

# MODELLI PER LA DIAGNOSTICA DEI GUASTI E LA PREVISIONE DELLA PRODUZIONE FOTOVOLTAICA

*Nicola Blasuttigh, Alessandro Massi Pavan, Stefano Pastore*

Università degli Studi di Trieste

Dipartimento di Ingegneria e Architettura

Nel contesto della produzione di energia solare, vi è una spinta crescente verso lo sviluppo di strumenti avanzati per il controllo, l'individuazione dei problemi e la stima della resa energetica degli impianti fotovoltaici. L'obiettivo di queste attività è quello di creare soluzioni accurate per rilevare malfunzionamenti e migliorare le prestazioni complessive degli impianti fotovoltaici.

Il gruppo di ricerca dell'Università di Trieste ha concentrato i propri sforzi sull'identificazione delle anomalie in questi sistemi, elaborando soluzioni basate sull'intelligenza artificiale, in particolare sfruttando tecniche di machine learning (ML) [1-3]. Questi strumenti si sono dimostrati particolarmente efficaci nell'individuazione e categorizzazione dei guasti, grazie all'impiego di algoritmi compatibili con dispositivi embedded a basso costo. Sono stati sviluppati anche metodi TinyML per l'analisi di immagini nei campi del visibile e dell'infrarosso, utili al riconoscimento dei difetti nei moduli PV [4-6]. Tra i risultati ottenuti spicca la realizzazione di una termocamera a basso costo, costruita mediante stampa 3D e dotata di sensori IR, capace di eseguire la classificazione dei guasti anche da parte di operatori privi di esperienza specifica [7].

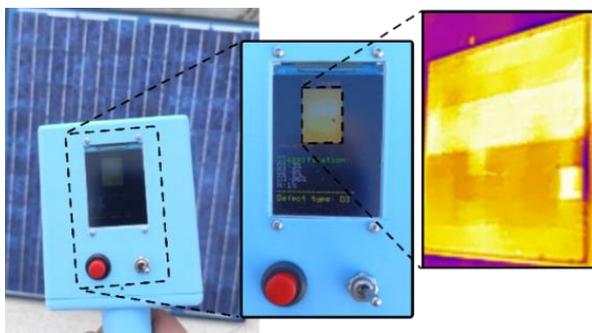


Figura 1 - Il prototipo stampato in 3D della termocamera progettata per classificare i guasti nei moduli fotovoltaici e i risultati della classificazione.

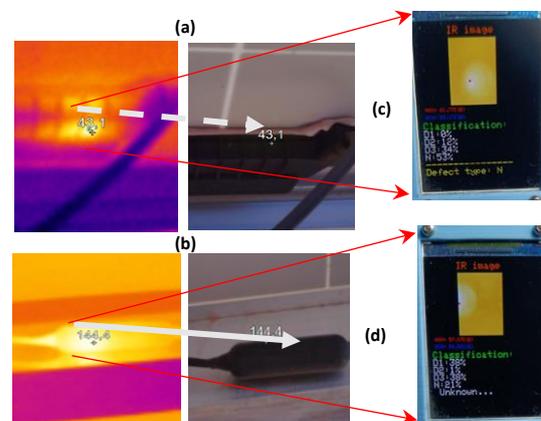


Figura 2 – Alcuni difetti osservati: a) diodo di bypass e b) conduttore surriscaldati, e i risultati della diagnosi osservati sullo schermo per entrambi i casi.

Il gruppo di ricerca ha dedicato particolare attenzione anche all'analisi dei difetti nei moduli fotovoltaici mediante immagini in elettroluminescenza, una tecnica diagnostica non invasiva che consente di individuare con precisione aree danneggiate o soggette a degrado all'interno delle singole celle. In collaborazione con l'unità del Politecnico di Milano, sono stati sviluppati modelli basati su algoritmi di machine learning per l'identificazione e la classificazione automatica dei guasti, nonché per la stima della potenza elettrica generata e dei parametri

elettrici del modello a singolo diodo [8]. Parallelamente, sono stati progettati anche modelli ibridi basati su tecniche ensemble, finalizzati a migliorare l'accuratezza del riconoscimento dei difetti, con particolare applicazione nelle fasi di produzione e controllo qualità delle celle fotovoltaiche [9].

Per quanto riguarda la previsione della produzione fotovoltaica, sono stati implementati modelli basati su reti neurali profonde (DLNN) [10], capaci di stimare con buona precisione la potenza erogata. Queste reti, addestrate su dati sperimentali raccolti nel laboratorio "Smart grid e mobilità elettrica" dell'Università di Trieste, hanno dimostrato elevate capacità predittive grazie alla loro efficienza nell'analizzare grandi quantità di dati.

Inoltre, si sta affinando un modello empirico esplicito per moduli solari commerciali, già pubblicato in precedenti studi, che potrà essere integrato in un sistema di monitoraggio in tempo reale con approccio digital twin, offrendo un supporto ulteriore alla diagnosi operativa degli impianti fotovoltaici.

### **Pubblicazioni scientifiche prodotte nel triennio**

1. Mellit, A., Blasuttigh, N., Pastore, S., Zennaro, M., & Massi Pavan, A. (2025). TinyML for fault diagnosis of photovoltaic modules using edge impulse platform and IR thermography images. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1–12.
2. A. Mellit, M. Benghanem, S. Kalogirou, and A. Massi Pavan, 'An embedded system for remote monitoring and fault diagnosis of photovoltaic arrays using machine learning and the internet of things', *Renewable Energy*, vol. 208, pp. 399–408, May 2023
3. A. Mellit, O. Herrak, C. Rus Casas, and A. Massi Pavan, 'A Machine Learning and Internet of Things-Based Online Fault Diagnosis Method for Photovoltaic Arrays', *Sustainability*, vol. 13, no. 23, Art. no. 23, Jan. 2021
4. Z. Ksira, A. Mellit, N. Blasuttigh, and A. Massi Pavan, 'A Novel Embedded System for Real-Time Fault Diagnosis of Photovoltaic Modules', *IEEE Journal of Photovoltaics*, pp. 1–9, 2024
5. A. Mellit, N. Blasuttigh, and A. Massi Pavan, 'TinyML for fault diagnosis of Photovoltaic Modules using Edge Impulse Platform', in *2023 11th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid)*, Jun. 2023, pp. 01–05.
6. Z. Ksira, N. Blasuttigh, A. Mellit, and A. Massi Pavan, 'TinyML model for fault classification of photovoltaic modules based on visible images', in *7th International Conference on Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems IC-AIRES2023*, 2023.
7. N. Blasuttigh, A. Mellit, A. Massi Pavan, and M. Zennaro, 'Thermal Camera Prototype for Predictive Maintenance in Photovoltaic Applications Based on TinyML Embedded System', in *Electrimacs 2024*, 2024.
8. E. Ozturk, E. Ogliari, M. Sakwa, A. Dolara, N. Blasuttigh, and A. Massi Pavan, 'Photovoltaic modules fault detection, power output, and parameter estimation: A deep learning approach based on electroluminescence images', *Energy Conversion and Management*, vol. 319, p. 118866, Nov. 2024
9. N. Drir, F. Chekired, A. Mellit, and N. Blasuttigh, 'Hybrid CNN-EML model for fault diagnosis in electroluminescence images of photovoltaic cells', *Renewable Energy*, vol. 250, p. 123343, Sep. 2025
10. A. Mellit, A. Massi Pavan, and V. Lughi, 'Deep learning neural networks for short-term photovoltaic power forecasting', *Renewable Energy*, vol. 172, pp. 276–288, Jul. 2021