

Ricerca di Sistema elettrico



Analisi di anomalie e guasti che inficiano la sicurezza e l'operatività del sistema elettrico

G.Adinolfi, A. Buonanno, R. Ciavarella,
A.Ricca, V. Sorrentino, M. Valenti

RdS_PTR 22-24_PR 2.3_LA1.1_L063

ANALISI DI ANOMALIE E GUASTI CHE INFICIANO LA SICUREZZA E L'OPERATIVITÀ DEL SISTEMA ELETTRICO

G. Adinolfi, A. Buonanno, R. Ciavarella, A. Ricca, V. Sorrentino, M. Valenti (ENEA)

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione/Digitalizzazione ed evoluzione delle reti*

Progetto: *Evoluzione, pianificazione, gestione ed esercizio delle reti elettriche*

Linea di attività: *LA1.1*

Responsabile del Progetto: *Maria Valenti, ENEA*

Responsabile Linea di Attività: *Giovanna Adinolfi, ENEA*

Mese inizio previsto: 1

Mese inizio effettivo: 1

Mese fine previsto: 18

Mese fine effettivo: 18

Indice

1	RISULTATI ATTESI	3
2	RISULTATI OTTENUTI.....	3
3	PRODOTTI ATTESI.....	4
4	PRODOTTI SVILUPPATI	5
5	ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI	5
6	SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE	5
7	DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE	5
8	CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE	11
9	PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE.....	11
10	EVENTI DI DISSEMINAZIONE	11
	APPENDICE 1.....	12
	APPENDICE 2.....	25
	APPENDICE 3.....	36

1 Risultati attesi

Lista dei risultati attesi come da capitolato vigente

Si riporta di seguito la lista dei risultati attesi come da capitolato vigente:

- Analisi di anomalie e guasti per generatori fotovoltaici
- Analisi di anomalie e guasti per generatori eolici
- Analisi di anomalie e guasti delle Fuel Cell
- Analisi di anomalie e guasti associati alle Batterie
- Analisi di anomalie e guasti associati ai sistemi di conversione DC/DC e DC/AC
- Analisi di anomalie e guasti di apparati di monitoraggio
- Analisi di anomalie e guasti di apparati di comunicazione
- Analisi di anomalie e guasti di apparati di controllo

2 Risultati ottenuti

Lista dei risultati ottenuti (*Evidenziare in che misura il risultato è stato ottenuto ed il beneficio per il sistema elettrico nazionale e i suoi utenti. Aggiungere eventuali risultati ottenuti non previsti nel capitolato*)

Le attività svolte nella presente LA hanno riguardato lo studio della letteratura di settore e della documentazione tecnica finalizzato all'acquisizione di dati utili all'analisi e alla caratterizzazione dei comportamenti anomali e dei guasti per diversi apparati di rete. Gli apparati analizzati sono stati identificati nella Tabella 4 del capitolato tecnico. Gli output dell'analisi condotta costituiranno un input sia per la LA1.3 che per la LA1.16. Il risultato atteso è stato pienamente raggiunto, ovvero la LA ha identificato, tra i componenti selezionati, quelli per i quali sono disponibili in letteratura i dati ricercati (sintetizzati nel presente documento) e quelli per i quali risulta necessaria la conduzione di test emulativo-sperimentali per la caratterizzazione delle anomalie nella LA1.16.

Per i componenti, per i quali sono stati reperiti dati sufficienti, si è provveduto ad analizzare, raggruppare e sintetizzare le informazioni in forma tabellare. Le tabelle prodotte riportano, per ciascun componente, le principali anomalie e guasti con indicazione dei relativi riferimenti bibliografici e i dataset (ove disponibili), reali o simulati/sintetici, da poter utilizzare per modellazioni matematiche e/o caratterizzazioni del componente con il relativo link per il download. Le tabelle prodotte in relazione all'analisi sulle anomalie e guasti sono riportate in Appendice 1 (tabelle 1-8), mentre le tabelle di dataset sono riportate in Appendice 2 (tabelle 9-14).

I dati così sistematizzati rappresentano un interessante base dati a beneficio dei diversi stakeholder della filiera energetica (es. aziende produttrici di tecnologie connesse al sistema elettrico, enti di ricerca, ecc.). I riferimenti alle tabelle per ciascun componente sono di seguito sintetizzati.

- **Analisi di anomalie e guasti per generatori fotovoltaici**

I risultati relativi ai generatori fotovoltaici sono sintetizzati in: Tabella 1 (classificazione anomalie e guasti) e Tabella 9 (dataset)

- **Analisi di anomalie e guasti per generatori eolici**

I risultati relativi ai generatori fotovoltaici sono sintetizzati in: Tabella 2 (classificazione anomalie e guasti) e Tabella 10 (dataset)

- **Analisi di anomalie e guasti degli elettrolizzatori**

- I risultati relativi ai generatori fotovoltaici sono sintetizzati in: Tabella 3 (classificazione anomalie e guasti) e Tabella 11 (dataset)

- **Analisi di anomalie e guasti delle Fuel Cell**

- I risultati relativi ai generatori fotovoltaici sono sintetizzati in: Tabella 4 (classificazione anomalie e guasti) e Tabella 12 (dataset)

- **Analisi di anomalie e guasti associati alle Batterie**

I risultati relativi alle batterie sono sintetizzati in: Tabella 5 (classificazione anomalie e guasti) e Tabella 13 (dataset)

- **Analisi di anomalie e guasti associati ai sistemi di conversione DC/DC e DC/AC**

I risultati relativi ai sistemi di conversione DC/DC e DC/AC sono sintetizzati in: Tabella 6 (classificazione anomalie e guasti) e Tabella 14 (dataset). Un approfondimento sui componenti di tali apparati che risentono maggiormente dei fattori di stress è riportato in Appendice 3.

- **Analisi di anomalie e guasti di apparati di monitoraggio**

I risultati relativi agli apparati di monitoraggio sono sintetizzati in: Tabella 7 (classificazione anomalie e guasti). Non sono stati trovati dataset pubblici relativi a questa tipologia di apparati, né modelli a partire dai quali costruire dataset sintetici.

- **Analisi di anomalie e guasti di apparati di comunicazione**

I risultati relativi agli apparati di comunicazione sono sintetizzati in: Tabella 8 (classificazione anomalie e guasti). Non sono stati trovati dataset pubblici relativi a questa tipologia di apparati, né modelli a partire da cui costruire dataset sintetici.

- **Analisi di anomalie e guasti di apparati di controllo**

L'analisi della letteratura tecnico-scientifica non rende disponibili dataset pubblici o articoli tecnici che riportano informazioni circa le anomalie e i guasti meccanici e/o elettrici agli apparati di controllo. Tale assenza di dati è presumibilmente riconducibile all'alta affidabilità dei componenti generalmente adoperati per la gestione dei sistemi elettrici, quali i sistemi SCADA. Le vulnerabilità, studiate per questo tipo di apparati, sono connesse alle problematiche di cybersicurezza più che alle problematiche di affidabilità del componente.

3 Prodotti attesi

Lista dei prodotti hardware/software eventualmente attesi per la LA

Per la presente LA non sono attesi prodotti hardware/software.

4 Prodotti sviluppati

Lista dei prodotti hardware/software eventualmente sviluppati nella LA, illustrando, per il software, le modalità di accesso per gli utenti *(Aggiungere eventuali prodotti sviluppati non previsti nel capitolato)*

La LA1.1 non prevede lo sviluppo di prodotti hardware/software.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

(8000 caratteri max)

Descrivere le motivazioni di eventuali scostamenti tecnici/economici rispetto al preventivo e criticità riscontrate *(Evidenziare il contenuto in riferimento al piano di rischi presentato)*

Non si sono registrati scostamenti tecnico e/o economici nell'ambito della LA1.1.

6 Sintesi delle attività svolte

(1000 caratteri max)

La LA1.1 si è posta l'obiettivo di identificare le principali cause di comportamenti anomali e guasti per specifici dispositivi di rete e la disponibilità di dati per la relativa caratterizzazione. A tale scopo, per ciascuno dei componenti selezionati, si è proceduto ad esaminare la letteratura tecnico-scientifica e la documentazione tecnica (es. datasheet forniti dai produttori) per individuare le tipologie di guasto più frequenti e la disponibilità di dati simulati e/o sperimentali per la relativa caratterizzazione. Laddove tali dati non sono stati reperiti, si è proceduto alla ricerca di modelli matematici e/o metodologie empiriche/simulative per la caratterizzazione dei guasti da poter utilizzare nelle successive attività del progetto. Al fine di rendere più fruibili i risultati ottenuti, essi sono stati organizzati in tabelle riportate nelle Appendici del presente documento. I risultati della linea saranno divulgati, nel II SAL, mediante pubblicazione scientifica.

7 Dettaglio delle attività svolte

(15000 caratteri max)

Descrivere in dettaglio le attività svolte nella LA *(Evidenziare come si sono ottenuti i risultati. Descrivere brevemente anche le attività, per le quali si sono spese delle risorse, che tuttavia non hanno portato all'ottenimento dei risultati previsti al fine di permettere la corretta valutazione di congruità e pertinenza dei costi rendicontati.)*

Le attività svolte nella presente LA sono state focalizzate sullo studio della letteratura e dei documenti tecnico-scientifici al fine di acquisire dati utili all'analisi e alla caratterizzazione di anomalie e guasti di diversi apparati di rete. Gli apparati analizzati sono stati identificati nella Tabella 4 del capitolato tecnico. Le attività svolte per ciascun componente sono di seguito sintetizzate.

- **Analisi di anomalie e guasti per generatori fotovoltaici**

L'attività è stata condotta attraverso tre fasi principali. Nella prima, si è proceduto a identificare le principali anomalie e guasti dei generatori fotovoltaici; successivamente, a individuare i parametri

per caratterizzare i guasti e, infine, a reperire dataset relativi ad anomalie e guasti dei sistemi fotovoltaici. Con riferimento al primo punto, le anomalie e i guasti più frequenti sono riconducibili ai seguenti fenomeni per ciascuno dei quali sono riportati i riferimenti risultanti dall'analisi condotta in Tabella 1:

- **mismatching**: effetto che si registra quando i moduli fotovoltaici, collegati in serie, non presentano i medesimi parametri elettrici di funzionamento tra loro con conseguente riduzione della producibilità dell'impianto. Il mismatching può essere temporaneo (es. ombreggiamenti) o permanente (es. degradazione, moduli difettosi, ecc.) e si rileva quando i moduli sono esposti a diverse condizioni ambientali, intervengono fattori di deterioramento o presentano difetti costruttivi.
- **corto circuito**: guasto più comune nei moduli fotovoltaici, provoca riduzione o interruzione della produzione di energia elettrica.
- **guasti al sistema PV** includono: guasto da circuito aperto senza/con diodo di bypass, guasto al diodo di bypass, guasto agli array PV, guasto a terra, guasto "Line-to-line", guasto alla "Box di giunzione", guasti da arco elettrico, guasti al sistema di controllo MPPT, guasto all'inverter, guasto "Bridging".

Nella seconda fase, si è proceduto a individuare i parametri necessari alla caratterizzazione dei guasti. In tal senso, l'articolo Kim et al.¹ fornisce gli effetti sulla curva I-V di alcuni guasti; tale curva potrà essere adoperata nella LA1.16 per analizzare/simulare gli impatti dei guasti sulla curva di funzionamento del sistema e/o individuare il tipo di guasto osservando la curva I-V in uscita dal generatore. Infine, con riferimento all'ultima fase di lavoro, in Tabella 9 sono riportati i dataset contenenti anomalie e guasti associati ai sistemi fotovoltaici.

- **Analisi di anomalie e guasti per generatori eolici**

L'attività è stata condotta attraverso due fasi principali. Innanzitutto, si è proceduto a identificare le principali anomalie e guasti associati ai generatori eolici; successivamente a reperire i relativi dataset. In sintesi, l'analisi condotta ha evidenziato che diversi componenti, con probabilità diverse, potrebbero portare ad un funzionamento anomalo o errato del generatore eolico: componenti elettrici, sistema di controllo, pitch system, pale, alberi, cuscinetti, navicella, trasmissione, ecc. Alcuni di questi componenti hanno un *tasso di guasto* mediano più alto (componenti elettrici, sistema di controllo, pitch system, pale, hub) mentre altri hanno un *tempo di fermo* (downtime) mediano più alto (trasmissione, generatore, alberi, cuscinetti, struttura). I tassi di guasto delle installazioni offshore risultano generalmente più alti di quelli onshore, anche per le condizioni operative più critiche nel caso offshore (es. velocità del vento più elevata, azione corrosiva del sale marino, ecc.). Il downtime in installazioni offshore, date le difficoltà logistiche, è mediamente più elevato di quello delle installazioni onshore.

In generale, la letteratura tecnico-scientifica rende disponibili numerosi lavori sui sistemi di diagnostica dei generatori eolici ma fornisce pochi dati su tassi di guasto e anomalie nei diversi componenti. I dati reperiti sono sintetizzati nelle Tabelle 2 e 10.

- **Analisi di anomalie e guasti degli elettrolizzatori**

L'attività è stata condotta in due fasi. In primis, si è proceduto a identificare le principali anomalie e guasti associati agli elettrolizzatori (Tabella 3) e, successivamente, i relativi dataset (Tabella 11). Con riferimento al primo punto, le anomalie e i guasti per ciascun componente dell'elettrolizzatore sono:

- **Membrana**

¹ "G. G. Kim, W. Lee, B. G. Bhang, J. H. Choi and H. -K. Ahn, "Fault Detection for Photovoltaic Systems Using Multivariate Analysis With Electrical and Environmental Variables," in IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 11, no. 1, pp. 202-212, Jan. 2021, doi: 10.1109/JPHOTOV.2020.3032974"

Deterioramento meccanico	<ul style="list-style-type: none"> • Perforazione del collettore di corrente • Micro-perforazioni causati da imperfezione in fase di produzione della MEA • Allargamento o restringimento • Idratazione non uniforme • Mancanza di acqua
Deterioramento termico	<ul style="list-style-type: none"> • Stress termici • Cicli termici
Deterioramento chimico / elettrochimico	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminazione • Attacchi radicalici

• Catalizzatore

Dissoluzione	<ul style="list-style-type: none"> • Potenziale operativo troppo elevato • Formazione di complessi di iridio (III) solubile durante la reazione di evoluzione dell'ossigeno • Inversione di corrente nelle procedure di spegnimento
Passivazione del supporto	<ul style="list-style-type: none"> • Potenziale operativo troppo elevato • Ambiente altamente ossidante
Agglomerazione	<ul style="list-style-type: none"> • Sintering ed incremento delle dimensioni dei siti attivi • Cicli di carico e avvio/spegnimento
Dissoluzione dello ionomero	<ul style="list-style-type: none"> • Alta densità di corrente • Attacco chimico dei radicali
Contaminazione da cationi	<ul style="list-style-type: none"> • Bloccaggio dei siti attivi da potenziale deposizione • Sostituzione dei protoni dello ionomero da parte dei cationi
Danni meccanici	<ul style="list-style-type: none"> • Pressione di serraggio non uniforme • Dilatazione irregolare della membrana

• Piastra bipolare

Infragilimento da idrogeno	<ul style="list-style-type: none"> • Assorbimento dell'idrogeno da parte delle piastre metalliche catodiche
Passivazione	<ul style="list-style-type: none"> • Formazione di uno strato di ossido
Corrosione	<ul style="list-style-type: none"> • Ossidazione del titanio • Corrosione da acidi dell'acciaio

• Collettori di corrente

Deterioramento chimico	<ul style="list-style-type: none"> • Passivazione e corrosione della piastra metallica
Deterioramento meccanico	<ul style="list-style-type: none"> • Compressione anomala • Infragilimento da idrogeno

Le principali cause di guasto sono legate alla membrana e al catalizzatore²; più rari sono i guasti di piastre bipolari e collettori di corrente. Diversi sono i metodi di diagnostica. I più innovativi³, i metodi statistici basati su reti neurali, necessitano di dati storici o sintetici del dispositivo⁴ e, quindi, di tempi

² M. Kheirrouz, F. Melino, and M. A. Ancona, "Fault detection and diagnosis methods for green hydrogen production: A review," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 65, pp. 27747–27774, 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.06.115.

³ S. Tao, Y. Si-jia, C. Guang-yi, and Z. Xin-jian, "Modelling and control PEMFC using fuzzy neural networks," *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, vol. 6, no. 10, pp. 1084–1089, 2005, doi: 10.1631/jzus.2005.A1084

⁴ M. Dhimish and X. Zhao, "Enhancing reliability and lifespan of PEM fuel cells through neural network-based fault detection and classification," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 41, pp. 15612–15625, 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.01.064.

maggiori di caratterizzazione. I metodi tradizionali basati su misurazioni elettriche ed elettrochimiche sono più percorribili ma con una più limitata capacità di identificazione del guasto⁵.

In generale, lo studio condotto ha evidenziato la difficoltà di reperire dati empirici sui guasti degli elettrolizzatori. Per ovviare a tale difficoltà, a valle della ricognizione propedeutica alla classificazione di anomalie e guasti (Tabella 3), è stata condotta una ulteriore ricognizione finalizzata alla ricerca di modelli matematici per la costruzione di dataset sintetici (Tabella 11).

Si precisa, infine, che l'analisi dei guasti negli elettrolizzatori non era stata prevista da capitolato. Essa è stata condotta perché, in corso di svolgimento della LA1.14, si è palesata la necessità di acquisire dati per la caratterizzazione di questo tipo di apparati da utilizzare nell'ambito della LA1.16, per un'eventuale modellazione dei sistemi di accumulo ad idrogeno da abbinare alle Fuel Cell (FC).

• **Analisi di anomalie e guasti delle Fuel Cell**

L'attività è stata condotta attraverso due fasi principali. In primis, si è proceduto a identificare le principali anomalie e guasti associati alle FC (Tabella 4); successivamente a reperire i relativi dataset.

Dall'analisi è emerso che i componenti più fragili sono la membrana e il catalizzatore⁶, che rappresentano il 95% dei malfunzionamenti. Non è stato, però, possibile reperire dati sperimentali sui guasti associati alle FC. Nella tabella dataset (Tabella 12) sono stati, quindi, riportati i diversi metodi diagnostici, sia di tipo stocastico⁷ e basati sulle reti neurali⁸ sia di tipo analitico, che diverse tecniche per l'analisi e la caratterizzazione on-line delle anomalie (Electrochemical Impedance Spectroscopy⁹, analisi della curva caratteristica V/P¹⁰, curva di polarizzazione¹¹, misurazione della tensione di cella¹²).

• **Analisi di anomalie e guasti associati alle Batterie**

L'attività è stata condotta attraverso due fasi principali. In prima battuta si è proceduto a identificare le principali anomalie e guasti associati alle batterie con i riferimenti bibliografici (Tabella 5) e, successivamente, i relativi dataset (Tabella 13). Con riferimento al primo punto, le principali anomalie e guasti nelle batterie sono di seguito richiamati, con l'indicazione delle possibili conseguenze¹³:

- **Corto circuito esterno:** può causare surriscaldamento e innalzamento della pressione.
- **Corto circuito interno:** può causare esplosione ed è principalmente causata dal sovraccarico.
- **Sovra-carica:** può provocare la reazione dell'elettrodo positivo con l'elettrolita, con conseguente generazione di calore, innalzamento della pressione e conseguente incendio.

⁵ R. Isermann, "Model-based fault-detection and diagnosis – status and applications," *Annu Rev Control*, vol. 29, no. 1, pp. 71–85, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2004.12.002>.

⁶ K. Brik, F. Ben Ammar, A. Djerdir, and A. Miraoui, "Causal and Fault Trees Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Degradation," *J Fuel Cell Sci Technol*, vol. 12, no. 5, Oct. 2015, doi: 10.1115/1.4031584.

M. Yue, S. Jemei, R. Gouriveau, and N. Zerhouni, "Review on health-conscious energy management strategies for fuel cell hybrid electric vehicles: Degradation models and strategies," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 13, pp. 6844–6861, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.190.

⁷ H. Wang, H. Li, and X.-Z. Yuan, *PEM fuel cell failure mode analysis*, vol. 1. CRC Press, 2011.

P. Rama, R. Chen, and J. Andrews, "Failure analysis of polymer electrolyte fuel cells," *SAE Technical Papers*, vol. 2008, no. 724, pp. 776–790, 2008, doi: 10.4271/2008-01-0634.

⁸ M. Dhimish and X. Zhao, "Enhancing reliability and lifespan of PEM fuel cells through neural network-based fault detection and classification," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 41, pp. 15612–15625, 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.01.064.

L. Mao and L. Jackson, "Comparative study on prediction of fuel cell performance using machine learning approaches," *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, vol. 1, pp. 52–57, 2016.

⁹ S. S. Araya, F. Zhou, S. L. Sahlín, S. Thomas, C. Jeppesen, and S. K. Kær, "Fault characterization of a proton exchange membrane fuel cell stack," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 1, 2019, doi: 10.3390/en12010152.

¹⁰ Z. Lin, C. H. Wang, and Y. Liu, "The Fault Analysis and Diagnosis of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack," *Adv Mat Res*, vol. 197–198, pp. 705–710, 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.197-198.705.

¹¹ L. Shi, B. P. Setzler, and Y. Yan, "Understanding the Ebalance for water management in hydroxide exchange membrane fuel cells," *J Power Sources*, vol. 536, no. April, p. 231514, 2022, doi: 10.1016/j.jpowsour.2022.231514.

¹² Z. Li, R. Outbib, S. Giurgea, D. Hissel, A. Giraud, and P. Couderc, "Fault diagnosis for fuel cell systems: A data-driven approach using high-precise voltage sensors," *Renew Energy*, pp. 1435–1444, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.09.077.

¹³ Report di Ricerca di Sistema (affidatario ENEA): C. Di Bari, E. Rossi, S. Constà, F. Sacco "Definizione di procedure di prova di overvoltage e cortocircuito su sistemi di accumulo litio-ione" RdS_PAR2016_170

- **Sotto-scarica:** può provocare danni al catodo della cella elettrolitica, formazione di placche e dendriti e conseguente cortocircuito interno per perforazione del diaframma.
- **Esposizione a calore esterno.**
- **Auto-riscaldamento.**

Si precisa, infine, che l'analisi condotta ha evidenziato la disponibilità di dati per le sole batterie al litio, tecnologia attualmente più diffusa. Pertanto, i dati riportati nelle tabelle 5 e 13 sono riferiti a questo tipo di tecnologia e a essa si farà riferimento anche nelle successive fasi di progetto.

- **Analisi di anomalie e guasti associati ai sistemi di conversione DC/DC e DC/AC**

L'attività è stata condotta attraverso tre fasi principali. In prima battuta si è proceduto a identificare le principali anomalie e guasti associati ai sistemi di conversione DC/DC e DC/AC (Tabella 6); successivamente, all'identificazione dei metodi per la caratterizzazione dei guasti dei convertitori di interfaccia e, infine, alla ricerca di possibili dataset. Maggiori dettagli relativi ai risultati delle analisi condotte sono riportati in Allegato 2. È opportuno, in ogni caso, evidenziare che non è stato possibile reperire dataset relativi alle anomalie e ai guasti né dei convertitori di interfaccia né dei dispositivi a commutazione, capacitivi ed induttivi dello stadio di potenza, né dei componenti dello stadio di controllo. Pertanto, nella Tabella 14 non sono riportati dataset di dati sperimentali e/o simulati ma i metodi identificati nella seconda fase di lavoro per la caratterizzazione delle anomalie di funzionamento. Nel prosieguo del progetto si dovrà, quindi, valutare l'opportunità/possibilità di procedere a caratterizzazione dei componenti per la costruzione di dataset sperimentali.

- **Analisi di anomalie e guasti di apparati di monitoraggio**

L'attività è stata condotta attraverso due fasi principali. In prima battuta si è proceduto a identificare le principali anomalie e guasti associati agli apparati di monitoraggio (Tabella 7); successivamente, si è proceduto alla ricerca di possibili dataset. Con riferimento al primo punto, le principali anomalie e guasti associati agli apparati di comunicazione sono di seguito richiamati¹⁴:

- **Guasti meccanici:** guasti imputabili al cedimento della struttura meccanica dell'apparato (es. degrado dei materiali¹⁵, vibrazioni, shock esterni¹⁶).
- **Guasti Elettrici:** guasti che inficiano le proprietà elettriche dell'apparato (es. perdita di isolamento¹⁷, residuo anomalo di misurazione¹⁸ per blackout o sovraccarico dell'apparato).

¹⁴ Jyrki Kullaa, "Detection, identification, and quantification of sensor fault in a sensor network, Mechanical Systems and Signal Processing", Volume 40, Issue 1, 2013, Pages 208-221, ISSN 0888-3270, <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2013.05.007>.

¹⁵ Jiang, L., Djurdjanovic, D., Ni, J., Lee, J. (2006). Sensor Degradation Detection in Linear Systems. In: Mathew, J., Kennedy, J., Ma, L., Tan, A., Anderson, D. (eds) Engineering Asset Management. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-84628-814-2_138

¹⁶ F. Hau, F. Baumgärtner and M. Vossiek, "Influence of vibrations on the signals of automotive integrated radar sensors," 2017 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM), Nagoya, Japan, 2017, pp. 159-162, doi: 10.1109/ICMIM.2017.7918881.

¹⁷ Yunbing Huang, Janos Gertler, Thomas J. McAvoy, "Sensor and actuator fault isolation by structured partial PCA with nonlinear extensions", Journal of Process Control, Volume 10, Issue 5, 2000, Pages 459-469, ISSN 0959-1524, [https://doi.org/10.1016/S0959-1524\(00\)00021-4](https://doi.org/10.1016/S0959-1524(00)00021-4).

Xiaodong Zhang, T. Parisini and M. M. Polycarpou, "Sensor bias fault isolation in a class of nonlinear systems," in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 50, no. 3, pp. 370-376, March 2005, doi: 10.1109/TAC.2005.843875.

¹⁸ Liu et al., "Fault Test Analysis of Abnormal Remaining Amount of Smart Meter," 2023 Panda Forum on Power and Energy (PandaFPE), Chengdu, China, 2023, pp. 1366-1370, doi: 10.1109/PandaFPE57779.2023.10140559

- **Altri guasti:** guasti che possono inficiare la misurazione dovuti ad esempio al rumore¹⁹, a errori di lettura (valore letto dall'apparato diverso da quello effettivo per una variazione del guadagno)²⁰, a perdite di calibrazione o degrado delle prestazioni²¹.

Lo studio ha evidenziato che i guasti degli apparati di monitoraggio dipendono fortemente dalle condizioni operative dell'ambiente in cui sono inseriti. I più comuni sono gli errori di lettura dovuti ad una errata calibrazione del sensore, a un degrado delle prestazioni, o a guasti di natura elettrica; meno frequenti sono i guasti di natura meccanica.

Per nessuna tipologia di guasto è stato possibile reperire dati simulati e/o sperimentali né informazioni riguardanti guasti e anomalie relative ai sistemi di misura per il settore specifico delle reti elettriche (smart meter). Pertanto, i risultati forniti fanno riferimento ad altri settori applicativi. Nel prosieguo del progetto si dovrà, pertanto, valutare l'opportunità/possibilità di procedere a caratterizzazione dei componenti per la costruzione di dataset sperimentali.

- **Analisi di anomalie e guasti di apparati di comunicazione**

L'attività è stata condotta attraverso due fasi principali. In prima battuta si è proceduto a identificare le principali anomalie e guasti associati agli apparati di comunicazione (Tabella 8); successivamente, si è proceduto alla ricerca di possibili dataset. Con riferimento al primo punto, le principali anomalie e guasti associati agli apparati di comunicazione sono di seguito richiamati²²:

- **Guasti del supporto di comunicazione:** guasti imputabili al mezzo di supporto e trasmissione (es. rottura fibra, eccessiva curvatura, connettori o rottura delle giunzioni²³).
- **Guasto al ricevitore:** guasti che riguardano un malfunzionamento del ricevitore, come un elevato tempo di ricezione del pacchetto dati²⁴.
- **Integrità dei dati:** guasti che inficiano l'integrità dei dati trasferiti, degradando l'accuratezza e l'affidabilità della trasmissione, e causati da alterazione o perdita di parte del pacchetto di dati trasmesso²⁵. Sono, generalmente, riconosciuti dal ricevitore mediante checksum²⁶.

L'analisi ha evidenziato che i guasti dovuti al mezzo di supporto sono più frequenti delle altre due tipologie. Per nessuna tipologia è stato possibile reperire dataset simulati/sperimentali ma solo metodi per la diagnostica dei guasti (Tabella 8).

¹⁹ Z. Q. Lei, G. J. Li, W. F. Egelhoff, P. T. Lai and P. W. T. Pong, "Review of Noise Sources in Magnetic Tunnel Junction Sensors," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 47, no. 3, pp. 602-612, March 2011, doi: 10.1109/TMAG.2010.2100814.

Reza Sharifi, Reza Langari, "Isolability of faults in sensor fault diagnosis, Mechanical Systems and Signal Processing", Volume 25, Issue 7, 2011, Pages 2733-2744, ISSN 0888-3270, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2011.02.015>.

²⁰ F. Grouz, L. Sbita and M. Boussak, "Current sensors gain faults detection and isolation based on an adaptive observer for PMSM drives," 10th International Multi-Conferences on Systems, Signals & Devices 2013 (SSD13), Hammamet, Tunisia, 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/SSD.2013.6564061. Youqing Wang, Donghua H. Zhou, "Sensor Gain Fault Diagnosis for a Class of Nonlinear Systems", European Journal of Control, Volume 12, Issue 5, 2006, Pages 523-535, ISSN 0947-3580, <https://doi.org/10.3166/ejc.12.523-535>.

²¹ Q. Yang and J. Wang, "Multi-Level Wavelet Shannon Entropy-Based Method for Single-Sensor Fault Location," Entropy, vol. 17, no. 12, pp. 7101-7117, Oct. 2015, doi: 10.3390/e17107101.

²² F. E. Abrahamsen, Y. Ai, and M. Cheffena, "Communication Technologies for Smart Grid: A Comprehensive Survey," Sensors, vol. 21, no. 23, p. 8087, Dec. 2021, doi: 10.3390/s21238087

²³ Xinyu Dou et al., "Demonstration of chaotic-laser based WDM-PON secure optical communication and real-time online fiber-fault detection and location," 2015 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), Shanghai, 2015, pp. 1-3, doi: 10.1109/OECC.2015.7340182.

Chun-Kit Chan, F. Tong, Lian-Kuan Chen, Keang-Po Ho and D. Lam, "Fiber-fault identification for branched access networks using a wavelength-sweeping monitoring source," in IEEE Photonics Technology Letters, vol. 11, no. 5, pp. 614-616, May 1999, doi: 10.1109/68.759416.

²⁴ F. Gardner, "A BPSK/QPSK Timing-Error Detector for Sampled Receivers," in IEEE Transactions on Communications, vol. 34, no. 5, pp. 423-429, May 1986, doi: 10.1109/TCOM.1986.1096561.

W. Yuan, Q. Shi, N. Wu, Q. Guo and X. Huang, "Gaussian Message Passing Based Passive Localization in the Presence of Receiver Detection Failures," 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Porto, Portugal, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/VTCSpring.2018.8417730.

²⁵ F. Li and B. Luo, "Preserving data integrity for smart grid data aggregation," 2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Tainan, Taiwan, 2012, pp. 366-371, doi: 10.1109/SmartGridComm.2012.6486011.

²⁶ H. Kim, I. Hwang, J. Lee, H. Y. Yeom and H. Sung, "Concurrent and Robust End-to-End Data Integrity Verification Scheme for Flash-Based Storage Devices," in IEEE Access, vol. 10, pp. 36350-36361, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3163729

Si fa presente, infine, che non essendo l'analisi dell'integrità dei dati oggetto del presente progetto, nella LA1.16 si farà riferimento solo ai guasti al supporto e al ricevitore, per i quali si dovrà valutare l'opportunità/possibilità di procedere a caratterizzazione per la costruzione di dataset sperimentali.

- **Analisi di anomalie e guasti di apparati di controllo**

L'analisi della letteratura tecnico-scientifica condotta ha evidenziato che non sono disponibili dataset pubblici o articoli tecnici che riportano informazioni circa le anomalie e i guasti meccanici e/o elettrici agli apparati di controllo. Tale tema, in particolare, come emerso dall'analisi condotta, non viene trattato poiché i componenti generalmente adoperati per la gestione dei sistemi elettrici, quali i sistemi SCADA, presentano elevata affidabilità di tipo meccanico ed elettrico. Le vulnerabilità di questo tipo di apparati, infatti, sono generalmente riconducibili a problematiche di cybersicurezza e/o software²⁷. Non ricadendo queste ultime tra gli obiettivi del progetto ed essendo ininfluenti le prime ai fini della valutazione dell'affidabilità, si ritiene non necessario caratterizzare anomalie e guasti di tali apparati nelle successive LA.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

L'attività non ha previsto il ricorso a consulenze.

9 Pubblicazioni scientifiche

Elenco delle pubblicazioni scientifiche eventualmente risultanti dall'attività svolta

L'attività svolta non è stata oggetto di pubblicazioni scientifiche nel SAL.

10 Eventi di disseminazione

Lista degli eventi di disseminazione eventualmente scaturiti dall'attività svolta

L'attività svolta non è stata oggetto di eventi di disseminazione nel SAL.

²⁷ AEMO 2021 | Preliminary Report – Total loss of SCADA systems on 24 January 2021. Available at: https://www.aemo.com.au/-/media/files/electricity/nem/market_notices_and_events/power_system_incident_reports/2021/preliminary-report-total-loss-of-nem-scada-data.pdf?la=en

APPENDICE 1

Tablelle analisi anomalie e guasti per componente/sistema

Di seguito si riportano le tabelle riassuntive dei risultati ottenuti in seguito all'analisi della letteratura di settore per acquisire dati utili alla caratterizzazione dei comportamenti anomali dei diversi apparati di rete così come previsto da capitolato.

Tabella 1: Analisi dei principali guasti associati ai sistemi di generazione fotovoltaica [Adattamento della tabella presente in Hong et al, 2022, https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.04.043]		
Tipologia di anomalia o guasto	Dati e informazioni forniti dalla fonte	Fonti
<p>Ombreggiamento parziale</p> <p>Causato dal passaggio di nuvole, dalla presenza di alberi, o altre strutture che bloccano l'irradianza solare provocando un possibile effetto di mismatching</p>	<p>DATI SIMULATIVI E SPERIMENTALI</p> <p>Risultati sperimentali ottenuti da test specifici</p>	<p>Nguyen, X.H. "Matlab/Simulink Based Modeling to Study Effect of Partial Shadow on Solar Photovoltaic Array", <i>Environ Syst Res</i> 4, 20 (2015). https://doi.org/10.1186/s40068-015-0042-1</p> <p>Y. Hu, W. Cao, J. Ma, S. J. Finney and D. Li, "Identifying PV Module Mismatch Faults by a Thermography-Based Temperature Distribution Analysis," in <i>IEEE Transactions on Device and Materials Reliability</i>, vol. 14, no. 4, pp. 951-960, Dec. 2014, doi: 10.1109/TDMR.2014.2348195.</p>
<p>Accumulo di polvere</p> <p>Accumulo di polvere dovuto all'ambiente circostante che può provocare un possibile effetto di mismatching.</p>	<p>METODOLOGIA / DATI</p> <p>Descrizione del fault e implementazione di un metodo per identificarlo.</p> <p>In [Mustafa et al, 2020] è descritto anche l'impatto sulle prestazioni</p>	<p>Li, Xiaoxia & Yang, Qiang & Lou, Zhuo & Yan, Wenjun. (2018). Deep Learning Based Module Defect Analysis for Large-Scale Photovoltaic Farms. <i>IEEE Transactions on Energy Conversion</i>. PP. 1-1. DOI: 10.1109/TEC.2018.2873358.</p> <p>Mustafa, Ramadan J., Mohamed R. Goma, Mujahed Al-Dhaifallah, and Hegazy Rezk. 2020. "Environmental Impacts on the Performance of Solar Photovoltaic Systems" <i>Sustainability</i> 12, no. 2: 608. https://doi.org/10.3390/su12020608</p>
<p>Caduta di foglie, deiezioni di uccelli</p> <p>Possibile effetto di mismatching</p>	<p>INFORMAZIONI GENERALI</p> <p>Impatto sulle prestazioni del sistema PV per ciascuna tipologia di evento)</p>	<p>Mustafa, Ramadan J., Mohamed R. Goma, Mujahed Al-Dhaifallah, and Hegazy Rezk. 2020. "Environmental Impacts on the Performance of Solar Photovoltaic Systems" <i>Sustainability</i> 12, no. 2: 608. https://doi.org/10.3390/su12020608</p>
<p>Hot spot</p> <p>Degradazione delle proprietà meccaniche e ottiche dei materiali di incapsulamento che possono provocare un possibile effetto di mismatching.</p>	<p>METODOLOGIA</p> <p>Descrizione del fault e implementazione di un metodo per identificarlo</p>	<p>Mingyao Ma, Heng Liu, Zhixiang Zhang, Ping Yun, Fang Liu, Rapid diagnosis of hot spot failure of crystalline silicon PV module based on I-V curve, <i>Microelectronics Reliability</i>, 2019 - https://doi.org/10.1016/j.microrel.2019.113402.</p>
<p>Degradazione dei moduli</p> <p>Declino costante della potenza prodotta dai moduli anche con possibile effetto di mismatching.</p>	<p>INFORMAZIONI GENERALI</p> <p>Tipi di degrado a cui sono soggetti i moduli fotovoltaici</p> <p>Tipi di stress accelerato utilizzati per valutarne l'affidabilità e la durabilità</p>	<p>Kim, J., Rabelo, M., Padi, S.P., Yousuf, H., Cho, E.-C., Yi, J., 2021. A review of the degradation of photovoltaic modules for life expectancy. <i>Energies</i> 14 (14), 4278.</p>

	prima del loro impiego in contesti reali.	
<p>Rottura del vetro</p> <p>Principalmente si ha durante l'installazione, dovuta ad una geometria non adatta dei morsetti (spigoli vivi), lunghezza o posizione dei morsetti. Può provocare un possibile effetto di mismatching</p>	<p>INFORMAZIONI GENERALI</p> <p>Descrizione del fault e delle sue cause</p>	<p>Köntges M., Kurtz S., Packard C., Jahn U., Berger K. A., Kato K., Friesen T., Liu H., Van Iseghem M., et al., Review of Failures of Photovoltaic Modules, Report IEA-PVPS T13-01:2014, 2014 https://iea-pvps.org/key-topics/review-of-failures-of-photovoltaic-modules-final/</p>
<p>Problemi connessi alla saldatura</p> <p>Causato dalla lisciviazione dell'argento o del rame, o dall'affaticamento del giunto di saldatura anche per imperfezioni durante il processo di saldatura. Problemi di saldatura possono provocare un possibile effetto di mismatching</p>	<p>INFORMAZIONI GENERALI</p> <p>Descrizione del fault e delle sue cause</p>	<p>Itoh, U., Yoshida, M., Tokuhisa, H., Takeuchi, K., Takemura, Y., 2014b. Solder joint failure modes in the conventional crystalline silicon module. Energy Procedia 55, 464–468</p>
<p>Rotture delle busbar di interconnessione</p> <p>Superficie della sezione trasversale ridotta attraverso la quale può passare corrente nel modulo. Causato da un errato processo di imballaggio, installazione, grandine e/o lancio di pietre. Può provocare un possibile effetto di mismatching</p>	<p>DATI SPERIMENTALI</p> <p>Risultati sperimentali ottenuti inducendo una rottura delle interconnessioni</p>	<p>Colvin, D.J., Schneller, E.J., Davis, K.O., 2021. Impact of interconnection failure on photovoltaic module performance. Prog. Photovolt., Res. Appl. 29 (5), 524–532.</p>
<p>Decolorazione</p> <p>Tipo di degradamento che porta alla modifica del colore dell'etilene vinil acetato (EVA) tra il vetro e le celle di solito verso il giallo o il marrone. Ha un impatto sulla potenza generata all'interno delle celle interessate dovute alla ridotta penetrazione della luce. Può provocare un possibile effetto di mismatching</p>	<p>DATI SPERIMENTALI</p> <p>Impatto sulle performance della decolorazione a spot osservata su moduli PV esposti ad un clima semi-arido per circa due anni.</p>	<p>Bouaichi, A., Merrouni, A.A., El Hassani, A., Naimi, Z., Ikken, B., Ghennioui, A., Benazzouz, A., El Amrani, A., Messaoudi, C., 2017. Experimental evaluation of the discoloration effect on PV-modules performance drop. Energy Procedia 119, 818–827.</p>
<p>Delaminazione</p> <p>Fenomeno causato dalla perdita dell'interfaccia vetro-EVA, cella-EVA, EVA-cella ed EVA-backsheet del modulo che porta alla formazione di gap. Esso può provocare un possibile effetto di mismatching</p>	<p>INFORMAZIONI GENERALI</p> <p>Descrizione del fault e delle sue cause</p>	<p>Hasan, A.A., Ahmed Alkahtani, A., Shahahmadi, S.A., Nur E. Alam, M., Islam, M.A., Amin, N., 2021. Delamination-and electromigration-related failures in solar panels—A review. Sustainability 13 (12), 6882.</p>
<p>Problemi al telaio (rottura, piegamento, disallineamento, graffiatura)</p>	<p>INFORMAZIONI GENERALI</p> <p>Descrizione del fault e delle sue cause</p>	<p>Köntges M., Kurtz S., Packard C., Jahn U., Berger K. A., Kato K., Friesen T., Liu H., Van Iseghem M., et al., Review of Failures of Photovoltaic Modules, Report IEA-PVPS T13-01:2014, 2014</p>

<p>Problemi causati dal peso eccessivo della neve sul pannello. Essi possono provocare un possibile effetto di mismatching</p>		<p>https://iea-pvps.org/key-topics/review-of-failures-of-photovoltaic-modules-final/</p>
<p>Microfrattura dei moduli</p> <p>Microfratture dovute a diverse cause, quali trasporto, installazione non corretta, vibrazioni, carichi eccessivi, stress ambientale, pulizia impropria, ecc. Esse possono provocare un possibile effetto di mismatching</p>	<p>INFORMAZIONI GENERALI</p> <p>Descrizione del fault e delle sue cause</p>	<p>Bdour, M., Dalala, Z., Al-Addous, M., Radaideh, A., Al-Sadi, A., 2020. A comprehensive evaluation on types of microcracks and possible effects on power degradation in photovoltaic solar panels. Sustainability 12 (16), 6416.</p>
<p>Rottura della cella</p> <p>Rotture della cella possono essere causate da diversi fenomeni o problemi che si manifestano in fase preinstallazione (produzione-trasporto-installazione) o nel periodo post-installazione (es. vibrazioni nell'ambiente di installazione, stress ambientali, pulizia e manutenzione non appropriate, ecc.). Rotture parziali delle celle possono provocare un possibile effetto di mismatching</p>	<p>INFORMAZIONI GENERALI</p> <p>Descrizione del fault e delle sue cause [Köntges et al. (2014)]</p> <p>Studio del comportamento alla frattura dei wafer di silicio multicristallino [Popovich, (2011)]</p>	<p>Köntges M., Kurtz S., Packard C., Jahn U., Berger K. A., Kato K., Friesen T., Liu H., Van Iseghem M., et al., Review of Failures of Photovoltaic Modules, Report IEA-PVPS T13-01:2014, 2014 https://iea-pvps.org/key-topics/review-of-failures-of-photovoltaic-modules-final/</p> <p>Popovich, V., 2011. Breakage issues in silicon solar wafers and cells. Photovoltaics International 12 (May), 49–57.</p>
<p>Surriscaldamento dei moduli conseguente ad Hot Spot</p> <p>Un hot spot si verifica quando la temperatura di un sistema fotovoltaico aumenta molto e potenzialmente può provocare un incendio su vasta scala se non viene rilevato tempestivamente. Nella maggior parte dei casi, un hot spot influisce sulle prestazioni e sulla vita del modulo. Un hot spot fault è di tipo mismatch ed è causato da una distribuzione squilibrata di potenza nelle celle fotovoltaiche di un modulo. Le celle interessate da un hot spot vengono polarizzate inversamente e agiscono quindi come un carico, consumando la potenza generata dalle altre stringhe/array, aumentando la temperatura delle celle interessate. Surriscaldamenti locali possono provocare un possibile effetto di mismatching</p>	<p>DATI SPERIMENTALI</p> <p>Principali pattern visibili tramite immagini ad infrarosso e loro associazione ai possibili guasti del sistema fotovoltaico</p>	<p>Köntges M., Kurtz S., Packard C., Jahn U., Berger K. A., Kato K., Friesen T., Liu H., Van Iseghem M., et al., Review of Failures of Photovoltaic Modules, Report IEA-PVPS T13-01:2014, 2014 https://iea-pvps.org/key-topics/review-of-failures-of-photovoltaic-modules-final/</p>
<p>Corto circuito</p>	<p>METODOLOGIA</p>	<p>Jiang, L.L., Maskell, D.L., 2015. Automatic fault detection and diagnosis for photovoltaic systems</p>

<p>Causato da una cattiva connessione delle celle o da difetti connessi alla produzione della cella.</p>	<p>Descrizione del fault e implementazione di una metodologia per identificarlo</p>	<p>using combined artificial neural network and analytical based methods. In: 2015 International Joint Conference on Neural Networks. IJCNN.</p>
<p>Guasto da circuito aperto senza/con diodo di bypass</p> <p>Causato da una cattiva connessione tra le celle PV, hot spot, rottura di celle, cablaggio obsoleto, connettori non correttamente fissati nella box di giunzione, ecc.</p>	<p>METODOLOGIA</p> <p>Descrizione del fault e implementazione di una metodologia per identificarlo</p>	<p>Jiang, L.L., Maskell, D.L., 2015. Automatic fault detection and diagnosis for photovoltaic systems using combined artificial neural network and analytical based methods. In: 2015 International Joint Conference on Neural Networks. IJCNN.</p> <p>Chine, W., Mellit, A., Pavan, A.M., Lughì, V., 2015. Fault diagnosis in photovoltaic arrays. In: 2015 International Conference on Clean Electrical Power. ICCEP, pp. 67–72. http://dx.doi.org/10.1109/ICCEP.2015.7177602.</p>
<p>Guasto al diodo di bypass</p> <p>Il diodo di bypass ha un ruolo importante nel compensare le perdite di potenza e ridurre l'effetto dell'ombreggiamento in un modulo, e funge anche da dispositivo di protezione per prevenire la distruzione del modulo in caso di un hot spot fault o altri guasti che invertono la polarizzazione del modulo. Un guasto al diodo di bypass si può verificare quando il diodo è in cortocircuito o aperto.</p>	<p>METODOLOGIA</p> <p>Descrizione del fault e implementazione di una metodologia per identificarlo</p>	<p>Jiang, L.L., Maskell, D.L., 2015. Automatic fault detection and diagnosis for photovoltaic systems using combined artificial neural network and analytical based methods. In: 2015 International Joint Conference on Neural Networks. IJCNN.</p> <p>Chine, W., Mellit, A., Pavan, A.M., Lughì, V., 2015. Fault diagnosis in photovoltaic arrays. In: 2015 International Conference on Clean Electrical Power. ICCEP, pp. 67–72. http://dx.doi.org/10.1109/ICCEP.2015.7177602.</p>
<p>Guasto negli array PV</p> <p>Connessione non intenzionale a livello di singola stringa o in stringhe adiacenti.</p>	<p>INFORMAZIONI GENERALI</p> <p>Descrizione del fault e delle sue cause</p>	<p>Alam, M.K., Khan, F., Johnson, J., Flicker, J., 2015. A comprehensive review of catastrophic faults in PV arrays: Types, detection, and mitigation techniques. IEEE J. Photovolt. 5 (3), 982–997.</p> <p>Zhao, Y., (2010). (thesis). Fault Analysis in Solar Photovoltaic Arrays. The Department of Electrical and Computer Engineering.</p>
<p>Guasto a terra</p> <p>Può verificarsi quando i conduttori che non trasportano corrente (come le strutture di montaggio dei moduli fotovoltaici, i telai, ecc.) sono esposti a un conduttore che trasporta corrente (current-carrying conductor - CCC). L'esposizione di conduttori che non trasportano corrente a un CCC è causata dal deterioramento dell'isolamento, dalla corrosione, dal taglio di un filo o da un collegamento scadente. I conduttori che non trasportano corrente in un sistema fotovoltaico dovrebbero essere</p>	<p>INFORMAZIONI GENERALI</p> <p>Descrizione del fault e delle sue cause</p>	<p>Alam, M.K., Khan, F., Johnson, J., Flicker, J., 2015. A comprehensive review of catastrophic faults in PV arrays: Types, detection, and mitigation techniques. IEEE J. Photovolt. 5 (3), 982–997.</p> <p>Zhao, Y., (2010). (thesis). Fault Analysis in Solar Photovoltaic Arrays. The Department of Electrical and Computer Engineering.</p>

collegati a un conduttore/attrezzatura di messa a terra, per evitare la possibile elettrocuzione di persone o animali. Tuttavia, un ground fault può verificarsi anche se un conduttore di messa a terra si collega accidentalmente a un CC		
Guasto "Line-to-Line" I guasti line-to-line fault sono causati da cortocircuiti non voluti tra due potenziali in un array fotovoltaico, tra due stringhe adiacenti o all'interno della stessa stringa. Essi possono essere provocati da una connessione non intenzionale tra conduttori che trasportano corrente (CCC) e i conduttori di terra/neutro.	INFORMAZIONI GENERALI Descrizione del fault e delle sue cause	Alam, M.K., Khan, F., Johnson, J., Flicker, J., 2015. A comprehensive review of catastrophic faults in PV arrays: Types, detection, and mitigation techniques. IEEE J. Photovolt. 5 (3), 982–997. Zhao, Y., (2010). (thesis). Fault Analysis in Solar Photovoltaic Arrays. The Department of Electrical and Computer Engineering.
Guasto alla "box di giunzione" Una "box di giunzione" protegge il cablaggio tra le stringhe di pannelli fotovoltaici e un terminale esterno. I guasti/malfunzionamenti alla box sono causati da errori umani, inclusi il fissaggio insufficiente della giunzione al pannello posteriore, un cablaggio scadente, un montaggio inadeguato, penetrazione dell'umidità nei connettori.	INFORMAZIONI GENERALI Descrizione del fault e delle sue cause	Kalejic J., Junction box wiring and connector durability issues in photovoltaic modules, 2014 - https://doi.org/10.1117/12.2063488
Guasti da arco elettrico Causato dalla presenza di un gap tra CCC come risultato della corrosione dei connettori, danneggiamento della cella, disconnessione della saldatura, ecc. o dalla rottura dell'isolamento	INFORMAZIONI GENERALI Descrizione del fault e delle sue cause	Alam, M.K., Khan, F., Johnson, J., Flicker, J., 2015. A comprehensive review of catastrophic faults in PV arrays: Types, detection, and mitigation techniques. IEEE J. Photovolt. 5 (3), 982–997.
Guasto di tipo "Bridging" Bassa resistenza nelle connessioni tra i cablaggi dei moduli PV.	DATI SIMULATIVI Dati da simulazione dell'occorrenza di questo tipo di guasto.	Kumar S., Selvakumar I., Detection of the faults in the photovoltaic array under normal and partial shading conditions, 2017 – DOI: 10.1109/IPACT.2017.8244890
Guasti al sistema di controllo MPPT Causato dal malfunzionamento nel controllore di carica del MPPT o dal sensore del MPPT.	DATI SIMULATIVI Dati da simulazione dell'occorrenza di questo tipo di guasto.	Mohamed M. Badr; Mostafa S. Hamad; Ayman S. Abdel-Khalik; Ragi A. Hamdy, Fault Detection and Diagnosis for Photovoltaic Array Under Grid Connected Using Support Vector Machine, 2019 – DOI: 10.1109/CPERE45374.2019.8980103
Guasto all'inverter	DATI SIMULATIVI	Chan, F., Calleja, H., 2006. Reliability: a new approach in design of inverters for PV systems. In:

Causato da malfunzionamento/guasto di un qualunque componente dell'inverter come IGBT o capacitori	Indagine sull'affidabilità dei diversi tipi di inverter	Proceedings of the 10th IEEE International Power Electronics Congress. CIEP '06, pp. 97–102
Guasto alle linee Causato da interruzioni di linea, guasti alle apparecchiature, servizi di manutenzione, configurazione della rete, incidente, errore umano, ecc.	INFORMAZIONI GENERALI Descrizione del fault e delle sue cause	National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2017. Enhancing the Resilience of the Nation's Electricity System. Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/24836 .
Guasto da fulmini Causato da fulmini	MODELLO Modellazione del comportamento di un sistema PV in presenza di fulmini	Ibrahim Hetita, Amr S. Zalhaf,, Diaa-Eldin A. Mansour, Yang Han , Ping Yang, Congling Wang, Modeling and protection of photovoltaic systems during lightning strikes: A review. 2022 - https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.11.083
Guasti alla cella fotovoltaica	DATI SPERIMENTALI Principali pattern visibili tramite immagini ad elettroluminescenza e loro associazione ai possibili guasti del sistema fotovoltaico	Köntges M., Kurtz S., Packard C., Jahn U., Berger K. A., Kato K., Friesen T., Liu H., Van Iseghem M., et al., Review of Failures of Photovoltaic Modules, Report IEA-PVPS T13-01:2014, 2014 https://iea-pvps.org/key-topics/review-of-failures-of-photovoltaic-modules-final/

Tabella 2: Analisi di anomalie e guasti associati ai generatori eolici

Tipologia di guasto	Dati e informazioni forniti dalla fonte	Fonti
Guasto ai componenti del generatore eolico	INFORMAZIONI GENERALI Descrizione del fault e indicazione dei valori mediani di failure rate e downtime.	Cuong Dao, Behzad Kazemtabrizi, Christopher Crabtree, Wind turbine reliability data review and impacts on levelised cost of energy, Wind Energy, Volume22, Issue12, December 2019, Pages 1848-1871 - https://doi.org/10.1002/we.2404
	INFORMAZIONI GENERALI Descrizione di sistemi di diagnostica e tecniche di controllo	S. S and S. A. J. Mary, "Fault Diagnosis and Control Techniques for Wind Energy Conversion System: A Systematic Review," 2022 Third International Conference on Intelligent Computing Instrumentation and Control Technologies (ICICT), Kannur, India, 2022, pp. 700-704, doi: 10.1109/ICICT54557.2022.9917722. H. Gu, W. Y. Liu, Q. W. Gao, and Y. Zhang, "A review on wind turbines gearbox fault diagnosis methods," Journal of Vibroengineering, Vol. 23, No. 1, pp. 26–43, Jan. 2021, https://doi.org/10.21595/jve.2020.20178

Tabella3: Analisi di anomalie e guasti per gli Elettrolizzatori

Tipologia di guasto	Dati e informazioni forniti dalla fonte	Fonti
---------------------	---	-------

Rottura della membrana Perforazione della membrana a causa di imperfezioni in fase di produzione	DATI SPERIMENTALI Risultati sperimentali sulla rottura della membrana in diverse condizioni di densità di corrente.	P. Millet, A. Ranjbari, F. De Guglielmo, S. A. Grigoriev, and F. Auprêtre, "Cell failure mechanisms in PEM water electrolyzers," <i>Int J Hydrogen Energy</i> , vol. 37, no. 22, pp. 17478–17487, 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.06.017.
Rottura della membrana Degradazione della membrana dovuta ad assottigliamento per dissoluzione del catalizzatore	DATI SPERIMENTALI Risultati sperimentali sulla rottura della membrana in diverse condizioni, a carico costante e con cicli di carico.	N. Li, S. S. Araya, and S. K. Kær, "Investigating low and high load cycling tests as accelerated stress tests for proton exchange membrane water electrolysis," <i>Electrochim Acta</i> , vol. 370, p. 137748, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.electacta.2021.137748.
Cross-over dell'idrogeno Imperfezioni di fabbricazione della membrana	METODOLOGIA Descrizione di una metodologia di stress test accelerati per studiare il fenomeno di cross-over dell'idrogeno.	E. Kuhnert, M. Heidinger, D. Sandu, V. Hacker, and M. Bodner, "Analysis of PEM Water Electrolyzer Failure Due to Induced Hydrogen Crossover in Catalyst-Coated PFSA Membranes," <i>Membranes (Basel)</i> , vol. 13, no. 3, pp. 1–17, 2023, doi: 10.3390/membranes13030348.
Disattivazione del catalizzatore Sintering del catalizzatore	DATI SPERIMENTALI Risultati sperimentali riduzione di efficienza per sintering del catalizzatore in una prova di durata Test condotti a due valori di densità di corrente.	S. Siracusano, V. Baglio, N. Van Dijk, L. Merlo, and A. S. Aricò, "Enhanced performance and durability of low catalyst loading PEM water electrolyser based on a short-side chain perfluorosulfonic ionomer," <i>Appl Energy</i> , vol. 192, pp. 477–489, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.09.011.
Dispersione del catalizzatore Dissoluzione del catalizzatore nella membrana polimerica	DATI SPERIMENTALI Risultati sperimentali sulla dissoluzione del catalizzatore in diverse a carico costante e con cicli di carico.	N. Li, S. S. Araya, and S. K. Kær, "Investigating low and high load cycling tests as accelerated stress tests for proton exchange membrane water electrolysis," <i>Electrochim Acta</i> , vol. 370, p. 137748, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.electacta.2021.137748. S. A. Grigoriev, K. A. Dzhus, D. G. Bessarabov, and P. Millet, "Failure of PEM water electrolysis cells: Case study involving anode dissolution and membrane thinning," <i>Int J Hydrogen Energy</i> , vol. 39, no. 35, pp. 20440–20446, 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.043.

Tabella 4: Analisi di anomalie e guasti per le Fuel Cell

Tipologia di guasto	Dati e informazioni forniti dalla fonte	Fonti
Rottura della membrana Crepa della membrana causata da stress tensili	INFORMAZIONI GENERALI Caratterizzazione della rottura di membrane per perforazione e formazioni di crepe. METODOLOGIA E DATI Descrizione di stress test ciclici di idratazione-disidratazione, e relativi dati sperimentali su	Y. Singh, F. P. Orfino, M. Dutta, and E. Kjeang, "3D Failure Analysis of Pure Mechanical and Pure Chemical Degradation in Fuel Cell Membranes," <i>J Electrochem Soc</i> , vol. 164, no. 13, pp. F1331–F1341, 2017, doi: 10.1149/2.0451713jes. A. Sadeghi Alavijeh et al., "Effect of hygral swelling and shrinkage on mechanical durability of fuel cell membranes," <i>J Power Sources</i> , vol. 427, pp. 207–214, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.04.081.

	deformazione e cracking della membrana.	
Rottura della membrana Foratura della membrana	MODELLO Modello FEM (elementi finiti) della perforazione di una membrana dovuta alla pressione di idrogeno.	Y. Hu, X. Xu, and W. Wang, "A new cavity profile for a diaphragm compressor used in hydrogen fueling stations," <i>Int J Hydrogen Energy</i> , vol. 42, no. 38, pp. 24458–24469, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.08.058.
Degradazione della membrana Assottigliamento della membrana a causa del rilascio di fluoridi	DATI SPERIMENTALI Risultati sperimentali sulla degradazione chimica della membrana. Caratterizzazione della membrana dopo il fenomeno di degradazione.	J. Healy et al., "Aspects of the chemical degradation of PFSA ionomers used in PEM fuel cells," <i>Fuel Cells</i> , vol. 5, no. 2, pp. 302–308, Apr. 2005. doi: 10.1002/fuce.200400050. S. Shi et al., "Fatigue crack propagation behavior of fuel cell membranes after chemical degradation," <i>Int J Hydrogen Energy</i> , vol. 45, no. 51, pp. 27653–27664, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.07.113.
Cross-over dell'idrogeno Stress della membrana	METODOLOGIA Descrizione di una metodologia di stress test accelerati, sia per test di durata che basati sull'umidificazione ciclica dell'idrogeno, per caratterizzare il fenomeno di rottura della membrana con conseguente fenomeno di cross-over.	K. Panha, M. Fowler, X. Z. Yuan, and H. Wang, "Accelerated durability testing via reactants relative humidity cycling on PEM fuel cells," <i>Appl Energy</i> , vol. 93, pp. 90–97, 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.05.011.
Deterioramento del catalizzatore Agglomerazione delle particelle di platino (Sintering)	DATI SPERIMENTALI Risultati sperimentali sul fenomeno di sintering del catalizzatore in una prova di durata e dopo cicli di potenziale variabile. Caratterizzazione del catalizzatore dopo le prove.	P. J. Ferreira et al., "Instability of Pt/C Electrocatalysts in Proton Exchange Membrane Fuel Cells," <i>J Electrochem Soc</i> , vol. 152, no. 11, p. A2256, 2005, doi: 10.1149/1.2050347.
Deterioramento del catalizzatore Contaminazione con monossido di carbonio	DATI SPERIMENTALI Risultati sperimentali sul fenomeno di disattivazione del catalizzatore per avvelenamento da CO. Dati raccolti su diversi layer catalitici e a diverse temperature di cella.	A. Hassan, V. A. Paganin, and E. A. Ticianelli, "Investigation of carbon supported PtW catalysts as CO tolerant anodes at high temperature in proton exchange membrane fuel cell," <i>J Power Sources</i> , vol. 325, pp. 375–382, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.06.043
Deterioramento del catalizzatore Ossidazione del supporto di carbonio	DATI SPERIMENTALI Caratterizzazione del fenomeno di ossidazione del supporto carbonioso. Viene evidenziato l'effetto del tempo di ossidazione e del potenziale.	K. H. Kangasniemi, D. A. Condit, and T. D. Jarvi, "Characterization of Vulcan Electrochemically Oxidized under Simulated PEM Fuel Cell Conditions," <i>J Electrochem Soc</i> , vol. 151, no. 4, p. E125, 2004, doi: 10.1149/1.1649756.
Allagamento del catodo	METODOLOGIA	W. He, G. Lin, and T. Van Nguyen, "Diagnostic Tool to Detect Electrode Flooding in Proton-Exchange

Retrodiffusione dell'acqua verso il catodo	Descrizione di una metodologia per rilevare il fenomeno di livello di saturazione della cella sulla base della permeabilità relativa.	Membrane Fuel Cells," AIChE Journal, vol. 49, no. 12, pp. 3221–3228, Dec. 2003, doi: 10.1002/aic.690491221.
--	---	---

Tabella 5: Analisi di anomalie e guasti per le Batterie

Tipologia di guasto	Dati e informazioni forniti dalla fonte	Fonte
Corto circuito esterno provocato da cause incidentali	DATI SPERIMENTALI Test sperimentali e relativi risultati con riferimento a: <ul style="list-style-type: none"> • prove di sovraccarica dovuta ad un guasto del sistema di carica • cortocircuito esterno ed interno su sistemi di accumulo litio-ione. 	Report di Ricerca di Sistema (affidatario ENEA): C. Di Bari, E. Rossi, S. Constà, F.Sacco "Definizione di procedure di prova di overvoltage e cortocircuito su sistemi di accumulo litio-ione" RdS_PAR2016_170
Corto circuito interno provocato da impurezze, dentriti, guasto del separatore, impatto esterno, BMS guasto		
Sovra-tensione provocato da superamento della tensione massima in fase di ricarica		
Sotto-tensione provocato da superamento al ribasso della tensione minima		
Sovra-carica provocato da superamento della corrente massima		
Auto-riscaldamento provocato da deposito di Litio metallico dovuto alla sovra-carica		
Anomalie e guasti delle batterie agli ioni di litio	INFORMAZIONI GENERALI CLASSIFICAZIONE DI TECNICHE SPERIMENTALI Sintesi delle tecniche sperimentali per lo studio dei guasti delle batterie agli ioni di litio (voltammetria ciclica, spettroscopia a dispersione di energia, spettroscopia di impedenza elettrochimica, microscopia e microlavorazione a fascio ionico focalizzato, microscopia elettrochimica a scansione, imaging termico, microscopia	Lin Liu, "Data-Driven Prognosis of Multiscale and Multiphysics Complex System Anomalies: Its Application to Lithium-ion Batteries Failure Detection", 2023, Journal of The Electrochemical Society, 170 050525, DOI 10.1149/1945-7111/acd300

	<p>elettronica a trasmissione, tempo di -Spettrometria di massa di ioni secondari in volo, microscopia termoionica a scansione, spettroscopia ad assorbimento di micro raggi X vicino al bordo, microscopia ottica a scansione in campo vicino)</p>	
	<p>INFORMAZIONI GENERALI</p> <p>CLASSIFICAZIONE DI MODELLI</p> <p>Approcci basati su modello: modelli multiscala, approssimazione del mezzo effettivo autoconsistente, Teoria dell'omogeneizzazione, metodo multiscala eterogeneo (HMM), Metodo variazionale multiscala (VMM)</p> <p>Approcci basati su modelli data-driven: può convertire dati di grandi dimensioni in dati di piccole dimensioni; applicabile a sistemi senza una conoscenza preliminare dei parametri; può essere utilizzato per il rilevamento di anomalie, la diagnosi dei guasti e la previsione SOH; può utilizzare metodi statistici o ML.</p>	

Tabella 6: Analisi dei principali guasti associati ai sistemi di conversione DC/DC e DC/AC

Tipologia di guasto	Dati e informazioni forniti dalla fonte	Fonti
<p>Guasto alla componentistica dello stadio di potenza dei convertitori</p> <p>I componenti switching (MOSFET; IGBT), capacitivi ed induttivi dei convertitori DC/DC e DC/AC</p>	<p>DATI SIMULATIVI</p> <p>Analisi dell'impatto dei diversi fattori di stress e dei fenomeni d'invecchiamento sui</p>	<p>G. Graditi and G. Adinolfi, "Temperature influence on photovoltaic power optimizer components reliability," International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Sorrento, Italy, 2012, pp.</p>

<p>possono rompersi per fattori termici, elettrici, ambientali e per invecchiamento.</p>	<p>componenti di convertitori DC/DC e DC/AC per applicazioni fotovoltaiche.</p>	<p>1113-1118, doi: 10.1109/SPEEDAM.2012.6264560.</p> <p>Y. Hu, P. Shi, H. Li and C. Yang, "Health Condition Assessment of Base-Plate Solder for Multi-Chip IGBT Module in Wind Power Converter," in IEEE Access, vol. 7, pp. 72134-72142, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2918029.</p> <p>M. Khalil, P. Soulatiantork, "Reliability assessment of PV inverters", 14th IMEKO TC10 Workshop Technical Diagnostics New Perspectives in Measurements, Tools and Techniques for system's reliability, maintainability and safety Milan, Italy, June 27-28, 2016.</p>
<p>Guasti dovuti a problematiche dei circuiti stampati e piste di collegamento tra i diversi componenti elettronici</p> <p>I circuiti stampati possono presentare delaminazioni, crepe e anche deterioramento delle saldature e delle piste di collegamento tra i diversi componenti elettronici. Tali problematiche possono determinare il malfunzionamento o il mancato funzionamento dei convertitori.</p>	<p>METODOLOGIA</p> <p>Metodo di valutazione dei fenomeni di aging sulle piste di collegamento degli IGBT.</p> <p>DATI SPERIMENTALI</p> <p>Forme d'onda sperimentali ottenute dai test accelerati d'invecchiamento condotti sulle piste di collegamento di un IGBT.</p>	<p>Z. Hu, X. Ge, D. Xie et alii, "An Aging-Degree Evaluation Method for IGBT Bond Wire with Online Multivariate Monitoring," Energies, vol. 12, no. 20, p. 3962, Oct. 2019, doi: 10.3390/en12203962.</p>
<p>Corto circuito ai terminali del convertitore</p> <p>Il verificarsi di un corto circuito ai terminali di un convertitore può essere causato da un guasto tra le polarità del sistema a monte o da un guasto a terra.</p>	<p>DATI SPERIMENTALI (FORME D'ONDA)</p> <p>Descrizione e rappresentazione delle condizioni operative di un convertitore DC/AC in presenza di un corto circuito ai suoi terminali.</p>	<p>ABB Technical Application Papers, "Faults in LVDC microgrids with front-end converters", 2015.</p>
<p>Guasto a terra ai terminali del convertitore</p> <p>Un guasto a terra ai conduttori d'ingresso o uscita di un convertitore può essere causato dalla perdita di isolamento dei cavi, da un'azione di natura meccanica (tranciare l'isolante di un cavo), da agenti ambientali (umidità, sostanze corrosive) o da sovratensioni.</p>	<p>DATI SPERIMENTALI (FORME D'ONDA)</p> <p>Descrizione e rappresentazione degli andamenti delle grandezze elettriche del convertitore DC/AC (e dell'impianti di cui esso fa parte) nella condizione di guasto a terra dei terminali d'ingresso o d'uscita.</p>	<p>ABB Technical Application Papers, "Faults in LVDC microgrids with front-end converters", 2015.</p>

Tabella 7: analisi di anomalie e guasti per apparati di monitoraggio

Tipologia di guasto	Dati e informazioni forniti dalla fonte	Fonti
Guasto meccanico del sensore dell'apparato di monitoraggio Degrado dei materiali costituenti l'apparato	METODOLOGIA Metodo per lo studio delle performance di un sensore sottoposto a degrado	Jiang, L., Djurdjanovic, D., Ni, J., Lee, J. (2006). Sensor Degradation Detection in Linear Systems. In: Mathew, J., Kennedy, J., Ma, L., Tan, A., Anderson, D. (eds) Engineering Asset Management. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-84628-814-2_138
Guasto meccanico del sensore dell'apparato di monitoraggio Vibrazioni e shock esterni a cui può essere sottoposto l'apparato	INFORMAZIONI GENERALI Descrizione degli effetti dovuti alle vibrazioni su un sensore	F. Hau, F. Baumgärtner and M. Vossiek, "Influence of vibrations on the signals of automotive integrated radar sensors," 2017 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM), Nagoya, Japan, 2017, pp. 159-162, doi: 10.1109/ICMIM.2017.7918881.
Guasto elettrico del sensore dell'apparato di monitoraggio Perdita di isolamento	METODOLOGIA Metodologia per la stima della perdita di isolamento di un sensore	Yunbing Huang, Janos Gertler, Thomas J. McAvoy, "Sensor and actuator fault isolation by structured partial PCA with nonlinear extensions", Journal of Process Control, Volume 10, Issue 5, 2000, Pages 459-469, ISSN 0959-1524, https://doi.org/10.1016/S0959-1524(00)00021-4 . Xiaodong Zhang, T. Parisini and M. M. Polycarpou, "Sensor bias fault isolation in a class of nonlinear systems," in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 50, no. 3, pp. 370-376, March 2005, doi: 10.1109/TAC.2005.843875.
Rumore nel sensore	INFORMAZIONI GENERALI Review delle principali cause di rumore in un sensore	Z. Q. Lei, G. J. Li, W. F. Egelhoff, P. T. Lai and P. W. T. Pong, "Review of Noise Sources in Magnetic Tunnel Junction Sensors," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 47, no. 3, pp. 602-612, March 2011, doi: 10.1109/TMAG.2010.2100814. Reza Sharifi, Reza Langari, "Isolability of faults in sensor fault diagnosis, Mechanical Systems and Signal Processing", Volume 25, Issue 7, 2011, Pages 2733-2744, ISSN 0888-3270, https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2011.02.015 .
Variazione del guadagno nel sensore	METODOLOGIA Metodo per lo studio dell'errore di gain di un sensore	F. Grouz, L. Sbita and M. Boussak, "Current sensors gain faults detection and isolation based on an adaptive observer for PMSM drives," 10th International Multi-Conferences on Systems, Signals & Devices 2013 (SSD13), Hammamet, Tunisia, 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/SSD.2013.6564061. Youqing Wang, Donghua H. Zhou, "Sensor Gain Fault Diagnosis for a Class of Nonlinear Systems", European Journal of Control, Volume 12, Issue 5, 2006, Pages 523-535, ISSN 0947-3580, https://doi.org/10.3166/ejc.12.523-535 .
Perdita di calibrazione del sensore	METODOLOGIA Metodo per la diagnosi dell'errore dovuto ad una perdita di calibrazione di un sensore	Q. Yang and J. Wang, "Multi-Level Wavelet Shannon Entropy-Based Method for Single-Sensor Fault Location," Entropy, vol. 17, no. 12, pp. 7101-7117, Oct. 2015, doi: 10.3390/e17107101.

<p>Anomalie e guasti nei sensori e negli apparati di misura/monitoraggio</p>	<p>METODOLOGIA</p> <p>Metodi e modelli matematici per la rilevazione dei guasti</p>	<p>L. Liu et al., "Fault Test Analysis of Abnormal Remaining Amount of Smart Meter," 2023 Panda Forum on Power and Energy (PandaFPE), Chengdu, China, 2023, pp. 1366-1370, doi: 10.1109/PandaFPE57779.2023.10140559.</p> <p>K. Jankowska and M. Dybkowski, "Experimental Analysis of the Current Sensor Fault Detection Mechanism Based on Neural Networks in the PMSM Drive System," Electronics, vol. 12, no. 5, p. 1170, Feb. 2023, doi: 10.3390/electronics12051170.</p> <p>J. Lu, E. Zhu, H. Zhang, S. Hou, J. Dou and H. Du, "Smart Meter Fault Diagnosis Model Based on DBN-LSSVM Feature Fusion," 2023 5th Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), Chengdu, China, 2023, pp. 628-633, doi: 10.1109/AEEES56888.2023.10114110.</p> <p>L. Helong, Y. Haibo and Y. Jinshuai, "Intelligent Energy Meter Fault Prediction Based on Machine Learning," 2019 15th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS), Macao, China, 2019, pp. 296-300, doi: 10.1109/CIS.2019.00069.</p>
---	--	--

Tabella 8: analisi di anomalie e guasti per apparati di comunicazione

Tipologia di guasto	Dati e informazioni forniti dalla fonte	Fonti
<p>Alterazione nell'integrità dei dati</p> <p>Perdita totale o parziale oppure alterazione del pacchetto di dati trasmesso</p>	<p>METODOLOGIA</p> <p>Metodi per verificare l'integrità del dato trasmesso</p>	<p>F. Li and B. Luo, "Preserving data integrity for smart grid data aggregation," 2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Tainan, Taiwan, 2012, pp. 366-371, doi: 10.1109/SmartGridComm.2012.6486011.</p> <p>H. Kim, I. Hwang, J. Lee, H. Y. Yeom and H. Sung, "Concurrent and Robust End-to-End Data Integrity Verification Scheme for Flash-Based Storage Devices," in IEEE Access, vol. 10, pp. 36350-36361, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3163729.</p>
<p>Malfunzionamento del ricevitore</p> <p>Malfunzionamento del ricevitore, elevati tempi di ricezione</p>	<p>MODELLO</p> <p>Algoritmo per l'analisi del tempo di ricezione</p>	<p>F. Gardner, "A BPSK/QPSK Timing-Error Detector for Sampled Receivers," in IEEE Transactions on Communications, vol. 34, no. 5, pp. 423-429, May 1986, doi: 10.1109/TCOM.1986.1096561.</p> <p>W. Yuan, Q. Shi, N. Wu, Q. Guo and X. Huang, "Gaussian Message Passing Based Passive Localization in the Presence of Receiver Detection Failures," 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Porto, Portugal, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/VTCspring.2018.8417730</p>
<p>Guasti del supporto di comunicazione guasti dovuti a rottura, eccessiva curvatura,</p>	<p>METODOLOGIA</p>	<p>Xinyu Dou et al., "Demonstration of chaotic-laser based WDM-PON secure optical communication and real-time online fiber-fault detection and</p>

connettori o rottura delle giunzioni	Metodo per l'analisi e la localizzazione del guasto	location," 2015 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), Shanghai, 2015, pp. 1-3, doi: 10.1109/OECC.2015.7340182. Chun-Kit Chan, F. Tong, Lian-Kuan Chen, Keang-Po Ho and D. Lam, "Fiber-fault identification for branched access networks using a wavelength-sweeping monitoring source," in IEEE Photonics Technology Letters, vol. 11, no. 5, pp. 614-616, May 1999, doi: 10.1109/68.759416.
Errori nella comunicazione	<p>METODOLOGIA</p> <p>Metodi che utilizzano apparati diagnostici supplementari per la ricerca dell'errore nella comunicazione attraverso, rispettivamente, l'utilizzo di apparati hardware di diagnosi (riflettometro ottico, generatore di segnali diagnostici a diversa lunghezza d'onda, dispositivi di sniffing dei dati trasmessi)</p>	<p>M. El-Sayed, P. J. Ibrahim and F. Gunzer, "Investigation of the precision regarding fiber fault location with a commercial Optical Time Domain Reflectometer," 7th International Symposium on High-capacity Optical Networks and Enabling Technologies, Cairo, Egypt, 2010, pp. 237-241, doi: 10.1109/HONET.2010.5715781.</p> <p>Chun-Kit Chan, F. Tong, Lian-Kuan Chen, Keang-Po Ho and D. Lam, "Fiber-fault identification for branched access networks using a wavelength-sweeping monitoring source," in IEEE Photonics Technology Letters, vol. 11, no. 5, pp. 614-616, May 1999, doi: 10.1109/68.759416.</p> <p>S. Ansari, S. G. Rajeev and H. S. Chandrashekar, "Packet sniffing: a brief introduction," in IEEE Potentials, vol. 21, no. 5, pp. 17-19, Dec. 2002-Jan. 2003, doi: 10.1109/MP.2002.1166620.</p>
	<p>METODOLOGIA</p> <p>Metodi basati su software diagnostici per la ricerca dell'errore nella comunicazione mediante: algoritmi avanzati per il continuous big data integrity checking, utilizzo di support vector machine per l'individuazione del fault, intelligenza artificiale mediante tecnica machine learning</p>	<p>H. Yu, Q. Hu, Z. Yang and H. Liu, "Efficient Continuous Big Data Integrity Checking for Decentralized Storage," in IEEE Transactions on Network Science and Engineering, vol. 8, no. 2, pp. 1658-1673, 1 April-June 2021, doi: 10.1109/TNSE.2021.3068261.</p> <p>Z. Hui-Ping, H. Hong-Yan and G. Meng-Xia, "Research of Fiber-Optical Fault Diagnosis Based on Support Vector Machine (SVM) Mining," 2014 Fifth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications, Hunan, China, 2014, pp. 803-807, doi: 10.1109/ISDEA.2014.251.</p> <p>K. Abdelli, J. Y. Cho, F. Azendorf, H. Griesser, C. Tropschug and S. Pachnicke, "Machine-learning-based anomaly detection in optical fiber monitoring," in Journal of Optical Communications and Networking, vol. 14, no. 5, pp. 365-375, May 2022, doi: 10.1364/JOCN.451289</p>

APPENDICE 2

Dataset relativi ad anomalie e guasti per componente

Tabella 9: dataset contenenti i guasti associati ai sistemi fotovoltaici

Nome dataset	Dati e informazioni forniti dalla fonte	Fonti
Fault Detection Dataset in Photovoltaic Farms	DATASET SIMULATO Un impianto PV simulato da 250-kW è stato utilizzato per realizzare un dataset di guasti. Sono stati considerati tre tipi di guasto (string fault, string-to-ground fault, string-to-string fault) oltre al caso di funzionamento normale	https://www.kaggle.com/datasets/amrezzeldinrashed/fault-detection-dataset-in-photovoltaic-farms
PVEL-AD dataset	DATASET REALE Dataset contenente 36543 immagini ad elettroluminescenza con diversi difetti e sfondo. Il dataset contiene sia immagini di pannelli privi di problemi e pannelli contenenti anomalie suddivise in 10 categorie.	https://iee-dataport.org/documents/photovoltaic-cell-anomaly-detection-dataset [da Binyi et al., 2022, https://doi.org/10.1109/TII.2022.3162846]
GPVS-Faults	DATASET REALE Dati ottenuti da esperimenti di laboratorio che hanno inserito manualmente, a metà dell'esperimento, i seguenti faults: array fault, inverter fault, grid anomaly, feedback sensor fault, MPP controller fault	https://data.mendeley.com/datasets/n76t439f65 [da Bakdi et al., 2020, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106457]
PV System Thermography Dataset	DATASET REALE Il dataset è composto da 120 immagini termiche ottenute da un drone in volo su un impianto reale. Questo dataset è stato successivamente esteso da Marcos Gabriel che ha utilizzato degli strumenti per annotare le immagini ed ha etichettato i faults (https://www.kaggle.com/datasets/marcosgabriel/photovoltaic-system-thermography)	https://tandf.figshare.com/articles/dataset/Online_automatic_anomaly_detection_for_photovoltaic_systems_using_thermography_imaging_and_low_rank_matrix_decomposition/15123655/1 [Da Wang et al., 2021, https://doi.org/10.1080/00224065.2021.1948372]

Mismatching and partial shading dataset	DATASET SIMULATO E REALE Il dataset è composto da 10000 curve I-V simulate (5000 in condizioni operative uniformi e 5000 in condizioni di mismatch) e 2000 curve I-V reali (1000 associabili a condizioni di corretto funzionamento e 1000 associabili a errato funzionamento)	https://zenodo.org/record/4781151 [Da Piliouguine et al., 2022, https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.026]
Partial Shading and Fault Simulation Dataset	DATASET SIMULATO Il dataset è stato realizzato utilizzando un modello a 2 diodi. Il numero totale di pannelli è 10 e sono generati i segnali al variare della temperatura e le condizioni di partial shading.	https://ieee-dataport.org/documents/partial-shading-and-fault-simulation-dataset-photovoltaics-module
PV Fault Dataset	DATASET SIMULATO A PARTIRE DA DATI REALI Il dataset si compone di dati reali ottenuti da un impianto PV composto da 2 stringhe con 8 C6SU-330P Moduli PV ognuno. I guasti di tipo degradazione, corto circuito e circuito aperto sono inseriti artificialmente mentre l'ombreggiamento è naturale (dovuto ad un palazzo nelle vicinanze).	https://github.com/clayton-h-costa/pv-fault-dataset [Da Lazzaretti et al., 2020, https://doi.org/10.3390/s20174688]
Elpv dataset	DATASET REALE Contiene 2624 immagini di Elettroluminescenza 300x300 pixel in toni di grigio (8 bit) sia relative a celle solari funzionanti che danneggiate con vari gradi di degradazione. [Buerhop-Lutz et al., 2018, 10.4229/35thEUPVSEC20182018-5CV.3.15]	https://github.com/zae-bayern/elpv-dataset
PVWatts dataset	DATASET SIMULATO Utilizzando lo strumento PVWatts calculator è possibile ottenere un anno di dati sintetici, su base oraria, della produzione stimata da PV in base alle	https://pvwatts.nrel.gov/pvwatts.php

	<p>caratteristiche di impianto inserite. Il sistema permette di tener conto anche delle loss dovute a diversi fattori (ad es., soiling, shading, mismatch, ecc.).</p> <p>Alcuni autori hanno creato dei dataset sintetici basati sui risultati ottenuti da PVWatts calculator e hanno labellato le diverse osservazioni secondo quanto descritto in [Rao et al., 2020, https://doi.org/10.1007/978-3-031-02505-1]</p>	
--	---	--

Tabella 10: dataset contenenti i guasti associati ai generatori eolici

Nome dataset	Dati e informazioni forniti dalla fonte	Fonti
Wind turbine gearbox monitoring vibration analysis benchmark dataset	<p>DATASET REALE-SIMULATO</p> <p>NREL (National Renewable Energy Laboratory) ha raccolto i dati da un ingranaggio funzionante ed uno danneggiato. L'ingranaggio sano è stato testato solo col dinamometro mentre quello danneggiato è stato prima testato col dinamometro e poi inviato ad un parco eolico per un test sul campo. Nel test sul campo ha subito due eventi di perdita di olio che hanno danneggiato i cuscinetti interni e gli elementi dell'ingranaggio.</p>	<p>https://data.openei.org/submissions/738</p> <p>https://www.kaggle.com/datasets/amrezzeldinrashed/fault-detection-dataset-in-photovoltaic-farms</p>
Wind Turbine Blades Fault Diagnosis based on Vibration Dataset Analysis	<p>DATASET REALE</p> <p>Il dataset contiene le misure di vibrazione uniaassiale di una turbina eolica che opera a diverse velocità del vento. Contiene i dati per tre tipologie di problemi (danneggiamento della pala, degradamento della superficie della pala, e pala non equilibrata) più i dati</p>	<p>https://data.mendeley.com/datasets/5d7vbdp8f7</p> <p>[Ogaili et al., 2023, http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4431782]</p>

	misurati in condizioni normali di funzionamento	
Vibration Signals Feature for Fault Diagnosis of wind turbine blade	DATASET REALE Il dataset contiene misure di vibrazione sia in condizioni normali che in situazioni problematiche (danneggiamento della pala, degradamento della superficie della pala, e pala non equilibrata)	https://data.mendeley.com/datasets/2kx995rscj/2 [Ogaili, et al., 2023, 10.17632/2kx995rscj.2] Collegato al dataset “Wind Turbine Blades Fault Diagnosis based on Vibration Dataset Analysis”
YOLO Annotated Wind Turbine Surface Damage	DATASET REALE Dataset composto da immagini della superficie delle turbine eoliche in cui i danni sono etichettati.	https://www.kaggle.com/datasets/ajifoster3/yolo-annotated-wind-turbines-586x371 Deriva da un dataset non etichettato: (https://data.mendeley.com/datasets/hd96prn3nc) che gli autori hanno appositamente modificato come descritto in [Foster et al., 2022, 10.1109/IVMSP54334.2022.9816220]
Wind turbine fault diagnosis dataset	DATASET REALE Dataset contenente i dati misurati di diverse turbine.	https://data.mendeley.com/datasets/v9wnr4bft9 [Wen et al., 2021, https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115016] NOTA: le colonne presenti nel dataset non contengono il dettaglio del contenuto e sono in numero diverso rispetto a quanto descritto nell’articolo.
Wind turbine PMSG - Short-Circuit Fault	DATASET SIMULATO Dataset ottenuto con una frequenza di campionamento di 1 kHz attraverso la simulazione di un modello matematico descritto nell’articolo [Barros et al, 2019, https://doi.org/10.1109/ISGT-LA.2019.8895378]. Il dataset così creato è stato poi utilizzato nell’articolo [Sà et al., 10.1109/ISGT-LA.2019.8895013]	https://www.kaggle.com/datasets/brunoadonis/wind-turbine-pmsg-short-circuit-fault-mcsa
Vibration and Motor Current Dataset of Rolling Element Bearing Under Varying Speed Conditions for Fault Diagnosis	DATASET REALE Dataset contenente le misure di vibrazione, di corrente, di temperatura e acustiche, di una macchina rotante. Sono considerate le condizioni normali e i malfunzionamenti (ad es. i guasti ai cuscinetti a diverse velocità di rotazione, disallineamento dell’albero e sbilanciamento del rotore).	https://data.mendeley.com/datasets/vxkj334rvz https://data.mendeley.com/datasets/x3vhp8t6hg https://data.mendeley.com/datasets/j8d8pfkvj2 [Da Jung et al., https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109049]

	Non è direttamente collegato alle turbine eoliche ma ad una macchina rotante. Data la dimensione del dataset è diviso in tre parti.	
Gearbox Fault Diagnosis Data	DATASET REALE Dataset contenente le vibrazioni registrate usando SpectraQuest's Gearbox Fault Diagnostics Simulator. In particolare, sono stati utilizzati 4 sensori di vibrazione in quattro diverse direzioni e al variare del carico dallo 0% al 90%. Sono inclusi due scenari: condizioni di funzionamento normale e denti rotti.	https://data.openei.org/submissions/623 NOTA: Non è direttamente collegato alle turbine eoliche ma ad un sistema di trasmissione.
EDP Open Data	DATASET REALE Storici dei guasti di una Wind Farm comprensivi dei segnali ottenuti dallo SCADA dell'impianto	https://www.edp.com/en/innovation/open-data/data

Tabella 11: modelli per ottenere dataset sintetici sui guasti associati agli elettrolizzatori

Nome dataset	Dati e informazioni forniti dalla fonte	Fonti
Degradazione della membrana	DATASET SINTETICI Modello matematico predittivo di degradazione della membrana NOTA: degradazione causata da cicli di carico	S. R. Choi et al., "Life prediction of membrane electrode assembly through load and potential cycling accelerated degradation testing in polymer electrolyte membrane fuel cells," Int J Hydrogen Energy, vol. 47, no. 39, pp. 17379–17392, May 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.222.
	DATASET SINTETICI Modello matematico predittivo delle prestazioni della cella sulla base di temperatura e carico NOTA: Meccanismo di degradazione basato sull'attacco radicalico alla membrana. Curva di degradazione dipendente	M. Chandesris, V. Médeau, N. Guillet, S. Chelghoum, D. Thoby, and F. Fouda-Onana, "Numerical modelling of membrane degradation in PEM water electrolyzer: Influence of the temperature and current density," FDFC2015, Ed., Toulouse (France), Feb. 2015.

	dalla temperatura e dal carico alla cella	
	<p>DATASET SINTETICI</p> <p>Modello matematico predittivo di assottigliamento della membrana</p> <p>NOTA: Curva di degradazione dipendente dalla temperatura e dal carico alla cella</p>	M. Chandesris, V. Médeau, N. Guillet, S. Chelghoum, D. Thoby, and F. Fouda-Onana, "Numerical modelling of membrane degradation in PEM water electrolyzer: Influence of the temperature and current density," FDFC2015, Ed., Toulouse (France), Feb. 2015.

Tabella 12: modelli per ottenere dataset sintetici sui guasti associati alle Fuel Cell

Nome dataset	Dati e informazioni forniti dalla fonte	Fonti
Degradazione della membrana	<p>DATASET SINTETICI</p> <p>Modello matematico predittivo di degradazione della membrana</p> <p>Il modello proposto è validato nei confronti dei meccanismi di polarizzazione dovuti a fenomeni di OCV. Basato sul metodo degli elementi finiti.</p>	R. Singh, P. C. Sui, K. H. Wong, E. Kjeang, S. Knights, and N. Djilali, "Modeling the Effect of Chemical Membrane Degradation on PEMFC Performance," J Electrochem Soc, vol. 165, no. 6, pp. F3328–F3336, 2018, doi: 10.1149/2.0351806jes.
	<p>DATASET SINTETICI</p> <p>Modello matematico predittivo di degradazione della membrana</p> <p>Il modello, semi-empirico, considera le perdite di corrente, la polarizzazione del catalizzatore e la resistenza ohmica.</p>	V. Ahmadi Sarbast, "Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance Degradation and Operation Life," 2021.
	<p>DATASET SINTETICI</p> <p>Modello matematico predittivo di degradazione della membrana</p> <p>Il modello considera la resistenza di polarizzazione</p>	P. Wang et al., "A novel degradation model of proton exchange membrane fuel cells for state of health estimation and prognostics," Int J Hydrogen Energy, vol. 46, no. 61, pp. 31353–31361, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.07.004.

	come somme di tutte le perdite per polarizzazione.	
Degradazione del catalizzatore	<p>DATASET SINTETICI</p> <p>Modello matematico predittivo del fenomeno di dissoluzione del catalizzatore</p>	Y. Ao, K. Chen, S. Laghrouche, and D. Depernet, "Proton exchange membrane fuel cell degradation model based on catalyst transformation theory," <i>Fuel Cells</i> , vol. 21, no. 3, pp. 254–268, Jun. 2021, doi: 10.1002/fuce.202100002.
	<p>DATASET SINTETICI</p> <p>Modello matematico predittivo del fenomeno di dissoluzione del catalizzatore</p> <p>Il modello considera diversi fenomeni che determinano la disattivazione del catalizzatore.</p>	T. Jahnke, G. A. Futter, A. Baricci, C. Rabissi, and A. Casalegno, "Physical Modeling of Catalyst Degradation in Low Temperature Fuel Cells: Platinum Oxidation, Dissolution, Particle Growth and Platinum Band Formation," <i>J Electrochem Soc</i> , vol. 167, no. 1, p. 013523, 2020, doi: 10.1149/2.0232001jes.
	<p>DATASET SINTETICI</p> <p>Modello matematico predittivo del fenomeno di dispersione e sintering del catalizzatore</p> <p>Il modello analizza la dispersione del catalizzatore a base di platino al catodo, e i fenomeni di agglomerazione, con conseguente riduzione dell'attività catalitica.</p>	D. Bernhard, T. Kadyk, S. Kirsch, H. Scholz, and U. Krewer, "Model-assisted analysis and prediction of activity degradation in PEM-fuel cell cathodes," <i>J Power Sources</i> , vol. 562, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.jpowsour.2023.232771
Degradazione del potenziale di stack	<p>DATASET SINTETICI</p> <p>Modello matematico di decadimento del potenziale dello stack</p> <p>Il modello determina la legge di decadimento del potenziale di stack sulla base di coefficienti di accelerazione basate sui fenomeni di start/stop, idle e sovra-richiesta di potenza.</p>	M. Yue, S. Jemei, R. Gouriveau, and N. Zerhouni, "Review on health-conscious energy management strategies for fuel cell hybrid electric vehicles: Degradation models and strategies," <i>Int J Hydrogen Energy</i> , vol. 44, no. 13, pp. 6844–6861, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.190.

Tabella 13: dataset contenenti i guasti associati alle Batterie

Nome dataset	Dati e informazioni forniti dalla fonte	Fonti
<p>NASA Data Repository</p>	<p>DATASET SIMULATI E REALI</p> <p>Set di dati idonei per lo sviluppo di algoritmi da utilizzare come strumenti prognostici.</p> <p>Tra i vari dati a disposizione è possibile reperire dati relativi ad esperimenti sulle batterie agli ioni di litio. Questi ultimi sono stati ottenuti analizzando le fasi di carica e scarica a temperature diverse e monitorando l'impedenza come criterio di danno.</p>	<p>https://www.nasa.gov/intelligent-systems-division/discovery-and-systems-health/pcoe/pcoe-data-set-repository/</p> <p>NOTA: i set di dati del NASA Data Repository sono stati donati da università, agenzie o aziende.</p> <p>[Da: Surya, Sumukh; S, Mohan Krishna; Chhetri, Ahilya; WILLIAMSON, SHELDON (2023): Software Tools and Datasets for Battery Management System Applications. TechRxiv. Preprint. - https://doi.org/10.36227/techrxiv.21903531.v1]</p>
<p>IEEE Data Port</p>	<p>DATASET SINTETICI</p> <p>Data set ottenuto simulando una Cella ai polimeri di litio modello ePLB C020, con una capacità effettiva di 15 Ah, di un'auto elettrica</p>	<p>http://iee-dataport.org/documents/automotive-li-ion-cell-usage-data-set</p> <p>NOTA: IEEE Data Port è una piattaforma sicura per i ricercatori, gli analisti di dati e la comunità tecnica globale per accedere, archiviare, gestire e condividere facilmente i dati di ricerca.</p> <p>[Da: Surya, Sumukh; S, Mohan Krishna; Chhetri, Ahilya; WILLIAMSON, SHELDON (2023): Software Tools and Datasets for Battery Management System Applications. TechRxiv. Preprint. - https://doi.org/10.36227/techrxiv.21903531.v1]</p>
<p>Stanford Fast Charging Datasets</p>	<p>DATASET REALE</p> <p>Dataset costituito da dati ottenuti mediante prove eseguite su batterie commerciali agli ioni di litio in condizioni di ricarica rapida. In particolare, le celle, del tipo litio-ferro-fosfato (LFP)/grafite, prodotte da A123 Systems (APR18650M1A), sono state testate su un dispositivo Arbin LBT a 48 canali. Le celle considerate sono caratterizzate da una capacità nominale di 1,1</p>	<p>https://data.matr.io/1/projects/5d80e633f405260001c0b60a</p> <p>NOTA: le 124 celle commerciali al litio ferro fosfato/grafite, oggetto dei test, sono state ciclare in condizioni di ricarica rapida, con cicli di vita variabili che vanno da 150 a 2.300 cicli (sistemi A123, modello APR18650M1A, capacità nominale di 1,1 Ah a 30 °C). Tutte le celle in questo set di dati sono state caricate con uno dei 224 protocolli di ricarica rapida in sei fasi da 10 minuti.</p> <p>[Da: Surya, Sumukh; S, Mohan Krishna; Chhetri, Ahilya; WILLIAMSON, SHELDON (2023): Software Tools and Datasets for Battery Management</p>

	Ah e una tensione nominale di 3,3 V.	System Applications. TechRxiv. Preprint. - https://doi.org/10.36227/techrxiv.21903531.v1
Cycle Life Prediction Dataset	<p>DATASET REALE</p> <p>Set di dati ottenuto mediante sperimentazione su batterie commerciali agli ioni di litio in condizioni di ricarica rapida. Le celle agli ioni di litio fosfato (LFP)/grafite, prodotte da A123 Systems (APR18650M1A), oggetto della sperimentazione, sono state testate mediante il dispositivo Arbin LBT a 48 canali in una camera di temperatura a convezione forzata impostata su 30°C. Le celle hanno una capacità nominale di 1,1 Ah e una tensione nominale di 3,3 V</p>	<p>https://data.matr.io/1/projects/5c48dd2bc625d700019f3204</p> <p>[Da: Surya, Sumukh; S, Mohan Krishna; Chhetri, Ahilya; WILLIAMSON, SHELDON (2023): Software Tools and Datasets for Battery Management System Applications. TechRxiv. Preprint. - https://doi.org/10.36227/techrxiv.21903531.v1]</p>
University of Wisconsin Madison	<p>DATASET REALE</p> <p>Set di dati operativi relativi alla batteria agli ioni di litio Panasonic 18650PF</p>	<p>https://data.mendeley.com/datasets/wykht8y7tg/1</p> <p>NOTA: i set di dati sono stati ottenuti sperimentalmente presso l'Università del Wisconsin-Madison e possono essere utilizzati per testare gli algoritmi della rete neurale e dello stato di carica del filtro Kalman o per sviluppare modelli di batterie. Essi sono destinati a fungere da riferimento in modo che i ricercatori possano confrontare il loro algoritmo e le prestazioni del modello per un set di dati standard.</p> <p>[Da: Surya, Sumukh; S, Mohan Krishna; Chhetri, Ahilya; WILLIAMSON, SHELDON (2023): Software Tools and Datasets for Battery Management System Applications. TechRxiv. Preprint. - https://doi.org/10.36227/techrxiv.21903531.v1]</p>
BEEP	<p>DATASET REALE</p> <p>Dataset che include dati relativi al ciclo della batteria (dati dei cicli, protocolli utilizzati durante gli esperimenti, modellazione del ciclo di vita, dati relativi alla batteria, ecc.)</p>	<p>https://github.com/TRI-AMDD/beep</p> <p>[Da: Surya, Sumukh; S, Mohan Krishna; Chhetri, Ahilya; WILLIAMSON, SHELDON (2023): Software Tools and Datasets for Battery Management System Applications. TechRxiv. Preprint. - https://doi.org/10.36227/techrxiv.21903531.v1]</p>

<p>Universal Battery Database</p>	<p>DATASET SIMULATI E REALI</p> <p>L'Universal Battery Database include dataset gestibili attraverso un software open source per la gestione dei dati delle celle agli ioni di litio.</p> <p>Il software consente anche la gestione di propri dataset sperimentali (es: cicli a lungo termine e EIS-Spettroscopia di impedenza elettrica) sulle batterie agli ioni di litio,</p>	<p>https://github.com/Samuel-Buteau/universal-battery-database</p> <p>[Da: Surya, Sumukh; S, Mohan Krishna; Chhetri, Ahilya; WILLIAMSON, SHELDON (2023): Software Tools and Datasets for Battery Management System Applications. TechRxiv. Preprint. - https://doi.org/10.36227/techrxiv.21903531.v1]</p>
--	---	---

Tabella 14: modelli per ottenere dataset sintetici sui guasti associati ai sistemi di conversione DC/DC e DC/AC

Nome dataset	Dati e informazioni forniti dalla fonte	Fonti
<p>Guasto alla componentistica dello stadio di potenza dei convertitori</p>	<p>DATASET SINTETICI</p> <p>Modello elettro-termico di convertitori: modello circuitale applicato in processi per la generazione dei profili operativi di convertitori/apparati impiegati in condizioni operative stressanti (sovraccarico, ecc.) da cui è possibile ricavare dataset sintetici.</p>	<p>DH. Wang, Thesis: "Dynamic electro-thermal model of power electronic building block in micro grid: modelling, analysis and simulation", Department of electrical & computer engineering National University of Singapore, 2012.</p>
<p>Corto circuito e guasto a terra ai terminali del convertitore</p>	<p>DATASET SINTETICI</p> <p>Analisi di guasto: rappresentazione degli andamenti delle grandezze elettriche del convertitore in condizioni di guasto.</p>	<p>ABB Technical Application Papers, "Faults in LVDC microgrids with front-end converters", 2015.</p>

APPENDICE 3

Anomalie e guasti associati ai convertitori di interfaccia

Convertitori switching di tipo unidirezionali e bidirezionali sono utilizzati per la connessione di generatori, sistemi di accumulo ed utenze al bus della rete principale in Corrente Alternata (convertitori DC/AC o inverter) o al bus in Corrente Continua (convertitori DC/DC) di reti e microreti elettriche. Essi sono caratterizzati dallo stadio di potenza e da quello di controllo, oltre che dalla componentistica per il monitoraggio e la comunicazione.

Durante il normale funzionamento, il convertitore è sottoposto a condizioni operative che possono variare nel tempo, a fenomeni di invecchiamento ed usura dovuti all'azione di agenti stressanti di natura elettrica, termica, meccanica o ibrida, secondo la specifica applicazione.

Tali fenomeni possono causare anomalie e/o guasti ai dispositivi dello stadio di potenza, allo stadio di controllo, che include anche i circuiti per il pilotaggio dei componenti a commutazione, e i connettori necessari per gli ingressi e le uscite del convertitore.

Le principali anomalie e guasti associati ai sistemi di conversione DC/DC e DC/AC sono di seguito richiamati, con l'indicazione delle possibili conseguenze:

- **Guasti alla componentistica dello stadio di potenza:** il corretto funzionamento dei componenti a commutazione (MOSFET, IGBT), componenti magnetici (induttori, trasformatori, ecc.) e capacitivi dello stadio di potenza del convertitore è influenzato da diversi fattori, tra i quali la qualità dei materiali utilizzati, le condizioni ambientali, operative, le caratteristiche del circuito e dei sistemi di raffreddamento adottati²⁸.
- **Guasti alla componentistica dello stadio di controllo:** i sensori ed i circuiti integrati (microcontrollori, Pulse-Width-Modulator, driver, ecc.) utilizzati nello stadio di controllo dei convertitori possono presentare anomalie di funzionamento e/o guasti dovuti a difetti di fabbricazione, alla qualità delle schede elettroniche su cui vengono saldati o a condizioni di Electrical Over Stress (EOS).
- **Anomalie legate alla tensione, corrente e frequenza all'interfaccia:** i sistemi di conversione possono presentare spegnimenti o limitazioni nel funzionamento attuati come modalità di protezione nel caso in cui la tensione o la frequenza risultino superiori o inferiori ai valori consentiti nel punto di connessione con il bus AC o DC.
- **Corto circuito ai terminali di uscita del convertitore:** il verificarsi di un corto circuito ai terminali di uscita di un convertitore di interfaccia può provocare sovracorrenti tali da distruggere i dispositivi elettronici presenti anche nello stadio d'ingresso²⁹.
- **Corto circuito ai terminali AC di un convertitore DC/AC:** in presenza di condensatori sul lato AC del convertitore, la condizione di corto circuito viene ulteriormente aggravata dalla corrente di scarica dei dispositivi di tipo capacitivo²⁹.
- **Guasto a terra ai terminali d'ingresso o d'uscita del convertitore:** il guasto a terra all'ingresso o all'uscita di un convertitore d'interfaccia comporta il fluire della corrente di guasto nei diversi rami del circuito con conseguenti malfunzionamenti o rotture dei componenti elettronici presenti²⁹.

La letteratura di settore affronta la tematica concentrando l'attenzione prevalentemente sulla fisica del guasto e/o dell'anomalia dei singoli componenti. Gli studi condotti evidenziano, in particolare, la distribuzione dei guasti ai dispositivi degli apparati di conversione riportata in Figura 1³⁰.

²⁸ G. Graditi and G. Adinolfi, "Temperature influence on photovoltaic power optimizer components' reliability," International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Sorrento, Italy, 2012, pp. 1113-1118, doi: 10.1109/SPEEDAM.2012.6264560.

²⁹ ABB, ABB Technical Application Papers, "Faults in LVDC microgrids with front-end converters", 2015.

³⁰ S. Yang, A. Bryant, P. Mawby, D. Xiang, L. Ran and P. Tavner, "An industry-based survey of reliability in power electronic converters," 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, San Jose, CA, USA, 2009, pp. 3151-3157, doi: 10.1109/ECCE.2009.5316356.

Si può osservare che i componenti maggiormente interessati da guasti sono quelli a commutazione e quelli capacitivi.

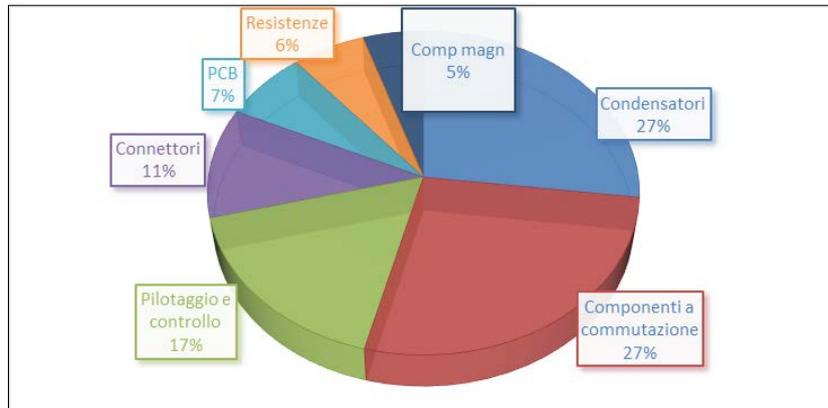


Figura 1 – Distribuzione dei guasti ai dispositivi convertitori di interfaccia³⁰

Nei dispositivi a commutazione condizioni di sovracorrente e sovratensione possono provocare il surriscaldamento del componente³¹. In particolare, l'azione di stress di natura termica possono avere effetti significativi sui fenomeni di breakdown secondario che portano alla distruzione del dispositivo a commutazione. È indispensabile considerare la Safe Operating Area di tali componenti e l'eventuale necessità di opportuni dissipatori nelle fasi di progettazione degli apparati. Bisogna, inoltre, tener presente che il valore della temperatura di giunzione dipende dalla temperatura ambiente come riportato nell'Eq. C1:

$$T_j = T_a + P_d R_{thja} \quad (C1)$$

dove:

- T_j è la temperatura di giunzione;
- T_a è la temperatura ambiente;
- P_d è la Potenza dissipata;
- R_{thja} è la resistenza termica giunzione-ambiente.

I valori della resistenza Drain-Source, della tensione Gate-Source dipendono, a loro volta, dalla temperatura di giunzione, come rappresentato nelle seguenti figure tratte da datasheet di MOSFET disponibili in commercio.

³¹ S. Yang, D. Xiang, A. Bryant, P. Mawby, L. Ran and P. Tavner, "Condition Monitoring for Device Reliability in Power Electronic Converters: A Review," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, no. 11, pp. 2734-2752, Nov. 2010, doi: 10.1109/TPEL.2010.2049377

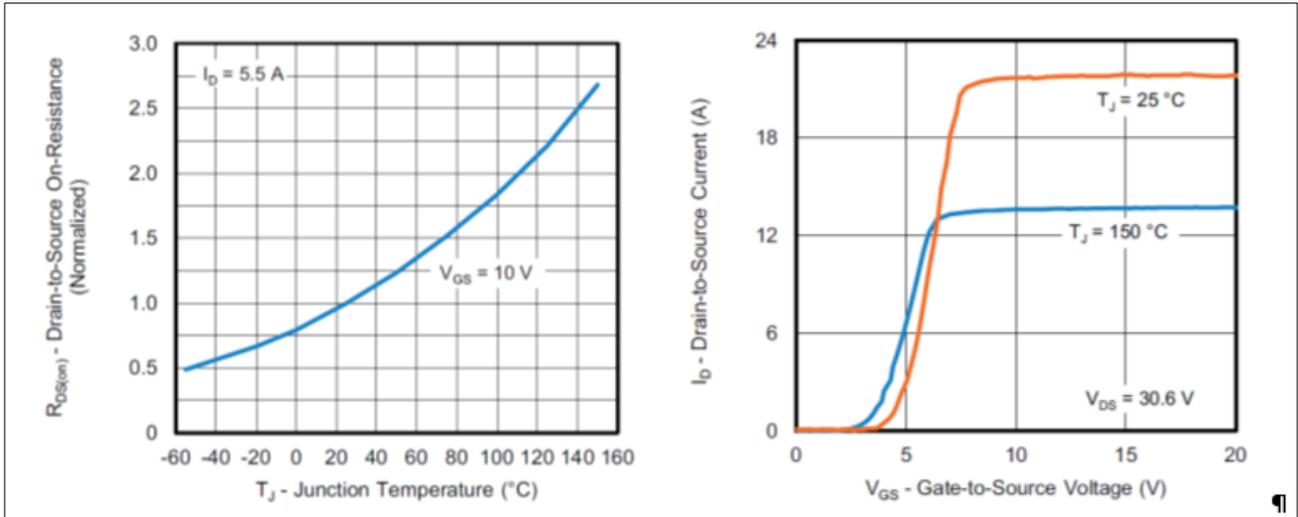


Figura 2 – MOSFET: (a) resistenza Drain-Source vs Temperatura di giunzione; (b) grafico della corrente Drain-Source in funzione della tensione gate-source per diversi valori della temperatura di giunzione³²

È evidente che il valore della resistenza Drain-Source aumenta all'aumentare della temperatura di giunzione (Figura 2(a)) mentre, in Figura 2(b), si può osservare che il valore della tensione Gate-Source nell'istante di accensione (tensione di soglia V_{th} nell'istante in cui la corrente Drain-Source è diversa da zero) diminuisce alle temperature di giunzione più alte.

Il grafico della tensione V_{th} in funzione della T_a per un MOSFET in carburo di Silicio, riportato nella Figura 3³³, ci fa comprendere che, a fronte delle temperature che hanno caratterizzato gli ultimi fenomeni di ondate di calore, la tensione di soglia potrebbe abbassarsi provocando l'accensione indesiderata del dispositivo a commutazione con conseguenze dannose per il singolo componente ed anche per il convertitore di interfaccia di cui fa parte.

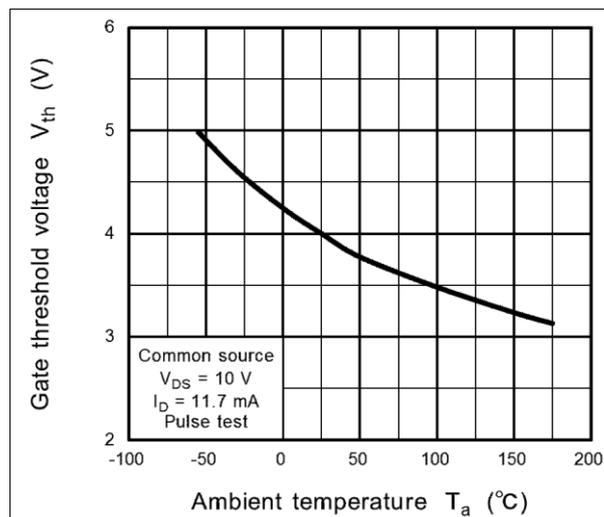


Figura 3 – MOSFET: Tensione di soglia vs Temperatura ambiente³³

Bisogna, inoltre, sottolineare che la temperatura rappresenta un agente stressante anche per i materiali che costituiscono i dispositivi a commutazione. L'impiego di materiali caratterizzati da un diverso

³² Datasheet Vishay E Series Power MOSFET siha11n80ae (<https://www.vishay.com/docs/92295/siha11n80ae.pdf>)

³³ Datasheet Power SiC MOSFETs Toshiba TW015N120C (https://toshiba.semicon-storage.com/info/TW015N120C_datasheet_en_20220615.pdf?did=143221&prodName=TW015N120C)

comportamento in termini di dilatazione e compressione termica può, infatti, determinare crepe con la conseguente rottura del componente.

Un'ulteriore causa di anomalie e guasti nei dispositivi switching sono le scariche elettrostatiche. In dettaglio, la loro azione può provocare la rottura dell'ossido di gate senza evidenti malfunzionamenti per il componente nell'immediato, determinandone, però, la rottura dopo un periodo di tempo dall'evento.

L'adozione di protezioni e la possibilità di monitorare la carica di gate possono evitare il guasto.

In riferimento ai componenti capacitivi è necessario sottolineare che nei convertitori di interfaccia vengono usati condensatori elettrolitici, ceramici e in film.

La capacità di tali dispositivi varia con la temperatura come riportato in Figura 4³⁴.

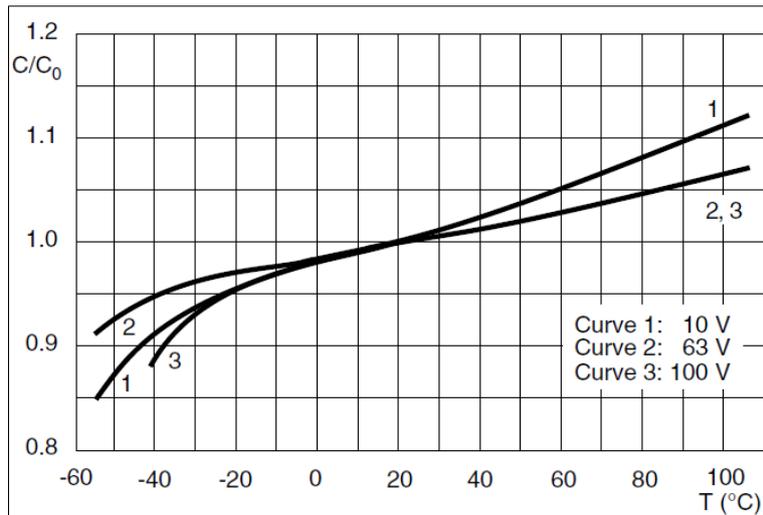


Figura 4 – Condensatore: Capacità* vs Temperatura³⁴

* La capacità C è normalizzata rispetto a C_0 ossia il valore della capacità del condensatore a 20°C, 100 Hz.

I grafici rappresentati in Figura 5³⁵ evidenziano, inoltre, il dimezzamento della vita operativa (espressa in ore) di un condensatore per ogni 10°C di incremento della temperatura.

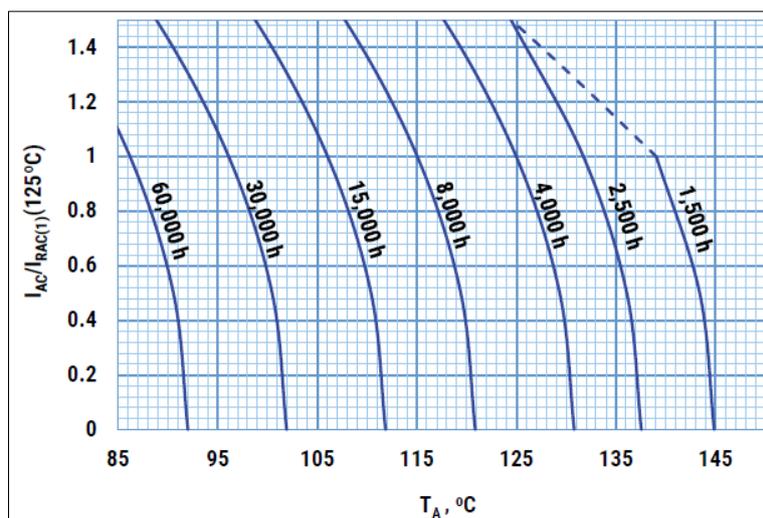


Figura 5 – Condensatore: Corrente di ripple e Vita Operativa vs Temperatura³⁵**

** La corrente di ripple I_{AC} è normalizzata rispetto a $I_{RAC(1)}$ ossia il valore massimo di ripple.

³⁴ Datasheet Aluminum Electrolytic Capacitors Vishay 150crz (<https://www.vishay.com/docs/28395/150crz.pdf>)

³⁵ Datasheet KEMET_AEC-Q200 (https://content.kemet.com/datasheets/KEM_A4098_A780.pdf)

All'interno dei convertitori di interfaccia, la tensione in uscita viene ottenuta pilotando opportunamente l'accensione e lo spegnimento dei dispositivi a commutazione presenti nel circuito. Tale funzione viene svolta da circuiti integrati denominati "driver". Essi possono presentare comportamenti anomali quando risultano applicate ai loro ingressi o uscite tensioni negative³⁶.

In particolare, le fasi di accensione e spegnimento (Figura 6³⁷) di MOSFET e IGBT sono caratterizzate da transitori di tensione e corrente che, in presenza di componenti parassiti (capacità e induttanze), possono causare la presenza di tensioni negative ai terminali del driver.

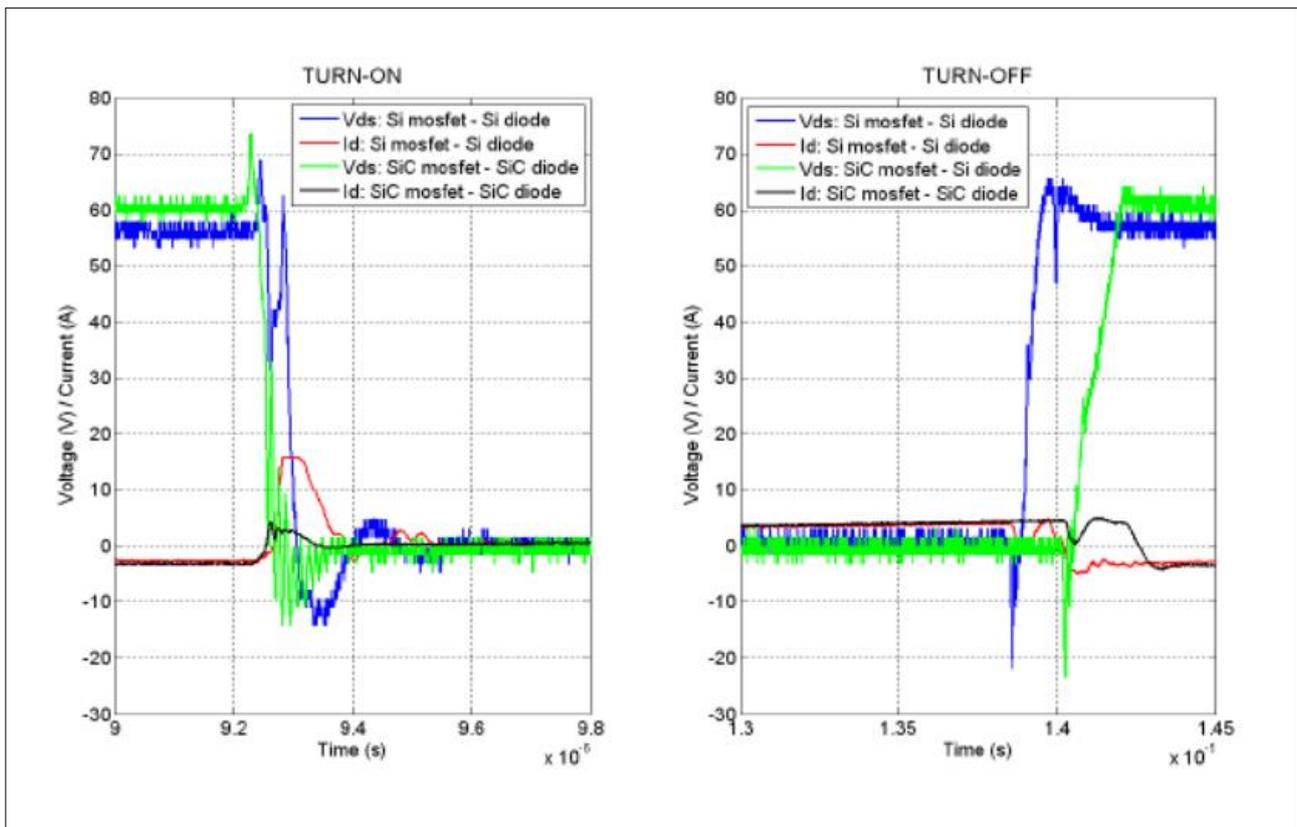


Figura 6 – Caratterizzazione della fase di accensione (figura di sinistra) e spegnimento (figura di destra) di un dispositivo a semiconduttore³⁷

Con riferimento all'identificazione dei metodi per la caratterizzazione dei guasti dei convertitori di interfaccia, si fa presente che essa deve essere condotta in maniera tale da analizzare l'impatto di agenti di natura elettrica, termica, ambientale, meccanica o ibridi sul corretto funzionamento dei diversi dispositivi del convertitore. In dettaglio, dal punto di vista degli agenti termici impattanti il funzionamento del convertitore, i diversi componenti sono sottoposti a test accelerati in camera climatica al fine di valutarne il comportamento quando sono sottoposti a cicli termici. Il monitoraggio delle condizioni operative e del funzionamento del dispositivo sottoposto a test consente di valutare il degrado che esso subisce sotto l'azione di stress legati alla temperatura operativa e ambientale. L'azione di tali agenti sui parametri e sulle grandezze caratteristiche dei diversi componenti del convertitore permette anche di caratterizzarne i relativi guasti.

³⁶ Frank W., Song J., SOI technology provides robustness against parasitic elements injecting negative voltages, Proceedings PCIM Europe 2015

³⁷ P. Bogónez-Franco and J. B. Sendra, "EMI comparison between Si and SiC technology in a boost converter," International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, Rome, Italy, 2012, pp. 1-4, doi: 10.1109/EMCEurope.2012.6396739.