V, larghezza di banda 30 MHz e frequenza di campionamento pari a 100 MSamples/s. Inoltre sul connettore di uscita, attraverso un DAC, può essere generato un segnale di uscita con ampiezza  $\pm 5$  V, larghezza di banda 20 MHz e frequenza di campionamento di 100 MS/s.

Per disaccoppiare la rete di alimentazione dal circuito di misura online, i due canali dell'oscilloscopio e il canale del generatore di tensione sono stati collegati a tre filtri passa-



banda di tipo Butterworth del terzo ordine [99] perfettamente simmetrici. I filtri, posti nella direzione del segnale e progettati per bloccare la frequenza fondamentale (50 Hz) e le componenti armoniche (fino a 2 kHz), presentano una larga banda piatta e un'elevata attenuazione al di fuori della frequenza di taglio.

Il dispositivo IoT è stato programmato per generare un segnale che opera in un intervallo compreso tra 2 kHz e 1,5 MHz. Il software durante il test aggiorna continuamente la frequenza di campionamento per avere la frequenza di campionamento sette volte la frequenza del segnale generato e quindi acquisire il numero desiderato di cicli di forme d'onda per ciascuna forma d'onda generata. In totale, vengono acquisiti 8192 campioni per ogni canale di ingresso in circa un minuto e mezzo.

Lo strumento collegato tramite la sua spina alle prese dell'impianto elettrico in esame, invia i dati tramite connessione Wi-Fi sul Cloud. Il programma dell'utente invece è in grado di mostrare in prima elaborazione, tre grafici:

- segnale TF e VF: grafico della funzione di trasferimento e dello sfasamento per la singola misura;
- confronto misure: confronto TF e VF tra più letture;
- media, min e max: grafico con la curva minima, massima e media tra un numero di misure selezionato.

Nella fase di test, la piattaforma è stata sperimentata su un modello in scala di un appartamento di medie dimensioni composto da ingresso, cucina, soggiorno, bagno e due camere da letto, dove ogni linea elettrica (fase, neutro e PE) è stata realizzata con elementi a parametri concentrati, sfruttando la teoria del doppio bipolo con schema a "PI greco". L'impianto presenta 9 punti luce, 26 punti presa alimentati tramite un interruttore differenziale con  $I_{dn}=30\text{mA}$  e suddivisi in tre circuiti:

- Linea luci: protetta da interruttore magnetotermico da 10A;
- Linea prese: protetta da interruttore magnetotermico 20A;
- Linea prese cucina: protetta da interruttore magnetotermico 16A.

Il pannello di prova è illustrato in figura 88. In particolare, a destra è mostrato il doppio bipolo che realizza una linea di derivazione.

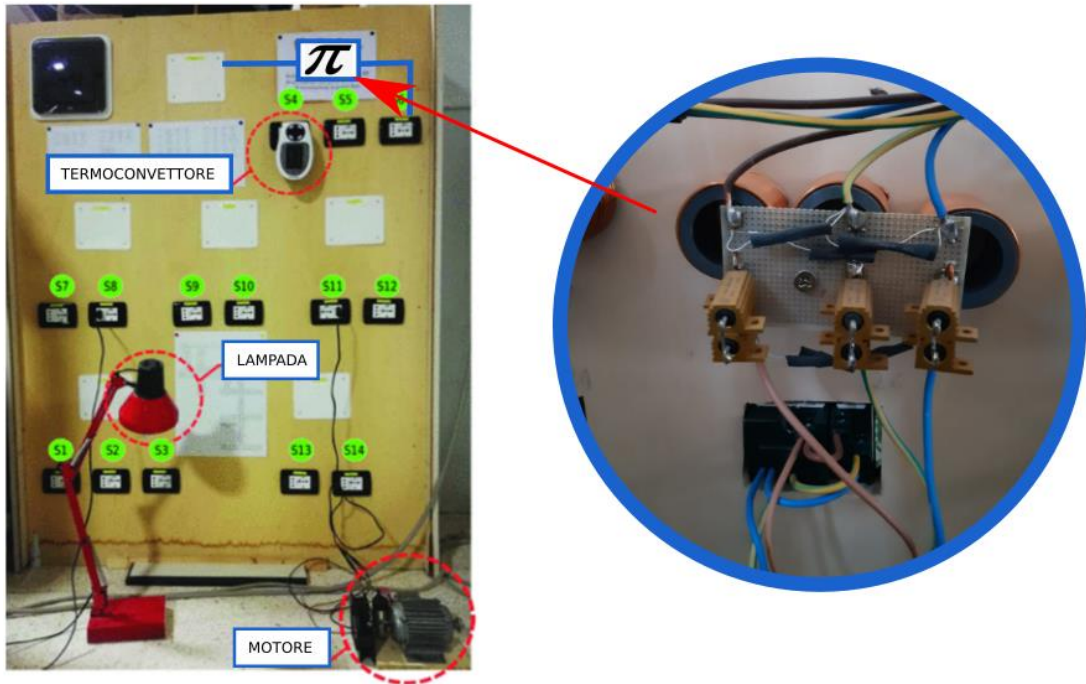


Fig.88 Pannello di prova dell'impianto elettrico domestico

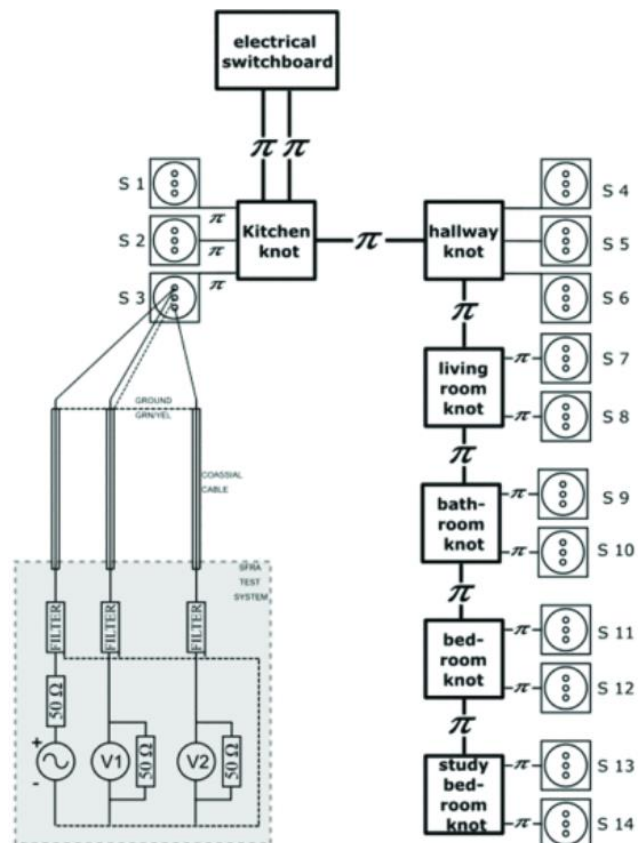


Fig. 89 Schema di misura

In [99], sono riportati i primi risultati del sistema SFRA online, collegando alle prese dell'impianto tre tipologie classiche di carico, tipicamente presenti negli impianti elettrici d'utenza come: i) una lampada fluorescente compatta, ii) un termoconvettore elettrico e iii) un piccolo motore asincrono monofase (SPAM) simile a quello utilizzato negli elettrodomestici. In tal caso sono stati inseriti rispettivamente la lampada Lexman ets-5 da 15W, la stufetta Kooper 2191217 500W e uno SPAM da 0,25 HP. Lo schema di misura e lo strumento di misura sono mostrati in figura 89.

I risultati in figura 90 sono stati ottenuti mantenendo fisso il punto di misura alla presa S3 e inserendo i vari carichi, oltre ad un fornello ad induzione da 3kW, alla presa S7.

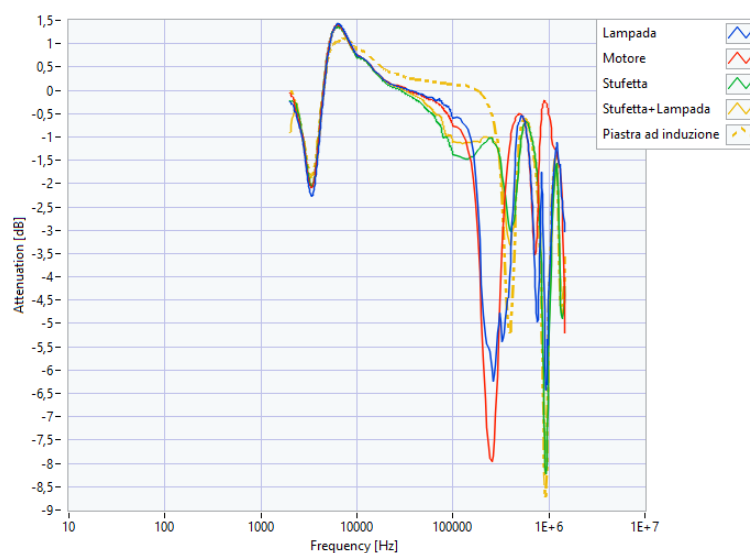


Fig. 90 Curve SFRA con dispositivo SFRA collegato alla presa S3 e gli altri carichi connessi alla presa S7

Dal grafico si evince come per frequenze inferiori a 5kHz, l'andamento della TF è poco significativo, in quanto non si riesce a distinguere il tipo di carico connesso, e probabilmente l'andamento è legato ai filtri capacitivi in ingresso. Anche le alte frequenze risultano poco influenzate dal carico e le oscillazioni sono dovute alla rete a monte e a vari disturbi che rendono il dato molto aleatorio. Invece, si nota come le frequenze intermedie sono legate al tipo di carico e poco influenzate dal punto di collegamento dello strumento di misura.

Nella fase di test sono stati analizzati anche diversi aspetti che potevano influire negativamente sulla misura, come la presenza dell'interruttore differenziale che filtra il segnale generato e acquisito oppure la lunghezza maggiore della rete a monte, che potrebbe essere significativa nella variazione di impedenza generale. Altre valutazioni sono state fatte tenendo fisso il punto di connessione dei carichi sulle prese e spostando il punto di misura e

viceversa, cioè connettendo il sistema di misura a una presa definita e variando i punti di inserzione dei carichi.

Nella figura 91 abbiamo a sinistra le misure con la lampada spostata nelle varie prese e lo strumento posizionato dopo il differenziale e a destra con lo strumento posizionato prima del differenziale. Si evince che l'interruttore differenziale opera un'azione di appiattimento della curva TF verso l'attenuazione nulla.

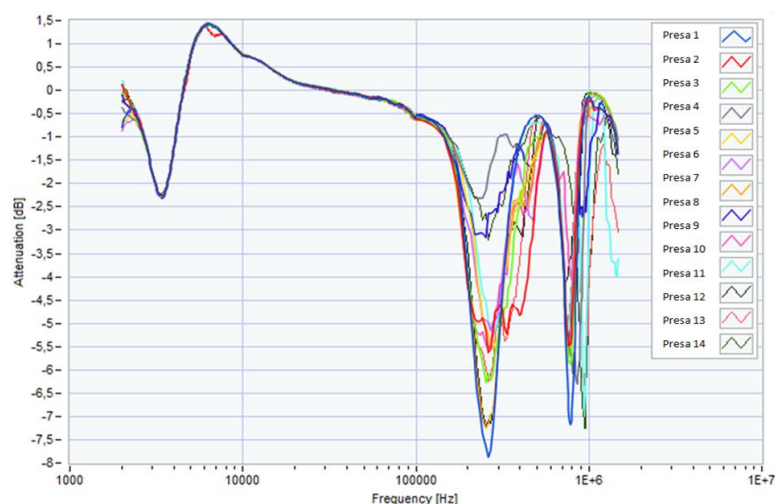


Fig. 91 Curve SFRA con dispositivo SFRA collegato alla presa S6 e lampada connessa a prese diverse

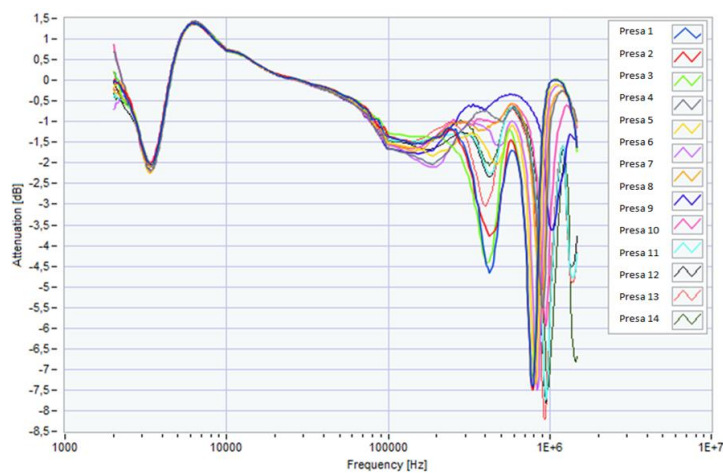


Fig. 92 Curve SFRA con dispositivo SFRA collegato alla presa S6 e termoconvettore connesso a prese diverse

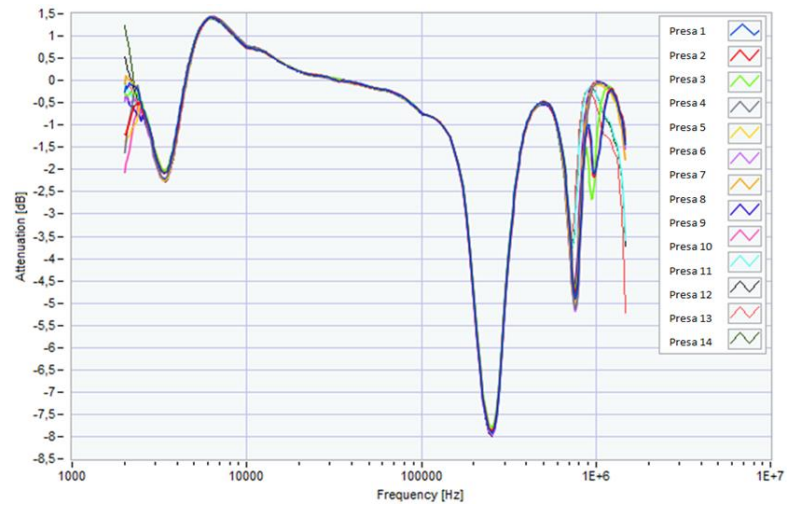


Fig. 93 Curve SFRA con dispositivo SFRA collegato alla presa S6 e motore connesso a prese diverse

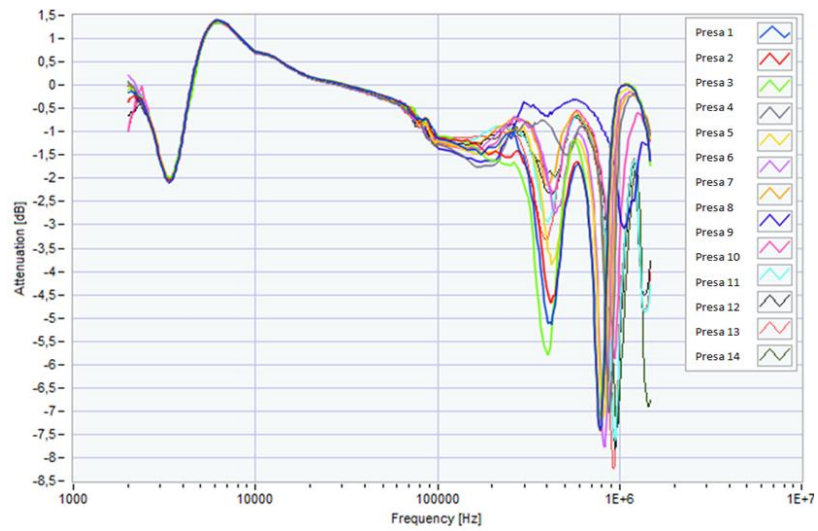


Fig. 94 Curve SFRA con dispositivo SFRA collegato alla presa S6 e termoconvettore+lampada connessi a prese diverse

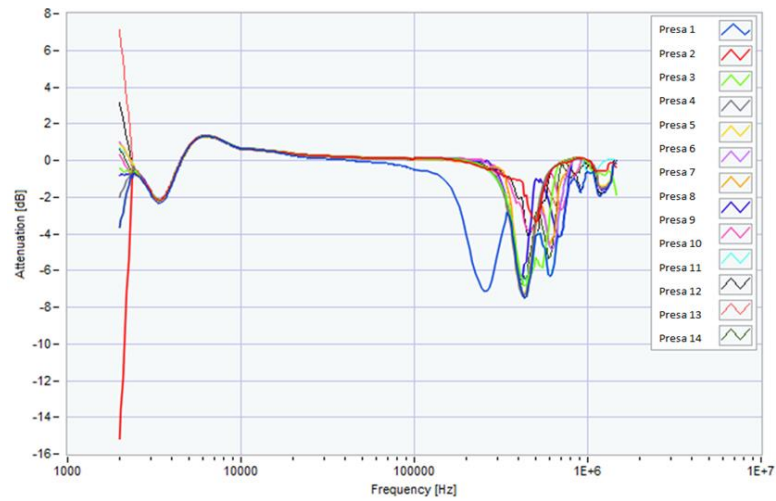


Fig. 95 Curve SFRA con dispositivo SFRA collegato a monte dell'interruttore differenziale e lampada connessa a prese diverse

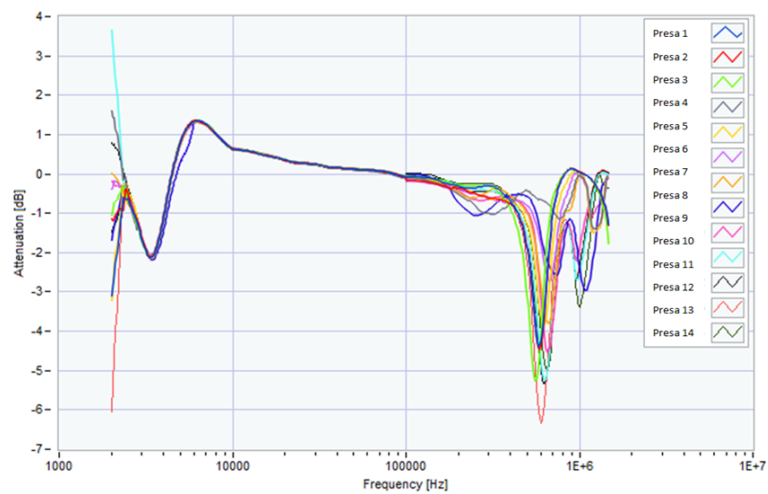


Fig. 96 Curve SFRA con dispositivo SFRA collegato a monte dell'interruttore differenziale e termoconvettore connesso a prese diverse

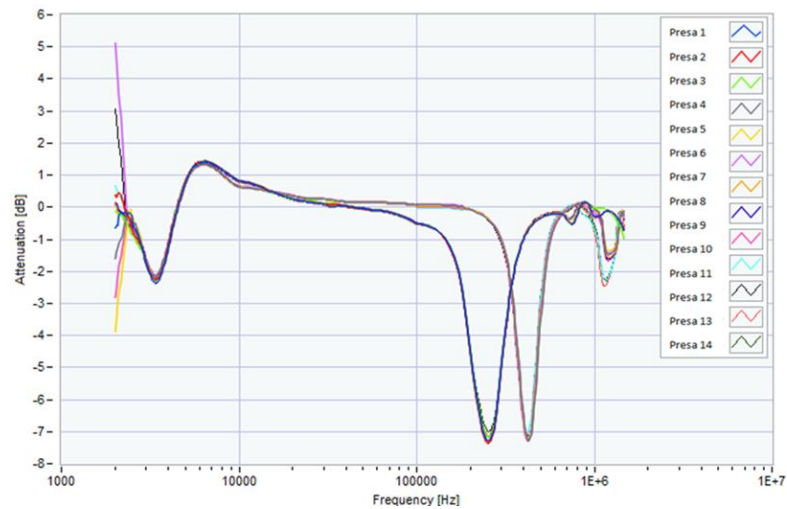


Fig. 97 Curve SFRA con dispositivo SFRA collegato a monte dell'interruttore differenziale e motore connesso a prese diverse

In figura 97 si osserva che le prove sul motore seguono due curve caratteristiche, quasi indipendenti dal punto di misura, con due punti di risonanza ben distinti. Ciò è dovuto al pannello di prova che presenta due linee di prese separate protette da due diversi interruttori magnetotermici.

La tecnica SFRA modificata per funzionare online ed essere un'affidabile piattaforma di misura IoT si dimostra quindi capace di fornire risultati ripetibili ed attendibili nonostante il basso costo del dispositivo. Successivamente, le firme di carico fornite dall'analizzatore SFRA online potrebbero essere utilizzate per addestrare la rete neurale all'identificazione del carico, al riconoscimento del modello di carico e allo studio del tempo di utilizzo. Inoltre, adottando la tecnica proposta, è possibile migliorare l'efficienza complessiva della rete, valutando e pianificando eventuali manutenzioni sui componenti che evidenziano un cambio della firma SFRA online.

### 3.4.2 NILM basato sulla tecnica SFRA

Il DL può essere definito come un sistema che utilizza una classe di algoritmi di apprendimento automatico che utilizzano vari livelli di elaborazione a cascata per eseguire analisi dei dati, decisioni e previsioni estraendo e trasformando i dati stessi. Gli algoritmi DL basano il loro funzionamento sulla classificazione e selezione dei dati più rilevanti per giungere a una conclusione, proprio come il cervello biologico, attraverso modelli di calcolo matematico-informatici basati sul funzionamento di reti neurali biologiche, ovvero modelli costituiti da interconnessioni di informazioni. Gli elementi computazionali di base di una ANN sono i nodi (o neuroni). Questi nodi sono disposti in una serie di strati, ciascuno dei quali è collegato agli strati posti su entrambi i lati. Alcuni nodi ricevono informazioni da fonti esterne (nodi di input), mentre sul lato opposto della rete, si trovano i nodi di output che indicano come il sistema risponde alle informazioni fornite. Tra i nodi di input e output, ci sono uno o più livelli di nodi di elaborazione nascosti.

Ogni nodo riceve il suo input da altri nodi o da una sorgente esterna e calcola il suo output applicando una funzione, chiamata funzione di attivazione (AF), somma ponderata dei suoi input. A questa somma viene aggiunto un valore di base. L'applicazione dell'AF introduce specificamente non linearità, con l'obiettivo di emulare il modo in cui gli esseri umani analizzano i dati del mondo reale. La connessione tra un nodo e l'altro è realizzata in base a un peso, che può essere positivo (un nodo ne eccita un altro) o negativo (un nodo ne inibisce un altro). Maggiore è il peso, maggiore è l'influenza che un nodo esercita su un altro. Se la somma finale è superiore a una certa soglia, il nodo genera un output.

Il problema dell'identificazione delle apparecchiature elettriche a partire dall'analisi della risposta in frequenza ottenuta con la tecnica SFRA è riconducibile ad un problema di classificazione multi-label. La classificazione multi-etichetta è un'attività di modellazione predittiva che prevede la previsione di zero o più etichette di classe reciprocamente non esclusive. Nella classificazione multi-etichetta, sono richieste zero o più etichette come output per ogni campione di input e gli output sono richiesti simultaneamente. Il presupposto è che le etichette di output siano una funzione degli input.

Di seguito viene adottata la rete neurale convoluzionale (CNN), per la sua capacità di elaborare input complessi come array multidimensionali. Le CNN sono in grado di ridurre il numero di operazioni richieste convertendo l'input in moduli, che sono più facili da elaborare.



Il modello estrae le caratteristiche dai dati delle sequenze e mappa le caratteristiche interne della sequenza. Una CNN unidimensionale (1D) è molto efficace per derivare caratteristiche da un segmento di lunghezza fissa del set di dati complessivo, dove non è così importante dove si trova l'elemento nel segmento.

Il sistema proposto, include diversi livelli: un livello di input, tre livelli per estrarre le caratteristiche matriciali, e infine un gruppo di array che utilizza i dati dei livelli di convoluzione per generare l'output, come mostrato in figura 98.

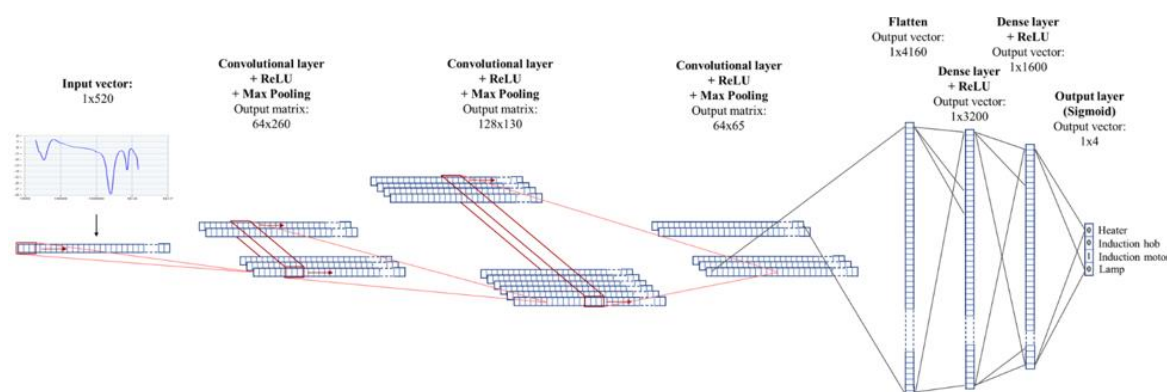


Fig. 98 Struttura della rete neurale CNN 1D proposta

Il primo livello è il vettore di input, composto da 520 valori, che contiene la risposta in frequenza ottenuta tramite SFRA. Lo strato di convoluzione, che è il blocco centrale di una CNN, rileva la presenza di caratteristiche specifiche nella caratteristica di ingresso attraverso l'applicazione di filtri pertinenti. Invece di elaborare un elemento dell'array alla volta, il livello di convoluzione raccoglie porzioni limitate di dati e le passa attraverso una serie di filtri. Ciascuno dei filtri ricerca un diverso parametro di input, come i picchi, o una particolare evoluzione della caratteristica o del suo comportamento speciale per un certo gruppo di frequenze. Le dimensioni spaziali di un filtro sono inferiori al segnale di ingresso. Ciascun livello convoluzionale applica una serie di filtri al proprio input. In questo caso sono stati applicati tre strati convoluzionali con un numero diverso di filtri (64 nel primo strato di convoluzione, 128 nel secondo e 64 nel terzo). I filtri sono stati fatti scorrere lungo il vettore d'ingresso e sono stati calcolati i risultati in tutte le posizioni. Il risultato sono array bidimensionali che forniscono le risposte ai filtri in ogni posizione spaziale.

Le funzioni di attivazione (AF) chiamate anche funzione di trasferimento, vengono utilizzate per mappare i nodi di input per i nodi di output in un determinato modo. Queste possono essere

lineari o non lineari e di solito sono preferite le seconde poiché consentono ai nodi di apprendere strutture dati più complesse, anche se richiedono più lavoro nella configurazione iniziale e quindi nell'addestramento. Nella rete proposta, l'AF utilizzato ad ogni uscita del filtro è un'Unità Lineare Raddrizzata Elementare chiamata RELU, le cui caratteristiche lineari a tratti sono presentate in figura 99.

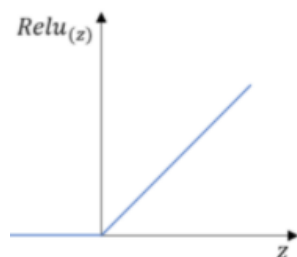


Fig.99 Funzione di attivazione relu

Le mappe di attivazione vengono inserite in un livello di max pooling, cioè in un processo di discretizzazione basato su campioni con l'obiettivo di sottocampionare il dato in ingresso riducendone le dimensioni e per permettere di formulare ipotesi sulle caratteristiche delle sottoregioni. Questo permette inoltre di ridurre il costo computazionale del processo. L'algoritmo di max pooling raccoglie il valore più grande da una porzione dell'input e lo inserisce in una nuova matrice accanto ai valori massimi di altre porzioni della matrice originaria e scarta il resto delle informazioni contenute nelle mappe di attivazione. Un esempio della funzione max pooling è mostrata in figura 100.

Questa operazione permette di ridurre tramite livelli di convoluzione successivi circa il 50% delle dimensioni spaziali della rappresentazione mantenendo le informazioni più significative. Successivamente la funzione flatten trasforma la matrice  $64 \times 65$  in un unico vettore  $1 \times 4160$  mettendo in coda tutte le righe della matrice.

Il vettore caratteristico ottenuto viene ora inviato a due livelli connessi costituiti rispettivamente da 3200 valori e da 1600 valori attraverso la funzione di attivazione RELU. Processata la curva SFRA dall'algoritmo NILM, l'output restituisce la probabilità dell'appartenenza dell'input a ciascuna classe. Essendo stati analizzati 4 soli elettrodomestici, il livello di output è composto da 4 valori, e quindi per ogni input verranno date 4 probabilità di appartenenza. Essendo stata scelta una classificazione multi-etichetta, l'appartenenza a una classe non escluderà l'appartenenza ad un'altra classe. Quindi, come ultima funzione viene

utilizzata la funzione Sigmoid (mostrata in figura 101) che restituisce un valore di appartenenza compreso tra 0 e 1. In questo lavoro è stata scelta una soglia di 0,5. E sarà possibile identificare un numero maggiore di apparecchi semplicemente modificando l'architettura della CNN.

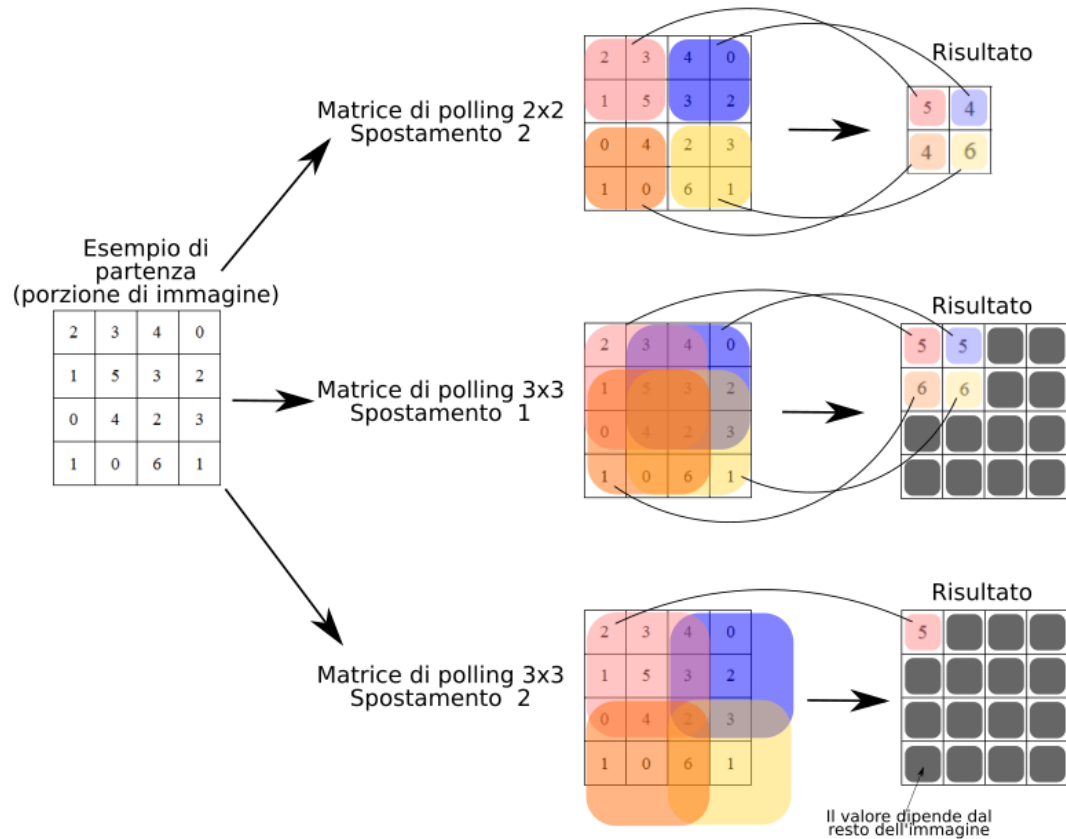


Fig 100 Algoritmo max pooling

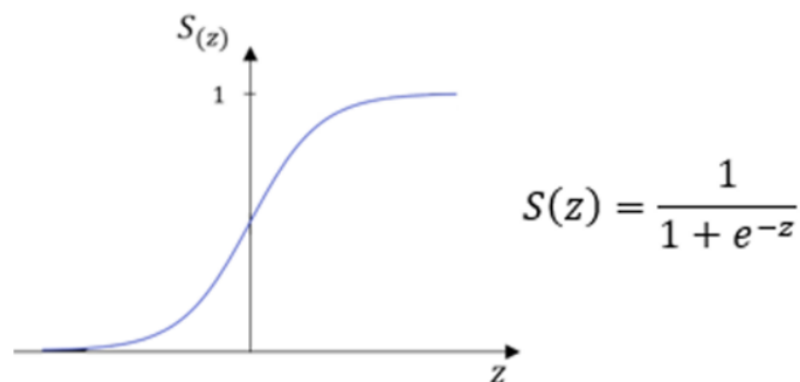


Fig.101 Funzione di attivazione Sigmoid

Dopo aver addestrato l'algoritmo di rete neurale con più di 1000 misurazioni (attività detta training), è stata verificata l'efficacia della rete su un dataset composto da:

- 13 misure SFRA con lampada accesa, una per ogni presa d'alimentazione;
- 13 misure SFRA con piastra ad induzione accesa a potenza massima, una per ogni presa d'alimentazione;
- 13 misure SFRA con motore acceso, una per ogni presa d'alimentazione;
- 13 misure SFRA con mini termoconvettore acceso, una per ogni presa d'alimentazione;
- 13 misure SFRA con motore e piastra ad induzione accesi;
- 13 misure SFRA con termoconvettore e piastra ad induzione accesi;
- 13 misure SFRA con motore e termoconvettore accesi;
- 13 misure SFRA con impianto a vuoto;

Per una migliore comprensione dei risultati, questi ultimi sono stati rappresentati attraverso la matrice di errore, la quale restituisce una rappresentazione dell'accuratezza di classificazione del sistema. Ogni colonna della matrice rappresenta i valori predetti, mentre ogni riga rappresenta i valori reali. L'elemento sulla riga  $i$  e sulla colonna  $j$  è il numero di casi in cui il classificatore ha classificato la classe "attesa"  $i$  come classe  $j$ . Attraverso questa matrice è possibile osservare la distribuzione degli errori di classificazione. La matrice d'errore, così costruita, mostrerà quindi sulla diagonale le risposte fornite dalla rete neurale esatte, mentre fuori diagonali saranno visualizzati gli errori.

La definizione delle classi che definiscono il problema di classificazione è:

- 0 = Condizione di funzionamento a vuoto;
- 1 = Funzionamento Lampada;
- 2 = Funzionamento Motore;
- 3 = Funzionamento Piastra ad induzione;
- 4 = Funzionamento Termoconvettore;
- 5 = Funzionamento Termoconvettore e Motore;
- 6 = Funzionamento Piastra e Motore;
- 7 = Funzionamento Piastra e Termoconvettore;

I risultati ottenuti in questa prima fase sono riportati in tabella:

Tabella IX Matrice di errore, ottenuta dalle misure SFRA

		Output del sistema							
		0	1	2	3	4	5	6	7
Output attesi	0	10	3	0	0	0	0	0	0
	1	0	13	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	13	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	4	0	4	5	0
	4	0	0	3	0	10	0	0	0
	5	0	0	0	1	0	12	0	0
	6	0	0	0	1	0	2	10	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	13

La rete neurale ha commesso un totale di 19 errori su 104 esempi, con un 18% di errore; nello specifico sono stati commessi:

- 3 errori nel riconoscimento della condizione a vuoto;
- 0 errori nel riconoscimento della lampada;
- 0 errori nel riconoscimento del motore;
- 9 errori nel riconoscimento della piastra ad induzione;
- 3 errori nel riconoscimento del mini termoconvettore;
- 1 errore nel riconoscimento del funzionamento stufetta e motore;
- 3 errori nel riconoscimento del funzionamento piastra ad induzione e motore;
- 0 errori nel riconoscimento del funzionamento misto: piastra ad induzione termoconvettore.

Successivamente, è stato addestrato il sistema utilizzando come ingressi non più la risposta assoluta fornita dal sistema di misura, bensì lo scostamento che le diverse condizioni di carico

provocavano rispetto alla condizione di vuoto, valutando in questo modo una risposta “relativa” del sistema. Per fare questo, i 100 esempi associati al funzionamento a vuoto acquisiti durante la fase di addestramento sono stati mediati per ottenere una risposta di riferimento che è stata poi sottratta ad ogni esempio presente nel dataset di addestramento. Esempi di risposte relative per le diverse condizioni di carico sono mostrate in figura 102.

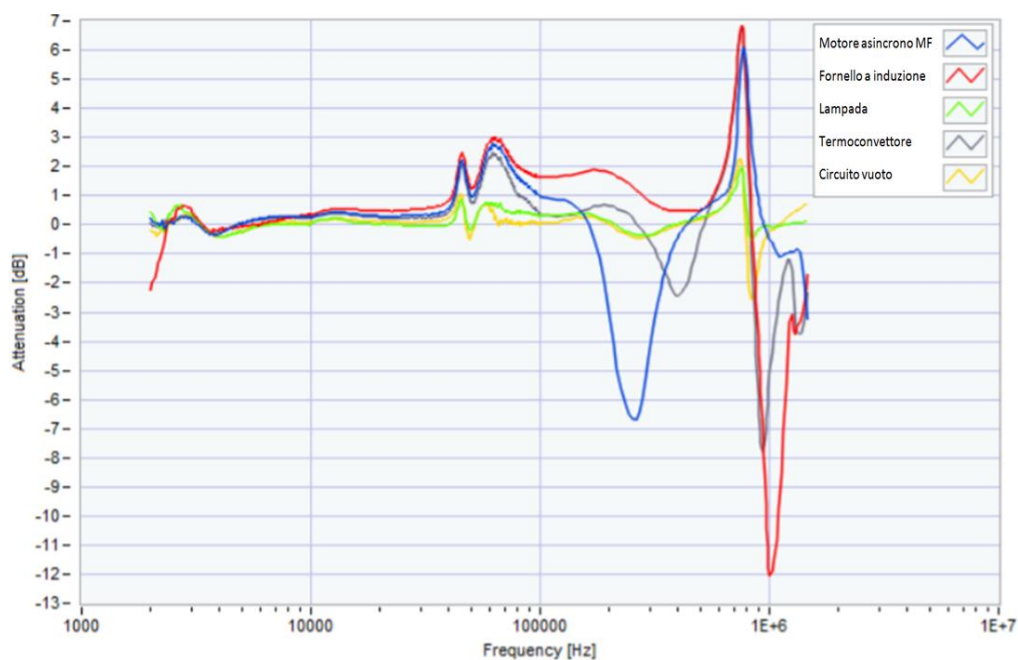


Fig. 102 Scostamenti dal funzionamento a vuoto delle diverse condizioni di carico

I risultati ottenuti in questa nuova condizione sono riportati nella nuova matrice di errore. La rete neurale ha commesso, in questa configurazione un totale di 10 errori su 104 esempi, cioè il 9% di errore. Nello specifico gli errori sono:

- 0 su 13 prove nel riconoscimento del funzionamento a vuoto, del funzionamento con sola lampada e del funzionamento con solo motore;
- 3 su 13 prove nel riconoscimento della piastra ad induzione;
- 3 su 13 prove nel riconoscimento del termoconvettore;
- 3 su 13 prove nel riconoscimento del funzionamento misto termoconvettore/motore;
- 1 su 13 prove nel riconoscimento del funzionamento misto piastra ad induzione/motore;
- 0 su 13 prove nel riconoscimento del funzionamento misto piastra ad induzione/mini termoconvettore.

La modifica ha apportato un miglioramento evidente con un tasso di errore dimezzato e il sistema, in questa nuova configurazione, si è dimostrato capace di discriminare in modo soddisfacente le differenti condizioni di alimentazioni dell'impianto. La maggior parte degli errori si è manifestata nel riconoscimento delle combinazioni miste, ciò è dovuto al comportamento della piastra a induzione che è risultata dominante sugli altri carichi, rendendo difficile per il sistema discriminare la condizione in cui la piastra a induzione è alimentata da sola rispetto a quando è alimentata insieme a più carichi.

Tabella X Matrice di errore, ottenuta dallo scostamento delle misure SFRA

		Output del sistema							
		0	1	2	3	4	5	6	7
Output attesi	0	13	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	13	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	13	0	0	0	0	0
	3	0	3	0	10	0	0	3	0
	4	0	0	3	0	10	0	0	0
	5	0	0	0	3	0	10	0	0
	6	0	0	0	1	0	0	12	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	13

In base ai risultati ottenuti si può concludere che l'approccio combinato tra Machine Learning e tecnica SFRA è una valida soluzione per le applicazioni NILM. L'identificazione dei dispositivi connessi ad un'utenza elettrica che ha come obiettivo finale quello di monitorare le condizioni di alimentazione dei singoli apparati elettrici e/o elettrodomestici è sicuramente utile sia per il consumatore che per il distributore, ad esempio per formulare strategie che consentano un utilizzo ottimale dell'energia anche a scopo di aumentare la resilienza dell'impianto. La soluzione di implementare una piattaforma IoT a basso impatto per catturare la firma SFRA istantanea dell'impianto risulta abbastanza pratica, in quanto dal punto di vista

hardware non prevede l'installazione di alcun trasduttore invasivo se non solo l'inserimento della presa dello strumento di cattura nell'impianto.

A differenza di altri sistemi NILM, questa soluzione non prevede un monitoraggio continuo ma può essere utilizzato per fornire informazioni in qualsiasi momento l'utente lo richieda tramite una misura che attualmente dura 60 secondi. L'univocità della firma anche per carichi multi stato e variabili risulta un altro vantaggio di questo sistema rispetto ad altre tecniche NILM.



# Capitolo 4

## Applicazioni per l'aumento della resilienza dei singoli componenti

L'aumento della resilienza del sistema elettrico d'utenza può essere ottenuto anche con tecniche che vanno ad agire su un singolo componente di impianto.

Nello specifico, durante il corso di dottorato, sono state proposte tre soluzioni, ossia:

- analisi delle vibrazioni dei componenti elettrici come quadri e motori;
- diagnostica dei guasti sui trasformatori IT-M;
- diagnostica dei guasti sugli interruttori AFDD.

I componenti elettrici possono essere monitorati anche attraverso altre tecniche lontane dalla misurazione delle grandezze elettriche caratteristiche. Se si considera ad esempio un motore elettrico, esso può essere monitorato analizzando le sue vibrazioni, tenendo presente che queste ultime sono dipendenti sia dal design dello stesso che dalle incertezze di accoppiamento e realizzazione delle parti meccaniche. Inoltre, altre vibrazioni potrebbero presentarsi quando il componente si sta deteriorando o sta iniziando a lavorare in condizioni sfavorevoli. Per quanto riguarda i trasformatori IT-M, componenti ideati per rendere l'impianto a valle sicuro, essi possono essere soggetti a guasti da deterioramento non visibili con le normali tecniche di test. Per tale motivo, per l'analisi delle vibrazioni e la diagnostica dei trasformatori IT-M sono state realizzate due piattaforme IoT descritte in seguito.

Nel terzo caso, invece, si propone un metodo di prova sperimentale, al fine di verificare il corretto funzionamento di interruttori magnetotermici con funzione di protezione da arco elettrico. L'arco è una condizione dannosa, che può provocare incendi elettrici soprattutto in prossimità di materiali infiammabili o non resistenti al calore. Pertanto, già le norme elettriche nazionali degli Stati Uniti richiedono l'installazione di interruttori per l'interruzione dell'arco elettrico in tutte le aree residenziali. Tuttavia, tali dispositivi, essendo delicati e dipendenti da un microcontrollore, possono guastarsi e quindi potrebbero non funzionare in caso di necessità. Al momento non esistono dei metodi di test per confermare il corretto funzionamento di questo tipo di dispositivi, ciò nonostante i risultati ottenuti con il presente lavoro di tesi hanno verificato che il metodo proposto può essere un'interessante soluzione. Infatti, esso getta le basi per un sistema di prova portatile per il controllo periodico dei sistemi elettrici in cui sono installati i dispositivi di rilevamento dell'arco elettrico (AFDD). Tuttavia,

anche se tale sistema è portatile e a basso costo ed è assai utile ad aumentare la resilienza dei componenti quali gli AFDD, richiedendo l'utilizzo di scaricatori di sovratensione intercambiabili, non rientra tra le soluzioni IoT.

## **4.1 Analisi spettrale della vibrazione per aumentare la resilienza**

In questo capitolo è stato esaminato un dispositivo IoT che analizza lo spettro delle vibrazioni dei macchinari e soprattutto degli apparati elettrici rotanti come i motori. Nel nuovo paradigma dell'industria 4.0, i dispositivi di controllo remotizzati e di monitoraggio remoto in tempo reale hanno avuto un largo sviluppo. Queste nuove tecnologie hanno permesso l'evoluzione e il miglioramento di molti processi industriali.

In un impianto d'utenza sono presenti centinaia di apparecchi elettronici, quadri elettrici, motori ecc., ciò rende alcune tecnologie sviluppate per l'industria 4.0 adatte anche a questo tipo di strutture. Infatti, sia negli impianti di utenza che nelle industrie sono presenti soluzioni comuni come data management, miglioramento dei servizi, gestione automatica di alcuni processi, ma anche la parte di interazione uomo-macchina.

Questa evoluzione può essere implementata aumentando l'utilizzo di dispositivi IoT, che consentono la collaborazione tra macchine e sistemi di misura, con il personale addestrato attraverso l'utilizzo di Smartphone, tablet e/o sinottici digitali sfruttando la comunicazione internet e i database [100, 101].

Le squadre di manutenzione come elettricisti, ascensoristi, idraulici, esperti di refrigerazione o informatici oggi non eseguono più semplici operazioni di riparazione dopo una chiamata, ma sono chiamati a supervisionare l'intera struttura di loro competenza tramite cellulari o tablet, fornendo le prime operazioni da remoto.

Purtroppo, per interagire con queste nuove tecnologie, i diversi operatori hanno dovuto apprendere nuove nozioni multidisciplinari, soprattutto quelle informatiche, e questo non è stato semplice, specie per coloro che non sono nati nell'era "digitale".

In passato le regolazioni venivano effettuate "a mano", cioè attraverso l'utilizzo di attrezzatura meccanica come pinze, cacciaviti ecc., mentre ora quasi tutti i dispositivi elettrici sono provvisti di un microcontrollore interno. Nella maggior parte dei casi la programmazione viene effettuata o attraverso lo schermo a corredo dell'apparecchiatura o attraverso il collegamento ad un PC ed all'utilizzo di un programma.

Un classico esempio è il termostato, in quanto in passato in caso di semplice termostato a singola soglia termomeccanica per impostare la temperatura bastava ruotare la rotellina. Nei modelli più recenti le soglie potevano essere impostate attraverso dei pulsanti accedendo al menu di programmazione. In quelli di nuova concezione invece non si trovano più dei tasti sul dispositivo, poiché questi ultimi sono stati sostituiti dalla connessione bluetooth o Wi-Fi, che permette di collegarsi al cellulare e scaricare le soglie impostandole tramite un'app.

Anche i nuovi macchinari si sono evoluti, infatti si trovano dispositivi sempre più autonomi, che analizzano le loro condizioni e segnalano se ci sono anomalie, forniscono informazioni per le operazioni di manutenzione e interpretano i dati per prevenire un possibile guasto.



Fig. 103. a) termostato manuale, b) termostato digitale, c) termostato Smart con APP

Certamente ogni operazione di monitoraggio dei dispositivi elettromeccanici si basa principalmente sull'acquisizione delle grandezze elettriche, come tensioni, correnti, potenza ecc., ma per aumentare la resilienza delle apparecchiature occorre anche andare a monitorare il maggior numero di parametri possibili attraverso sensori a basso costo. Dato il considerevole numero di apparecchi che utilizzano trasformatori e motori, un'utile informazione che può dare indicazione sullo stato del sistema può essere data dalle misure delle vibrazioni.

Sui trasformatori le principali vibrazioni sono dovute alla magnetostrizione, ma ci possono essere ulteriori sollecitazioni meccaniche dovute a armoniche o fluttuazioni di tensione. Inoltre, le vibrazioni sulla macchina permettono di captare anche continue variazioni di carico

o interventi delle protezioni [102]. In pratica, ogni condizione di lavoro può essere valutata attraverso un'attenta analisi delle vibrazioni.

Sulle macchine rotanti presenti negli ospedali, come motori elettrici di pompe, compressori, ventilatori, possono verificarsi vibrazioni causate da alberi e giunti non allineati o cuscinetti rovinati. Il disallineamento può essere dovuto anche ad espansioni termiche non uniformi, flange non perfettamente accoppiate o strutture di supporto deboli. I disallineamenti che si possono verificare si possono suddividere in:

- disallineamenti angolari: quando due assi di due macchine accoppiate non sono paralleli;
- disallineamenti paralleli: quando i due assi delle due macchine accoppiate sono disassati.

Il disallineamento angolare provoca delle vibrazioni con frequenza pari alla frequenza di rotazione dell'albero, mentre il disallineamento parallelo provoca vibrazioni con frequenza doppia rispetto alla frequenza di rotazione. Di solito, il disallineamento deriva da una combinazione dei due aspetti, anche a causa di difetti di fabbricazione degli apparecchi.

Questa analisi può essere utilizzata per valutare un'operazione di riparazione o come controllo di routine.

Una possibile soluzione IoT può essere basata sull'impiego di un chip accelerometro letto da un microcontrollore Photon attraverso un collegamento UART full-duplex come descritto in [103].

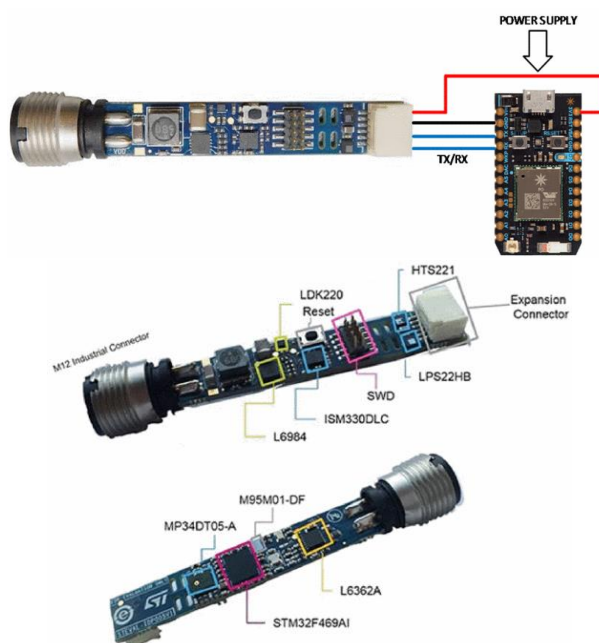


Fig.104 Piattaforma IoT per analisi delle vibrazioni

Nel presente lavoro è stato utilizzato il sensore ISM330DLC: accelerometro e giroscopio 3D il cui schematico è mostrato in figura 105.

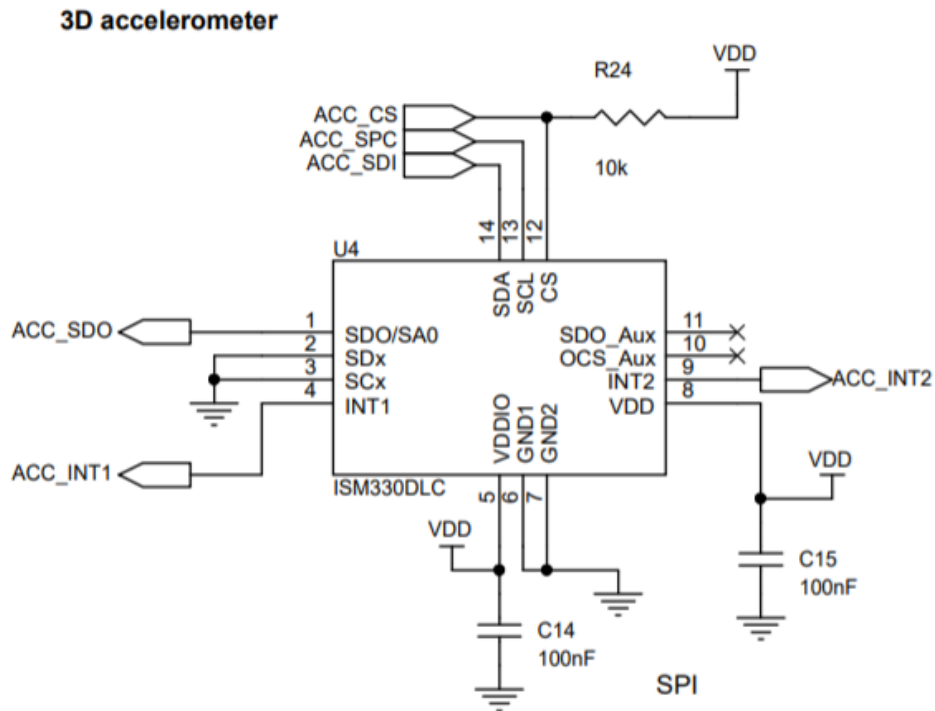


Fig.105 Schema circuitale del chip ISM330DLC

I dati dell'accelerometro venivano letti ed elaborati dal chip STM32F469AI, microprocessore ARM Cortex-M4 a 32 bit, per poi essere salvati sull'EEPROM M95M01-DF. Infine, tramite comunicazione seriale a 230.4 kbps questi venivano spediti alla piattaforma di sviluppo Particle Photon.

A differenza dei tradizionali strumenti di rilevamento delle vibrazioni basati sulla tecnologia piezoelettrica, il chip usato sfrutta la tecnologia MEMS capacitiva [104]. I principali vantaggi di tale soluzione possono essere così riassunti:

- un recupero rapido dopo uno shock elevato;
- risposta in frequenza a partire dalla componente continua;
- buona stabilità nel tempo e in un ampio range di temperatura;
- uscita digitale.

Ulteriori vantaggi del chip sono:

- i) autotest integrato;
- ii) basso consumo;
- iii) dimensioni ridotte;
- iv) iv) peso ridotto.

Il chip campiona con frequenza 3,3 kHz ed elabora i dati con un filtro antialiasing analogico a 1,5 kHz. La risoluzione in frequenza è di 1,46 Hz considerando che la FFT viene eseguita su un buffer di 2048 campioni.

I dati vengono in seguito condivisi dal dispositivo Particle Photon su una piattaforma cloud per gestire e monitorare più dispositivi IoT. Il Photon è un System on Chip (SOC) composto dal chip Broadcom BCM43362 Wi-Fi 802.11 b/g/n e da un ARM Cortex M3 STM32F205RGY6 120 MHz. Il modulo Wi-Fi incorporato consente la comunicazione su rete internet. Inoltre, ha 1MB flash e 128KB RAM e 18 GPIO. Tale sistema è progettato per l'utilizzo con un Sistema operativo in tempo reale (FreeRTOS) [105].

Gli effetti negativi delle vibrazioni sono legati sia all'ampiezza che alla frequenza delle oscillazioni. La velocità è una misura diretta di questi due effetti, essendo una funzione di questi parametri. L'accelerazione è strettamente correlata alle forze dinamiche e quindi è utilizzata per analizzare vibrazioni ad alta frequenza. Invece, la velocità è comunemente utilizzata per misurare e analizzare le vibrazioni a bassa frequenza (poche centinaia di hertz).

Quindi, i dati utilizzati per la diagnosi vengono elaborati sia nel dominio della frequenza che nel dominio del tempo. Per fare ciò i segnali acquisiti dal MEMS a tre assi vengono pre-filtrati con un filtro passa-alto per eliminare la tensione di Bias, poi tramite un integratore viene calcolata la velocità.

La velocità ( $v$ ) e l'accelerazione ( $a$ ) vengono successivamente analizzate anche nel dominio del tempo per fornire informazioni immediate; perciò i parametri di picco e RMS calcolati, vengono esaminati andando a catturare eventi al di sopra dei limiti di soglia prestabiliti. I dati nel dominio della frequenza vengono invece confrontati con quelli precedentemente acquisiti per verificare il corretto comportamento del sistema sotto monitoraggio.

Il posizionamento del trasduttore sull'apparato sotto misura è delicato, in quanto la direzione dell'asse rotante dovrebbe essere ad esempio vincolata alla direzione dell'asse x e il vettore normale alla base dell'apparato dovrebbe essere vincolato all'asse z. Per evitare gli errori

dovuti al cattivo montaggio, le maschere di analisi vengono applicate al vettore risultante espresso in coordinate polari  $(\rho, \theta, \phi)$  come mostrato in figura.

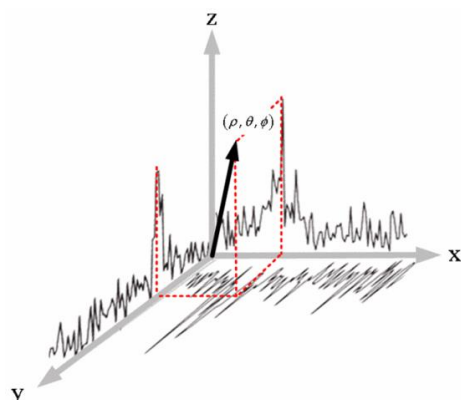


Fig. 106 Rappresentazione  $(\rho, \theta, \phi)$  del vettore di vibrazione

Quindi ogni sistema IoT invia i dati tramite una rete locale Wi-Fi al Cloud Particle utilizzando l'API Rest come architettura software. Inoltre, il Particle fornisce una piattaforma WEB che permette di gestire il Photon se connesso e permette di aggiornare il firmware da remoto. Questa funzione risulta molto utile quando si sta sviluppando una nuova piattaforma oppure quando si riscontrano errori o bug software di programmazione e si vuole intervenire rapidamente sui sistemi già installati.

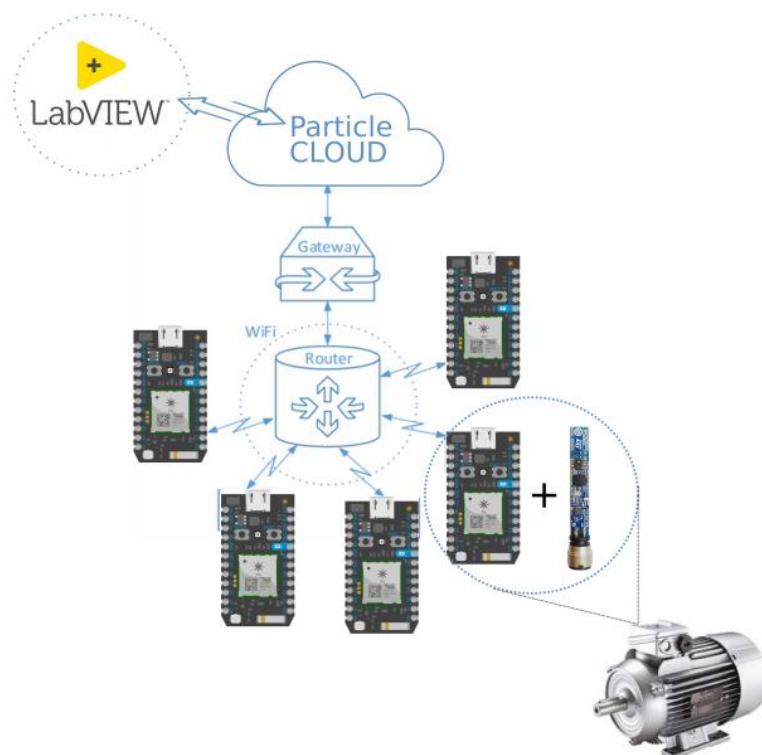


Fig. 107 Schema del sistema IoT proposto per l'analisi delle vibrazioni



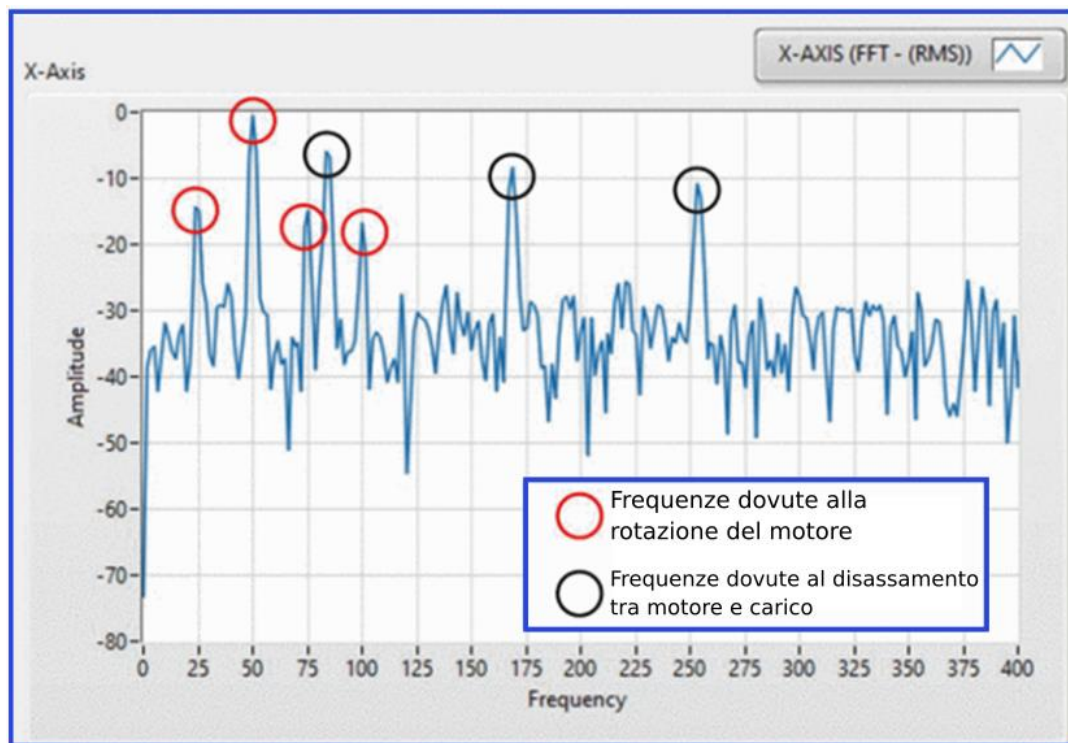


Fig. 108 Risultato del sistema proposto

Tutto ciò consente di capire come una piattaforma IoT di basso costo, anche inferiore a 150 euro, permette di rilevare i guasti di apparecchi presenti in ambito industriale con lo scopo di aumentare la resilienza generale. Dopo aver fornito ogni motore o apparecchio elettrico di un suo piccolo analizzatore vengono campionati gli stati e le vibrazioni caratteristiche creando così un'impronta digitale di ogni apparato. Impostate le soglie di allarme si possono tenere sotto controllo tutti gli apparecchi che rilevano punti fuori dalle finestre di allarme per poter intervenire prontamente mantenendo il sistema sempre alla massima efficienza.

## 4.2 Piattaforma IoT per la diagnostica dei trasformatori IT-M

Gli ambienti dove vengono utilizzati i trasformatori IT e IT-M, come gli ospedali, in molti casi devono garantire la continuità del servizio anche a seguito di guasti elettrici. Ad esempio, nei locali medici il trasformatore non solo trasferisce potenza, ma allo stesso tempo isola i dispositivi vitali dalla fonte di alimentazione. Tuttavia, anche se dopo il primo guasto i dispositivi continuano a funzionare, i rischi legati ad un secondo guasto aumentano e quindi viene meno la sicurezza della rete isolata. L'utilizzo dell'elettricità comporta sempre un rischio potenziale, principalmente quando questi dispositivi vengono utilizzati con persone in condizioni di salute precarie o con minore capacità di reazione.

I dispositivi di controllo del primo guasto (isol-tester) sono presenti per legge in tutti gli impianti ospedalieri e controllano continuamente l'isolamento tra la rete primaria e la rete isolata. Una seconda piattaforma per la diagnosi in linea di questi trasformatori può svolgere un ruolo cruciale in termini di sicurezza, consentendo di analizzare il loro stato e di valutarne l'affidabilità nel tempo.

La tecnica SFRA rappresenta una possibile soluzione per monitorare lo stato e prevenire guasti. In installazioni critiche, il test potrebbe essere eseguito in automatico su base giornaliera, tramite un misuratore IoT a basso costo connesso al trasformatore.

La maggior parte delle apparecchiature elettriche passive, come il trasformatore di isolamento, possono essere considerate circuiti RLC, che producono una firma unica in frequenza [106]. In tali circuiti, alimentati con un segnale alternato con frequenza  $f$  e frequenza angolare  $\omega = 2\pi f$ , si possono identificare componenti discrete quali:

- resistenza  $R$ : costante al variare della frequenza;
- reattanza capacitiva  $X_C = 1/2\pi fC$  che si riduce all'aumentare della frequenza;
- reattanza induttiva  $X_L = 2\pi fL$  che aumenta con l'aumentare della frequenza.

L'impedenza dei singoli componenti varia con la frequenza come è possibile osservare in figura 109.

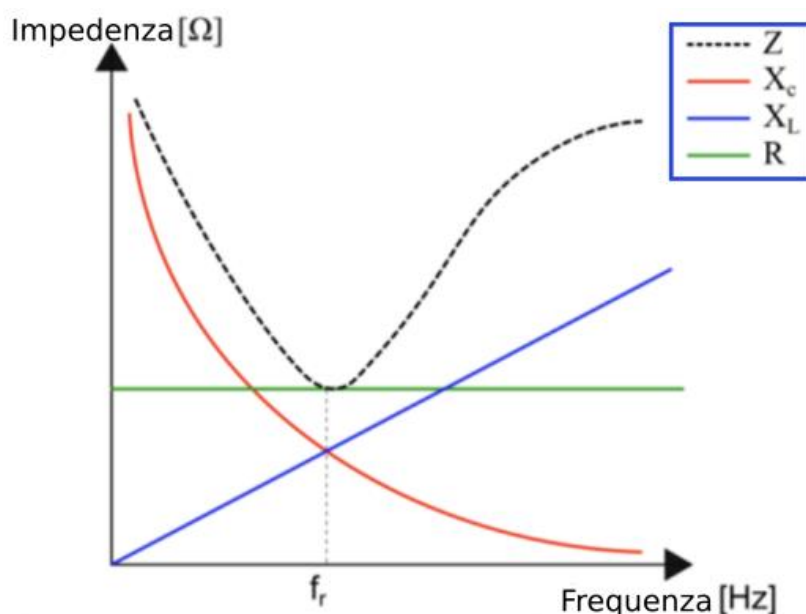


Fig. 109. Curve delle varie impedenze dei componenti elettrici

Il trasformatore è considerato una rete complessa di componenti RLC collegati tra loro e che possono avere anche più frequenze di risonanza. Qualsiasi variazione meccanica ed elettrica può causare una variazione dei parametri che influisce su una variazione della risposta in frequenza.

L'obiettivo della SFRA è determinare la funzione di trasferimento (TF) di ciascun avvolgimento del trasformatore in un determinato intervallo di frequenza. Nel dettaglio, le caratteristiche del TF dipendono dai diversi parametri elettrici e meccanici del trasformatore, quali la potenza nominale, il livello di tensione, i tipi di avvolgimenti, il nucleo magnetico e l'isolamento.

Dunque, l'analizzatore SFRA può identificare le seguenti anomalie nel trasformatore [107]:

- (i) deformazione del nucleo magnetico;
- (ii) deformazione degli avvolgimenti;
- (iii) difetti dello schermo;
- (iv) cortocircuiti o interruzione degli avvolgimenti;
- (v) degrado dell'isolamento [108-112].

Come richiesto dalle norme IEC 60076-18 [113], il test SFRA viene già eseguito di norma su ogni trasformatore durante il processo produttivo, per verificare se ci sono problemi di fabbricazione o di assemblaggio [114, 115].

I tipi più comuni di guasto che interessano i trasformatori IT-M si possono classificare in guasti interni ed esterni [116, 117]. I primi riguardano: (i) cortocircuiti tra spire; (ii) deformazioni degli avvolgimenti; (iii) danni all'isolamento; (iv) deformazioni del nucleo; (v) danni al sistema di protezione; (vi) surriscaldamento nelle condizioni di funzionamento nominali dovuto a dissipazione termica inefficiente.

Tra le cause di guasto esterne si possono considerare: (i) cortocircuiti sulla rete esterna; (ii) fenomeni di power quality; (iii) sovraccarichi.

La deformazione degli avvolgimenti è dovuta a sollecitazioni termiche o meccaniche [118]. Queste ultime possono comportare variazioni dimensionali dovute ad allentamento e spostamento sia degli avvolgimenti che dei lamierini del nucleo. La deformazione del nucleo provoca un aumento delle perdite dovute a isteresi e correnti parassite, che portano ad un aumento della temperatura complessiva della macchina. Le sollecitazioni termiche possono insorgere a causa di caratteristiche inadeguate dei materiali che compongono il trasformatore, ma anche a causa della ridotta efficienza del sistema di raffreddamento o del superamento dei limiti massimi di corrente.

I trasformatori, sebbene raffreddati ad aria, sono solitamente installati in box o custodie sigillate, all'interno di apparecchiature mediche, sale operatorie e quadri di distribuzione. Questa condizione porta frequentemente ad una ventilazione non corretta con conseguente persistenza di surriscaldamenti. L'aumento della temperatura degli avvolgimenti provoca un rapido degrado dell'isolamento e una diminuzione della durata del trasformatore. Il dispositivo di controllo della temperatura, che attiva una segnalazione in caso di surriscaldamento senza interrompere l'alimentazione, è consigliato ma non obbligatorio.

Oltre agli effetti di una ventilazione inappropriata, anche i sovraccarichi aumentano la temperatura interna del trasformatore. Il sovraccarico viene solitamente evitato dal dispositivo di protezione che, per le sue caratteristiche, può consentire un sovraccarico fino al 40% per un tempo indefinito. Il guasto dovuto ad effetti termici è irreversibile, infatti ad esso può essere posto rimedio solo sostituendo l'avvolgimento di fase o sostituendo completamente la macchina, a seconda del costo del trasformatore.

L'invecchiamento è influenzato anche dalle condizioni atmosferiche come temperatura, ambiente e umidità a cui è sottoposto il trasformatore. Diventa quindi inevitabile il controllo periodico dell'integrità meccanica e dell'invecchiamento dei trasformatori, in quanto una

localizzazione tempestiva delle deformazioni degli avvolgimenti aiuta a prevenire guasti critici [119] .

Il test SFRA viene eseguito iniettando un segnale sinusoidale a bassa tensione ad un'estremità dell'avvolgimento del trasformatore e misurando la tensione all'altra estremità dell'avvolgimento del trasformatore stesso. Il rapporto tra la tensione di ingresso e quella di uscita viene quindi visualizzato nel dominio della frequenza in dB. L'impedenza del trasformatore sotto test attenua e interrompe il segnale iniettato [120]. Per rimuovere gli effetti dei puntali viene utilizzato un sistema a tre conduttori, uno per iniettare il segnale nel punto A (ingresso), uno per misurare la tensione nel punto A e il terzo per misurare simultaneamente la tensione nel punto B (uscita).

Si tratta di un metodo di misurazione comparativo, dove si analizza come la TF varia nel tempo: la TF ottenuta sul trasformatore nuovo o appena assemblato viene confrontata con la TF dopo il guasto o dopo un certo periodo di tempo [121]. La TF(f) in decibel è calcolata mediante la seguente equazione [122, 123] :

$$TF_{db} = 20\log\left(\frac{|V_2|}{|V_1|}\right)$$

dove  $V_1$  è il segnale di ingresso applicato a un'estremità dell'avvolgimento in prova e  $V_2$  è il segnale di uscita misurato all'altra estremità.

Nella misura della SFRA, la  $V_1$  viene misurata all'estremità dell'avvolgimento del trasformatore e non all'uscita del generatore di segnale, per tenere conto degli effetti del cavo coassiale che collega il generatore all'avvolgimento.  $V_1$  e  $V_2$  si misurano rispetto alla massa mettendo in parallelo una resistenza di  $50\Omega$  [124]. L'impostazione della misurazione è mostrata in figura 110.

Il rapporto tra le due tensioni è:

$$\frac{\vec{V}_2}{\vec{V}_1} = \frac{50\Omega}{\vec{Z} + 50\Omega}$$

dove  $\vec{Z}$  è l'impedenza dell'avvolgimento del trasformatore e varia con la frequenza.

I trasformatori di isolamento possono essere assimilabili ad una rete elettrica complessa composta da capacità, induttanze e resistenze. Ogni trasformatore ha una rete propria che fornisce una risposta in frequenza unica, con amplificazioni o attenuazioni del segnale in

uscita, a causa di risonanze interne. Da un punto di vista teorico, la funzione di trasferimento di un trasformatore di isolamento può essere analizzata considerando tre range di frequenza, in ognuno dei quali si ha un diverso comportamento dell'avvolgimento in prova [125].

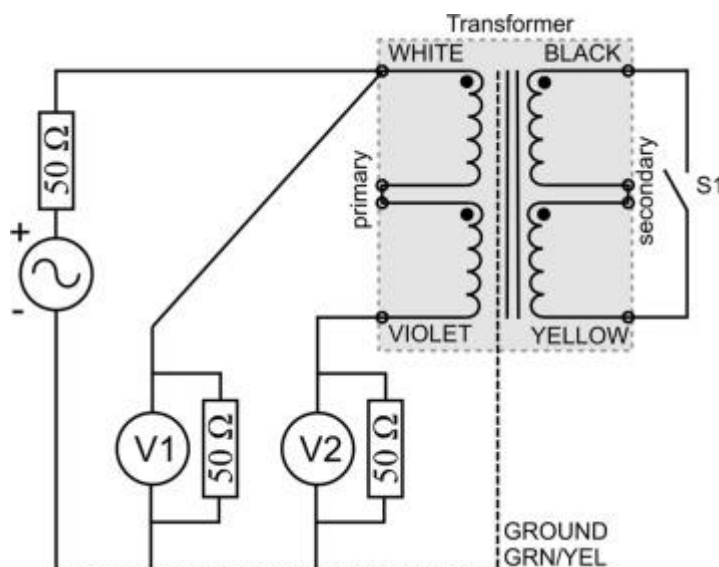


Fig. 110 Schema di misura per il test SFRA sul trasformatore

Nel range 10 Hz – 10 kHz, il trasformatore si comporta come una rete induttiva-resistiva, la cui attenuazione è parzialmente compensata da fenomeni capacitivi, normalmente a partire da 1 kHz. In questo intervallo di frequenza è importante distinguere i risultati SFRA ottenuti con gli altri avvolgimenti aperti o chiusi in cortocircuito [126]. Quando gli altri avvolgimenti sono tenuti aperti, la TF mostra un'attenuazione massima, il cui valore dipende dalla potenza nominale e dal livello di isolamento del trasformatore. Quando l'altro avvolgimento viene cortocircuitato si riduce l'effetto del nucleo e l'attenuazione risultante può essere dovuta solo agli effetti resistivi, come per un induttore in aria.

Nel range di frequenze da 1 kHz a 1 MHz, l'effetto del nucleo perde progressivamente influenza, in modo che la TF sia legata solo alle caratteristiche fisiche dell'avvolgimento in prova e lo smorzamento del punto di risonanza sia dovuto alle perdite dielettriche e resistive. In questa gamma di frequenze, la TF mostra una sequenza unica di picchi di risonanza e anti-risonanza, il cui numero generalmente aumenta nel tempo a causa dell'invecchiamento del trasformatore.

A frequenze più alte, fino a 2 MHz e oltre, gli effetti capacitivi diventano fortemente prevalenti, in quanto gli elementi secondari, così come la configurazione del setup di misura, possono avere effetti apprezzabili sulla TF.

Le variazioni della risposta TF rispetto alla frequenza evidenziano le variazioni di impedenza legate ai componenti capacitivi e induttivi, mentre le variazioni della TF nel tempo dello stesso trasformatore sono indicative di cambiamenti fisici all'interno degli avvolgimenti del trasformatore, le cui cause però devono essere individuate e studiate.

Il prototipo per il test SFRA, come tutti i dispositivi IoT deve essere di piccole dimensioni ed economico e progettato per la supervisione dei trasformatori già installati. Secondo le norme, il sistema di misura SFRA deve verificare le seguenti specifiche [127]:

- precisione del rapporto  $V_{out}/V$  in migliore di  $\pm 1$  dB nell'intervallo da +10 dB a -80 dB;
- precisione del rapporto  $V_{out}/V$  in migliore di  $\pm 0,3$  dB nell'intervallo da +10 dB a -40 dB;
- precisione di misurazione di fase migliore di  $\pm 1^\circ$  nell'intervallo da +10 dB a -40 dB;
- larghezza di banda massima di 10 Hz per frequenze inferiori a 100 Hz e minore del 10% per misure a frequenza superiore a 100 Hz;
- tensione di ingresso fino a 50 V<sub>pp</sub>;
- impedenza caratteristica pari a 50  $\Omega$  e attenuazione inferiore a 0,3 dB a 2 MHz per il cavo coassiale di ingresso e uscita;
- impedenza interna del generatore, impedenza dello strumento di misura in ingresso e impedenza caratteristica del cavo di 50  $\Omega \pm 2\%$  per l'intero range di misura.

Lo strumento IoT è stato sviluppato utilizzando la piattaforma di sviluppo Digilent Analog Discovery 2 [128], ossia uno strumento multifunzione collegato tramite USB ad un Raspberry pi 4, che permette di inviare i dati al server in cui è stato installato un software ad hoc sviluppato in ambiente NI LabVIEW. Le caratteristiche principali dell'Analog Discovery 2, che ne hanno determinato la scelta, sono riportate di seguito:

- generatore di funzioni a due canali ( $\pm 5V$ , 14 bit, 100 Msample/s, larghezza di banda 20 MHz con la scheda adattatore BNC di Analog Discovery);
- oscilloscopio a due canali (1 M $\Omega$ ,  $\pm 25V$ , differenziale, 14 bit, 100 Msample/s, larghezza di banda 30 MHz con la scheda adattatore BNC di Analog Discovery).

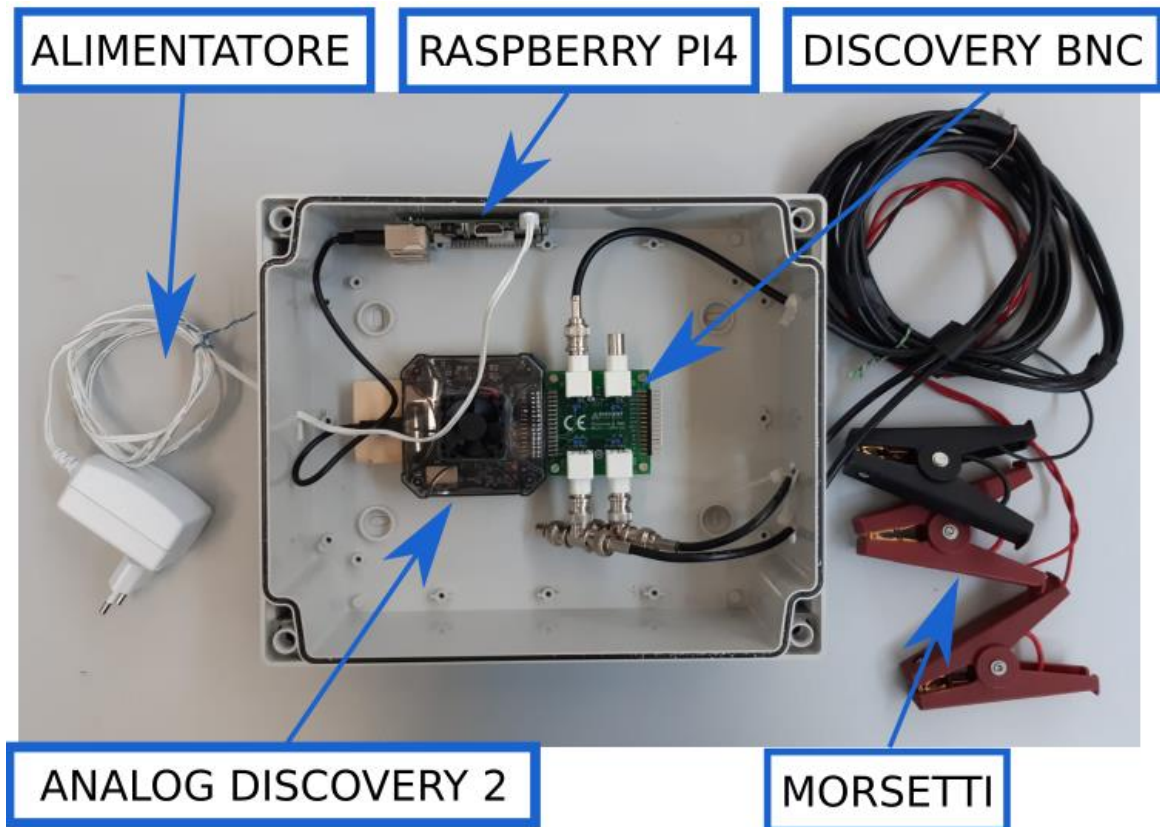


Fig. 111 Apparato IoT per la misura SFRA

La scheda Digilent Discovery BNC è collegata all'unità Analog Discovery 2. Il canale W1 di tale scheda è stato collegato al terminale che funge da generatore di segnale a frequenza variabile. I canali CH1 e CH2 sono invece utilizzati come oscilloscopi e sono stati collegati in parallelo a due resistenze BNC da 50  $\Omega$ .

I cavi coassiali collegano:

- il generatore con il principio dell'avvolgimento in prova;
- il principio dell'avvolgimento in prova con il primo canale dell'oscilloscopio;
- l'estremità dell'avvolgimento in prova con il secondo canale dell'oscilloscopio.

Il programma che analizza i dati è stato sviluppato nell'ambiente NI LabView, la cui interfaccia è rappresentata in figura 112. Una volta caricati i dati delle misure salvati sul Cloud, è possibile visualizzare la TF di ampiezza e fase, effettuare confronti visivi tra diverse curve salvate nel tempo e calcolare i coefficienti di cross-correlation.





Fig.112 Interfaccia del programma LabView per il test SFRA.

Questo strumento di misura è quindi in grado di eseguire misurazioni ripetitive. L'Analog Discovery 2 ha anche 16 pin I/O digitali, che sono utilizzati per creare una piattaforma fissa di monitoraggio del trasformatore [129] mediante alcuni relè, che distaccano il trasformatore dalla rete e creano un cortocircuito sull'avvolgimento secondario. Quando il trasformatore non è utilizzato, quindi, la piattaforma lo scollega dalla rete e collega gli avvolgimenti al generatore di funzioni e all'oscilloscopio, per effettuare le misure. Dopo il test, il trasformatore viene ricollegato automaticamente per il normale funzionamento.

#### 4.2.1 Analisi dei guasti dei trasformatori di isolamento

Il test preliminare della piattaforma è stato realizzato su 10 trasformatori di isolamento monofase per uso medico TRIAD MAGNETICS modello VPM240-4170, mostrati in figura 113 come descritto in [130].

Lo schema circuitale del trasformatore è osservabile in figura 114. Presenta avvolgimenti multipresa sia al primario che al secondario avvolti attorno ad un nucleo toroidale, formato da un unico lamierino magnetico avvolto su sé stesso. Il vantaggio della costruzione toroidale consiste nell'aver buone prestazioni con dimensioni e pesi contenuti e nella diminuzione dei flussi dispersi. Questi ultimi sono ulteriormente ridotti anche dalla presenza di un ulteriore schermo magnetico esterno. Tra l'avvolgimento primario e secondario è presente uno schermo composto da una nastratura di rame, collegata all'esterno tramite il filo giallo-verde.



Fig. 113. Trasformatore per uso medico TRIAD MAGNETICS VPM240-4170.

Il trasformatore può essere alimentato a 100, 120, 220, 240 VAC, 50/60 Hz e le tensioni di uscita possono essere pari a 120 VAC (con corrente massima pari a 8,34 A) o a 240 VAC (con corrente massima pari a 4,17 A), per una potenza massima trasferita di 1000 VA. La particolare configurazione del trasformatore consente dispersioni verso terra inferiori a 10  $\mu$ A come stabilito da Norma.

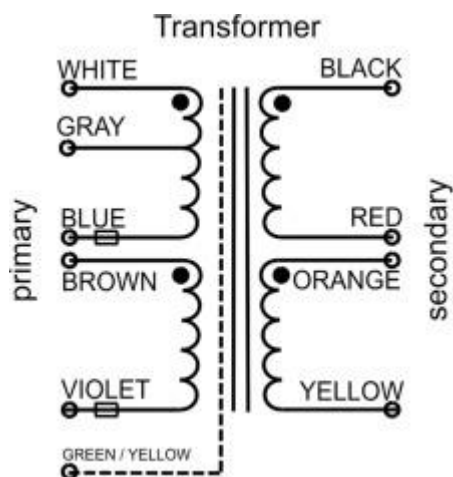


Fig. 114. Circuito interno del TRIAD MAGNETICS VPM240.

Per l'isolamento galvanico di una rete 230V, i fili blu e marrone devono essere ponticellati così come i fili rosso e arancione [131]. La linea di ingresso deve essere collegata ai fili

bianco e viola mentre il circuito secondario va collegato ai fili nero e giallo, per avere un rapporto di trasformazione 1:1 (figura 114).

Le misure a vuoto sono state effettuate ponendo il generatore in serie all'avvolgimento primario e misurando con l'oscilloscopio le tensioni  $V_1$  e  $V_2$  alle due estremità dell'avvolgimento, come mostrato in figura 110, mantenendo aperto il secondario (interruttore S1 aperto). Nella parte iniziale del grafico, il TF mostra un'attenuazione, dovuta all'aumento della reattanza induttiva con la frequenza. Alle medie frequenze, la reattanza induttiva è compensata (punto minimo) dalla reattanza capacitiva, che poi diventa predominante alle alte frequenze.

In figura 115 è rappresentato il confronto tra le curve di 10 trasformatori TRIAD MAGNETICS, ottenuto con il test a vuoto da fili bianco-viola. A frequenze più basse, le curve sono influenzate dall'induttanza degli avvolgimenti; lo scostamento tra le curve è considerato come una tolleranza di fabbrica.

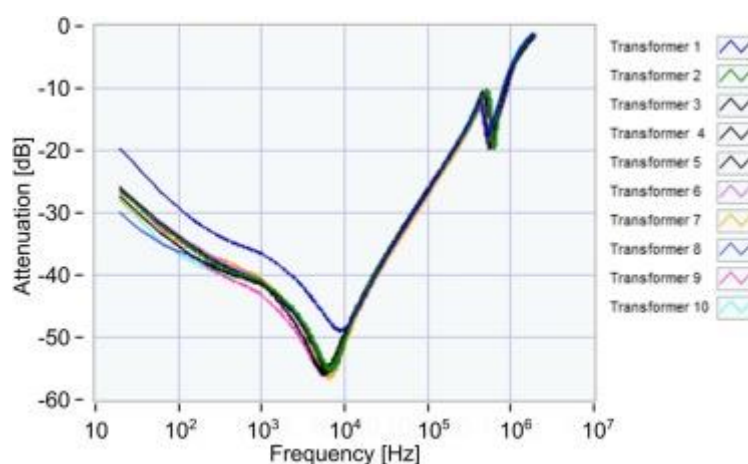


Fig. 115. Prova SFRA a circuito aperto dei trasformatori 1–10.

La prova in cortocircuito viene eseguita con il circuito secondario in cortocircuito. Alle basse frequenze, il TF è costante e vicino allo zero, perché l'influenza nel nucleo è trascurabile. Tuttavia, questa misura è utile per testare eventuali difetti dell'avvolgimento. Il minimo della TF si trova nel punto di risonanza (ampiezza minima e fase zero), quando vengono compensati gli effetti delle componenti capacitivi e induttivi (figura 116).

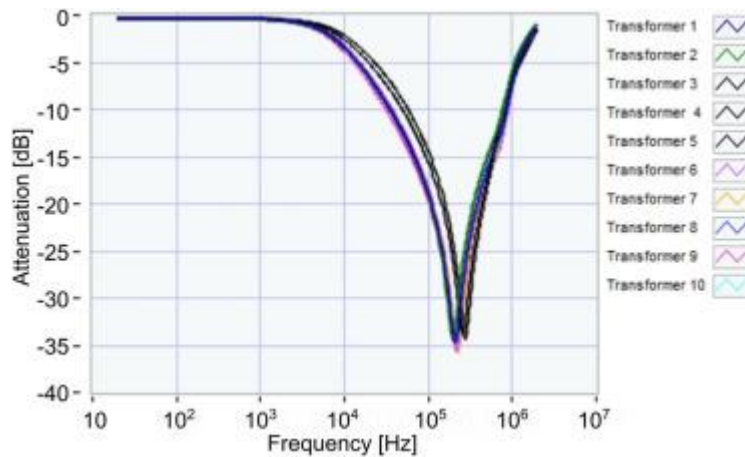


Fig. 116. Prova SFRA in cortocircuito dei trasformatori 1–10.

Come sottolineato in precedenza, ogni elemento costruttivo di un trasformatore può essere affetto da difetti e può produrre conseguenti problemi. Alcuni di loro sono frequenti e ben noti, altri sono più rari e meno evidenti e se trascurati, possono causare danni permanenti. Alcune tipologie di guasti sono stati riprodotti nel test per analizzare gli effetti prodotti dalle varie tipologie di difetti.

Il trasformatore 7 è stato scelto come trasformatore di riferimento, poiché all'interno del gruppo analizzato presentava valori intermedi dei parametri misurati. I trasformatori 5 e 8 sono stati esclusi dal test, in quanto avevano le curve della TF con uno scostamento significativo rispetto alla curva media della TF dell'insieme di trasformatori considerati. Gli altri trasformatori sono stati “modificati”, per riprodurre guasti realistici nel modo seguente:

- trasformatore n.1: invecchiamento accelerato;
- trasformatore n.2: danneggiato con prova di sovraccarico;
- trasformatore n.4: danneggiato da caduta senza imballo;
- trasformatore n.6: danneggiato da caduta con imballo;
- trasformatore n.9: guasto dello schermo elettrostatico;
- trasformatore n.10: guasto bobina-bobina.

Per evitare il surriscaldamento del trasformatore, i vani di installazione del trasformatore devono prevedere adeguati ricambi d'aria, ma spesso questi ultimi non sono garantiti a causa dell'installazione in cassette asettiche e chiuse, che accelerano così l'invecchiamento. Per simulare gli effetti dell'invecchiamento, il trasformatore n. 1 è stato portato a 190 °C per 4 giorni, come descritto dalla norma CEI 61558-1, per trasformatori con isolamento in classe F (tabella XI).

Tabella XI Temperatura di prova e tempo di prova per il test di invecchiamento

Temperatura di prova [° C]	Tempo di prova [giorni]				
<b>220</b>					4
<b>210</b>					7
<b>200</b>					14
<b>190</b>				4	
<b>180</b>				7	
<b>170</b>				14	
<b>160</b>			4		
<b>150</b>		4	7		
<b>140</b>		7			
<b>130</b>	4				
<b>120</b>	7				
<b>Classe termica</b>	100 ° C	115 ° C	120 ° C	140 ° C	165 ° C
<b>Classificazione</b>	A	E	B	F	H
<b>IEC 60,085 e IEC 60,216</b>					

Lo stato del trasformatore dopo il processo di invecchiamento è mostrato in figura 117. Effettuando un confronto con il trasformatore nuovo di figura 113, si evince che il nastro isolante di copertura è evidentemente deteriorato e le fessurazioni hanno comportato l'allargamento dello schermo metallico esterno di alcuni millimetri. I cavi di collegamento si sono deteriorati: hanno perso il loro colore originale e si sono induriti, inoltre, il filo giallo-verde collegato allo schermo, oltre alla perdita di colore, presenta delle crepe nell'isolamento principale.



Fig. 117. Stato del trasformatore dopo la prima fase del test di invecchiamento.

La prova di sovraccarico è stata eseguita collegando in serie i due avvolgimenti secondari con una resistenza di potenza da 23,5  $\Omega$ . Il primario del trasformatore è stato collegato all'alimentatore EMC Partner Harcs 1000 (generatore di forma d'onda sinusoidale pura a 230  $V_{rms}$ ) tramite un Variac Belotti modello V40, così da variare la tensione di alimentazione al fine di avere una corrente al primario pari al 140% della  $I_n$ .

La scelta di alimentare il trasformatore con un sovraccarico del 140% per 1 h è stata motivata dal fatto che le linee che alimentano i trasformatori sono di solito protette con interruttori magnetotermici automatici, scelti per rispettare il criterio di dimensionamento  $I_b < I_n < I_z$  e che quindi hanno una curva caratteristica che permette il passaggio di corrente di  $1.4 I_n$  per 1 h, come mostrato in figura 118.

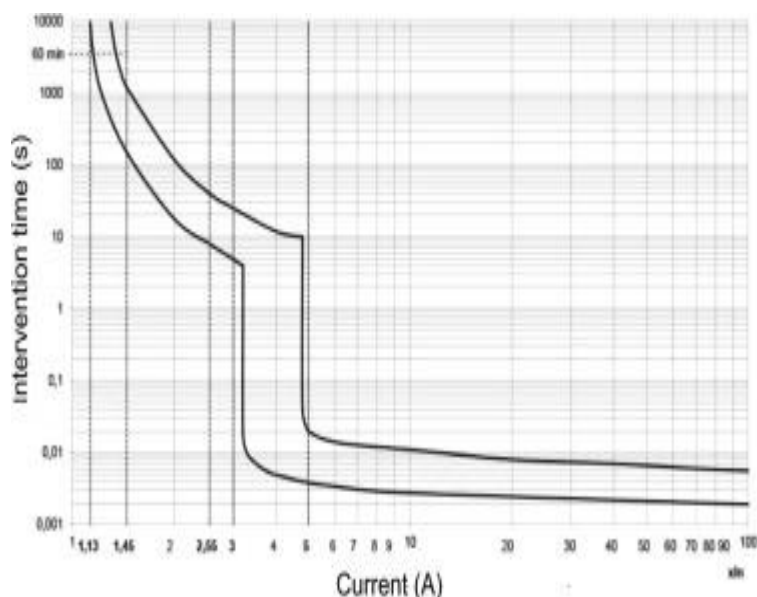


Fig. 118. Caratteristiche di intervento degli interruttori magnetotermici.

I danni da caduta possono essere molto frequenti e possono essere anche difficili da individuare se di lieve entità. Il trasporto dei trasformatori dalla fabbrica coinvolge diverse figure professionali come trasportatori, rivenditori e installatori. Il trasporto, così come l'installazione, potrebbe compromettere l'integrità del trasformatore a causa di cadute o urti accidentali. Questo è ancora più probabile quando i trasformatori sono di piccole dimensioni. Per tale ragione sono stati effettuati due test di caduta. In particolare, il trasformatore n.4 è stato fatto cadere da un'altezza di 1,2 m (altezza media di trasporto a mano in prossimità del busto) senza scatola di imballaggio, per simulare la caduta in fase di installazione. Il trasformatore n.6, imballato nella sua scatola di cartone e protetto da un foglio di polietilene espanso, è stato fatto cadere dalla stessa altezza, per simulare la caduta durante il trasporto o la consegna. Si sottolinea che di solito 1,2 metri è anche l'altezza media del pianale di un camion.

Per simulare il cedimento dello schermo di rame sono stati effettuati due test. Nel primo l'isolamento sia dell'avvolgimento esterno che del nastro di protezione dello schermo è stato graffiato (tipico di uno sfregamento per attrito). Quindi, dopo aver eseguito le prove, i due

punti scoperti del trasformatore n.9 sono stati saldati per simulare un guasto franco, come mostrato nella foto 119.



Fig. 119. Saldatura tra lo schermo e l'estremità dell'avvolgimento secondario.

Il guasto spira-spira è uno dei danni più frequenti che di solito inizia con una diminuzione dell'isolamento tra le spire, a causa di attriti di lunga durata che provocano riscaldamento localizzato e favoriscono la diffusione del cortocircuito tra le spire su una sezione più ampia. Nel primo test di guasto spira-spira, l'isolamento tra le bobine del trasformatore 10 è stato graffiato per simulare un danno lieve. Nella seconda prova, le due spire danneggiate sono state saldate insieme come mostrato in figura 120. Il guasto spira-schermo e il guasto spira-spira è stato realizzato sull'avvolgimento secondario, in quanto unico avvolgimento accessibile; infatti l'avvolgimento primario nel trasformatore analizzato risultava essere avvolto direttamente sul nucleo toroidale ed era protetto dal nastro di rame che fungeva da schermo.



Fig. 120. Cortocircuito ottenuto saldando due spire adiacenti.

Di seguito vengono riportati i risultati del test sperimentale realizzato collegando la piattaforma IoT implementata ai cavi bianco-viola dell'avvolgimento primario e ponendo i cavi nero-giallo in modalità aperto o chiuso in cortocircuito

Le acquisizioni tracciate in figura 121 e 122 mostrano l'andamento delle misure del trasformatore di circuito aperto e di cortocircuito effettuate dopo ogni fase di riscaldamento all'interno del forno. La temperatura è stata mantenuta costante intorno ai  $190 \pm 5$  °C. Le misurazioni sono state effettuate ogni 20 h durante il ciclo di invecchiamento e sono visualizzate nei seguenti colori: blu per  $t = 0$  h, rosso per  $t = 20$  h, verde per  $t = 40$  h, azzurro per  $t = 60$  h, giallo per  $t = 80$  h e rosa per  $t = 96$  h.

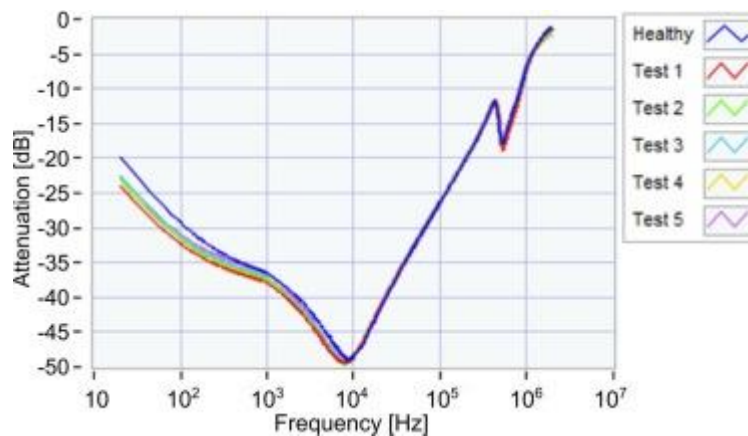


Fig. 121. Test SFRA a circuito aperto del trasformatore 1 dopo il test di invecchiamento.



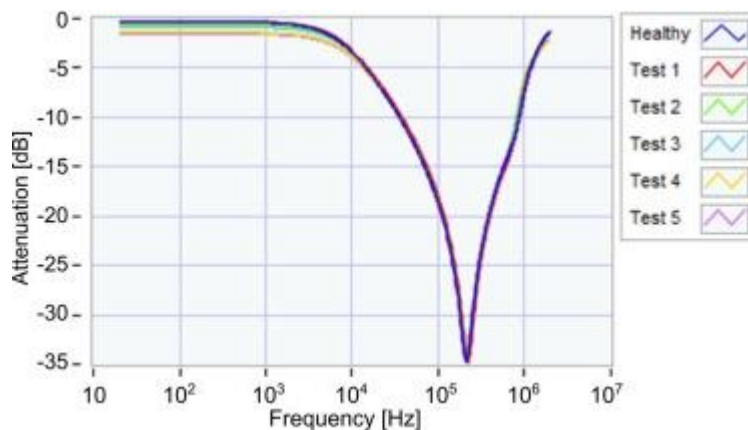


Fig. 122. Prova SFRA di cortocircuito del trasformatore 1 dopo la prova di invecchiamento.

Nelle figure 123 e 124 si osserva la differenza tra la curva di pre-guasto e la curva dopo ogni ciclo di riscaldamento, rispettivamente per il caso di circuito aperto e cortocircuito.

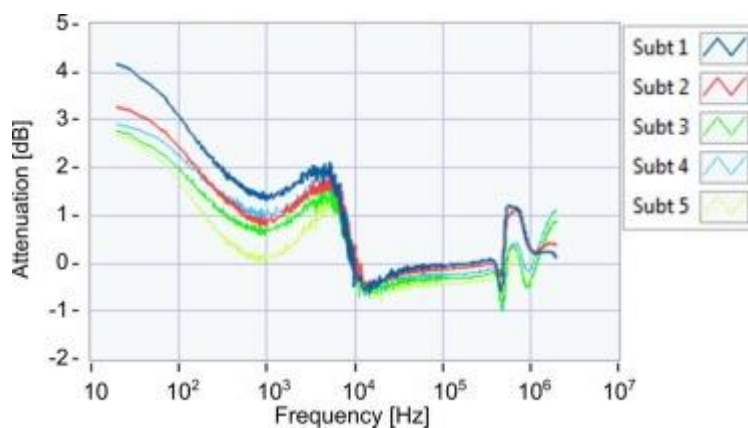


Fig. 123. Differenza tra le curve a circuito aperto tra trasformatore sano e trasformatore dopo i test di invecchiamento.

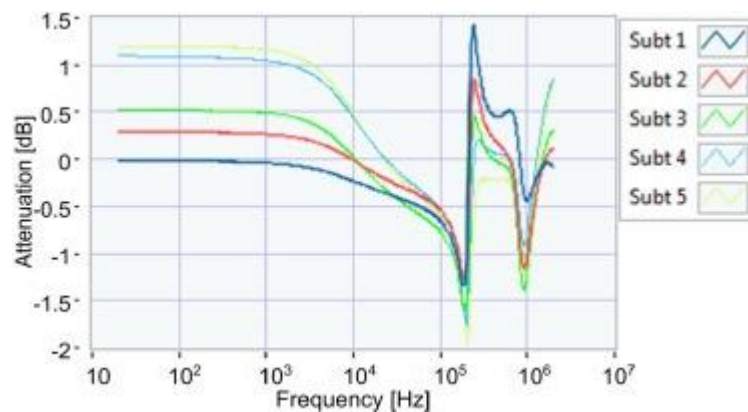


Fig. 124. Differenza tra le curve in cortocircuito tra trasformatore sano e trasformatore dopo i test di invecchiamento.

Le figure 125 e 126 mostrano le curve caratteristiche rispettivamente del test SFRA a vuoto e del test SFRA di cortocircuito del trasformatore n.2 prima e dopo il sovraccarico. Le curve blu riguardano la misura prima del sovraccarico e le curve verdi le misure dopo il ciclo di sovraccarico. Le figure 127 e 128 mostrano la differenza tra la curva del trasformatore nuovo e la curva dopo il ciclo di sovraccarico, rispettivamente per il caso di circuito aperto e di cortocircuito.

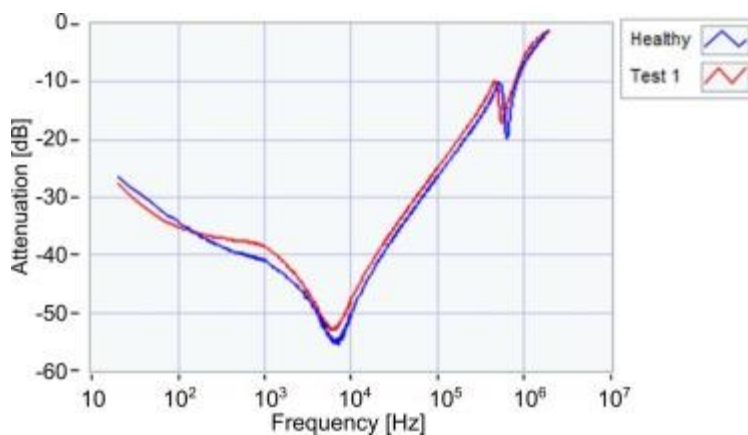


Fig. 125. Prova SFRA a circuito aperto del trasformatore 2 dopo il sovraccarico elettrico.

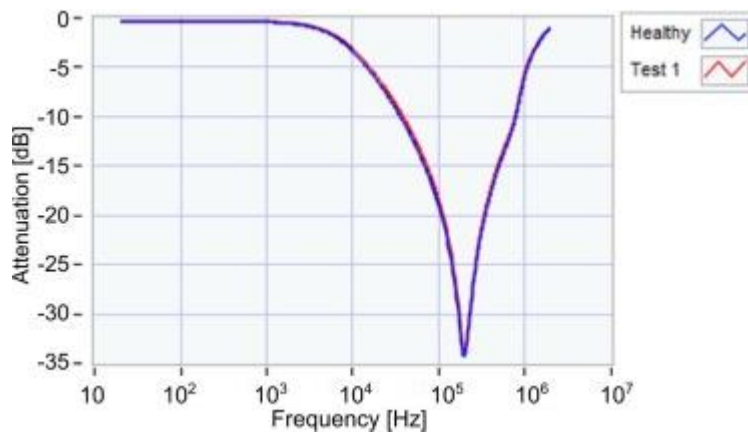


Fig. 126. Prova SFRA in cortocircuito del trasformatore 2 dopo il sovraccarico elettrico.

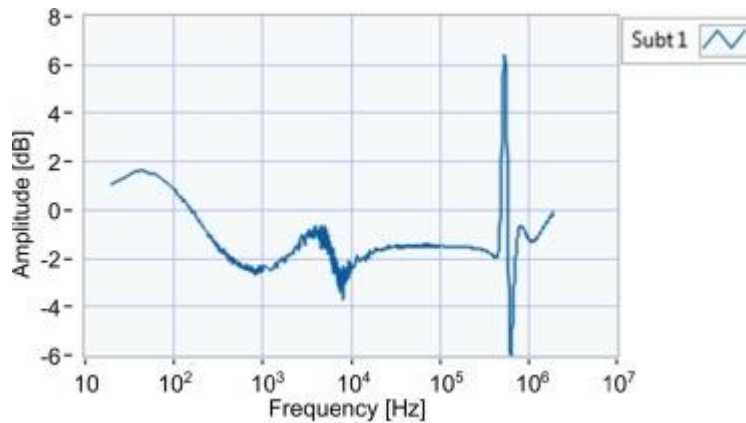


Fig. 127. Differenza tra le curve a circuito aperto tra trasformatore sano e trasformatore dopo il sovraccarico elettrico.

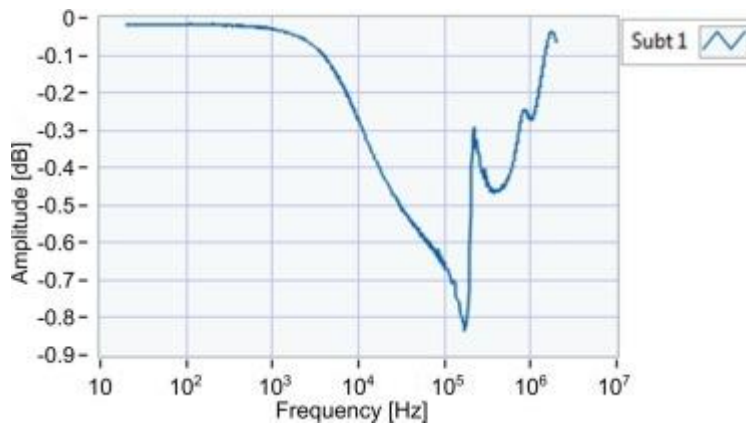


Fig. 128. Differenza tra le curve in cortocircuito tra trasformatore integro e trasformatore dopo il sovraccarico elettrico.

Le figure 129 e 130 mostrano le TF prima e dopo la prova di caduta senza imballo del trasformatore 4 e le figure 133 e 134 le TF acquisite prima e dopo la caduta con l'imballo del trasformatore n.6. Dalle figure si evince che l'imballaggio è quasi irrilevante per prevenire danni dovuti a una caduta di 1,2 m. Le figure 131 e 132 mostrano la differenza tra la curva di pre-guasto e la curva dopo la prova di caduta senza imballaggio, mentre nelle figure 135 e 136 si riporta il confronto tra le curve per la caduta con l'imballaggio di fabbrica.

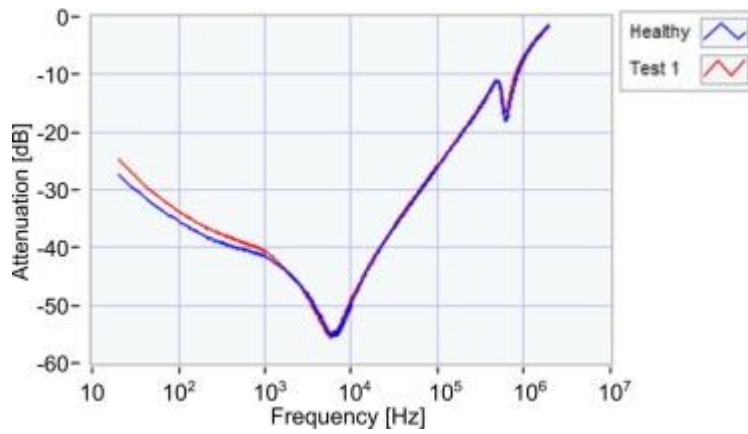


Fig. 129. Test SFRA a circuito aperto del trasformatore 4 dopo test di caduta senza imballaggio.

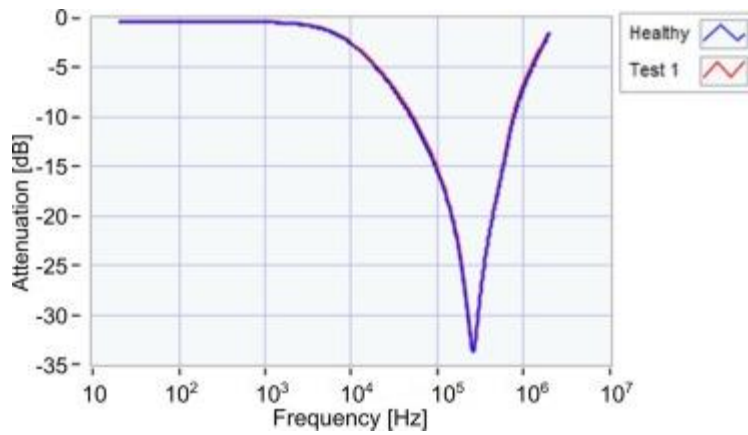


Fig. 130. Prova SFRA in cortocircuito del trasformatore 4 dopo prova di caduta senza imballo.

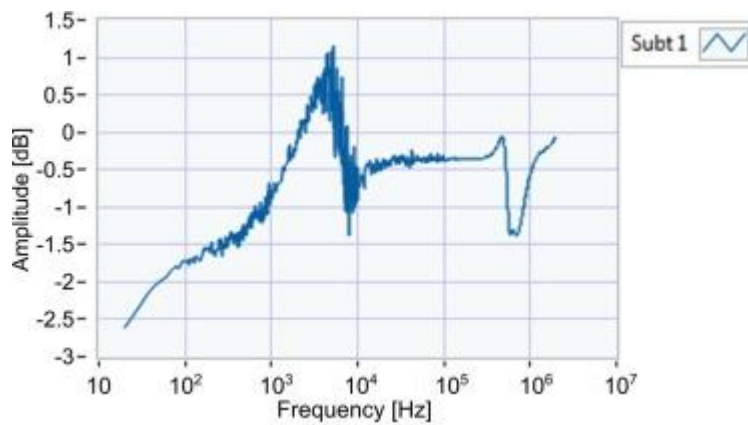


Fig. 131. Differenza tra le curve a circuito aperto tra trasformatore integro e trasformatore dopo il test di caduta senza imballaggio.

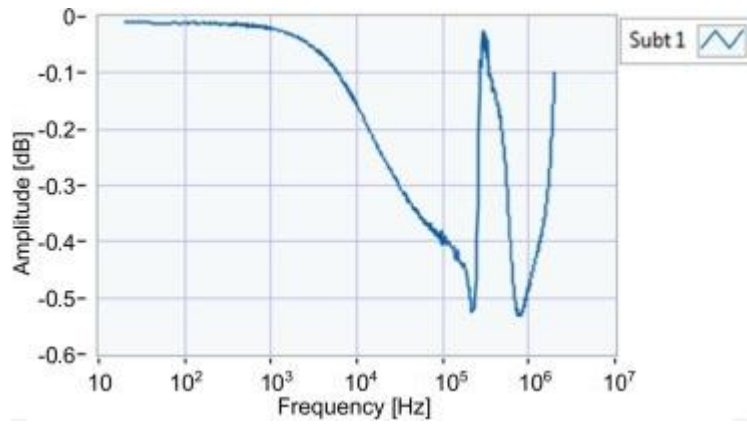


Fig. 132. Differenza tra le curve in cortocircuito tra trasformatore integro e trasformatore dopo il test di caduta senza imballaggio.

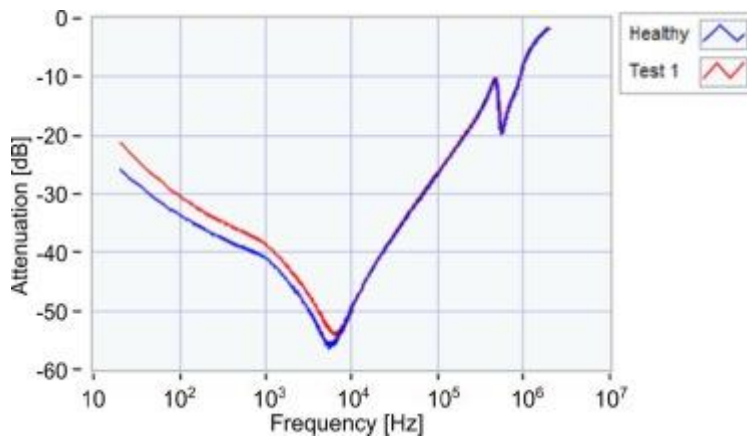


Fig. 133. Test SFRA a circuito aperto del trasformatore 6 dopo il test di caduta con l'imballo.

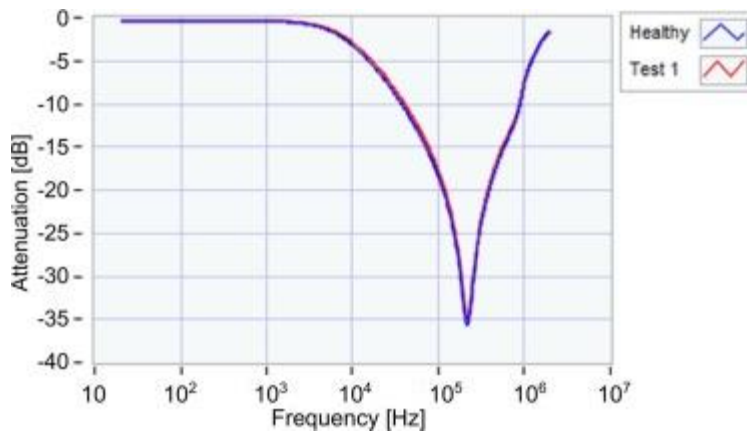


Fig. 134 Prova SFRA in cortocircuito del trasformatore 6 dopo prova di caduta con l'imballo.

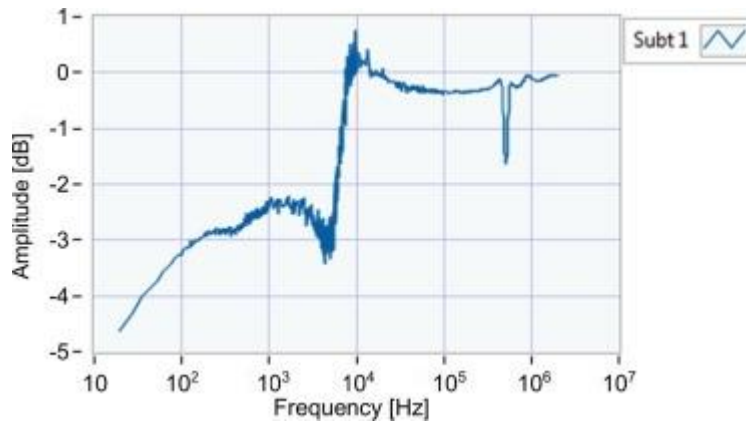


Fig. 135 Differenza tra le curve a circuito aperto tra trasformatore integro e il trasformatore dopo il test di caduta con l'imballo.

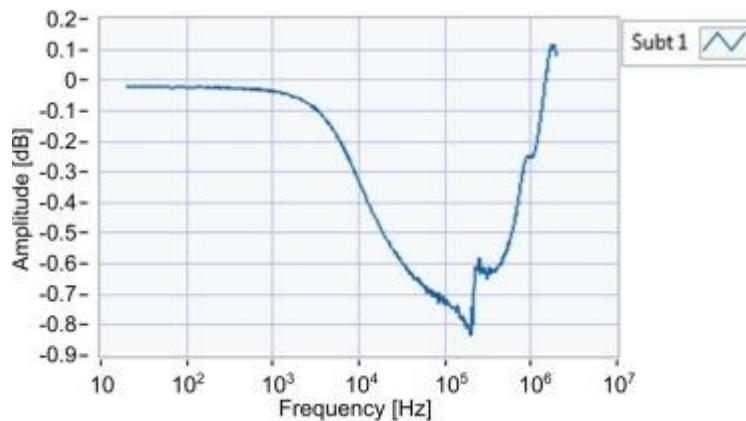


Fig. 136 Differenza tra le curve in cortocircuito tra trasformatore integro e trasformatore dopo il test di caduta con l'imballo.

Sul trasformatore n. 9 sono state effettuate le prove SFRA in configurazione aperta e di cortocircuito, a seguito di danneggiamento dell'isolamento tra schermo e avvolgimento. Esse sono riportate in figura 137 e 138. La curva blu è il risultato della misurazione prima del danno, mentre la curva verde è il risultato dopo il guasto leggero tra schermo-spira e la curva nera è il guasto schermo-spira realizzato tramite saldatura. Le figure 139 e 140 mostrano la differenza tra la curva di pre-guasto e la curva dopo il guasto ottenuta saldando la bobina con lo schermo nel caso di circuito aperto e nel caso di corto circuito.

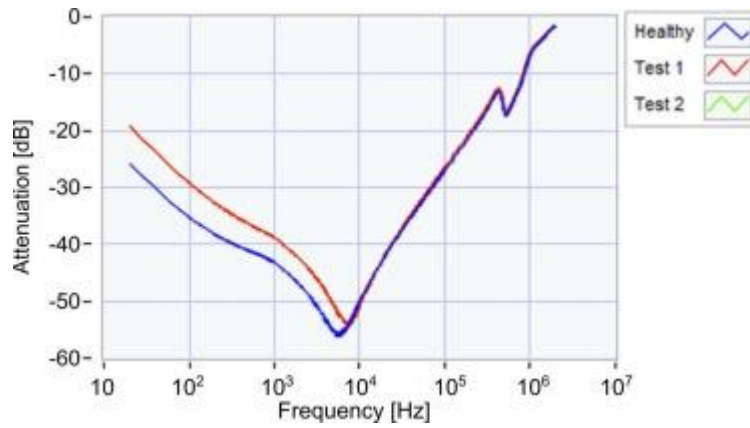


Fig. 137. Test SFRA a circuito aperto del trasformatore 9 dopo guasto dello schermo elettromagnetico.

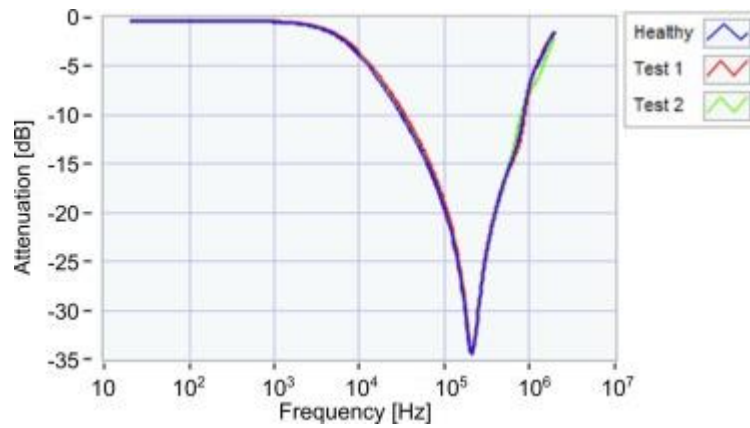


Fig. 138. Prova SFRA in cortocircuito del trasformatore 9 dopo il guasto dello schermo elettromagnetico.

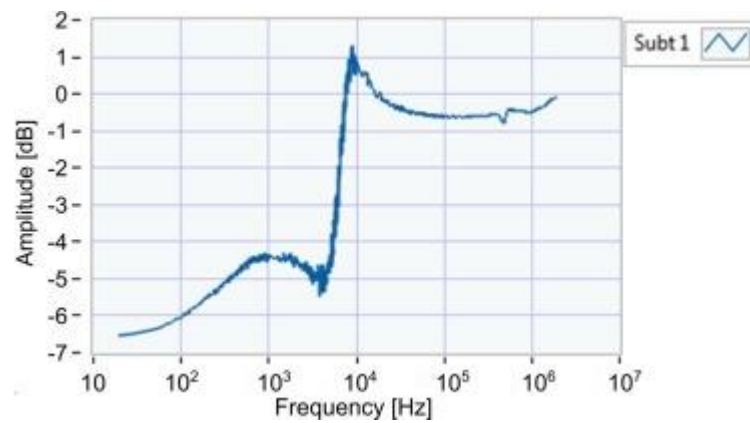


Fig. 139. Differenza tra le curve a circuito aperto tra trasformatore sano e trasformatore dopo il guasto dello schermo elettromagnetico.

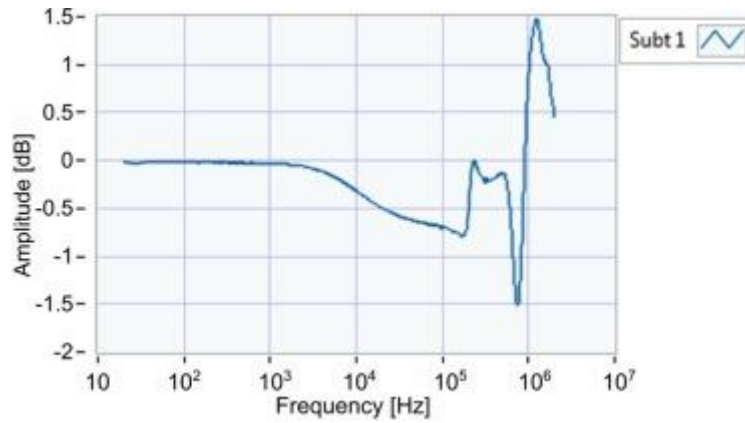


Fig. 140. Differenza tra le curve in cortocircuito tra trasformatore integro e trasformatore dopo il guasto allo schermo elettromagnetico.

Nel test mostrato nelle figure 141 e 142, la curva blu è il risultato della misurazione del trasformatore 10 sano, la curva rossa è il risultato del leggero contatto spira-spira e la curva verde è il corto-circuito franco spira-spira tramite saldatura stagno. Le figure 143 e 144 mostrano in blu la differenza tra le curve di pre-guasto e le curve dopo il leggero guasto spira-spira ed in rosso la differenza tra le curve di pre-guasto e la curva del corto spira-spira rispettivamente per i casi di circuito aperto e cortocircuito.

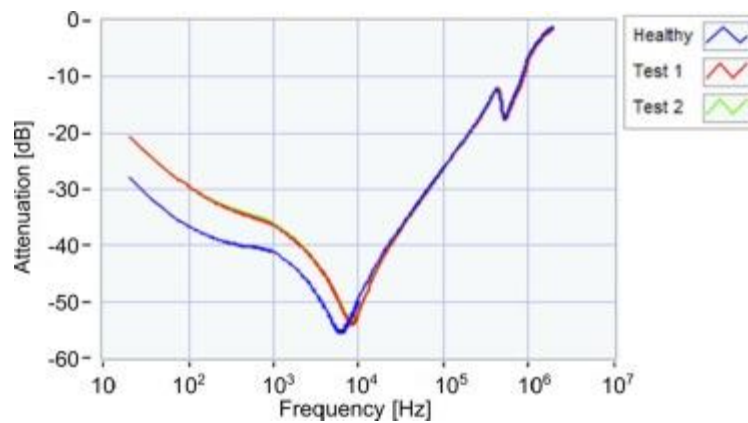


Fig. 141. Test SFRA a circuito aperto del trasformatore 10 dopo guasto bobina-bobina.



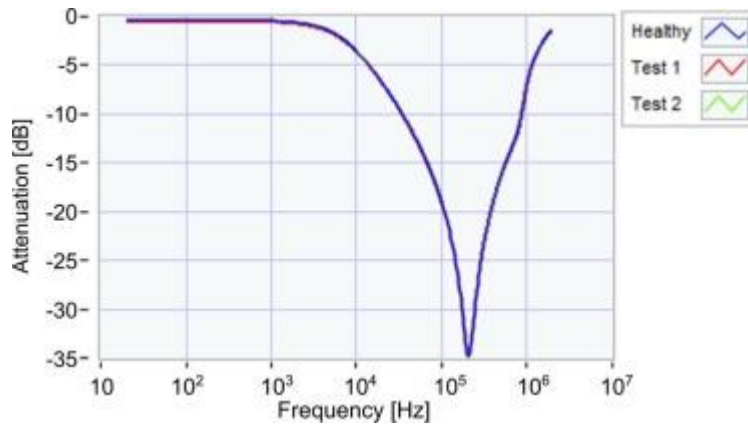


Fig. 142. Prova SFRA in cortocircuito del trasformatore 10 dopo guasto bobina-bobina.

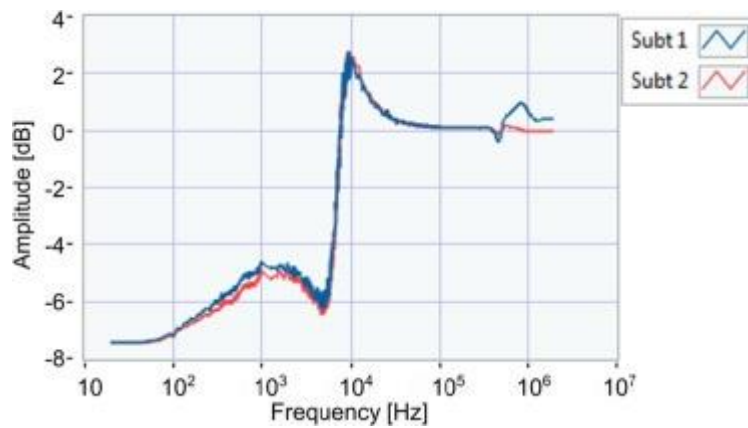


Fig. 143. Differenza tra le curve a circuito aperto tra trasformatore integro e trasformatore dopo il guasto bobina-bobina.

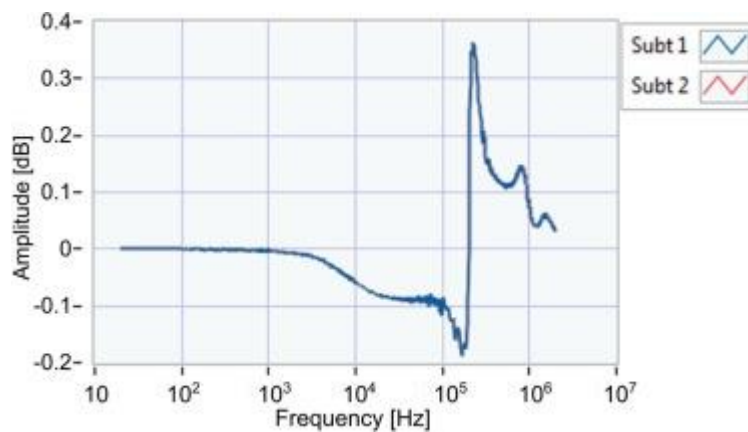


Fig. 144. Differenza tra le curve di cortocircuito tra trasformatore integro e trasformatore dopo il guasto bobina-bobina.

Per confrontare analiticamente le curve TF date dalla misura SFRA, si può ricorrere al cross-correlation coefficients (CCF), come descritto in [132]. Tale parametro analizza la somiglianza tra due set di dati: se gli insiemi coincidono il CCF tende a 1, se non c'è

correlazione il CCF tende a 0. I valori intermedi tra 0 e 1 forniscono una misura quantitativa di similarità. La tabella XII mostra i CCF calcolati in 4 bande distinte dei test precedenti (100 Hz – 1 kHz, 1–10 kHz, 10–100 kHz, 100 kHz – 1 MHz).

Tabella XII. Coefficienti di correlazione incrociata per bande di frequenza.

	<b>100 Hz – 1 kHz</b>	<b>1 kHz – 10 kHz</b>	<b>10 kHz – 100 kHz</b>	<b>100 kHz – 1 MHz</b>
<b>Trasformatore 1</b>				
Circuito aperto	0.9989	0.9953	0.9999	0.9987
Corto circuito	0.9965	0.9998	0.9999	0.9980
<b>Trasformatore 2</b>				
Circuito aperto	0.9883	0.9853	0.9998	<b>0.8883</b>
Corto circuito	0.9988	0.9999	0.9999	0.9999
<b>Trasformatore 4</b>				
Circuito aperto	0.9978	0.9899	0.9999	0.9951
Corto circuito	0.9979	0.9999	0.9999	0.9999
<b>Trasformatore 6</b>				
Circuito aperto	0.9994	<b>0.9605</b>	0.9999	0.9976
Corto circuito	0.9975	0.9999	0.9999	0.9999
<b>Trasformatore 9</b>				
Circuito aperto	0.9994	<b>0.8663</b>	0.9998	0.9998
Corto circuito	0.9993	0.9999	0.9999	0.9990
<b>Trasformatore 10</b>				
Circuito aperto	0.9927	<b>0.8412</b>	0.9993	0.9999
Corto circuito	0.9992	0.9999	0.9999	0.9998

In dettaglio, per il trasformatore n.1 sono riportati i CCF calcolati tra la curva sana e la curva ottenuta dopo la quinta fase di riscaldamento. Per il trasformatore n.9 sono riportati i CCF calcolati tra trasformatore sano e dopo la saldatura schermo-spira. Per il trasformatore n. 10 i CCF sono stati calcolati tra trasformatore integro e dopo la saldatura spira-spira.

Per l'aumento della resilienza gioca un ruolo fondamentale la scelta delle soglie di preallarme.

Sebbene tutti i valori del CCF tendano a 1, per i test a circuito aperto abbiamo 4 casi in cui si supera il 4% di divergenza:

- il sovraccarico sembra aver modificato la TF del trasformatore n.2 nel range 100 kHz – 1 MHz;

- la caduta sembra aver influenzato la TF del trasformatore n. 6 nel range 1–10 kHz, anche a causa della deformazione dello schermo metallico esterno;
- il guasto dello schermo sembra aver influito sulla capacità complessiva riducendo la frequenza di risonanza come si vede per il trasformatore n. 9 nell'intervallo 1–10 kHz;
- il guasto bobina-bobina sul trasformatore 10 (intervallo 1-10kHz) provoca un effetto simile al guasto dello schermo.

Attraverso un'attenta analisi dei risultati, la tecnica SFRA può quindi fornire preziose informazioni sia per problematiche meccaniche che elettriche. Lo stato di salute del nucleo, degli avvolgimenti, delle connessioni interne e dei contatti può essere rilevato utilizzando questa tecnica. Per facilitare il test, l'azienda produttrice dei trasformatori potrebbe fornire all'utente le curve ottenute con la tecnica SFRA, in modo tale che l'utente finale le possa confrontare con quelle misurate per verificare lo stato di degrado e invecchiamento del trasformatore, ma anche possibili danni dovuti all'errato montaggio o al trasporto.

L'analisi dei risultati ottenuti mostra che le prove SFRA a vuoto sono più significative per la diagnostica rispetto alle prove di cortocircuito, soprattutto per quanto riguarda guasti o danni che in qualche modo influenzano i parametri geometrici. Questi sono più apprezzabili considerando la differenza tra le curve nelle condizioni pre e post guasto. In queste curve, i test a circuito aperto mostrano differenze per frequenze inferiori a 10 kHz, mentre nel test in cortocircuito le differenze sono apprezzabili per frequenze al di sopra di questa soglia.

Molte informazioni possono essere dedotte dal confronto visivo delle curve, tuttavia risultati più accurati possono essere ottenuti attraverso analisi statistiche. Queste analisi numeriche possono essere implementate direttamente sul Raspberry, che controlla l'Analog Discovery 2, oppure possono essere eseguite da remoto su un server centrale.

L'affidabilità del trasformatore potrebbe aumentare notevolmente grazie all'utilizzo di questo dispositivo, anche a seguito di una sola misura giornaliera. Infatti, il dispositivo ha bisogno di scollegare momentaneamente il trasformatore dalla rete e la misura richiede circa due minuti di tempo. A seguito dell'elaborazione dei dati è possibile prendere una decisione affidabile sulla sicurezza del trasformatore, sulla sua rimessa in servizio o se sono necessarie ulteriori diagnosi.

## 4.2.2 Test preliminare sui trasformatori IT-M già installati

Durante l'orario di chiusura di alcuni reparti dell'ospedale San Camillo-Forlanini di Roma per la manutenzione periodica e la sanificazione, oltre alle normali verifiche richiesti dagli standard italiani e da protocolli interni all'ospedale, è stato previsto anche il test dei trasformatori di isolamento ad uso medico attraverso la piattaforma IoT implementata [133].

Il primo test è stato effettuato sul trasformatore di isolamento medicale Thytronic da 10kVA, che alimentava la sala operatoria del reparto di oculistica. Il trasformatore, posizionato dentro al quadro di distribuzione, nello sportello in basso, è stato scollegato dalla rete, poi i terminali dello strumento sono stati collegati al primario ed è stato testato lasciando aperto il secondario.

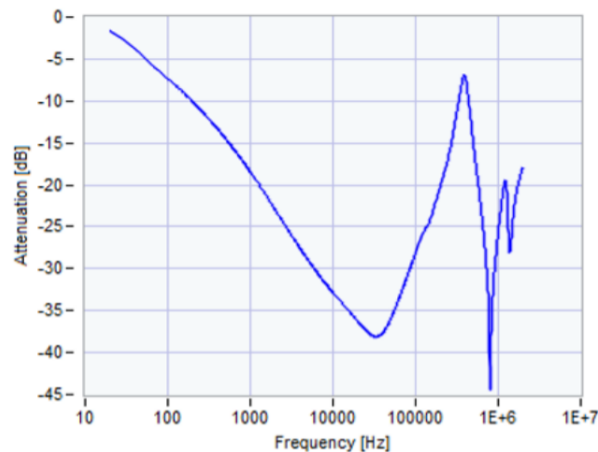


Fig. 145 Grafico dell'attenuazione del test SFRA a circuito aperto del trasformatore della sala operatoria oculistica

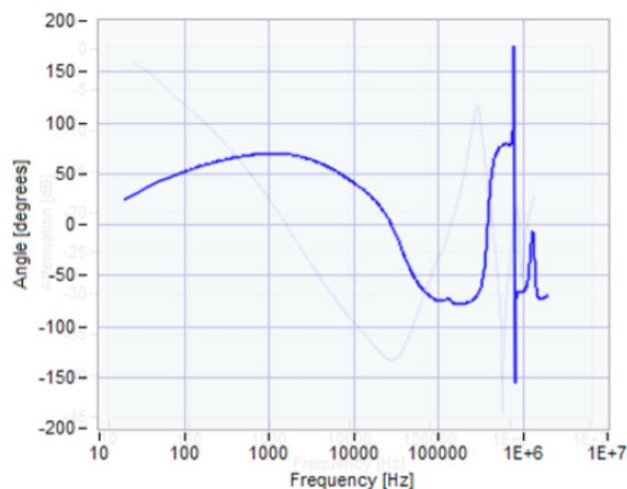


Fig. 146 Grafico della fase del test SFRA a circuito aperto del trasformatore della sala operatoria oculistica

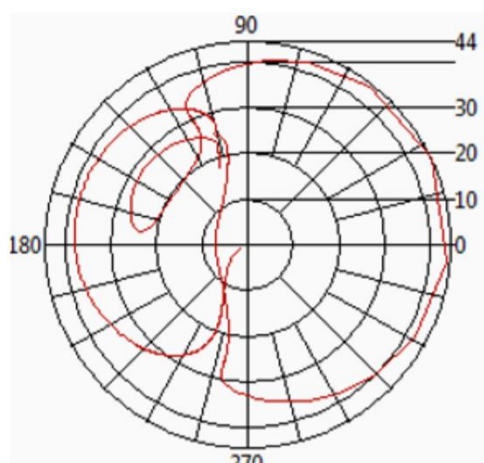


Fig. 147 Grafico polare del test SFRA a circuito aperto del trasformatore della sala operatoria oculistica

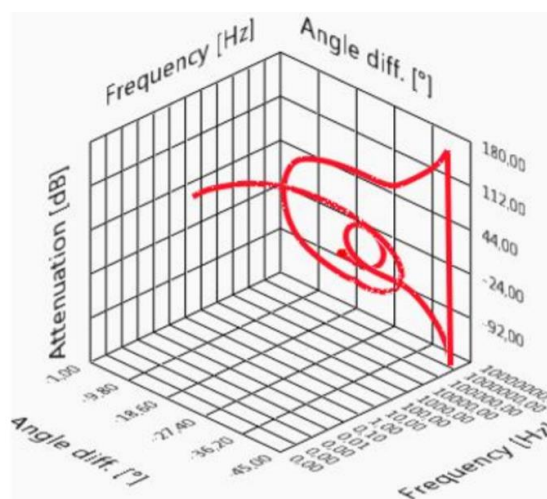


Fig. 148 Grafico 3D del test SFRA a circuito aperto del trasformatore della sala operatoria oculistica

Il blackout elettrico, causato da un guasto del trasformatore di isolamento, è un rischio tecnologico importante e la rapida evoluzione dell'evento può compromettere il regolare svolgimento di un lavoro delicato. In caso di guasto del trasformatore di isolamento ad uso medico, questo rischio è accentuato se l'interruzione colpisce gli ambienti di gruppo 2, poiché queste stanze sono utilizzate in operazioni chirurgiche, interventi intracardiaci o dove il paziente è sottoposto comunque a trattamenti vitali. Per tale ragione sono stati testati anche 4 trasformatori di isolamento Siemens 4kVA, che alimentavano le prese nell'ambiente di gruppo 2 della sala operatoria 6 del BOE (blocco operativo di emergenza) e della sala A del DEA (dipartimento di emergenza e accettazione). I trasformatori anche se acquistati nello

stesso periodo possono avere variazioni dovute al differente invecchiamento e a differenti cicli di lavoro.

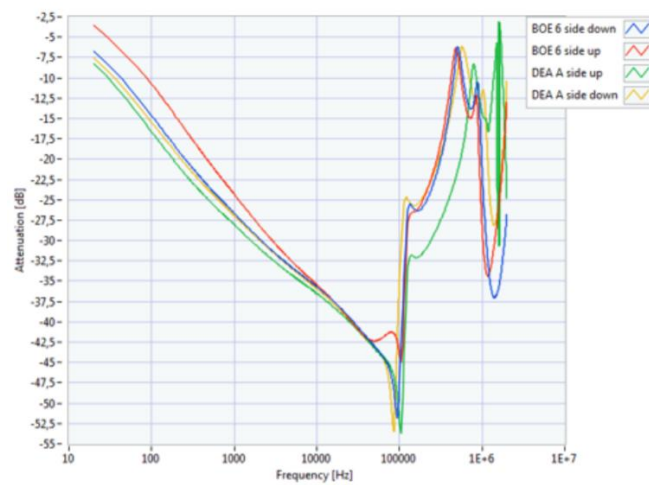


Fig. 149 Grafico dell'attenuazione dell'ampiezza del test SFRA a circuito aperto sui trasformatori del DEA e del BOE

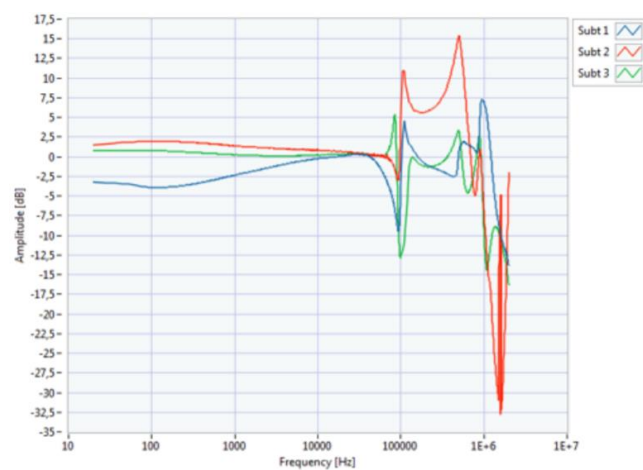


Fig. 150 Differenze di ampiezza del test SFRA a circuito aperto sui trasformatori del DEA e del BOE

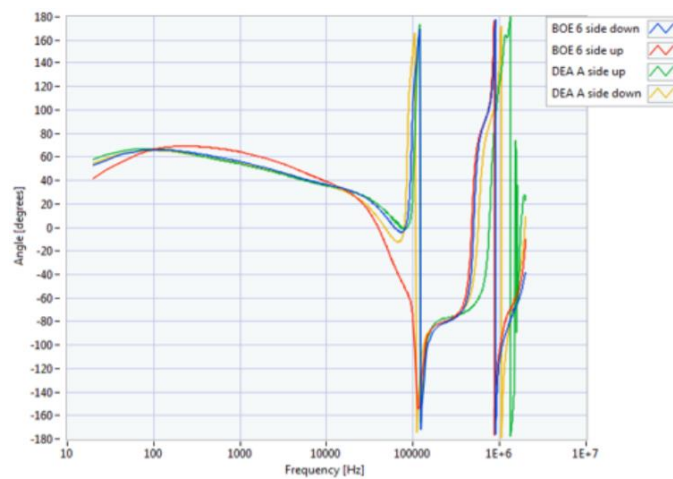


Fig. 151 Grafico della fase del test SFRA a circuito aperto sui trasformatori del DEA e del BOE trasformatori

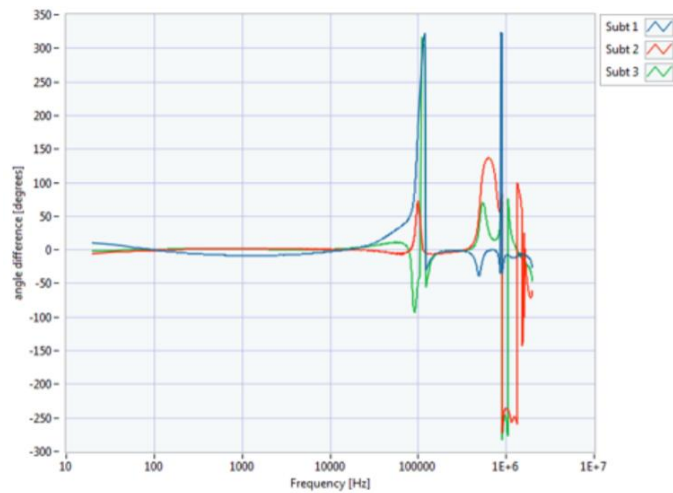


Fig. 152 Differenze di fase del test SFRA a circuito aperto su trasformatori del DEA e del BOE

In conclusione, la piattaforma utilizzata si è rivelata un potente mezzo di analisi a basso costo con prestazioni elevate e tempi di verifica bassi, in grado di testare i trasformatori mettendoli fuori servizio per un tempo minimo. Tuttavia, affinché tale metodo sia valido, è necessario testare sia trasformatori sani che trasformatori con errori noti, in modo da riempire un database completo con tutte le informazioni necessarie per un'analisi dettagliata.

# Conclusione

Il concetto di resilienza viene applicato indifferentemente in qualsiasi ambito della società, tanto da essere ormai riconosciuta come una caratteristica essenziale non solo delle infrastrutture critiche moderne, ma anche delle persone o dei materiali. Tale qualità è divenuta fondamentale anche a causa della maggiore frequenza con cui eventi naturali di grande impatto quali terremoti, maremoti, tornado, abbondanti neviccate e piogge torrenziali si stanno verificando nel panorama internazionale, basti pensare allo tsunami di Tohoku in Giappone, al terremoto dell'Aquila e del centro Italia e agli uragani Katrin e Sandy negli USA.

La previsione di tali eventi severi unitamente alla supervisione dell'impianto da rendere resiliente, consente agli operatori di ipotizzare possibili evoluzioni del sistema oggetto di analisi.

Infatti, al fine di mitigare queste condizioni critiche, si rende necessario un "aumento" della resilienza, che può essere ottenuto irrobustendo l'infrastruttura tramite costose opere di ammodernamento, andando ad ottimizzare la gestione di un impianto o attraverso piccole soluzioni locali sui componenti. La soluzione ottimale passa per una combinazione opportuna di questi approcci per ragioni sia tecniche che economiche.

In particolare, nel campo dei sistemi di alimentazione, dove il termine "resilienza" può assumere diverse connotazioni, che vanno dalla capacità del sistema di "resistere" e "riprendersi" da eventi di disturbo alla capacità di rispondere in modo attivo a potenziali eventi di disturbo e nuove minacce emergenti, questo argomento è stato oggetto negli ultimi anni di grande interesse, anche se non esistono ancora metriche di valutazione precise o filoni di ricerca ben definiti. Tuttavia, si può affermare con assoluta certezza che in tal caso la resilienza non può essere svincolata da concetti quali affidabilità, robustezza e sicurezza, motivo per il quale può essere vista come un insieme di azioni e tecniche volte a rendere il sistema efficiente e sicuro.

Dunque, il miglioramento della resilienza può essere perseguito o attraverso la prevenzione o mediante il recupero e il ripristino. In particolare, la prevenzione può essere ottenuta irrobustendo i componenti elettrici e la rete, ma poiché tali interventi richiedono elevate risorse economiche, in tal caso occorre effettuare uno studio di fattibilità.



Nel caso invece del raggiungimento degli obiettivi di resilienza operativa, si rende dapprima necessaria una raccolta di informazioni per poter individuare punti deboli e punti di forza del sistema elettrico. Questi ultimi devono essere analizzati al fine di poterli adeguare ai fabbisogni reali dell'utente.

Per quanto riguarda il sistema elettrico d'utenza, l'aumento della resilienza può essere conseguito mediante l'uso di soluzioni intelligenti, che permettono di raggiungere dei risultati ottimali con piattaforme a basso costo.

Infatti, il ricorso alle microgrid può essere utile per la riduzione dei guasti e per il ripristino efficiente della rete, andando a minimizzare i tempi di intervento ed evitando ridondanze dei punti di alimentazione della rete.

Il presente lavoro di tesi è stato incentrato sullo studio delle possibili applicazioni di IoT ai sistemi elettrici d'utenza, al fine di incrementare gli indici di resilienza di uno o più suoi componenti. In particolare, sono state descritte alcune attività di ricerca che hanno condotto il candidato ad approfondire applicazioni sia al sistema che al singolo componente. Infine, ricorrendo alle più moderne tecnologie elettroniche ed informatiche, sono stati sviluppati dei sistemi efficienti, in grado di supervisionare, analizzare e fornire informazioni sui sistemi elettrici connessi.

Nello specifico, sono state realizzate sia piattaforme per controllare sistemi omogenei ed eterogenei distribuiti, sia piattaforme per l'aumento della resilienza dei singoli dispositivi.

Le piattaforme realizzate per il controllo dei sistemi sono le seguenti:

- piattaforma per la gestione della manutenzione e degli allarmi;
- piattaforma per il controllo energetico degli edifici;
- piattaforma per l'individuazione dei carichi connessi, in modo da ottimizzare l'esercizio della rete elettrica d'utenza e le risorse locali in caso di eventi severi.

Per quanto riguarda quelle per i singoli componenti, esse sono state distinte a seconda dello scopo in:

- piattaforma per l'analisi delle vibrazioni dei componenti elettrici;
- piattaforma per la diagnostica dei guasti sui trasformatori IT-M.

I risultati raggiunti sono stati molto soddisfacenti, in quanto le soluzioni IoT sviluppate si sono rivelate estremamente efficienti per l'individuazione dei guasti, l'ottimizzazione della gestione dei carichi e la pianificazione efficace degli interventi di manutenzione.

Tuttavia, tale studio ha evidenziato dei punti di miglioramento che possono essere implementati per ottenere delle soluzioni più affidabili e sicure ed ha permesso di individuare degli aspetti che influenzeranno lo stato futuro della resilienza dei sistemi elettrici trattati, essendo questi ultimi sempre più complessi, interdipendenti ed economicamente impattanti.

Infatti, sebbene l'applicazione dei metodi e degli strumenti proposti su sistemi reali ha permesso di ottenere apprezzabili benefici dal punto di vista manutentivo, per migliorare ulteriormente il sistema dovranno essere analizzati possibili legami futuri causa-effetto tra eventi e guasti.

In particolare, le opere di resilienza dovranno essere analizzate anche da un punto di vista analitico per soppesare il risparmio economico netto ed i dati raccolti dai vari sistemi di supervisione dovranno essere utilizzati per calcolare la probabilità di avvenimento di determinati scenari.

Infine, poiché i benefici ottenuti dall'applicazione delle piattaforme implementate hanno dimostrato che esse possono rappresentare delle soluzioni fondamentali per la realizzazione di sistemi elettrici resilienti, è auspicabile che in futuro si continui a perseguire tali strategie di miglioramento della resilienza e che data la loro importanza siano sostenute da finanziamenti pubblici e privati.

# Bibliografia

- [1] Treccani; <http://www.treccani.it/vocabolario/resilienza/>
- [2] EPRI, Electric Power System Resiliency CHALLENGES AND OPPORTUNITIES, February 2016
- [3] Flavio Fabbri, “L’Italia delle auto elettriche a +100% di vendite nel primo semestre 2020. La quota di mercato UE sale al 16%”, Key4biz, 29 Luglio 2020, ore 11:20, <https://www.key4biz.it/litalia-delle-auto-elettriche-a-100-di-vendite-nel-primo-semestre-2020-la-quota-di-mercato-ue-sale-al-16/316693/>, visitato il 20/10/2020
- [4] N. Bhusal, M. Abdelmalak, M. Kamruzzaman, and M. Benidris, “Power system resilience: Current practices, challenges, and future directions,” IEEE Access, vol. 8, pp. 18 064–18 086, 2020.
- [5] Resilienza del sistema elettrico, RSE view
- [6] Interruzioni senza preavviso lunghe, 07/10/2012 - 00:00, Voltimum, sito: <https://www.voltimum.it/articolo/guide-e-approfondimenti/interruzioni>, visitato il 6/11/2020
- [7] Bacino Carbonifero del Sulcis, Wikipedia, [https://it.wikipedia.org/wiki/Bacino\\_carbonifero\\_del\\_Sulcis](https://it.wikipedia.org/wiki/Bacino_carbonifero_del_Sulcis), visitato il 31/10/2020
- [8] Gianluca Carrino, “Stoccaggio gas: come funziona e perché sarà sempre più importante”, Rienergia, 2 aprile 2019, <https://rienergia.staffettaonline.com/articolo/33268/Stoccaggio+gas:+come+funziona+e+perch%C3%A9+sar%C3%A0+sempre+pi%C3%B9+importante/Gianluca>, visitato il 31/10/2020
- [9] Legislazione-normativa italiana, AU acquirente unico, <http://www.ocsit.it/content/legislazione>, visitato il 31/10/2020
- [10] “Improving Power System Resilience in the 21st Century - Resilient America Roundtable”, July 24-25, 2014, [https://sites.nationalacademies.org/cs/groups/pgasite/documents/webpage/pga\\_153420.pdf](https://sites.nationalacademies.org/cs/groups/pgasite/documents/webpage/pga_153420.pdf), visitato il 28/10/2020
- [11] Kim Zetter “Inside the Cunning, Unprecedented Hack of Ukraine's Power Grid”, Wired, March 03, 2016, <https://www.wired.com/2016/03/inside-cunning-unprecedented-hack-ukraines-power-grid/>, visitato il 31/10/2020
- [12] ASHLEY WADHWANI, Vandalized BC Hydro transformers cause power outages, oil spill and hefty damage, Jul. 10, 2019, <https://www.vicnews.com/news/vandalized-bc-hydro-transformers-cause-power-outages-oil-spill-and-hefty-damage/>, visitato il 19/10/2020
- [13] [https://twitter.com/ashwadhvani/status/1149076477494775809?ref\\_src=twsrc%5Etfw%7Ctwcamp%5Etw%5Eembed%7Ctwterm%5E1149076477494775809%7Ctwgr%5Eshare\\_3%2Ccontainerclick\\_0&ref\\_url=https%3A%2F%2Fwww.vicnews.com%2Fnews%2Fvandalized-bc-hydro-transformers-cause-power-outages-oil-spill-and-hefty-damage%2F](https://twitter.com/ashwadhvani/status/1149076477494775809?ref_src=twsrc%5Etfw%7Ctwcamp%5Etw%5Eembed%7Ctwterm%5E1149076477494775809%7Ctwgr%5Eshare_3%2Ccontainerclick_0&ref_url=https%3A%2F%2Fwww.vicnews.com%2Fnews%2Fvandalized-bc-hydro-transformers-cause-power-outages-oil-spill-and-hefty-damage%2F)
- [14] “Metcalf sniper attack”, Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Metcalf\\_sniper\\_attack](https://en.wikipedia.org/wiki/Metcalf_sniper_attack), visitato il 25/10/2020
- [15] Rebecca Smith “Assault on California Power Station Raises Alarm on Potential for Terrorism”, The Wall Street Journal, February 5, 2014, <https://www.wsj.com/articles/SB10001424052702304851104579359141941621778>, visitato il 25/10/2020
- [16] Enrico Maria Carlini, Michele Poli, Seminario AEIT Sez. TAA “Obiettivi ed esperienze di Terna ai fini dell’affidabilità dei propri impianti”, Terna S.P.A., Trento, 24 marzo 2017, <http://www.aeit-taa.org/Documenti/AEIT-TAA-2017-03-24-Piani-Emerg-Res-S-E-TERNA-Carlini-Poli.pdf>, visitato il 13/10/2020

- [17] La stampa, “Cina, la neve provoca 60 morti”, PUBBLICATO IL 01 Febbraio 2008 ULTIMA MODIFICA 18 Luglio 2019, <https://www.lastampa.it/esteri/2008/02/01/news/cina-la-neve-provoca-60-morti-1.37110982>, visitato il 22/10/2020
- [18] <https://www.rse-web.it/laboratori.page?docId=5298&country=ita>, visitato il 13/10/2020
- [19] “Terremoto e maremoto del Tōhoku del 2011”, [https://it.wikipedia.org/wiki/Terremoto\\_e\\_maremoto\\_del\\_T%C5%8Dhoku\\_del\\_2011](https://it.wikipedia.org/wiki/Terremoto_e_maremoto_del_T%C5%8Dhoku_del_2011), visitato il 22/10/2020
- [20] Daniele Ingemi, Meteoweb, “Ennesima tempesta di sabbia su Phoenix, capitale dell’Arizona; ma come si originano questi fenomeni?”, 9 settembre 2012, <http://www.meteoweb.eu/2012/09/ennesima-tempesta-di-sabbia-su-phoenix-capitale-dellarizona-ma-come-si-originano-questi-fenomeni/151897/>, visitato il 20/10/2020
- [21] Awad, Mahmoud & Said, Hassan & Arafa, Bahaa & El-Hady, Abd & Sadeek, (2002). Effect of Sandstorms With Charged Particles on The Flashover and Breakdown of Transmission Lines.
- [22] The new Arab, “Iran blames Iraq for sandstorm that crippled power grid”, 21 febbraio 2017 Aggiornato alle 00:52 GMT, visitato il 22/10/2020
- [23] Heos.it, Tempeste di sabbia nel deserto, un nemico invisibile dei pannelli Fv, pubblicato martedì, 27 Maggio 2014 09:00, [http://www.heos.it/index.php?option=com\\_content&view=article&id=2117:tempeste-di-sabbia-nel-deserto-un-nemico-invisibile-dei-pannelli-fv&catid=27&Itemid=118](http://www.heos.it/index.php?option=com_content&view=article&id=2117:tempeste-di-sabbia-nel-deserto-un-nemico-invisibile-dei-pannelli-fv&catid=27&Itemid=118), visitato il 22/10/2020
- [24] Hydro-Québec's electricity transmission system, [https://en.wikipedia.org/wiki/Hydro-Qu%C3%A9bec%27s\\_electricity\\_transmission\\_system](https://en.wikipedia.org/wiki/Hydro-Qu%C3%A9bec%27s_electricity_transmission_system)
- [25] [https://www.nasa.gov/topics/earth/features/sun\\_darkness.html](https://www.nasa.gov/topics/earth/features/sun_darkness.html)
- [26] <https://www.spaceweather.gc.ca/tech/se-chr-en.php>
- [27] U.S. Energy Information Administration, “Electricity restored to many in the Northeast but outages persist” November 9, 2012, visitato il 22/10/2020, <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=8730>
- [28] Iain Staffell, “How the heatwave affects electricity demand”, drax, 27th July 2018, <https://www.drax.com/technology/heatwave-affects-electricity-demand/>, visitato il 31/10/2020 27th July 2018
- [29] Z. Bie, Y. Lin, G. Li and F. Li, "Battling the Extreme: A Study on the Power System Resilience," in Proceedings of the IEEE, vol. 105, no. 7, pp. 1253-1266, July 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2679040.
- [30] <https://www.ilcentro.it/abruzzo/cavi-ghiacciati-tralicci-crollati-telefoni-in-tilt-1-abruzzo-pensa-al-futuro-1.38707>, visitato il 13/10/2020
- [31] Terna, Verso la rete del futuro: intelligente e a basso impatto ambientale <http://collaudo.download.terna.it/terna/0000/0019/59.pdf>, visitato il 27/10/2020.
- [32] Met, "Progetto Resilienza": proseguono i lavori Enel per restyling linee elettriche 22/07/2020 12.36, <http://met.cittametropolitana.fi.it/news.aspx?n=317291>, visitato il 13/10/2020
- [33] Elettro Costruzioni, <https://www.elettrocostruzionisrl.it/casehistory/piazza-armerina/>, visitato il 13/10/2020
- [34] CEB impianti srl, <https://www.facebook.com/CEB-IMPIANTI-SRL-163296673765618/photos/pcb.1443576002404339/1443575949071011>, visitato il 13/10/2020
- [35] ABB Power Grids HV U. O. ADDA -Roberto Cameroni, Resilienza delle apparecchiature elettriche, Università di Trento 24 Marzo 2017, sito: <http://www.aeit-taa.org/Documenti/AEIT-TAA-2017-03-24-Piani-Emerg-Res-S-E-ABB-Cameroni.pdf>, visitato il 07/12/2020
- [36] Direttiva - Protezione parasismica della rete di distribuzione di energia elettrica in Svizzera, UFT / ESTI n. 248, Versione 0415 i, sito: [https://www.esti.admin.ch/inhalte/pdf/Weisungen/Italienisch/ESTI\\_248\\_0415\\_i.pdf](https://www.esti.admin.ch/inhalte/pdf/Weisungen/Italienisch/ESTI_248_0415_i.pdf), visitato il 07/12/2020
- [37] Chaamala Klinger, Owen Landeg, and Virginia Murray, Power Outages, Extreme Events and Health: a Systematic Review of the Literature from 2011-2012, January 2, Plos Currents Disasters

- [38] E. L. Holland, MD; C. D. Hoaglan, MD; M. A. Carlstead, CRNA; R. P. Beecher, CRNA; G. H. Porteous, How Do I Prepare for operating room Power Failure?, APSF Newsletter, Volume 30, No. 3, 45-76 February 2016a
- [39] Jean-Marie Hypolite: 'Improve patient safety through power availability and reliability', Schneider Electric, 2011 june
- [40] How Unreliable Power Affects the Business Value of a Hospital: An indepth look at the causes and effects of power outages in hospitals across North America, and recommendations to ensure power reliability. December 2010 / White Paper By, Bernie Lawrence, Martin Hancock, and Ginni Stieva (Schneider Electric)
- [41] Resilient Power. What States Should Do: A Guide to Resilient Power Programs and Policy, Todd Olinsky-Paul, June 2015, Clean Energy Group
- [42] Department of Health, 2007. Health Building Note 00-07: Resilience Planning for the healthcare estate, Leeds.
- [43] National Protection and Programs Directorate, Office of Cyber and Infrastructure Analysis (OCIA) "Sector Resilience Report: Hospitals", Homeland Security, December 19, 2014.
- [44] Okamoto K, 2013. Impact of prolonged electrical power failure on hospital function by a disaster. Manchester, UK.
- [45] Redlener, I., 2012. Lessons from Sandy - preparing health systems for future disasters. The New England Journal of Medicine, Volume 367, pp. 2269-2271.
- [46] Ardagh, M., 2012. The initial health system response to the earthquake in Christchurch, New Zeland, in February, 2011. Lancet, Volume 379, pp. 2109-15
- [47] Department of Health, 2013. Care in local communities: A new vision and model for district nursing, Leeds, UK.
- [48] C. Verni. A Hospital System's Response To A Hurricane Offers Lessons, Including The Need For Mandatory Interfacility Drills. Health Affairs, August 2012.
- [49] Italian Standard CEI 64.8 sez. 710
- [50] Klemun, M.. North American Microgrids 2014: The Evolution of Localized Energy Optimization. GTM Research, 2014
- [51] A recently released report, "Combined Heat and Power: Enabling Resilient Energy Infrastructure for Critical Facilities"
- [52] NREL, Distributed solar PV for electricity system resiliency, 2015
- [53] David Ribeiro, Energy efficiency and community resilience: making the connection to keep the lights on and our homes warm, ACEEE Blog, February 04, 2015
- [54] A. Prudenzi, A. Fioravanti and V. Caracciolo, "Resilient power in hospitals: The S. Giovanni Addolorata general hospital case study," 2017 AEIT International Annual Conference, Cagliari, 2017, pp. 1-6, doi: 10.23919/AEIT.2017.8240572.
- [55] Riley RH. Power failure to a tertiary hospital's operating suite. Anaesth Intensive Care 2010; 58:785.
- [56] Larsen PH, LaCommare KH, Eto JH, Sweeney JL. Assessing changes in the reliability of the U.S. electric power system. Lawrence Berkeley National Laboratory 2015.
- [57] Ji-Ae Lee<sup>1</sup>, Won-Hwa Hong , Gyu-Yeob Jeon: 'A Study on Emergency Power Systems in Hospital Buildings during Massive Power Outage to Ensure Maintenance of System Functions', Advanced Science and Technology Letters Vol.47.
- [58] Icaro, "il modulo fotovoltaico bifacciale, quando conviene?", sito: <https://www.icaro-srl.eu/il-modulo-fotovoltaico-bifacciale-quando-conviene/>, visitato il 19/11/2020

- [59] DS New Energy, "I pannelli solari bifacciali forniscono un maggiore potenziale di potenza", Jun 18, 2019, sito: <http://it.dsnsolar.com/info/bifacial-solar-panels-give-increased-power-out-36650772.html>, visitato il 19/11/2020
- [60] Philip Keebler, Power quality for healthcare facilities PQ TechWatch EPRI Power Quality knowledge program, december 2007.
- [61] R. W. Hotchkiss and P.E. Mikesell, "SPDs Shown to Improve the Reliability Of Medical Equipment – A Case Study", 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 21-25 July 2013.
- [62] Tecniche di test e misurazione: metodi di misurazione della qualità dell'alimentazione, standard IEC 61000-4-30, 2008.
- [63] MR Qader, MHJ Bollen e RN Allan, "Previsione stocastica degli abbassamenti di tensione in un grande sistema di trasmissione", IEEE Trans. Ind. Appl , vol. 35, n. 1, pp. 152-162, gennaio/febbraio. 1999.
- [64] André dos Santos e Maria Teresa Correia de Barros, "Predicting Equipment Outages Due to Voltage Sags", IEEE Transactions on Power delivery , vol. 31, n. 4, agosto 2016.
- [65] Philip Keebler, Power quality per le strutture sanitarie PQ TechWatch EPRI Power Quality knowledge program, dicembre 2007.
- [66] A. Fioravanti Prudenzi e M. Regoli, "Una soluzione IoT a basso costo per il miglioramento della disponibilità di energia negli ospedali", Conferenza internazionale sulle energie rinnovabili e la qualità dell'energia (ICREPQ'18) Salamanca (Spagna) , 21-23 marzo 2018
- [67] A. Prudenzi, A. Fioravanti, L. Petriconi e V. Caracciolo, "Power Quality problems in hospital: a case study", 2019 IEEE Milan PowerTech , Milan, Italy, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109 / PTC .2019.8810682.
- [68] Iscrizione alla newsletter sui dispositivi medici e l'industria diagnostica, [online] disponibile: <https://www.mddionline.com/what-you-need-know-iec-60601-1-2-4th-edition>.
- [69] Cosa c'è da sapere, agosto 2017, [online] Disponibile: <https://www.cui.com/blog/medical-60601-1-4th-edition>.
- [70] Information Technology Industry Council (ITI) 1250 Eye Street NW Suite 200, Washington DC 20005, 2000, [online] Disponibile: <http://www.itic.org/technical/iticurv.pdf>.
- [71] L.E. Weldemariam, H.J. Gärtner, V. Cuk, J.F.G. Cobben and W.L. Kling, "Experimental Investigation on the Sensitivity of an Industrial Process to Voltage Dips", Proceeding of IEEE PowerTech, pp. 1-6, 2015.
- [72] A. Prudenzi, M.C. Falvo and S. Mascitelli, "Power quality survey on Italian industrial customers: Paper industries", 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 20-24 July 2008.
- [73] Jonathan Manson and Roman Targosz, "Leonardo Energy-European Power Quality Survey Report", November 2008.
- [74] Qualità dell'energia per l'imaging medico diagnostico EPRI Solutions , 2006.
- [75] Sito: <https://www.rmnonline.it/risonanza-magnetica-costi-prezzi-ssn-privato/>.
- [76] Analog Devices ADE9000 Technical Reference Manual UG-1098.
- [77] White paper "FFT Analysis", 2017.
- [78] S. Capolupo, "Come funziona un sito web: HTML PHP CSS e JS", 31 July 2015.
- [79] A. Prudenzi, A. Fioravanti, F. Pierannunzi e F. Ciancetta, "Distributed Power Quality monitoring in customer's electric distribution system", IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe 2019 IEEEIC / Io e CPS Europe , no. 8783784, 2019.

- [80] Jillian Ambrose, "La scadenza per l'implementazione del contatore di energia intelligente è stata rimandata al 2024", *The Guardian*, settembre 2019.
- [81] Siemens Industry "Trends in hospitals and out-patient departments", 2016.
- [82] Department of Health, 2007. Health Building Note 00-07: Resilience Planning for the healthcare estate, Leeds.
- [83] <https://www.algorab.com/servizi/supervisione-impianti.html>.
- [84] H. K. Merchant, D. D. Ahire "Industrial Automation using IoT with Raspberry Pi", *International Journal of Computer Applications* (0975 – 8887) Volume 168 – No.1, June 2017
- [85] A. Prudenzi, A. Fioravanti and M. Regoli, "A low-cost IoT solution for power availability improvement in hospitals". *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'18)*, Salamanca (Spain), 21th to 23th March, 2018.
- [86] "Be2K-Plus Bernini, OEM's Manual", <https://bernini-design.com/wpcontent/uploads/2015/06/BE2K-PLUS-Genset-Controller-OEMManual.pdf>, 10 April 2018
- [87] "Power vision1 Telegroup, Manuale istruzioni uso e manutenzione", <http://www.telegroup.it/pdf/manuale/power-vision-1-3-kva-manualeuso.pdf>, 10 April 2018
- [88] "7085 473-00 Liebherr, Operating instructions", [https://home.liebherr.com/external/products/productsassets/HAU\\_BA\\_B2B\\_708547300\\_en/708547300\\_en.pdf](https://home.liebherr.com/external/products/productsassets/HAU_BA_B2B_708547300_en/708547300_en.pdf), 10 April 2018
- [89] "F400 CIA, user manual" [https://www.hiltron.it/pub/Manuali/F200-F400\\_IT-EN-FR-ES\\_3.02.pdf](https://www.hiltron.it/pub/Manuali/F200-F400_IT-EN-FR-ES_3.02.pdf), 10 April 2018
- [90] "41CPE012 Comelit, Manuale di installazione e programmazione", [http://pro.comelitgroup.com/it/files\\_cms/14manuali/file/41CPE012\\_Manuale\\_Tecnico\\_IT\\_RevA\\_012015.pdf](http://pro.comelitgroup.com/it/files_cms/14manuali/file/41CPE012_Manuale_Tecnico_IT_RevA_012015.pdf), 10 April 2018
- [91] "Stk3-gmv10 SEA SYSTEMS, manuale di installazione e uso", <https://www.gmv.it/TECAREA/Imp/MAN/DOC/MI-0600-MSTK3-Rev04-Man-UsaInstallaz-STK3-Precablato-IT.pdf>, 10 April 2018.
- [92] A. Prudenzi, A. Fioravanti and M. Regoli, "Making electric distribution of industrial customers smarter with IoT," 2018 *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Amalfi, 2018, pp. 556-561, doi: 10.1109/SPEEDAM.2018.8445253.
- [93] Vahid Behjat, Abolfazl Vahedi, Alireza Setayeshmehr, Hossein Borsi e Ernst Gockenbach, "Diagnosing Shorted Turns on the Windings of Power Transformers Based On Online FRA Using Capacitive and Inductive Couplings", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, n. 4, pp. 2123-2133, ottobre 2011.
- [94] G. Bucci, F. Ciancetta, A. Fioravanti, E. Fiorucci e A. Prudenzi, "Application of SFRA for diagnostics on medical isolation transformers", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 117, maggio 2020, [online] Disponibile: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105602>.
- [95] F. Ciancetta, A. Del Pizzo, C. Olivieri, N. Rotondale, L. Castellini e M. D'Andrea, "Tecnica SFRA applicata alla diagnosi dei guasti sugli statori dei motori elettrici", *Simposio Internazionale sugli Azionamenti Elettrici di Elettronica di Potenza Automation and Motion (SPEEDAM 2014)*, 18-20 giugno 2014.
- [96] Tom De Rybel, Arvind Singh, John A. Vandermaar, May Wang, José R. Martí e KD Srivastava, "Apparatus for Online Power Transformer Winding Monitoring Using Bushing Tap Injection", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, n. 3, luglio 2009.
- [97] IEC 60076-18: 2012 Trasformatori di potenza - Parte 18: Misura della risposta in frequenza.
- [98] Hui Jin e Falin Liu, "Filtri passa-banda del piano elettronico della guida d'onda con caratteristiche Butterworth", 2002 3rd *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT 2002)*, 17-19 agosto 2002.

- [99] A. Fioravanti, A. Prudenzi, G. Bucci, E. Fiorucci, F. Ciancetta e S. Mari, "Identificazione di carichi elettrici non intrusivi attraverso un approccio basato su SFRA", Simposio internazionale 2020 su elettronica di potenza, azionamenti elettrici, automazione e Motion (SPEEDAM), Sorrento, Italia, 2020, pp. 694-698, doi: 10.1109 / SPEEDAM48782.2020.9161856
- [100] C. Chauvenet, G. Etheve, M. Sedjai and M. Sharma, G3-PLC based IoT sensor networks for SmartGrid (2017) 2017 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications ISPLC, 2017.
- [101] R. Li, J. Liu and X. Li, "A networking scheme for transmission line online monitoring system based on IoT" (2012) Proceedings - 2012 8th International Conference on Computing Technology and Information Management ICCM 2012 1, pp. 180-184.
- [102] Bin Lu, D. B. Durocher and P. Stemper, "Online and nonintrusive continuous motor energy and condition monitoring in process industries", Conference Record of 2008 54th Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, pp. 18-26, 2008, 2008.
- [103] G. Bucci, F. Ciancetta, E. Fiorucci, A. Fioravanti, A. Prudenzi and S. Mari, "An IoT condition monitoring system for resilience based on spectral analysis of vibration," 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT, Roma, Italy, 2020, pp. 38-43, doi: 10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138177.
- [104] STMicroelectronics, Predictive maintenance kit with sensors and IO-Link capability, sito: [https://www.st.com/resource/en/data\\_brief/steval-bfa001v1b.pdf](https://www.st.com/resource/en/data_brief/steval-bfa001v1b.pdf), visitato il 25/11/2020
- [105] Photon WiFi Development Board, Particle, sito: <https://store.particle.io/collections/gen-2/products/photon>, visitato il 25/11/2020
- [106] G. M. Kennedy, A. J. McGrail and J. A. Lapworth, "Transformer sweep frequency response analysis (SFRA)", energize, page 28-33, October 2007.
- [107] Devadiga, N. Harid, H. Griffiths, N. Al Sayari, B. Barkat, S. Jayaram, et al. Winding turn-to-turn short-circuit diagnosis using FRA method: sensitivity of measurement configuration", IET Sci Meas Technol, 13 (1) (2019), pp. 17-24, 10.1049/iet-smt.2018.5331
- [108] S. Dolce, E. Fiorucci, G. Bucci, F. D'Innocenzo, F. Ciancetta, A. Di Pasquale, "Test instrument for the automatic compliance check of cast resin insulated windings for power transformers", Meas: J Int Meas Confederation, 100 (2017), pp. 50-61
- [109] A.A. Pandya, B.R. Parekh, "Interpretation of sweep frequency response analysis (SFRA) traces for the open circuit and short circuit winding fault damages of the power transformer", Int J Elec Power, 62 (2014), pp. 890-896, 10.1016/j.ijepes.2014.05.011
- [110] E. Fiorucci, G. Bucci, F. D'Innocenzo, M. Luiso, "A measurement technique for quality control of windings for cast resin power transformers", 2014 IEEE international instrumentation and measurement technology conference: instrumentation and measurement for sustainable development, I2MTC 2014 Montevideo (Uruguay) 12–15 May (2014), 10.1109/I2MTC.2014.6860830
- [111] Szymon Banaszak, Wojciech Szoka, "Transformer frequency response analysis with the grouped indices method in end-to-end and capacitive inter-winding measurement configurations", IEEE Trans Power Del (Early Access) (2019), 10.1109/TPWRD.2019.2915570
- [112] V. Nurmanova, M. Bagheri, A. Zollanvari, K. Aliakhmet, Y. Akhmetov, G.B. Gharehpetian, "A new transformer FRA measurement technique to reach smart interpretation for inter-disk faults", IEEE Trans Power Del, 34 (4) (2019), 10.1109/TPWRD.2019.2909144
- [113] IEC 60076-18:2012. Power transformers – Part 18: Measurement of frequency response. <https://webstore.iec.ch/>.
- [114] A. Di Pasquale, E. Fiorucci, A. Ometto, N. Rotondale, "Frequency characterization of cast-resin transformers", 21st international symposium on power electronics, electrical drives, automation and motion, SPEEDAM 2012 Sorrento (Italy) 20–22 June (2012), 10.1109/SPEEDAM.2012.6264464



- [115] R. Khalili Senobari, J. Sadeh, H. Borsi, "Frequency response analysis (FRA) of transformers as a tool for fault detection and location: a review", *Electr Power Syst Res*, 155 (2018), pp. 172-183, 10.1016/j.epsr.2017.10.014
- [116] Jawad Faiz, Reza Heydarabadi, "Diagnosing power transformers faults", *Russian Electr. Eng.*, 85 (12) (2014), pp. 785-793
- [117] Shayan Tariq Jan, Raheel Afzal, and Akif Zia Khan. "Transformer failures, causes & impact." In: *International conference data mining, civil and mechanical engineering (ICDMCME'2015)*, Bali (Indonesia); Feb. 1–2, 2015, <https://doi.org/10.15242/iee.e0215039>.
- [118] Kaixing Hong, Ling Wang, Xu Suan, "A variational mode decomposition approach for degradation assessment of power transformer windings", *IEEE Trans Instrum Meas*, 68 (4) (2019), pp. 1221-1229, 10.1109/TIM.2018.2865048
- [119] W.K. Jong, K.P. Byung, C.J. Seung, W.K. Sang, G.P. Poo, "Fault diagnosis of a power transformer using an improved frequency response analysis", *IEEE Trans Power Del*, 20 (1) (2005), 10.1109/TPWRD.2004.835428
- [120] Mohd Fairouz Bin Mohd Yousof, Thesis: "Frequency Response Analysis for Transformer Winding Condition Monitoring", The University of Queensland, 2015
- [121] Martin Brandt, Miroslav Gutten, Tomasz Koltunowicz, Pawel Zukowski, "Analysis of winding fault in electric machines by frequency method", 2018 *Elektro*, Mikulov (Czech Republic), 21-23 May 2018, DOI: 10.1109/ELEKTRO.2018.8398298
- [122] Priti Gite, A.S. Sindekar, "Investigating mechanical integrity in power transformer using sweep frequency response analysis (SFRA)", 2017 *IEEE international conference on electrical, instrumentation and communication engineering (ICEICE)*, Karur (India) 27–28 April 2017 (2017), 10.1109/ICEICE.2017.8191911
- [123] J.J. Huang, W.H. Tang, Yanli Xin, Q.H.Wu Jq Zhou, *IOP conference series: materials science and engineering* (2018), 10.1088/1757-899X/366/1/012067
- [124] P. Gite, A.S. Sindekar, "Interpretation of sweep frequency response data (SFRA) using graphical and statistical technique", 2017 *International conference of electronics, communication and aerospace technology (ICECA)*, coimbatore (India) 20–22 April 2017 (2017), 10.1109/ICECA.2017.8212810
- [125] D. Smugala, M. Bonk, R. Ziemski, "Single-phase magnetic cores' faults diagnosis using FRA approach", *Measurement*, 114 (2018), pp. 428-435, 10.1016/j.measurement.2017.10.004
- [126] A. Avalos, J. Cerda, S. Sanchez, "Non Typical Fault Detection in Power Transformers using SFRA", *World congress on engineering and computer science (WCES 2017)*, San Francisco CA (USA) (2017), pp. 25-27
- [127] CENELEC EN 50541-1:2011. Three phase dry-type distribution transformers 50 Hz, from 100 kVA to 3 150 kVA, with highest voltage for equipment not exceeding 36 kV IEC 60076-18/ – 2013 *Power Transformers – Part 18: Measurement of frequency response.*].
- [128] *Analog discovery 2™ reference manual*, digilent.
- [129] A. Prudenzi, A. Fioravanti, M. Regoli, "A low-cost internet of things integration platform for a centralized supervising system of building technology systems in hospitals", 2018 *IEEE international conference on environment and electrical engineering and IEEE industrial and commercial power systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*, Palermo (Italy) 12–15 June 2018 (2018), 10.1109/EEEIC.2018.8494473
- [130] G. Bucci, F. Ciancetta, A. Fioravanti, E. Fiorucci, A. Prudenzi, "Application of SFRA for diagnostics on medical isolation transformers", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 117, 2020, 105602, ISSN 0142-0615, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105602>.
- [131] *Triad Magnetic VPM240-4170 Datasheet*, Publish Date: July 7, 2016.

[132] G.M. Kennedy, A.J. McGrail, J.A. Lapworth, “Transformer sweep frequency response analysis (SFRA)”, Energize (2007), pp. 28-33

[133] G. Bucci, F. Ciancetta, A. Fioravanti, E. Fiorucci, A. Prudenzi, “Improving the Power System safety in Hospitals by means of periodical SFRA tests on Medical Isolation Transformers”, 18th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'20) Granada (Spain), 1st to 2nd April 2020, Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ) ISSN 2172-038 X, Volume No.18, June 2020