

PREDIZIONE DELLE ENERGIE RINNOVABILI IN APPLICAZIONI A SITI MULTIPLI ATTRAVERSO RETI NEURALI A GRAFO

Alessio Verdone, Simone Scardapane, Rodolfo Araneo, Massimo Panella

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Elettronica e Telecomunicazioni (DIET)
Università degli Studi di Roma "La Sapienza"
Via Eudossiana 18, 00184 Roma

Il settore dell'energia rinnovabile è al centro della transizione ecologica, con una crescente diffusione di fonti come il solare e l'eolico all'interno dei sistemi elettrici [1]. Tuttavia, la natura intrinsecamente variabile di queste fonti pone sfide significative in termini di previsione della produzione. Negli ultimi anni, le metodologie di previsione si sono evolute da approcci statistici a modelli di deep learning, includendo ora tecniche avanzate come le Spatio-Temporal Graph Neural Networks (STGNNs) o architetture basate su State-Space Models (SSMs) [2, 3]. Parallelamente, l'interesse verso nuovi paradigmi computazionali, tra cui il quantum computing, ha aperto ulteriori possibilità metodologiche, specialmente in ambiti ad alta dimensionalità e complessità topologica [4].

Nel corso dell'ultimo anno, l'attività di ricerca ha incluso sia lavori di revisione dello stato dell'arte che sperimentazioni su nuovi modelli predittivi. Sul piano applicativo, è stata condotta una revisione sistematica delle tecniche di previsione solare ed eolica, con un'attenzione particolare al passaggio dal paradigma *single-site* a quello *multi-site* [5]. Lo studio ha messo in evidenza i vantaggi derivanti dall'integrazione dell'informazione spaziale tra impianti, in particolare attraverso strutture dati a grafo e modelli STGNNs. Sono stati classificati oltre cento contributi scientifici recenti, evidenziando i trend metodologici, le caratteristiche dei dataset utilizzati e i criteri di valutazione delle performance. Una visualizzazione della categorizzazione è riportata in Fig. 1.

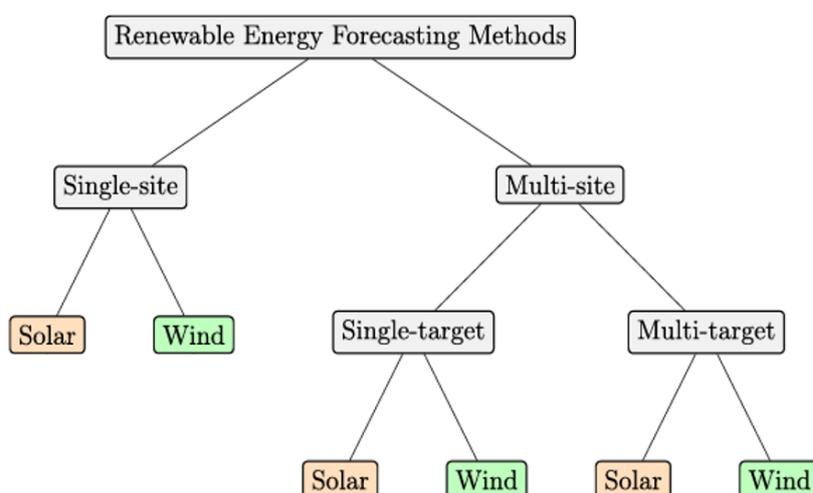


Figura 1 - Categorizzazione di alto livello degli articoli recensiti. I lavori in letteratura vengono classificati innanzitutto in base al numero di siti e poi in base alle fonti di energia rinnovabile.

Parallelamente, è stato realizzato un lavoro di carattere metodologico con l'obiettivo di analizzare e categorizzare lo stato dell'arte dei Quantum Graph Neural Networks (QGNNs), un ambito emergente che coniuga le potenzialità della computazione quantistica con le architetture

GNN. Il lavoro, sottomesso a *IEEE TPAMI*, presenta una tassonomia estesa dei modelli QGNN, esplorando criticamente le potenzialità computazionali ed applicative, e le sfide ancora aperte come la coerenza quantistica e la scalabilità su hardware NISQ.

Infine, è stata esplorata l'efficacia dei Graph State-Space Models nel contesto del forecasting spatio-temporale dell'energia rinnovabile, con particolare riferimento alla produzione fotovoltaica e alla generazione eolica. Lo studio ha introdotto una prima applicazione del modello STG-Mamba per la previsione multi sito di impianti eolici e fotovoltaici. I risultati sperimentali indicano che i modelli basati su SSM riescono a catturare in modo efficiente le dipendenze tra le variabili spaziali e temporali, con prestazioni migliori rispetto ai modelli STGNN e con un costo computazionale ridotto.

In conclusione, le attività condotte testimoniano una traiettoria di ricerca volta all'integrazione di tecniche avanzate di modellazione predittiva e all'esplorazione di paradigmi computazionali innovativi, in risposta alle sfide crescenti della gestione intelligente dei sistemi energetici basati su fonti rinnovabili. Il lavoro futuro si concentrerà sull'implementazione di modelli ibridi interpretabili e sulla validazione in scenari di produzione reale e comunità energetiche distribuite.

La presente ricerca è stata in parte svolta (M. Panella, R. Araneo) nell'ambito del progetto PRIN 2022 "BERENICE -Battery Energy management systems for renewable and citizen energy Communities", codice P2022R3L83, finanziato dall'Unione Europea – Next generation EU, CUP B53D23024050001, e in parte svolta (A. Verdone) nell'ambito del Dottorato in Ingegneria dell'Informazione e delle Comunicazioni (ICT) di cui al D.M. n.1061/2021 del MUR.

Riferimenti bibliografici

- [1] P.A. Østergaard, N. Duic, Y. Noorollahi, S.A. Kalogirou, "Recent advances in renewable energy technology for the energy transition", *Renewable Energy*, 179, pp.877-884, 2021.
- [2] A. Verdone, S. Scardapane, M. Panella, "Explainable spatio-temporal graph neural networks for multi-site photovoltaic energy production", *Applied Energy*, 353, p.122151, 2024.
- [3] A. Verdone, S. Scardapane, R. Araneo, M. Panella, "On the Exploration of Graph State-Space Models for Spatio-Temporal Renewable Energy Forecasting", *2024 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2024 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)* (pp. 1-5). IEEE, 2024.
- [4] A. Ceschini, F. Mauro, F. De Falco, A. Sebastianelli, A. Verdone, A. Rosato, B. Le Saux, M. Panella, P. Gamba, S.L. Ullo, "From Graphs to Qubits: A Critical Review of Quantum Graph Neural Networks", <https://arxiv.org/abs/2408.06524>, sottomesso a *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2024.
- [5] A. Verdone, M. Panella, E. De Santis, A. Rizzi, "A review of solar and wind energy forecasting: From single-site to multi-site paradigm", *Applied Energy*, Volume 392, 2025.