

# PIANO TRIENNALE DI REALIZZAZIONE 2025-2027 DELLA RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE

Presentazione dei progetti di ricerca di cui all'art. 10 comma 2, lettera a) del  
decreto 26 gennaio 2000

## Tema di ricerca 2.3A

### Titolo del progetto

#### Evoluzione e pianificazione delle reti elettriche

- Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile [ENEA]
- Politecnico di Bari [POLIBA]
- Politecnico di Torino - Dipartimento Energia [POLITO-DENERG]
- Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli" - Dipartimento di Ingegneria [UNICAMP-DI]
- Università degli Studi di Cagliari - Dipartimento di Ingegneria Elettrica ed Elettronica [UNICA-DIEE]
- Università degli Studi di Palermo - Dipartimento di Ingegneria [UNIPA-DI]
- Università di Pisa - Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni [UNIPI-DESTEC]

**Durata del progetto: 36 mesi**

**Costo proposto: 3.600.000,00 €**

## 2. DATI GENERALI DEL PROGETTO

### 2.1 Dati progetto

**Titolo del progetto**

Evoluzione e pianificazione delle reti elettriche

**Durata del progetto**

36 mesi

### 2.2 Descrizione progetto

**Abstract del progetto**

Il cambiamento climatico rappresenta una delle sfide più critiche per le infrastrutture energetiche a livello globale, influenzando sia la generazione che la distribuzione dell'energia elettrica. Le mutate condizioni ambientali e la crescente frequenza di eventi estremi, come ondate di calore, precipitazioni intense e fenomeni meteorologici severi, stanno mettendo sotto pressione i sistemi elettrici, evidenziandone la vulnerabilità. Tali eventi possono danneggiare i componenti fisici delle reti, ridurre le prestazioni e compromettere la continuità del servizio. Diventa quindi imprescindibile aggiornare gli strumenti di pianificazione delle reti elettriche per affrontare questi nuovi scenari.

Adattare le reti elettriche ai cambiamenti climatici richiede metodologie innovative e tecnologie avanzate. Gli strumenti adottati devono garantire resilienza e flessibilità in contesti operativi sempre più complessi. Il presente progetto si inserisce in questo quadro, proponendo interventi mirati all'innovazione nella pianificazione e gestione delle reti elettriche, con l'obiettivo di aumentarne la resilienza e assicurare sicurezza ed efficienza energetica in un contesto di crescente imprevedibilità climatica.

Il progetto si propone di raggiungere obiettivi strategici volti a rendere la rete elettrica più robusta e resiliente. Il primo obiettivo è la realizzazione di uno studio sperimentale per analizzare la risposta dei componenti della rete a condizioni di stress ambientale. La mancanza di dati pubblici e di riferimento rappresenta un ostacolo per l'analisi dettagliata degli impatti climatici. Attraverso test empirici, il progetto raccoglierà dati essenziali per colmare questa lacuna e sviluppare modelli predittivi più accurati, rendendo più accurata la pianificazione delle reti. In linea con questo obiettivo, saranno anche condotte valutazioni teoriche e sperimentali sugli effetti degli stress termici e delle distorsioni armoniche sulla rete, analizzando anche soluzioni per la loro mitigazione.

Un secondo obiettivo chiave è lo sviluppo di modelli avanzati per prevedere il consumo e la generazione di energia sia a breve che a lungo termine. Le attuali tecniche di machine learning, utilizzate per le previsioni a breve termine, si basano su grandi quantità di dati storici e risultano quindi inadatte nei contesti in cui questi dati sono limitati. Il progetto esplorerà l'adozione di modelli predittivi globali, capaci di fornire previsioni accurate anche in contesti di scarsità dei dati. Per la previsione a lungo termine, saranno sviluppati modelli di simulazione che combinano profili di carico termico ed elettrico con scenari climatici proiettati su un orizzonte di 25 anni, migliorando la precisione delle previsioni e supportando la pianificazione delle reti elettriche intelligenti.

Un altro obiettivo del progetto riguarda lo sviluppo di modelli avanzati di pianificazione delle reti elettriche. Una prima innovazione consiste nell'integrazione di variabili sociologiche negli algoritmi di ottimizzazione multi-obiettivo. Tradizionalmente focalizzati su aspetti tecnici, questi modelli trascurano spesso l'accettazione sociale delle nuove tecnologie, fattore che influenza l'effettiva disponibilità di flessibilità dei carichi energetici. Considerare queste variabili migliorerà la stima del carico effettivamente disponibile, rendendo le soluzioni più realistiche e applicabili.

I modelli di pianificazione basati su ottimizzazione multiobiettivo, che utilizzeranno i dati previsionali di generazione e carico valutati con le tecniche descritte in precedenza, genereranno soluzioni ottimizzate. Queste, insieme ai modelli affidabilistici dei componenti e della fornitura (ulteriore output del progetto), saranno integrati in un software freeware sviluppato da ENEA, uno dei principali risultati innovativi della presente proposta progettuale. L'impiego di un risolutore OPF consentirà di individuare le aree critiche delle reti elettriche in scenari energetico-ambientali futuri, ovvero aree particolarmente vulnerabili, per la presenza di uno più elementi (es. nodi, linee, ecc.) in cui si rilevano criticità (es. scostamenti significativi di prefissate grandezze fisiche rispetto a valori soglia prestabiliti). Questi strumenti forniranno un supporto prezioso per la pianificazione strategica delle reti, consentendo ai gestori di infrastrutture di prendere decisioni più informate e di pianificare interventi preventivi in modo più efficace.

Un'ulteriore innovazione riguarda lo sviluppo di modelli basati su un approccio "risk-based". Questa metodologia consente di gestire le incertezze che caratterizzano lo sfruttamento della flessibilità dalle risorse energetiche presenti nelle reti elettriche di distribuzione, individuando soluzioni robuste di pianificazione a lungo termine in grado di aumentarne l'Hosting Capacity e di migliorarne la resilienza. Lo strumento di pianificazione sviluppato si baserà su tecniche di ottimizzazione multi-obiettivo e multi-periodo. Rispetto alle tecniche tradizionali, questo approccio offre soluzioni più dinamiche e adattabili ai cambiamenti futuri del sistema energetico, rappresentando un progresso significativo rispetto allo stato attuale delle conoscenze.

Parallelamente, il progetto analizzerà le basi teoriche e matematiche necessarie per implementare il controllo di wide-synchronization

nelle reti di distribuzione, inclusi i sistemi MVDC. L'obiettivo è migliorare la sicurezza e la stabilità del sistema elettrico, evidenziando le differenze con i sistemi di trasmissione e individuando i vincoli da considerare per l'applicazione di questo controllo. Saranno valutati i vantaggi di questa tecnologia in termini di sicurezza e stabilità, insieme ai suoi limiti di applicazione.

Un ulteriore risultato atteso è lo sviluppo di un prototipo di convertitore grid-forming, progettato per supportare la rete e integrare funzionalità di diagnostica avanzata. Questa innovazione sarà cruciale per rafforzare la stabilità della rete, sempre più messa a rischio dall'integrazione crescente di fonti rinnovabili.

Il progetto prevede inoltre uno studio di fattibilità per valutare la possibilità di definire modelli capaci di valutare o prevedere gli effetti delle condizioni meteorologiche estreme sulle infrastrutture elettriche locali.

Infine, il progetto realizzerà un Digital Twin di una rete di distribuzione idrica per analizzare l'interoperabilità tra reti elettriche e altre infrastrutture di servizio. Questo strumento permetterà di valutare l'impatto di eventuali malfunzionamenti della rete elettrica sulle infrastrutture idriche, offrendo una visione integrata delle criticità infrastrutturali e migliorando la capacità di prevenzione dei disservizi a catena.

In conclusione, attraverso studi sperimentali, lo sviluppo di modelli predittivi avanzati e la realizzazione di strumenti software e hardware prototipali, il progetto migliorerà la capacità di pianificazione a lungo termine. Fornirà agli operatori energetici strumenti più precisi e dinamici per affrontare le nuove sfide ambientali, rafforzando la resilienza del sistema a beneficio degli utenti e offrendo dati cruciali ai decisori politici per valutare l'impatto del cambiamento climatico sulle infrastrutture critiche.

### Abstract del progetto ENG

Climate change is emerging as one of the most critical challenges for energy infrastructure worldwide, affecting both power generation and distribution. Changing environmental conditions and the increasing frequency of extreme events—such as heatwaves, intense precipitation, and severe weather phenomena—are putting significant pressure on electrical systems, highlighting their vulnerabilities. These events can damage physical network components, reduce performance, and compromise service continuity. It is therefore essential to update power grid planning tools to effectively address these evolving challenges.

Adapting power grids to climate change requires innovative methodologies and advanced technologies. The tools employed must ensure resilience and flexibility in increasingly complex operational contexts. This project fits within this framework, proposing targeted innovations in power grid planning and management. The objective is to enhance grid resilience while ensuring security and energy efficiency in an environment characterized by growing climatic unpredictability.

The project aims to achieve strategic goals focused on strengthening the power grid's robustness and resilience. The first objective is to conduct an experimental study analyzing how grid components respond to environmental stress conditions. Currently, the lack of publicly available reference data poses a significant barrier to detailed climate impact assessments. Through empirical testing, the project seeks to collect essential data to fill this gap and develop more accurate predictive models, improving grid planning accuracy. In line with this goal, theoretical and experimental evaluations will also be conducted to assess the effects of thermal stress and harmonic distortions on the network, as well as potential mitigation solutions.

A second key objective is the development of advanced models for forecasting energy consumption and generation over both short and long-time horizons. Current machine learning techniques for short-term forecasting rely on large amounts of historical data, making them unsuitable in contexts where such data is scarce. This project will explore the adoption of global predictive models capable of delivering accurate forecasts even in data-limited scenarios. For long-term forecasting, simulation models will be developed to integrate thermal and electrical load profiles with climate projections over a 25-year horizon. This approach will significantly enhance forecasting accuracy and provide strategic support for planning smart power grids.

Another focus of the project is the development of advanced power grid planning models. One key innovation is the integration of sociological variables into multi-objective optimization algorithms. Traditionally, these models have focused on technical aspects, often overlooking social acceptance of new technologies—an important factor influencing the actual flexibility of energy loads. Incorporating these variables will improve the estimation of available load flexibility, making proposed solutions more realistic and applicable. Multi-objective optimization-based planning models, utilizing the predictive generation and load data described earlier, will generate optimized solutions. These solutions, along with reliability models for components and supply systems (another key project outcome), will be analyzed using open-source software—one of the project's most innovative contributions. The use of an OPF solver will help identify critical areas in future energy-environmental scenarios, pinpointing network vulnerabilities due to specific elements (e.g., nodes, lines) experiencing significant deviations from predefined threshold values. These tools will provide invaluable support for strategic grid planning, enabling infrastructure managers to make more informed decisions and implement preventive measures more effectively. Another key innovation lies in the development of models based on a risk-based approach. This methodology enables the management of uncertainties associated with leveraging the flexibility of distributed energy resources, identifying robust long-term planning solutions that enhance hosting capacity and improve overall resilience. The developed planning tool will rely on multi-objective, multi-period optimization techniques. Compared to traditional methods, this approach offers more dynamic and adaptable solutions, making it a significant advancement in energy system planning.

In parallel, the project will explore the theoretical foundations and mathematical models necessary to implement wide-synchronization control in distribution networks, including MVDC systems. The goal is to enhance the security and stability of the power system by

identifying key differences from transmission networks and determining constraints for practical implementation. The benefits of this technology in terms of system security and stability will be assessed, along with its limitations.

Another anticipated outcome is the development of a grid-forming converter prototype, designed to support the network while integrating advanced diagnostic capabilities. This innovation will be crucial for enhancing grid stability, which is increasingly at risk due to the growing penetration of renewable energy sources.

The project will also conduct a feasibility study to evaluate the potential for developing models that assess or predict the impact of extreme weather conditions on local electrical infrastructure.

Finally, a Digital Twin of a water distribution network will be developed to analyze interoperability between power grids and other infrastructure systems. This tool will assess the impact of power network malfunctions on water infrastructure, providing an integrated view of critical infrastructure challenges and improving the ability to prevent cascading failures.

Through a combination of experimental studies, the development of advanced predictive and planning models, and the creation of prototype software and hardware tools, this project will enhance long-term energy planning capabilities. It will provide energy operators with more precise and dynamic tools to address emerging environmental challenges, strengthening overall system resilience for the benefit of end-users while delivering crucial insights for policymakers on the impact of climate change on critical infrastructure.

### 2.3 TRL progetto

TRL iniziale: 4

TRL finale: 5

Gli strumenti attuali per la pianificazione delle reti elettriche si collocano tra i livelli TRL 6 e 8, a seconda della tipologia e dell'applicazione specifica. Alcuni strumenti, sviluppati e testati in contesti reali rilevanti, come casi studio o progetti pilota, si attestano a TRL 6. Questi strumenti sono in grado di simulare scenari energetici e valutare l'impatto delle politiche energetiche in situazioni specifiche. Altri, più avanzati, sono adottati da utility e aziende per la pianificazione strategica e operativa delle risorse di rete, raggiungendo il TRL 8 in quanto impiegati in ambienti operativi e qualificati per la gestione delle reti negli attuali scenari energetici.

Tuttavia, gli strumenti di pianificazione a TRL 8, pur essendo consolidati ed efficaci nelle condizioni operative attuali, non tengono conto delle nuove sfide energetiche e dei cambiamenti climatici in corso. Inoltre, non integrano a livello operativo le funzionalità innovative necessarie per accelerare la transizione energetica.

Gli studi, i modelli e le soluzioni proposte in questa iniziativa progettuale sono ancora in fase di ricerca e, secondo la letteratura tecnico-scientifica, si collocano a un livello TRL compreso tra 3 e 4. L'obiettivo del progetto è incrementare il TRL fino a 5, sviluppando metodologie, modelli e strumenti in grado di affrontare le peculiarità dei futuri contesti energetici e le problematiche emergenti legate al cambiamento climatico.

### 2.4 Inquadramento del progetto nello stato dell'arte

#### a) Stato dell'arte nazionale e internazionale relativamente alle attività previste nel progetto

Il cambiamento climatico sta influenzando in modo significativo le reti elettriche, alterando la generazione e la distribuzione dell'energia sia direttamente che indirettamente a causa delle mutate condizioni ambientali (es. aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi meteorologici estremi, variazioni nella domanda energetica che modificano i modelli di consumo, impatto delle condizioni climatiche sulla produzione di energia rinnovabile, ecc.). Pertanto, è fondamentale aggiornare gli strumenti di pianificazione delle reti elettriche, adottando nuovi metodi, strumenti e strategie che modellino i nuovi scenari e contesti operativi.

Negli ultimi anni, il campo degli strumenti di pianificazione ed esercizio dei sistemi di potenza ha visto notevoli sviluppi. Tra questi, alcuni studi recenti ([1], [2]) hanno evidenziato una serie di innovazioni significative. In particolare, sono stati introdotti nuovi approcci come: (1) l'inclusione delle coordinate geografiche nelle simulazioni, per una maggiore precisione nelle previsioni; (2) l'analisi delle perturbazioni geomagnetiche, che possono influire negativamente sulle reti elettriche; (3) l'uso dei dati meteorologici in tempo reale nelle simulazioni, per migliorare la capacità di previsione; (4) l'integrazione di tecniche avanzate di machine learning e intelligenza artificiale per la previsione di eventi meteorologici e guasti; (5) l'implementazione di modelli di gestione del carico (demand side management) per abilitare un utilizzo flessibile delle reti elettriche; (6) lo sviluppo di nuovi algoritmi per il calcolo dell'Optimal Power Flow (OPF) e del Security-Constrained Optimal Power Flow (SCOPF) che amplia l'OPF standard introducendo vincoli aggiuntivi legati alla sicurezza del sistema, come la stabilità del sistema e la capacità di reagire a guasti imprevisti, ad esempio attraverso la riconfigurazione della rete. Gli SCOPF, in particolare, sono progettati per ottimizzare la distribuzione dell'energia anche in scenari di emergenza, come guasti a linee o generatori, e per garantire il funzionamento sicuro della rete, tenendo conto delle fonti rinnovabili disponibili e della flessibilità della rete. Sebbene questi strumenti siano stati ampiamente testati per le condizioni attuali, sia climatiche che tecnologiche, è necessario sviluppare

configurazioni, metodi e modelli che rispondano alle nuove esigenze del sistema elettrico. In tal senso, diventa fondamentale:

- Implementare CONFIGURAZIONI TECNOLOGICHE e ARCHITETTURE DI RETE AVANZATE per raggiungere gli obiettivi della transizione energetica, favorendo il coinvolgimento delle risorse distribuite nell'esercizio della rete [3].

Il coinvolgimento delle risorse energetiche distribuite (Distributed Energy Resources) presenti nei sistemi di distribuzione nella regolazione del sistema elettrico è un aspetto fondamentale per il mantenimento della stabilità e dell'affidabilità del sistema. Con la crescente integrazione di DER nei sistemi di distribuzione, i metodi tradizionali di regolazione del sistema elettrico stanno evolvendo per integrare il potenziale contributo delle nuove tecnologie. In questo contesto, le strategie di controllo si possono dividere in due grandi categorie: tecniche di controllo locale, tipicamente basate sui sistemi di controllo dei convertitori di potenza; algoritmi di controllo distribuito, basate sul coordinamento a differenti livelli gerarchici delle DER in una data porzione di sistema. Se però da un lato numerosi lavori in letteratura affrontano le modalità di partecipazione delle DER alla regolazione del sistema elettrico, non esiste sufficiente letteratura scientifica in merito alle possibilità di coinvolgimento di DER in architetture di controllo wide-area. In questo senso, la scalabilità e la robustezza delle architetture considerate rappresentano un ambito di ricerca chiave, mirando a strategie di controllo in grado di adattarsi al numero crescente e variabile di DER presenti nei sistemi di distribuzione.

- Considerare VARIABILI AGGIORNATE E AMPIATE che riflettano il nuovo contesto energetico. Per esempio, i modelli OPF e SCOPF dovrebbero considerare non solo la flessibilità teorica ottenibile dai carichi potenzialmente controllabili, ma anche variabili sociologiche che possono influire sulla disponibilità reale di questa flessibilità. Spesso, infatti, si tende a trascurare fattori come il comportamento dei consumatori e l'accettazione sociale delle nuove tecnologie, che potrebbero influenzare i risultati calcolati dagli algoritmi incidendo sulla previsione del carico utile effettivamente utilizzabile ([4], [5], [6], [7], [8], [9]).
- Sviluppare MODELLI PREVISIONALI che tengano conto dell'evoluzione delle condizioni climatiche. Questo aspetto è essenziale, poiché la disponibilità di previsioni accurate influenza il calcolo della capacità di generazione e di distribuzione dell'energia delle reti elettriche. Sul fronte della distribuzione, l'aumento di frequenza e intensità degli eventi meteorologici estremi sottopone a forte stress le infrastrutture elettriche, causando possibili danni diretti. Ad esempio, le temperature elevate per periodi prolungati, tipicamente associate alle ondate di calore, possono compromettere il funzionamento dei componenti della rete e ridurre l'efficienza operativa complessiva, provocando interruzioni e guasti. Le ondate di calore, inoltre, producono generalmente un incremento della richiesta elettrica per la climatizzazione, accrescendo il rischio di sovraccarichi e congestioni della rete. Sul versante della generazione, l'incertezza nella previsione della produzione energetica, soprattutto per le fonti rinnovabili che dipendono da condizioni meteorologiche variabili come solare ed eolico, rende più complicata la pianificazione delle reti elettriche. Le alte temperature, durante le ondate di calore, ad esempio, possono comportare una riduzione della capacità produttiva teorica degli impianti fotovoltaici, rendendo meno affidabili le stime di producibilità fornite dai modelli previsionali [10].
- Introdurre MODELLI AVANZATI DI PREVISIONE DEL CONSUMO ENERGETICO, che utilizzano tecniche innovative come i modelli fondazionali, per ovviare alla scarsità di dati e alla difficoltà di applicare modelli predittivi efficaci in contesti con nuove utenze o dati incompleti ([11], [12]).
- Ottimizzare la PROGETTAZIONE DEGLI APPARATI HARDWARE e, in particolare, per l'elettronica di potenza presente nelle reti, per tener conto dei mutati scenari energetici. Il ruolo di tali apparati, inizialmente limitato alla conversione dell'energia generata da fonti rinnovabili (DC/AC, DC/DC e AC/AC) ed alla power quality (filtri attivi, STATCOM), deve essere oggi esteso alla capacità di contribuire alla stabilità e resilienza della rete (convertitori Grid Forming, Virtual Synchronous Compensators - VSG). L'installazione di un convertitore grid forming con capacità di assistenza alla rete di tipo VSG inverte la criticità "più rinnovabili, meno stabilità", aumentando la stabilità della rete anziché pregiudicarla al crescere della quantità di rinnovabili. Attualmente, la letteratura tecnica di settore propone diverse modalità di controllo di convertitori per l'emulazione del comportamento da macchina sincrona. Gli studi disponibili riportano modalità di controllo generalmente verificate in ambiente di simulazione. Non sono, invece, disponibili risultati di campagne di test di tali apparati all'interno di reti e microreti sperimentali.
- Fornire DATASET SPERIMENTALI per supportare studi più precisi e affidabili. La disponibilità di dataset sperimentali, ad esempio sulla correlazione tra guasti dei componenti e parametri termoelettrici, sulle interruzioni del servizio nella rete di distribuzione e sugli impatti delle condizioni meteo sulle infrastrutture, rappresenta un valore aggiunto per la ricerca e l'industria. Questi dati favoriscono lo sviluppo di modelli più accurati, con un potenziale miglioramento dell'affidabilità della fornitura e benefici diretti per gli utenti finali. Tuttavia, ad oggi, tali dataset non vengono resi disponibili dagli operatori commerciali, come i produttori di componentistica per le reti. ENEA, nell'ambito del Progetto 2.3 Piano Triennale 2022-2024, ha avviato una serie di test sperimentali che proseguiranno nel corso del prossimo triennio. I dati del triennio 2022-2024 sono resi disponibili, a valle del processo di valutazione, sul sito della Ricerca di Sistema ENEA.

Infine, esistono pochi studi che analizzano in modo integrato il funzionamento delle diverse reti [13], ad esempio, gli effetti a cascata di un malfunzionamento di una infrastruttura di distribuzione su un'altra. È essenziale condurre un'analisi coordinata delle infrastrutture critiche per garantire che le reti elettriche possano rispondere efficacemente ai futuri scenari. Le interruzioni nella fornitura di energia elettrica possono avere un impatto significativo su altri servizi e forniture ad esse interconnesse. Ad esempio, i malfunzionamenti della rete elettrica possono influenzare infrastrutture critiche (es. telecomunicazioni, trasporto elettrico, reti di distribuzione idrica); le interruzioni dell'elettricità possono, pertanto, generare effetti a cascata che compromettono il funzionamento dei servizi connessi a tali

reti. Nonostante una crescente consapevolezza riguardo all'importanza di tali interconnessioni, gli studi tecnici disponibili non offrono una comprensione adeguata di queste dinamiche, evidenziando una lacuna significativa nella pianificazione delle reti elettriche, che dovrebbe probabilmente includere alcuni di questi apparati tra i carichi critici prioritari.

- [1] Adam B. Birchfeld, Thomas J. Overbye, "A Review on Providing Realistic Electric Grid Simulations for Academia and Industry", 2023, *Current Sustainable/Renewable Energy Reports* 10:154–161, <https://doi.org/10.1007/s40518-023-00212-7>
- [2] Hans-Kristian Ringkjøb et al., "A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewables", 2018, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 96, Pages 440-459, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.002>
- [3] Yasser Nassar, Ibrahim Mangir, Ahmad Hafez, Hala El-Khozondar, Mansour Salem, Hilmy Awad, "Feasibility of innovative topography-based hybrid renewable electrical power system: A case study", *Cleaner Engineering and Technology*, 2023, Volume 14, 100650, ISSN 2666-7908, <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100650>.
- [4] Hucklebrink, David, and Valentin Bertsch, "Integrating Behavioural Aspects in Energy System Modelling—A Review", 2021, *Energies* 14, no. 15: 4579. <https://doi.org/10.3390/en14154579>
- [5] Senkpiel, Charlotte, Audrey Dobbins, Christina Kockel, Jan Steinbach, Ulrich Fahl, Farina Wille, Joachim Globisch, Sandra Wassermann, Bert Droste-Franke, Wolfgang Hauser, Claudia Hofer, Lars Nolting and Christiane Bernath. "Integrating methods and empirical findings from social and behavioural sciences into energy system Models—Motivation and possible approaches", 2020, *Energies*, 13(18), 4951. <https://doi.org/10.3390/en13184951>, <https://doi.org/10.3390/en14154579>
- [6] Alexandra Krumm, Diana Süsler, Philipp Blechinger "Modelling social aspects of the energy transition: What is the current representation of social factors in energy models?", (2022) *Energy*, Volume 239, Part A, 2022, 121706, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121706>
- [7] Miguel Chang, Jakob Zink Thellufsen, Behnam Zakeri, Bryn Pickering, Stefan Pfenninger, Henrik Lund, Poul Alberg Østergaard "Trends in tools and approaches for modelling the energy transition", 2021, *Applied Energy*, Volume 290, 116731, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116731>.
- [8] Marte Fodstad, Pedro Crespo del Granado, Lars Hellemo, Brage Rugstad Knudsen, Paolo Pesciella, Antti Silvast, Chiara Bordin, Sarah Schmidt, Julian Straus, "Next frontiers in energy system modelling: A review on challenges and the state of the art", 2022, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 160, 112246, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112246>.
- [9] Jann Michael Weinand, Fabian Scheller, Russell McKenna, "Reviewing energy system modelling of decentralized energy autonomy", 2023, *Energy*, Volume 203, 117817, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117817>.
- [10] Daniel D. Tripp, Joseph E. Trujillo-Falcón, Kim E. Klockow-McClain, Heather D. Reeves, Kodi L. Berry, Jeff S. Waldstreicher, and James A. Nelson "Foundational Needs of Forecasters for Probabilistic Winter Forecasting", 2023, *Weather and Forecasting Journal*, Volume 38, issue 1, DOI: <https://doi.org/10.1175/WAF-D-22-0116.1>
- [11] Susana Santos, Helena Martins Gonçalves, "The consumer decision journey: A literature review of the foundational models and theories and a future perspective", *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 173, 2021, 121117, ISSN 0040-1625, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121117>;
- [12] Hussain Kazmi, Chun Fu, Clayton Miller, "Ten questions concerning data-driven modelling and forecasting of operational energy demand at building and urban scale", 2023, *Building and Environment*, Volume 239, 110407, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110407>.
- [13] Konstantinos Oikonomou, Kendall Mongird, Jennie S. Rice and Juliet S. Homer, "Resilience of Interdependent Water and Power Systems: A Literature Review and Conceptual Modeling Framework", 2021, *Water*, 13, 2846, <https://doi.org/10.3390/w13202846>

## b) Attività svolte nel triennio precedente

Le attività della presente proposta progettuale si pongono in continuità con:

- Progetto 2.3: "Evoluzione, pianificazione, gestione ed esercizio delle reti – WP Evoluzione, pianificazione, gestione ed esercizio delle reti elettriche in ottica di valutazione e miglioramento di adeguatezza, sicurezza e resilienza elettriche" del Piano Triennale della Ricerca di Sistema 2022-2024.

ENEA, POLIBA, POLITO, UNIPA e UNICA hanno partecipato, rispettivamente come affidatario e co-beneficiari, al progetto 2.3. Tra i prodotti della ricerca, è stato sviluppato uno strumento software open source (ArsTool), installabile in ambiente Windows, dedicato alla valutazione dell'adeguatezza, dell'affidabilità, della sicurezza e della resilienza delle reti elettriche. Attraverso una specifica interfaccia grafica, l'utente può creare o importare modelli di rete, inserendo i parametri tipici e le informazioni topologiche. Nel corso del presente triennio, sarà sviluppato un software basato sui moduli e sulle caratteristiche disponibili nello strumento software ArsTool, arricchendolo con i risultati della ricerca del presente progetto e implementando una nuova gestione grafica della rete attualmente non disponibile. Inoltre, nell'ambito del progetto 2.3, ENEA ha progettato e realizzato una vasca prototipale che consente di sperimentare come variano le grandezze elettriche e fisiche di interesse al variare delle condizioni di temperatura e/o umidità. Questa vasca potrà essere utilizzata per effettuare test online e creare dataset di dati sperimentali sul comportamento dei componenti delle reti elettriche sottoposti a stress di tipo termoigrometrico.

Infine, la metodologia per la previsione della produzione energetica a lungo termine, basata principalmente su dati storici e sviluppata nell'ambito del progetto 2.3, sarà utilizzata come base per elaborare una metodologia per le previsioni di generazione orarie, a partire dal downscale di dati climatici ottenuti da OpenMeteo.

Nell'ambito del progetto 2.3, POLIBA ha sviluppato una metodologia analitica di riconfigurazione ottimale delle reti (ONR). Nel corso di questo progetto, la metodologia ONR sarà estesa al fine di potersi adattare a problemi di molteplice natura, ivi inclusi problemi di pianificazione delle reti.

Il co-beneficiario POLITO, nel precedente progetto 2.3, ha progettato un prototipo di convertitore grid-forming trifase a tensione e frequenza industriale 400V, 50Hz di taglia 100 kVA. Nel corso del presente progetto verrà completata la fase di assemblaggio e validazione del convertitore e saranno integrate funzioni di diagnostica aggiuntiva.

Il co-beneficiario UNICA, nel precedente progetto 2.3, ha sviluppato modelli per la pianificazione della gestione delle reti elettriche di distribuzione con capacità di formazione di isole autonome intenzionali o microreti in ottica di miglioramento dell'adeguatezza e sicurezza delle singole isole e resilienza nell'intero sistema di distribuzione. Tale attività sarà estesa nel progetto 2.3a e, in particolare, saranno implementati modelli e metodi di calcolo innovativi per la pianificazione risk-based a lungo termine delle reti elettriche di distribuzione MT finalizzata all'incremento dell'Hosting Capacity e il miglioramento della resilienza.

Il co-beneficiario UNIPA, nel precedente progetto 2.3, ha sviluppato un modello per la analisi in simulazione dell'impatto delle influenze esterne sulla sicurezza, adeguatezza e resilienza di porzioni di reti. Tale attività si è conclusa nel triennio 2022-2024 e non sarà estesa nel progetto 2.3a. Nel triennio, infatti, UNIPA focalizzerà la propria ricerca sull'applicazioni del Wide-Synchronization Control nelle reti di distribuzioni ibride per incrementare la sicurezza e la stabilità.

- Progetto 2.7: "Modelli e strumenti per incrementare l'efficienza energetica nel ciclo di produzione, trasporto e distribuzione dell'elettricità – WP Analisi delle problematiche di gestione per l'integrazione nelle attuali reti in AC di nuove reti in DC in MT/BT (Media Tensione/Bassa Tensione)" del Piano Triennale della Ricerca di Sistema 2019-2021. Più nello specifico, i modelli affidabilistici dei componenti presenti in una rete elettrica, già sviluppati nell'ambito di tale progetto, verranno estesi per considerare nuovi modelli (es.: linee interrattate) e l'impatto dei cambiamenti climatici sui componenti stessi.

Relativamente ai progetti in corso di realizzazione, le attività della presente proposta risultano complementari a quelle svolte da RSE nell'ambito del progetto 2.3a. Come dettagliato nel Piano di Coordinamento allegato alla presente proposta, gli obiettivi generali delle due proposte progettuali sono stati discussi e concordati preventivamente dai due affidatari per evitare sovrapposizioni. Pertanto, i prodotti della ricerca sviluppati dai due affidatari in relazione ai temi affrontati nel progetto risulteranno non solo complementari ma anche sinergici, contribuendo a una gamma completa di soluzioni per il beneficiario della Ricerca di Sistema.

### c) Obiettivi scientifici e tecnologici e progressi attesi rispetto allo stato dell'arte

Il cambiamento climatico, come illustrato nel paragrafo dello stato dell'arte, pone delle sfide alla pianificazione e alla gestione delle reti elettriche. È quindi cruciale condurre studi che consentano di riprodurre scenari rappresentativi delle nuove condizioni operative dei sistemi elettrici e implementare nuovi metodi, modelli e strategie che rispondano a tali mutate condizioni. Di seguito, si riportano i principali obiettivi del progetto e i relativi avanzamenti rispetto allo stato dell'arte e ai risultati raggiunti in precedenti Piani triennali della Ricerca di sistema.

- Condurre studi sperimentali del comportamento dei componenti di rete elettrica sottoposti a stress termo-igrometrici finalizzati all'implementazione di dataset di alta qualità

Come già richiamato, la mancanza di dati pubblici rappresenta un ostacolo significativo per l'analisi degli impatti delle variazioni climatiche sui componenti di rete. Temperature elevate, umidità ridotta, umidità eccessiva, presenza di livelli anomali di acqua e altre condizioni ambientali anomale possono influenzare le prestazioni e l'affidabilità dei componenti e delle infrastrutture tecnologiche, ma attualmente non esistono informazioni sufficienti per valutare questi effetti in modo sistematico. Per affrontare questa lacuna, nel presente Piano della Ricerca di Sistema (Progetto 2.3 – PTR 2022-2024) si è avviata una serie di test sperimentali che proseguiranno nel corso del prossimo triennio. Questi esperimenti si concentreranno sull'osservazione diretta e la misurazione delle reazioni dei componenti di rete sottoposti a diversi stress (es. temperature elevate o ridotte), raccogliendo dati empirici fondamentali.

L'obiettivo del presente Piano Triennale è quello di costruire una base di dati robusta che possa essere utilizzata per analisi future da parte dei diversi stakeholder della filiera energetica. Essi permetteranno di sviluppare modelli predittivi più accurati e di migliorare le strategie di mitigazione degli effetti avversi del cambiamento climatico, con il fine ultimo di preservare l'integrità delle reti e incrementarne la resilienza.

- Implementare modelli avanzati di previsione del consumo e della generazione

Orizzonte temporale: breve termine

Al fine di superare le limitazioni attuali e offrire un avanzamento rispetto allo stato dell'arte nello sviluppo di modelli previsionali del consumo e della generazione più robusti e flessibili, nella presente proposta progettuale si utilizzeranno tecniche innovative rispetto alle tecniche basate sul machine learning. Negli ultimi anni, infatti, le tecniche basate sul machine learning hanno dimostrato la loro efficacia nella previsione ma richiedono uno storico dei consumi sufficientemente ampio, in grado di coprire diverse stagioni, e di buona qualità,

con pochi dati mancanti o corrotti. Per questi motivi la loro applicabilità in contesti dove i dati sono scarsi risulta fortemente compromessa. Altra complicazione è data dalla necessità di effettuare il forecasting energetico di diversi utenti. Di solito si realizza un modello predittivo diverso per ogni utenza (modello locale) ma questa soluzione risulta poco scalabile. Per questi motivi, negli ultimi anni, si sta tendendo verso i modelli predittivi di tipo globale (un modello predittivo per tutte le utenze). Molto recentemente gli approcci fondazionali (modelli pre-allenati su grandi quantità di serie temporali eterogenee) hanno mostrato risultati interessanti nella previsione di serie temporali senza la necessità di un ulteriore allenamento rendendoli, di fatto, degli approcci molto interessanti e flessibili. Pertanto, i modelli proposti nella presente proposta progettuale mirano a superare le attuali limitazioni legate alla mancanza di dati e alle difficoltà di implementare previsioni accurate in contesti con nuove utenze o informazioni incomplete. Ciò costituisce un'innovazione rilevante per il settore, poiché consente una maggiore applicabilità delle tecniche di forecasting in scenari reali e complessi. L'adozione di queste nuove tecniche rappresenta, inoltre, un avanzamento anche rispetto ai risultati ottenuti nel presente Piano triennale della Ricerca di sistema (Progetto 2.3), in cui sono stati sviluppati modelli di forecasting basati sul machine learning.

Orizzonte temporale: medio-lungo termine

La stima dei profili di carico, pur avvalendosi di metodologie consolidate, presenta ancora sfide rilevanti nella previsione a lungo termine, soprattutto per l'integrazione di variabili come i cambiamenti climatici. Se le previsioni attuali si concentrano su orizzonti temporali brevi (da giorni a mesi), una proiezione su 25 anni richiede metodologie più avanzate per gestire l'incertezza dei futuri scenari climatici. Modelli come TRNSYS per la simulazione termica e OpenDSS per i flussi di carico sono ampiamente riconosciuti, ma l'integrazione sistematica dei cambiamenti climatici nelle previsioni di carico rimane un'area emergente. Progetti come SENDER (Horizon 2020, Grant agreement No. 957755, [online] <https://www.sender-h2020.eu/>) indagano l'ottimizzazione dei carichi a livello residenziale, ma raramente con un orizzonte temporale così ampio e con l'inclusione di variabili climatiche dettagliate da downscaling meteorologico. In Italia, le previsioni dei profili di carico si basano spesso su dati climatici medi (TMY), limitando l'accuratezza a lungo termine. L'innovazione proposta risiede nell'integrazione di previsioni climatiche estese su 25 anni, consentendo di anticipare l'impatto delle variazioni climatiche sulla domanda energetica residenziale. La metodologia si concentra sul miglioramento della precisione dei profili di carico a lungo termine, superando i limiti degli approcci tradizionali grazie all'integrazione di dati climatici futuri. Strumenti avanzati di simulazione combineranno profili di carico termico ed elettrico con scenari climatici, migliorando la precisione delle stime e supportando la pianificazione dinamica delle reti intelligenti. I principali avanzamenti rispetto allo stato dell'arte includono una maggiore accuratezza delle previsioni climatiche, insieme a una più efficace integrazione delle variabili socioeconomiche e comportamentali, fornendo una rappresentazione più realistica delle dinamiche di consumo energetico.

- Sviluppare metodi e modelli per la pianificazione risk-based a lungo termine delle reti elettriche di distribuzione MT

L'obiettivo è sviluppare modelli e metodi di calcolo innovativi per la pianificazione a lungo termine delle reti elettriche di distribuzione a media tensione (MT), adottando un approccio "risk-based" per migliorare l'Hosting Capacity e incrementare la resilienza delle reti. Questo approccio supera le limitazioni delle tecniche tradizionali, fornendo soluzioni più dinamiche e adattabili ai cambiamenti futuri del sistema energetico, consentendo così di conseguire un avanzamento rispetto allo stato dell'arte.

- Definire basi teoriche e modelli matematici per l'implementazione del wide-synchronization control nelle reti di distribuzione, anche in presenza di sistemi MVDC

L'obiettivo principale è definire le basi teoriche e le equazioni matematiche necessarie per l'implementazione del wide-synchronization control nelle reti di distribuzione, anche in presenza di sistemi MVDC. Questo approccio mira a migliorare la sicurezza e la stabilità del sistema elettrico in diverse condizioni operative. Lo studio metterà in luce anche le principali differenze con il caso della trasmissione, i vincoli da tenere in considerazione per l'implementazione del controllo, i vantaggi per la sicurezza e la stabilità del sistema elettrico nonché i limiti di implementazione della tecnologia.

- Implementare modelli avanzati di pianificazione energetica su diversi orizzonti temporali

L'introduzione di variabili sociologiche nei modelli di pianificazione energetica offre numerosi vantaggi nel migliorare l'accuratezza delle previsioni e l'efficacia delle soluzioni proposte. Questi modelli, che tradizionalmente si concentrano su aspetti tecnici e teorici, spesso trascurano fattori legati al comportamento umano e all'accettazione sociale delle tecnologie. Tuttavia, il comportamento dei consumatori e la loro disponibilità ad adottare nuove tecnologie possono avere un impatto significativo sulla reale flessibilità dei carichi energetici. Ad esempio, la predisposizione dei consumatori a partecipare a programmi di demand-response, o la loro disponibilità a modificare le abitudini di consumo in risposta a segnali di prezzo, varia in base a fattori culturali, sociali ed economici. Ignorare queste dinamiche può portare a previsioni irrealistiche sulla capacità di controllare i carichi energetici, riducendo l'efficacia degli algoritmi di ottimizzazione. I tool proposti nella presente proposta progettuale mirano a sviluppare modelli di pianificazione energetica basati su tecniche di ottimizzazione multiobiettivo che includono variabili sociologiche; le soluzioni dei modelli di ottimizzazione vengono, quindi, analizzate con il risolutore OPF per pervenire all'individuazione di aree critiche delle reti elettriche. Pertanto, le soluzioni complessive del tool, considerando le variabili sociologiche consentono di catturare meglio la realtà del contesto energetico, migliorando la stima del carico effettivamente utilizzabile e rendendo le soluzioni proposte più realistiche e implementabili, producendo così un avanzamento rispetto allo stato dell'arte. L'approccio proposto produce, inoltre, un avanzamento anche rispetto ai prodotti sviluppati nel presente Piano triennale della Ricerca di sistema (Progetto 2.3), in cui sono stati sviluppati modelli di OPF ma non sono stati progettati e/o implementati modelli di pianificazione energetica multiobiettivo per il calcolo delle configurazioni energetiche ottime in funzione di parametrico tecnico-economico-sociologici.

- Sviluppare un prototipo di convertitore grid forming con capacità di assistenza alla rete di tipo VSG

Per garantire la sicurezza del sistema elettrico e le sue proprietà correlate, è necessario fornire sia strumenti hardware che software capaci di rispondere alle mutate condizioni operative sopra richiamate. In questo contesto, il ruolo dell'elettronica di potenza nelle reti, inizialmente limitato alla conversione dell'energia generata da fonti rinnovabili (DC/AC, DC/DC e AC/AC) ed alla power quality (filtri attivi, STATCOM) ed alla trasmissione DC ad altissima tensione (HVDC), deve essere oggi esteso alla capacità di contribuire alla stabilità e resilienza della rete (convertitori Grid Forming, Virtual Synchronous Generators- VSG). L'installazione di un convertitore grid forming con capacità di assistenza alla rete di tipo VSG inverte la criticità "più rinnovabili, meno stabilità", aumentando la stabilità della rete anziché pregiudicarla al crescere della quantità di rinnovabili. Attualmente, la letteratura tecnica offre varie modalità di controllo per convertitori in grado di emulare il comportamento di una macchina sincrona, ma tali approcci sono generalmente verificati solo in ambienti di simulazione. Mancano, invece, risultati derivanti da test su tali dispositivi all'interno di reti e microreti sperimentali.

Tra gli obiettivi del progetto c'è lo sviluppo completo di un prototipo di convertitore grid forming con capacità di assistenza alla rete di tipo VSG su cui condurre test sperimentali all'interno di reti e microreti sperimentali. La disponibilità di dati sperimentali consente una validazione più accurata dei modelli teorici ed evidenzia problemi operativi non rilevabili in ambiente simulazione, anche nell'ottica di una futura industrializzazione dell'apparato. I risultati ottenuti rappresentano un avanzamento rispetto allo stato dell'arte. Essi si pongono in continuità con il presente Piano triennale della Ricerca di sistema (Progetto 2.3), in cui è stato sviluppato il progetto e il prototipo preliminare dell'apparato che si intende completare e testare sperimentalmente sulle microreti nel triennio 2025-2027.

- Integrare funzionalità di diagnostica dello stato di salute del convertitore grid forming

La crescente adozione dei convertitori a semiconduttore nella generazione elettrica è spesso limitata dalla loro minore affidabilità rispetto ai tradizionali convertitori elettromeccanici. Questo problema è ulteriormente amplificato quando si utilizzano semiconduttori di tipo wide bandgap (GaN e SiC), che, pur garantendo efficienza e densità di potenza superiori, presentano sfide legate alla loro immaturità tecnologica e ai complessi processi produttivi, risultando spesso causa di guasti imprevisti. In particolare, è ampiamente documentato nella letteratura scientifica che la principale causa di guasto sia di origine termica.

Il progetto si propone di sviluppare un convertitore prototipale innovativo, capace non solo di stimare in tempo reale la temperatura di giunzione dei semiconduttori durante il funzionamento, ma anche di monitorarne costantemente le caratteristiche di conduzione. Questo permetterà di anticipare e segnalare all'utente eventuali guasti imminenti, aumentando significativamente l'affidabilità operativa. Inoltre, il convertitore sarà in grado di valutare lo stato di salute delle capacità del dc-link, che, insieme ai semiconduttori, rappresentano i componenti più soggetti a guasti.

Attualmente, nessun convertitore commerciale integra sistemi diagnostici in grado di monitorare lo stato di salute sia dei semiconduttori che degli elementi reattivi, come le capacità del dc-link. Il progresso atteso con questo progetto consisterà nella creazione di un sistema di diagnostica integrato e predittivo, che rappresenterà un avanzamento significativo rispetto allo stato dell'arte, migliorando la sicurezza e l'affidabilità dei convertitori grid-forming di nuova generazione.

- Realizzare un tool software per l'identificazione delle aree critiche delle reti elettriche in presenza di scenari energetico-ambientali prospettici

La presente proposta progettuale si pone tra gli obiettivi il potenziamento dei software sviluppati nei Piani triennali della Ricerca di sistema 2019-2021 (ORAtool - Progetto 2.7) e 2022-2024 (ARStool - Progetto 2.3) mediante l'integrazione di nuove funzionalità che consentiranno di ottenere un avanzamento rispetto ai precedenti trienni. Nel software (gratuito come i precedenti) verranno integrati i modelli di cui ai precedenti punti 2 e 3 e ulteriori modelli che consentiranno di identificare aree critiche della rete in presenza dei nuovi contesti operativi sopra richiamati. Più nello specifico, per aree critiche si intende zone identificate come particolarmente vulnerabili, per la presenza di uno più elementi (es. nodi, linee, ecc.) in cui si rilevano criticità (es. scostamenti significativi di prefissate grandezze fisiche rispetto a valori soglia prestabiliti).

Allo stato dell'arte, non sono presenti in letteratura tecnico scientifica tool integrati di tipo freeware che presentano funzionalità analoghe.

- Progettare e sviluppare il digital twin di una rete di distribuzione idrica finalizzato all'analisi degli impatti dei malfunzionamenti di reti elettriche su reti di utilità

La presente proposta progettuale ha tra i suoi obiettivi la progettazione e lo sviluppo di un digital twin di una rete di distribuzione idrica, mirato a valutare l'interoperabilità tra reti elettriche e reti di utilità. Oltre al digital twin, sarà sviluppata una metodologia per analizzare gli impatti dei malfunzionamenti delle reti elettriche sulle reti idriche. Questa metodologia si baserà su un'estensione del modello idraulico della rete idrica, includendo il comportamento degli elementi energivori in caso di interruzioni parziali o totali dell'alimentazione elettrica. Lo studio, attraverso un'analisi coordinata delle problematiche legate alle infrastrutture critiche, offrirà indicazioni utili per prevenire possibili criticità negli scenari futuri, un tema non trattato nei precedenti trienni della ricerca di sistema.

- Condurre uno studio di fattibilità con l'obiettivo di valutare la possibilità di definire modelli per la valutazione o la previsione di effetti sulla operatività di infrastrutture elettriche locali in condizioni meteorologiche estreme.

Come già richiamato, la creazione di modelli è resa difficile dalla scarsa disponibilità di dati energetici pubblici, specialmente a livello sub-trasmissione e distribuzione, che mettano in relazione eventi climatici ed impatto sulle infrastrutture energetiche, necessari alla modellazione di interazioni clima-energia. L'obiettivo proposto mira a verificare la fattibilità di creare modelli per la valutazione degli effetti a livello locale delle reti elettriche in determinate condizioni meteorologiche estreme o per la previsione di interruzioni di corrente.

Facendo seguito alla richiesta di integrazione degli esperti valutatori, di seguito, si riportano per ogni categoria di prodotto/risultato descritta nello "Stato dell'arte" del progetto e per le corrispondenti LA, un'analisi dell'innovatività e dell'originalità rispetto allo stato attuale

#### MODELLI AVANZATI DI PREVISIONE DELLA GENERAZIONE FER CHE TENGANO CONTO DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO

Tema proposto nel progetto: definizione di modello di previsione per la produzione fotovoltaica ed eolica a lungo termine basato su sistemi che realizzano il downscale temporale su base oraria partendo da previsioni giornaliere ottenuti da modelli climatici ad alta risoluzione.

Avanzamento rispetto allo stato dell'arte:

I modelli di downscale temporale presenti in letteratura non sono generalmente applicati alla problematica di analisi delle aree critiche delle reti elettriche e, pertanto, i modelli di letteratura non sono immediatamente applicabili al contesto specifico del progetto. I modelli sviluppati mirano a ricoprire tale gap. Inoltre, il passaggio ad una scala oraria rappresenta un miglioramento in termini di frequenza dei dati (da 1 dato/giorno a 24 dati/giorno). L'integrazione delle previsioni orarie a lungo termine nei modelli di simulazione della rete permette di tener conto, con maggiore dettaglio, della variabilità climatica nell'identificazione di criticità nella rete elettrica. Questo aumento della risoluzione consentirà una descrizione più dettagliata delle dinamiche energetiche future.

LA di riferimento: LA1.3

#### MODELLI AVANZATI DI PREVISIONE DEL CONSUMO ENERGETICO

Tema proposto nel progetto: sviluppo di un modello di previsione del consumo a breve termine adatto anche alle situazioni in cui vi siano pochi dati storici disponibili

Avanzamento rispetto allo stato dell'arte

Il modello è progettato per garantire prestazioni superiori rispetto ad altri modelli, anche quando si dispone di una quantità limitata di dati. In particolare, con una quantità limitata di dati, il modello dovrà presentare un errore quadratico medio inferiore del 2% rispetto ad altri modelli.

La disponibilità di modelli di previsione del consumo energetico a breve termine che non richiedano uno storico elevato aumenta le possibilità di applicazione a scenari reali, in cui la disponibilità di storici estesi non è sempre garantita, migliorando così la scalabilità della soluzione senza comprometterne l'accuratezza.

LA di riferimento: LA2.1

Tema proposto nel progetto: valutazione e stima dei profili di carico per la pianificazione a lungo termine su base caso d'uso

Avanzamento rispetto allo stato dell'arte

I modelli proposti per la stima dei profili di carico per la pianificazione a lungo termine dovranno garantire una riduzione del CV(RMSE) orario al di sotto del 30%, in conformità con i criteri ASHRAE. L'obiettivo è raggiungere un valore target compreso tra il 20% e il 25%, migliorando così l'affidabilità dei profili stimati.

LA di riferimento: LA1.4, LA1.5

#### VARIABILI AGGIORNATE E AMPIATE CHE RIFLETTANO IL NUOVO CONTESTO ENERGETICO

Tema proposto nel progetto: implementazione di modelli di ottimizzazione multiobiettivo avanzati a supporto della pianificazione a breve termine delle reti

Avanzamento rispetto allo stato dell'arte

Le attività proposte mirano a progettare e sviluppare modelli di ottimizzazione multiobiettivo a supporto della pianificazione a breve termine delle reti che includano variabili sociali con l'obiettivo finale di ottenere una più realistica stima della flessibilità offerta dagli utenti finali.

A parità di modello di ottimizzazione multiobiettivo e di scenari di lavoro, si stima una potenziale riduzione, rispetto al valore teorico massimo di flessibilità, del 6%-10% per effetto dell'introduzione delle variabili sociologiche nei modelli proposti.

Allo stato dell'arte, non sono stati trovati in letteratura modelli di ottimizzazione che tengano conto delle variabili sociologiche integrati in software open source. L'attività mira a ricoprire questo gap di ricerca.

LA di riferimento: LA1.13, LA1.14

Tema proposto nel progetto: sviluppo di un metodo euristico basato su un modello digitale di funzionamento della rete idrica e casi specifici di guasto della rete elettrica che consente di analizzare i relativi impatti sulla distribuzione idrica e derivare regole generali di mitigazione

Avanzamento rispetto allo stato dell'arte

Tradizionalmente, il problema dell'interdipendenza tra reti è affrontato mediante metodi deterministici. L'adozione di un approccio euristico, come proposto nel presente progetto, consente di gestire in modo più efficace la complessità del problema, offrendo al

contempo maggiore flessibilità e rappresentando un avanzamento rispetto allo stato dell'arte.

LA di riferimento: LA1.16, LA2.5

Tema proposto nel progetto: studio di fattibilità di modelli statistici e di machine learning per la valutazione o la previsione di effetti sulla operatività di infrastrutture elettriche locali in condizioni meteorologiche estreme

Avanzamento rispetto allo stato dell'arte

Allo stato dell'arte non sono disponibili modelli per la valutazione o la previsione degli effetti delle condizioni meteorologiche estreme sull'operatività delle infrastrutture elettriche locali.

Il tema proposto si propone di colmare questo gap, esplorando la possibilità di quantificare l'impatto di eventi estremi, come alluvioni e ondate di calore, sulle infrastrutture elettriche. A tal fine, si prevede l'impiego di modelli di machine learning, come la Principal Component Analysis e le reti neurali, per individuare all'interno delle serie temporali meteorologiche i periodi in cui tali eventi si manifestano, con l'obiettivo di supportare l'attuazione di azioni preventive.

LA di riferimento: LA1.6. LA2.8

#### NUOVI METODI E STRUMENTI PER LA PIANIFICAZIONE DELLE RETI DI TRASMISSIONE E DISTRIBUZIONE, ANCHE IBRIDE (AC-DC) PER ABILITARE CONFIGURAZIONI TECNOLOGICHE e ARCHITETTURE DI RETE AVANZATE

Tema proposto nel progetto: applicazione del Wide-Synchronization Control nelle reti di distribuzione ibride per incrementare la sicurezza e la stabilità

Avanzamento rispetto allo stato dell'arte

Il wide-synchronization control (WSC) è un concetto innovativo emerso di recente per i sistemi di trasmissione. In aggiunta alla novità in sé del concetto, in letteratura non sono presenti metodologie o modelli per l'applicazione del WSC a reti di distribuzione ibride.

L'applicazione del WSC può portare a un notevole incremento dello smorzamento nel sistema, aumentando i valori originari da 2 a 10 volte.

LA di riferimento LA1.7, LA2.11

Tema proposto nel progetto: sviluppo di modelli, metodi di calcolo innovativi e di un software per la pianificazione risk-based a lungo termine delle reti elettriche di distribuzione MT finalizzata all'incremento dell'Hosting Capacity e al miglioramento della resilienza

Avanzamento rispetto allo stato dell'arte

I metodi di pianificazione proposti per l'incremento dell'Hosting Capacity sono totalmente innovativi e consentono un miglioramento nei tempi di calcolo necessario per applicazione in strumenti di pianificazione.

LA di riferimento LA1.8, LA2.12

Tema proposto nel progetto: sviluppo di una metodologia per la riconfigurazione delle reti a supporto della pianificazione delle reti elettriche di distribuzione e applicazione a casi studio

Avanzamento rispetto allo stato dell'arte

La principale innovazione risiede nell'adozione di una tecnica di programmazione matematica avanzata (MISOCP) per poter risolvere problemi caratterizzati dalla presenza di variabili decisionali binarie e variabili continue. La metodologia proposta produce, pertanto, un avanzamento rispetto allo stato dell'arte e apporta i seguenti miglioramenti prestazionali:

- introduce vincoli di uguaglianza relativi alle equazioni di rete;
- introduce vincoli tecnici relativi alle caratteristiche elettriche (correnti, tensioni, etc.);
- incrementa il numero di funzioni obiettivo
- identifica almeno n. 2 use-case per l'utilizzo di strumenti ONR per la pianificazione, estendendone quindi la portata anche a problemi di diversa natura;

La scalabilità degli approcci proposti sarà testata mediante applicazione su reti di distribuzione di dimensioni realistiche (circa 900-1000 nodi).

LA di riferimento LA1.9, LA2.13

Tema proposto nel progetto Sviluppo di un software per la pianificazione delle reti di distribuzione, anche ibride AC-DC

Avanzamento rispetto allo stato dell'arte

Allo stato dell'arte, non sono disponibili software di pianificazione open source liberamente scaricabili dal Web con funzionalità confrontabili con quelle sviluppate nell'ambito del progetto (es. modelli affidabilistici che tengano conto del cambiamento climatico).

Le funzionalità integrative del software ArsTool saranno almeno cinque ed includeranno:

- calcolo della distorsione armonica nei sistemi di distribuzione;
- previsione della distorsione armonica nei sistemi di distribuzione;
- previsione stocastica del numero di buchi di tensione annui presso nodi specifici e ben delimitate aree della rete di distribuzione.
- implementazione di tecnica LVRT per garantire resilienza e maggiore continuità di servizio alle risorse energetiche distribuite;

- modelli affidabilistici per componenti di reti MT e BT che tengano conto degli effetti del cambiamento climatico. Le configurazioni test integrate nel SW (come da output della LA1.2) potranno essere utilizzate come casi benchmark di riferimento per applicazioni analoghe.

LA di riferimento LA1.1, LA1.2, LA1.3, LA1.5, LA1.13, LA1.14, LA1.15, LA2.1, LA2.6, LA2.14

Tema proposto nel progetto Valutazione degli impatti e stress termici, dovuti alle distorsioni armoniche ed al cambiamento climatico, sugli apparati, componenti e sulla power quality della rete, basandosi anche sulla caratterizzazione prestazionale delle soluzioni per la mitigazione e/o compensazione delle armoniche.

Avanzamento rispetto allo stato dell'arte

L'innovatività dell'attività consiste nel condurre campagne di test sperimentali per la valutazione delle distorsioni delle grandezze elettriche della rete elettrica in condizioni di stress determinati dall'innalzamento della temperatura per il cambiamento climatico e dall'inquinamento armonico dovuto ai convertitori switching ed ai carichi lineari. L'elemento originale, che consente di superare lo stato dell'arte, consiste nella conduzione contemporanea e la valutazione comparativa della power quality in presenza e in assenza di soluzioni di filtraggio attivo. L'impiego di tecnologie Hardware in Loop consentirà di studiare gli impatti del cambiamento climatico e dell'inquinamento armonico su reti benchmark o custom e sugli apparati degli utenti del sistema elettrico. Inoltre, verranno implementati software open source di modelli e di tecniche innovative per l'analisi e la previsione di inquinamento armonico e dei buchi di tensione. Mentre per l'analisi dell'inquinamento armonico verranno utilizzate tecniche iterative nel dominio della frequenza, per la previsione di eventi di buco di tensione sarà implementata tecnica mediante approccio stocastico sulla variabile "ttne" (time to next event).

Miglioramenti rispetto a metodi presenti in letteratura possono essere stimati in questa fase in più del 50% in termini di efficienza computazionale.

LA di riferimento LA1.10, LA2.2, LA2.7, LA2.14

Tema proposto nel progetto: metodologia e tecnica di modellazione geospaziale di sistemi di distribuzione

Avanzamento rispetto allo stato dell'arte

Allo stato dell'arte, non sono disponibili metodologie geospaziali e database open per la rappresentazione di reti MT/BT esistenti e del loro layout. Il modello prototipale proposto permetterà di definire modelli di distribuzione per regioni di interesse dell'utente, sulla base delle informazioni georeferenziate disponibili in letteratura combinate ad appropriati algoritmi di analisi ed ottimizzazione delle stesse.

LA di riferimento LA1.11, LA1.12

#### DATASET SPERIMENTALI

Tema proposto nel progetto: produzione di dataset di dati sperimentali risultanti da test stress termo-igrometrici su componenti delle reti elettriche di distribuzione

Avanzamento rispetto allo stato dell'arte

Allo stato dell'arte, non sono disponibili dataset di dati sperimentali risultanti da test stress termo-igrometrici su componenti delle reti elettriche di distribuzione BT scaricabili dal Web.

L'attività mira a ricoprire lo specifico gap di ricerca.

Data la tipologia di prodotto (dataset) non è possibile applicare metriche per valutare le sue prestazioni.

LA di riferimento LA2.3, LA2.4

#### PROGETTAZIONE DEGLI APPARATI HARDWARE

Tema proposto nel progetto: prototipo di convertitore grid-forming trifase a tensione e frequenza industriale 400V, 50Hz di taglia 100 kVA validato sperimentalmente

Avanzamento rispetto allo stato dell'arte

Il convertitore proposto consente una sovraccaricabilità transitoria fino al 10-30% della corrente nominale per alcuni secondi, senza compromettere l'affidabilità, grazie alla stima dinamica della temperatura di giunzione. La funzionalità di supporto alla rete in modalità VSM, combinata con le capacità di compensazione armonica, consente, inoltre, una riduzione delle distorsioni armoniche di rete (THD) fino al 20% nel punto di connessione, rispetto a convertitori convenzionali non dotati di capacità harmonic-sink.

LA di riferimento LA2.9, LA2.10

#### d) Eventuali collegamenti con altri progetti relativamente alle attività previste nel progetto

Le attività previste nel presente progetto presentano numerosi collegamenti con altri progetti svolti da ENEA e dai co-beneficiari, come di seguito sinteticamente elencato.

1. POA Smart Grid - MISSION – Microreti e sistemi smart, multivettore ed integrati, per accelerare la transizione energetica (2021-2026) mira a studiare, esplorare e sperimentare le potenzialità ed il ruolo delle microreti energetiche multivettore a supporto della

transizione energetica. I modelli di previsione della generazione rinnovabile (fotovoltaico ed eolico) sviluppati saranno utilizzati, come base di partenza, nel presente progetto.

2. Rome Technopole, Flagship Project 1 “Decarbonization and digitalization in research on new green energy sources” – Topic: “Renewable Energy Conversion” (in corso) è finalizzato a generare un salto di qualità nella Regione Lazio in tutti i processi di innovazione orientati allo sviluppo sostenibile, alla “smart specialization”, alla riqualificazione e al rilancio del settore industriale. Le tecniche fondazionali indagate saranno usate come punto di partenza nel presente progetto.
3. eNeuron - greEN Energy hUbs for local integRated energy cOmmunities optimizatioN (in Corso) mira ad Ottimizzare la progettazione e il funzionamento delle comunità energetiche local. Le tecniche fondazionali indagate saranno usate come punto di partenza nel presente progetto.
4. CMIP6 - Coupled Model Intercomparison Project Phase 6. I dati messi a disposizione sono utilizzati da OpenMeteo per fornire delle stime climatiche con risoluzione spaziale di 10km. I Metodi avanzati di previsione di generazione rinnovabile a lungo termine propedeutici all’identificazione dei nodi critici sviluppati nel presente progetto faranno uso dei dati forniti da OpenMeteo.
5. INTERPLAN - INTEgrated opeRation PLAnning tool towards the Pan-European Network (2017- 2020) è stato focalizzato sullo sviluppo di un tool integrato di pianificazione per l’integrazione delle reti (es. rete paneuropea, integrazione TSO-DSO). I risultati ottenuti nell’ambito del progetto INTERPLAN potranno fornire linee guida in relazione alle metodologie di gestione delle reti elettriche.
6. ELECTRA IRP - European Liason on Electricity Committed Towards long-term Research Activity Integrated Research Programme – progetto finanziato dal programma europeo FP7 che ha visto la partecipazione di RSE ed ENEA, in qualità rispettivamente di coordinatore e vicecoordinatore, ha introdotto una metodologia di controllo decentralizzato della rete elettrica basata sul concetto di Web-of-Cell, celle interconnesse, in grado di gestire al meglio la flessibilità resa disponibile dalle risorse energetiche interne consentendo una gestione più efficace della rete in scenari caratterizzati da elevata penetrazione di generazione da FER. Le logiche sviluppate potranno essere di ausilio nello sviluppo delle azioni di pianificazione e gestione delle reti.
7. MICCA - MICROGRID IBRIDE IN CORRENTE CONTINUA E IN CORRENTE ALTERNATA (PON03PE\_00178\_1) - Distretto ad alta tecnologia “Smart Power System (SPS)” - PON R&C 2007-2013, MIUR (2013 – 2017) ENEA si è occupata dello studio delle problematiche connesse alla qualità della fornitura di potenza in architetture di microreti ibride in presenza di generazione da fonte rinnovabile nell’ambito della linea di ricerca “Studi di affidabilità attraverso l’analisi integrata della continuità dell’alimentazione e della qualità della tensione nelle microreti ibride” del progetto nazionale. I risultati ottenuti nell’ambito del progetto MICCA rappresentano una importante base di conoscenza preliminare ai fini degli studi di affidabilità da condurre nella presente proposta progettuale.
8. “ComESto - Community Energy Storage: Gestione Aggregata di Sistemi d’Accumulo dell’Energia in Power Cloud” – progetto PON 2015-2020 promosso dal MIUR, mira a realizzare un sistema di accumulo distribuito relativo ad una comunità di utenti e gestito in forma aggregata. ENEA ha integrato la propria nanogrid sperimentale con altre nanogrid previste nel progetto (es. Università della Calabria); l’esperienza maturata sarà di ausilio nella realizzazione dell’integrazione delle infrastrutture sperimentali ENEA-POLIBA per le attività di co-simulazione sperimentale. Inoltre, ENEA ha progettato e implementato i servizi di forecasting della generazione e del carico per la piattaforma di Gestione Aggregata ComESto.
9. “IS.MI. - Smart grids per le isole minori” (2020-oggi). Nell’ambito del progetto, focalizzato sulle isole minori italiane, l’unità di ricerca di POLIBA, nella collaborazione di ricerca con e-distribuzione, ha sviluppato algoritmi di gestione della sicurezza e adeguatezza delle reti di distribuzione isolate e testato il funzionamento di sistemi innovativi di controllo dei sistemi di distribuzione con approccio Power Hardware-in-the-Loop. Tale know-how potrà essere utilizzato per la progettazione di strumenti per la gestione delle reti in ottica di miglioramento della adeguatezza e sicurezza del sistema elettrico.
10. “Living Grid” (2017-2020), Cluster Tecnologico Nazionale Energia, in collaborazione con Terna SpA, e-distribuzione SpA, ENEA, CNR e Consorzio EnSiEL. Nell’ambito del progetto, POLIBA ha sviluppato una collaborazione di ricerca con POLITO per l’implementazione di una piattaforma di co-simulazione remota Power Hardware-in-the-Loop (R-PHIL).
11. “ROCKET - Reliable pOwer to Cloud multiKilowatt ElecTronics”. POLITO è coinvolto nel progetto ROCKET – Contratto di Insediamento, Regione Piemonte, 2022-2024 – nella progettazione e implementazione di caricabatterie bidirezionali usando una interfaccia lato rete basata sul concetto di generatore sincrono virtuale (VSG) per fornire supporto alla rete come inerzia virtuale e reazione ai guasti. Le attività del progetto 2.3 e di Rocket sono complementari e applicheranno il concetto di VSG ad ambiti applicativi diversi, consentendo così anche di analizzare potenzialità e criticità della tecnologia nei diversi settori. Il progetto 2.3a si avvarrà, altresì, del know-how già sviluppato da POLITO nella prima annualità di ROCKET.

12. “RES NOVAE: Reti, Edifici, Strade - Nuovi Obiettivi Virtuosi per l’Ambiente e l’Energia” (2012-2015), cod. PON04a2\_E, PON Ricerca e Competitività 2007-2013 (capofila e-distribuzione, partner Politecnico di Bari, CNR, ENEA, Università della Calabria, IBM Italia SpA, General Electric Transportation Systems SpA, Elettronika Srl) ha sviluppato, in collaborazione con e-distribuzione, delle metodologie di ottimizzazione e controllo delle reti di distribuzione in media e bassa tensione, destinate ad applicazioni real-time SCADA/DMS. Tale know-how potrà essere di ausilio per le attività di progettazione delle azioni di pianificazione delle reti.
13. Nel progetto “Smart-Grids: Tecnologie Avanzate per i servizi pubblici e l’energia” (2009-2012), cod. PST #44, Progetto Strategico su APQ in materia di Ricerca Scientifica nella Regione Puglia, (capofila Politecnico di Bari, partner AMGAS SpA e AMET SpA), l’unità di ricerca del Politecnico di Bari ha sviluppato in collaborazione con il DSO di Trani (AMET) una architettura di controllo della rete di distribuzione basata su SCADA/DMS. Per questa architettura sono stati sviluppati codici e algoritmi di test per funzioni DMS avanzate come unbalanced three-phase optimal power flow, conservative voltage reduction, volt-var optimization, riconfigurazione ottimale di rete per la minimizzazione delle perdite.
14. Progetto “ZERO (Zero Emissions Research Option)” (2011-2017), finanziato dalla Regione Puglia nell’ambito del APQ “Reti di Laboratori Pubblici di Ricerca della Regione Puglia” progetto ha finanziato la creazione di un laboratorio multidisciplinare denominato LabZERO con unità di ricerca del Politecnico di Bari e di ENEA. LabZERO dispone di una test-facility per simulazioni real-time e prove Power Hardware-in-the-Loop con una microrete fisica.
15. Progetto “OSMOSE – Optimal System-Mix Of flexibility Solutions for European electricity”, (2018-2022), finanziato dall’Unione Europea nell’ambito del Horizon 2020 framework (Programme: H2020-EU.3.3.4.—A single, smart European electricity grid; Topic: LCE-04-2017—Demonstration of system integration with smart transmission grid and storage technologies with increasing share of renewables; Grant agreement ID: 773406). Come rappresentante del Consorzio EnSiEL, UniCA ha condotto studi sulla stima della potenziale flessibilità che le risorse distribuite possono offrire agli operatori delle reti in presenza di nuovi meccanismi e dinamiche di mercato elettrico e valutato l’impatto di tale offerta sull’esercizio e gestione della rete di distribuzione. Tale modellazione, che ha compreso la costruzione di reti sintetiche agganciate alle caratteristiche del territorio sotto studio, sarà utile al presente progetto per sviluppare il modello di SCOPF necessario per individuare la quantità ottima di flessibilità necessaria per la risoluzione di potenziali contingenze (LA 1.8). Nell’ambito dello stesso progetto OSMOSE, UniCA ha anche collaborato a modelli di Dynamic Thermal Rating (DTR) per le linee di trasmissione e che possono essere adattati anche ai sistemi di distribuzione in MT per “liberare” potenziali risorse di flessibilità (LA 1.8). Tale modellazione, che ha compreso la costruzione di reti sintetiche agganciate alle caratteristiche del territorio sotto studio, sarà utile al presente progetto per sviluppare il modello di SCOPF necessario per individuare la quantità ottima di flessibilità necessaria per la risoluzione di potenziali contingenze. Nell’ambito dello stesso progetto OSMOSE, UniCA ha anche collaborato a modelli di Dynamic Thermal Rating (DTR) per le linee di trasmissione e che possono essere adattati anche ai sistemi di distribuzione in MT per “liberare” potenziali risorse di flessibilità.
16. Progetto di Ricerca di Rilevante Interesse Nazionale (PRIN) Bando 2017: “Planning and flexible operation of micro-grids with generation, storage and demand control as a support to sustainable and efficient electrical power systems: regulatory aspects, modelling and experimental validation” (2020-2023), finanziato dal Ministero dell’Istruzione, dell’Università e della Ricerca (MIUR) – grant 2017K4JZEE. UniCA ha trattato aspetti della pianificazione dello sviluppo delle reti e della loro gestione flessibile, che possono assumersi complementari con le attività proposte dal presente progetto.
17. “SRACC – Attuazione e Revisione della Strategia Regionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici” (2021-2023), finanziato dalla Regione Autonoma della Sardegna. Tra le varie attività previste, UniCA si sta occupando di sviluppare una metodologia di valutazione degli indicatori di rischio con riferimento alla resilienza dell’infrastruttura elettrica regionale a fronte di eventi naturali avversi. L’applicazione della metodologia al territorio regionale sardo, risultato del progetto, potrà essere usata per affinare la definizione della metrica per la misura della resilienza di una rete elettrica di distribuzione e come benchmark per le attività di testing.
18. Progetto dal titolo “Impiego dei servizi ancillari forniti da risorse di energia distribuite per l’esercizio della rete di distribuzione” (2021-2022), finanziato da e-distribuzione nell’ambito del progetto pilota “EDGE – Energia da risorse Distribuite per la Gestione della rete di E-distribuzione”. In qualità di partner del Consorzio EnSiEL, UniCA ha testato un numero significativo di feeder MT reali per valutare la fattibilità tecnica ed economica della partecipazione delle risorse distribuite al mercato dei servizi ancillari. Le analisi condotte e i risultati ottenuti in questo progetto potranno essere usati per definire i benchmark per le attività di modellazione e di simulazione.
19. Partenariato Esteso “NEST – Network for Energy Sustainable Technologies” (2022-2025), finanziato nell’ambito della Missione 4 del PNRR “Istruzione e Ricerca”, Componente 2 “Dalla ricerca all’impresa del PNRR”, Investimento 1.3 “Partenariati allargati estesi a Università, centri di ricerca, imprese e finanziamento progetti di ricerca di base”. Nell’ambito del progetto, ENEA partecipa, tra i diversi Spoke, allo Spoke 7 “Smart Sector Integration” che intende applicare soluzioni per la Smart Sector Integration che potrebbero richiedere competenze in parte anche sviluppate nel presente progetto.
20. UniCA partecipa alle attività di coordinamento e di ricerca dello Spoke 8 – “Final use optimization, sustainability & resilience in energy supply chain”, le cui tematiche sono attinenti alle attività del presente progetto. Ad esempio, UniCA coordina il WP5 dello Spoke 8

che intende valutare differenti misure migliorative della resilienza delle reti di distribuzione.

21. Ecosistema dell'Innovazione "e.INS - Ecosystem of Innovation for Next Generation Sardinia" (2022-2025), finanziato nell'ambito della Missione 4 del PNRR "Istruzione e Ricerca", Componente 2 "Dalla ricerca all'impresa del PNRR", Investimento 1.5 "Creazione e rafforzamento di Ecosistemi dell'innovazione e costruzione di leader Territoriali di R&S". UniCA è coordinatore delle attività di ricerca e di trasferimento tecnologico per lo Spoke 7 - "Low Carbon Technologies for efficient energy system" finalizzato allo sviluppo di soluzioni innovative per la produzione, l'uso e l'accumulo di energia per il raggiungimento della neutralità climatica della Sardegna entro il 2050. Molte attività previste in questo Spoke potranno essere usate per affinare i modelli stocastici delle risorse energetiche e della flessibilità offerta.

Facendo seguito alla richiesta integrativa degli esperti, si precisa che nel progetto 2.3a ENEA non sono previste linee di attività con interdipendenze dirette con altri progetti. Più precisamente, i "collegamenti tecnici con altri progetti relativamente alle attività previste nel progetto 2.3a" si riferiscono principalmente al know-how e alla base di conoscenza maturata in ambiti tematici analoghi. Non essendo prevista l'integrazione nel 2.3a di output provenienti da altri progetti o la necessità di fornire i risultati del 2.3a ad altri progetti, non si rende necessario alcun coordinamento operativo tra le attività, né si evidenzia un problema di interrelazioni di tipo temporale.

## 2.5 Obiettivi e risultati

### a) Obiettivi finali del progetto

Le soluzioni proposte nel presente progetto sono orientate a fornire soluzioni e strumenti avanzati che superino lo stato dell'arte. Di seguito, si riportano gli obiettivi e i risultati attesi per macrocategoria di prodotto della ricerca:

- Studio sperimentale del comportamento dei componenti di rete elettrica sottoposti a stress termo-igrometrici  
Obiettivo: Raccogliere dati empirici sul comportamento dei componenti di rete in condizioni climatiche estreme.  
Risultato atteso: Creare una base di dati robusta per sviluppare modelli predittivi più accurati con il fine ultimo di migliorare l'affidabilità della fornitura delle reti elettriche.
- Modelli avanzati di previsione del consumo e della generazione  
Obiettivo: Sviluppare modelli previsionali più flessibili, in grado di operare anche in contesti con dati limitati attraverso lo studio della possibilità di utilizzare tecniche alternative al machine learning (es. approcci fondazionali).  
Risultato atteso: Aumentare l'accuratezza delle previsioni a breve termine e integrare variabili climatiche per le proiezioni a lungo termine, migliorando la pianificazione energetica.
- Metodi e modelli per la pianificazione risk-based a lungo termine delle reti elettriche di distribuzione MT  
Obiettivo: Adottare un approccio "risk-based" per la pianificazione delle reti di distribuzione a media tensione.  
Risultato atteso: Migliorare l'Hosting Capacity e la resilienza delle reti, valutando i rischi e le opportunità in modo più preciso.
- Basi teoriche e modelli matematici per l'implementazione del wide-synchronization control nelle reti di distribuzione  
Obiettivo: Definire modelli teorici per il controllo di sincronizzazione nelle reti, inclusi sistemi MVDC.  
Risultato atteso: Incrementare la sicurezza e la stabilità del sistema elettrico in diverse condizioni operative.
- Basi teoriche e modelli matematici per l'implementazione del wide-synchronization control nelle reti di distribuzione  
Obiettivo: Definire modelli teorici per il controllo di sincronizzazione nelle reti, inclusi sistemi MVDC.  
Risultato atteso: Incrementare la sicurezza e la stabilità del sistema elettrico in diverse condizioni operative.
- Modelli avanzati di pianificazione energetica su diversi orizzonti temporali  
Obiettivo: Integrare variabili sociologiche nei modelli di pianificazione energetica e introdurre approcci multiobiettivo.  
Risultato atteso: Migliorare l'efficacia dei modelli di pianificazione e la rispondenza con nuove leve da considerare negli scenari energetici attuali.
- Sviluppo di un prototipo di convertitore grid forming con capacità di assistenza alla rete di tipo VSG  
Obiettivo: Realizzare e testare un prototipo di convertitore grid forming per migliorare la stabilità della rete.  
Risultato atteso: Validare i modelli teorici e affrontare problemi operativi, facilitando l'industrializzazione della tecnologia.
- Tool software per l'identificazione delle aree critiche delle reti elettriche  
Obiettivo: Ampliare le funzionalità rese disponibili dal software Arstool (es. identificazione aree critiche in scenari energetico-ambientali prospettici).  
Risultato atteso: Offrire uno strumento freeware innovativo con funzionalità avanzate integrate, non disponibili allo stato dell'arte.

- Progettazione e sviluppo di un digital twin di una rete di distribuzione idrica

Obiettivo: Sviluppare un digital twin per analizzare gli effetti a cascata di disservizi alla rete elettrica su altre infrastrutture di distribuzione critiche con particolare riferimento alle idriche.

Risultato atteso: Creare una metodologia per valutare gli impatti delle interruzioni elettriche sulle reti idriche, contribuendo a prevenire criticità future e a migliorare l'affidabilità dei servizi per l'utente finale.

- Valutazione teorica e sperimentale delle prestazioni, degli impatti e dello stress termico causati dalle distorsioni armoniche e dal cambiamento climatico su apparati e componenti di rete

Obiettivo: Valutazione teorica e delle prestazioni, degli impatti e dello stress termico causati dalle distorsioni armoniche e dal cambiamento climatico su apparati e componenti di rete. Realizzazione di una infrastruttura sperimentale ed esecuzione di test sperimentali per la quantificazione delle prestazioni, degli impatti e dello stress termico causati dalle distorsioni armoniche e dal cambiamento climatico su apparati e componenti di rete.

Risultato atteso: risultati dell'analisi teorica e delle prove sperimentali condotte.

- Studio di fattibilità volto ad analizzare la possibilità di sviluppare modelli per valutare o prevedere gli effetti sulle operazioni delle infrastrutture elettriche locali in condizioni meteorologiche estreme.

Obiettivo: esplorare la possibilità di creare modelli per analizzare e prevedere come le condizioni meteorologiche estreme possano influire sul funzionamento delle infrastrutture elettriche locali.

Risultato atteso: porre le basi per la definizione di modelli accurati che permettano di valutare in anticipo gli impatti delle condizioni meteorologiche estreme sulle infrastrutture elettriche locali.

Le misure proposte nel progetto si allineano con diverse iniziative europee e nazionali, tra cui il Green Deal Europeo, che mira a rendere l'Europa il primo continente a impatto climatico zero entro il 2050, e REPowerEU, che punta a ridurre la dipendenza energetica dall'estero. Inoltre, il progetto sostiene la Strategia per la decarbonizzazione e il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), che investe in infrastrutture energetiche sostenibili e tecnologie innovative. Le attività proposte, come l'ottimizzazione delle reti e l'integrazione delle previsioni climatiche, sono coerenti con gli obiettivi del Piano Nazionale per l'Energia e il Clima (PNEC) e la Direttiva sull'Efficienza Energetica, contribuendo così a promuovere un sistema energetico più resiliente e sostenibile.

## b) Principali risultati attesi/deliverable

Il progetto è strutturato in tre WP, ciascuno con obiettivi specifici che contribuiscono al raggiungimento degli obiettivi complessivi descritti nei paragrafi precedenti. Tali obiettivi si traducono nei prodotti della ricerca, come dettagliato di seguito.

Il WP1 "Studio e definizione di nuovi metodi e strumenti per la pianificazione delle reti di distribuzione, anche ibride (AC-DC)", costituito da 16 linee di attività, produrrà i seguenti prodotti della ricerca:

- 16 Rapporti Tecnici
- Configurazioni e architetture innovative: modelli di rete, diversificati per gli scenari implementati, in linguaggio OpenDSS
- Modelli:
  - o previsionali: produzione fotovoltaica a lungo termine; produzione eolica a lungo termine;
  - o affidabilistici dei componenti presenti nelle reti elettriche di distribuzione che consentano di valutare gli impatti dei cambiamenti climatici sul sistema elettrico;
  - o equazioni matematiche per l'adozione del wide-synchronization control nelle reti di distribuzione anche in presenza di sistemi MVDC;
  - o modelli e strumenti di simulazione che combinano i dati climatici, i profili di carico e i modelli di rete, fornendo un framework per l'analisi della domanda energetica in scenari futuri complessi;
  - o ottimizzazione multiobiettivo a supporto della pianificazione a breve termine delle reti negli scenari energetici futuri in funzione di parametri ambientali, economici e variabili sociologiche.
- Dataset:
  - o raccolta organizzata di dati sui consumi energetici, profili di occupazione degli edifici, tendenze migratorie e proiezioni demografiche;
  - o profili di carico termico ed elettrico stimati per diverse tipologie di edifici e scenari futuri.
- Metodologie:
  - o metodologia per la riconfigurazione delle reti a supporto della pianificazione delle reti elettriche di distribuzione;
  - o definizione e basi teoriche per lo sviluppo di un problema di riconfigurazione ottimale in presenza di più sorgenti di alimentazione e

per l'integrazione delle equazioni di rete;

- o metodologia e tecnica di modellazione geospaziale di sistemi di distribuzione.
- Metriche: identificazione delle metriche da adottare per misurare l'HC della rete e la sua resilienza.
- Gemello digitale di una rete di distribuzione idrica in grado di simulare il comportamento idraulico della rete in funzione del funzionamento ordinario o straordinario degli elementi fisici energivori.

Per quanto riguarda il WP2 "Modellistica e sperimentazione a supporto della pianificazione delle reti elettriche", costituito da 14 linee di attività, produrrà i seguenti risultati della ricerca:

- 14 Rapporti Tecnici
- Modelli:
  - o previsionali: consumo energetico a breve termine applicabile in un contesto con scarsa disponibilità di dati storici
- Studio di fattibilità con l'obiettivo di valutare la possibilità di definire modelli per la valutazione o la previsione di effetti sulla operatività di infrastrutture elettriche locali in condizioni meteorologiche estreme.
- Dataset:
  - o dati sperimentali risultanti da test stress termo-igrometrici sulla componentistica delle reti elettriche
- Metodologie:
  - o analisi degli impatti dei malfunzionamenti di reti elettriche su reti di utilità quali quella di distribuzione idrica.
- Infrastrutture:
  - o Realizzazione infrastruttura sperimentale per l'analisi delle distorsioni delle grandezze elettriche e per la valutazione della Power Quality delle reti e microreti di distribuzione.
  - o Potenziamento del laboratorio di diagnostica per i componenti di reti elettriche BT.
- Software:
  - o Software di pianificazione a lungo termine per le reti elettriche di distribuzione sviluppati in Python.
  - o Applicativi software per la modellazione del comportamento delle componenti delle reti elettriche di distribuzione in presenza di condizioni di deformazione armonica della corrente e della tensione, rispettivamente, lungo linee elettriche e morsetti di alimentazione di utenze in media tensione attraverso la definizione di modelli semplificati per la simulazione numerica.
  - o Applicativo software freeware che integri i modelli sviluppati nell'ambito delle linee di attività ENEA per la pianificazione e lo studio delle reti elettriche sia AC, sia DC sia ibride.
- Casi studio significativi per l'implementazione del Wide-Synchronization Control nelle reti di distribuzione
- Hardware:
  - o convertitore grid-forming trifase a tensione e frequenza industriale 400V, 50Hz di taglia 100 kVA dotato di funzioni di diagnostica avanzata.
- Test sperimentali:
  - o Valutazione degli impatti e stress termici, dovuti alle distorsioni armoniche ed al cambiamento climatico, sugli apparati, componenti e sulla power quality della rete, basandosi anche sulla caratterizzazione prestazionale delle soluzioni per la mitigazione e/o compensazione delle armoniche.
  - o Campagna di test di endurance del convertitore grid forming per implementare e validare gli algoritmi di diagnosi e prognostica per un numero prolungato di ore di funzionamento (almeno 300 ore).

Il WP3 "Attività di diffusione", è costituito da 2 LA e produrrà i seguenti risultati della ricerca:

- 2 Rapporti Tecnici
- pubblicazione di articoli scientifici in conferenze e/o riviste
- partecipazione a eventi e tavole rotonde di settore, sia a livello nazionale che internazionale;
- giornate formative relative all'esperienza di realtà immersiva per osservare l'evoluzione delle reti elettriche attraverso utilizzo di sistemi visivi dedicati.

## 2.6 Fattibilità tecnico-scientifica

### a) Fattibilità tecnico-scientifica

Il presente progetto è articolato in 32 LA, 30 delle quali focalizzate sullo sviluppo di soluzioni orientate al raggiungimento degli obiettivi proposti dal Tema di ricerca 2.3a del Piano Triennale 2025-2027: "Progetto Evoluzione nella pianificazione delle reti elettriche". Due LA sono, invece, dedicate alle "Attività di diffusione".

Ciascuna LA presenta una durata di 18 mesi. Relativamente alle milestone si prevede la seguente calendarizzazione:

- La data di scadenza rappresenta la principale milestone per ciascuna LA; i relativi risultati verranno resi disponibili nei prodotti della ricerca dettagliati nella TABELLA RIASSUNTIVA PRODOTTI DELLA RICERCA ED ELEMENTI DI VERIFICA DEL PROGETTO.
- LA1.2 presenta al mese M12 una milestone intermedia rispetto alla M18 (scadenza della LA). Al mese M12 dovranno essere rese disponibili le configurazioni di rete per le quali saranno successivamente definiti scenari rappresentativi di diversi casi d'uso (livelli di penetrazione di generazione distribuita da fonte rinnovabile, di sistemi di accumulo di energia, connessi sia alla rete AC che DC, sia in MT che in BT, e di mobilità elettrica, ecc.).
- LA1.3 presenta al mese M30 una milestone intermedia rispetto a M36 (scadenza della LA). Al mese M30 dovranno essere disponibili i dati climatici da OpenMeteo, che sfrutta modelli climatici ad alta risoluzione ottenuti a partire dai risultati del progetto CMIP6. Tali dati sono propedeutici al successivo downscaling temporale e all'integrazione dei profili climatici orari nei modelli di previsione della produzione energetica, che saranno utilizzati per stimare la produzione fotovoltaica ed eolica su orizzonte temporale esteso.
- LA1.6 presenta al mese M6 una milestone intermedia rispetto alla M18 (scadenza della LA). Più nello specifico, al mese M6 dovranno essere stati individuati dati a risoluzione localizzata, utili per indagini a livello distribuzione. Laddove non dovessero essere reperiti dati da canali pubblici, si attiveranno al mese M7 contatti diretti con gli stakeholder (provider, ministeri, agenzie, gestori di reti) per farne richiesta.
- LA1.9 presenta al mese M12 una milestone intermedia rispetto alla M18 (scadenza della LA). Più nello specifico, al mese M12 dovrà essere stato formulato il problema mediante tecnica di programmazione MISOCIP così da poter procedere nell'ultimo semestre al test degli algoritmi risolutivi e alla valutazione dei limiti delle metodologie proposte.
- LA1.13 presenta due milestone intermedie rispetto alla M36 (scadenza della LA), rispettivamente al mese M24 e al mese M30. Più nello specifico, al mese M24 dovranno essere state individuate le variabili rilevanti da inserire nel modello di ottimizzazione multi-obiettivo e al mese M30 dovrà essere finalizzata la definizione di un modello che tenga conto delle variabili socio ambientali individuate in letteratura così che negli ultimi 6 mesi dell'attività si possano reperire i dati necessari per il test del modello su reti pilota per valutare la bontà dei risultati.
- LA2.3 presenta due milestone intermedie rispetto alla M18 (scadenza della LA), rispettivamente al mese M2 e al mese M8. Più nello specifico, al mese M2 dovrà essere stata finalizzata la definizione della metodologia di prova relativa alla modalità di esecuzione dei test sperimentali; entro il mese M8 dovrà essere portata a termine la realizzazione dei cablaggi di segnali tra la componentistica e i diversi apparati di monitoraggio delle grandezze di interesse così da poter procedere con la calibratura dell'attrezzatura sperimentale principale con particolare riferimento alla camera climatica e alla vasca sperimentale.
- LA2.7 presenta al mese M24 una milestone intermedia rispetto alla M36 (scadenza della LA). Più nello specifico, al mese M24 dovrà essere completata la realizzazione dell'infrastruttura sperimentale avviata nella LA2.2 per poter procedere all'esecuzione dei test sperimentali.
- LA2.9 presenta al mese M12 una milestone intermedia rispetto alla M18 (scadenza della LA). Più nello specifico, al mese M12 dovrà essere completata la programmazione di tutti i firmware di controllo così da poter procedere alla sperimentazione sulla sovraccaricabilità del convertitore a seguito di vari eventi di rete e sulle funzionalità di diagnostica del convertitore.

Gli strumenti progettati e sviluppati dai proponenti (metodologie, metodi, modelli software, prototipi, Dataset, metriche), in ottica di superamento dello stato dell'arte, saranno basati su soluzioni innovative, che integrino aspetti di modellazione che potranno diventare cruciali per gli scenari energetici futuri. Tra questi saranno considerati: 1) lo studio sperimentale del comportamento dei componenti di rete elettrica sottoposti a stress termo-igrometrici; 2) metodi e modelli per la pianificazione risk-based a lungo termine delle reti elettriche di distribuzione MT; 3) modelli matematici per l'implementazione del wide-synchronization control nelle reti di distribuzione, anche in presenza di sistemi MVDC; 4) modelli avanzati di pianificazione energetica su diversi orizzonti temporali; 5) modelli previsionali del consumo energetico a breve termine applicabile in un contesto con scarsa disponibilità di dati storici; 6) modelli di previsione per l'analisi della domanda energetica in scenari futuri complessi che tengono conto dei dati climatici, i profili di carico e i modelli di rete; 7) modelli previsionali per la produzione fotovoltaica ed eolica a lungo termine; 8) applicativi software per la modellazione del comportamento delle componenti delle reti elettriche di distribuzione in presenza di condizioni di deformazione armonica della corrente e della tensione; 9) una metodologia per l'analisi degli impatti dei malfunzionamenti di reti elettriche su reti di utilità quali quella di distribuzione idrica; 10) l'identificazione delle metriche da adottare per misurare l'HC della rete e la sua resilienza; 11) una metodologia per la riconfigurazione delle reti a supporto della pianificazione delle reti elettriche di distribuzione; 11) metodi di modellazione geospaziale di sistemi di distribuzione; 12) lo sviluppo di un prototipo di convertitore grid forming con capacità di assistenza alla rete di tipo VSG e sua diagnostica; 13) tool software per l'identificazione delle aree critiche delle reti elettriche in presenza di scenari energetico-ambientali prospettici; 14) progettazione e sviluppo di un digital twin di una rete di distribuzione idrica finalizzato all'analisi degli impatti dei malfunzionamenti di reti elettriche su reti di utilità.

Per garantire la massima diffusione dei risultati del progetto sopra richiamati, verranno implementate diverse azioni di disseminazione, sia scientifica che tecnica. In particolare, saranno previste pubblicazioni in conferenze e riviste specializzate, nonché la partecipazione a comitati nazionali e internazionali, al fine di condividere i risultati e le innovazioni del progetto con la comunità scientifica e tecnica. Tutti i prodotti della ricerca, inoltre, saranno resi disponibili al termine del processo di valutazione, sul sito ENEA dedicato alla Ricerca di Sistema. Inoltre, saranno organizzate attività divulgative mirate a sensibilizzare il pubblico generale sull'importanza dell'evoluzione delle

reti elettriche. Tra queste, verrà offerta l'opportunità di vivere un'esperienza immersiva, utilizzando la realtà virtuale (VR), per permettere a chi non è esperto di visualizzare e interagire con la rappresentazione digitale delle reti elettriche. Questo approccio innovativo aiuterà a comprendere meglio come le reti elettriche si stiano evolvendo per far fronte alle sfide del futuro e come la tecnologia stia trasformando il sistema energetico.

Infine, si sottolinea che in termini generali la presente proposta progettuale si prefigge l'obiettivo di sviluppare studi e soluzioni tecnologiche mirate a valutare gli effetti del cambiamento climatico sulle reti elettriche, oltre a ideare strategie per minimizzarne gli impatti anche indiretti sulle altre infrastrutture critiche (come la rete idrica), e proporre soluzioni avanzate per la modernizzazione della rete che facilitino la transizione energetica, a supporto della realizzazione degli scenari energetici futuri. In tal senso, la proposta risponde alle necessità di affrontare le sfide poste dai cambiamenti climatici, e si inserisce perfettamente in un contesto globale che privilegia approcci proattivi e preventivi. Numerosi studi hanno evidenziato che adottare un approccio proattivo nella pianificazione e nel rafforzamento delle reti elettriche per migliorarne la resilienza ai cambiamenti climatici offre vantaggi significativi, sia economici che operativi, rispetto agli interventi successivi per riparare i danni causati da eventi climatici estremi. Un esempio di questa evidenza è fornito dal Climate Resiliency Report 2024

(<https://www.uschamber.com/security/the-preparedness-payoff-the-economic-benefits-of-investing-in-climate-resilience>), che dimostra chiaramente l'efficacia di investire preventivamente nella resilienza delle infrastrutture, riducendo i costi e migliorando l'affidabilità complessiva dei sistemi energetici. In particolare, l'analisi costi-benefici condotta mostra che gli investimenti in resilienza generano risparmi significativi a lungo termine, superando ampiamente i costi iniziali, e contribuendo a rendere le infrastrutture più efficienti e meno vulnerabili a eventi estremi. Secondo il rapporto statunitense, ogni dollaro investito nella resilienza potrebbe generare un risparmio di 13 dollari (6 dollari connessi ai costi di riparazione e bonifica post-evento, 7 dollari attribuibili all'impatto economico più ampio, come la perdita di posti di lavoro, la diminuzione della forza lavoro, la riduzione della produzione economica e la perdita di reddito). Tale risultanza è anche in linea con gli studi TERNA (TERNA S.P.A. | 2023 - documento metodologico per l'applicazione dell'analisi costi benefici applicata al piano di sviluppo 2023), secondo cui, l'adozione di misure proattive nella pianificazione delle infrastrutture, e in particolare gli investimenti nella resilienza, non solo riducono i rischi legati agli eventi climatici estremi, ma garantiscono anche significativi ritorni economici a lungo termine. In effetti, prevenire i danni e ottimizzare l'efficienza del sistema elettrico attraverso un'adeguata pianificazione rappresenta un'opportunità per rafforzare la sostenibilità del sistema e ridurre le perdite economiche future legate a eventi catastrofici.

## 2.7 Impatto sul sistema energetico e benefici attesi

### a) Impatto e benefici sul sistema energetico

Il conseguimento degli obiettivi del progetto può dare un contributo significativo al sistema energetico, in particolare attraverso il supporto alla transizione energetica, un processo cruciale per affrontare le sfide ambientali e climatiche globali. La transizione verso un sistema energetico più sostenibile implica una serie di azioni, tra cui l'ottimizzazione delle reti elettriche, l'integrazione delle fonti rinnovabili e l'adattamento delle infrastrutture alle nuove condizioni climatiche, che il progetto si propone di attuare in modo innovativo. In tal senso, i modelli di riconfigurazione e l'ottimizzazione della pianificazione delle reti elettriche, anche basata sull'integrazione di variabili climatiche e socioeconomiche, permetteranno di migliorare la continuità del servizio e l'efficienza di utilizzo delle risorse. La creazione di modelli avanzati per prevedere il consumo e la generazione energetica anche in un contesto con scarsa disponibilità di dati storici faciliterà una gestione più flessibile e reattiva delle risorse rinnovabili, riducendo la dipendenza dalle fonti fossili. La disponibilità di dati sperimentali per la valutazione dell'impatto del cambiamento climatico sui componenti di rete e lo studio di fattibilità condotto per definire modelli di previsione degli effetti sulle infrastrutture elettriche locali in condizioni meteorologiche estreme, contribuiranno allo sviluppo di una rete più resiliente e che minimizzi gli impatti di disservizi per il cliente finale.

Inoltre, l'implementazione di tecnologie come i convertitori grid forming, le architetture di controllo wide-area e gli studi sulle distorsioni contribuiranno a migliorare la stabilità delle reti, rendendo il sistema elettrico più sicuro e affidabile anche in presenza di rilevanti quote di energie rinnovabili. Inoltre, l'analisi degli impatti delle reti elettriche su quelle idriche promuoverà un approccio olistico nella gestione delle infrastrutture critiche.

### b) Benefici per gli utenti

Il progetto apporterà numerosi benefici agli utenti del sistema elettrico nazionale, migliorando l'affidabilità e la qualità del servizio, nonché rafforzando la resilienza della rete. Questi vantaggi includono una maggiore continuità del servizio, riducendo i disagi derivanti da interruzioni improvvise, e una gestione più efficiente delle risorse energetiche, con impatti positivi sia in termini di costi che di prestazioni. Inoltre, la maggiore resilienza della rete consentirà di affrontare meglio gli eventi climatici estremi, riducendo i danni e i tempi di recupero, come già approfondito nel paragrafo 2.6.

Grazie all'ottimizzazione della pianificazione delle reti e all'implementazione di modelli avanzati di previsione, gli utenti potranno

beneficiare di una fornitura elettrica più stabile e reattiva, riducendo i rischi di interruzioni e disservizi. L'integrazione di fonti rinnovabili sarà facilitata, consentendo agli utenti di accedere a energia più sostenibile e, nel lungo termine, potenzialmente più economica. Inoltre, con l'adozione di strumenti come i convertitori grid-forming e architetture di controllo wide-area, la stabilità delle reti sarà garantita anche in scenari di alta penetrazione di energie rinnovabili, mitigando l'impatto delle fluttuazioni della domanda e dell'offerta con benefici economici per l'utente finale. Infine, l'uso di modelli che considerano le variabili sociologiche aiuterà a sviluppare politiche energetiche più in linea con le esigenze e le aspettative degli utenti, promuovendo una maggiore partecipazione e consapevolezza nella gestione dei consumi energetici. Questi fattori complessivi contribuiranno a creare un sistema elettrico più resiliente, efficiente e sostenibile, a beneficio di tutti gli utenti.

Come da richiesta degli esperti valutatori del progetto, si specificano di seguito i benefici che potranno trarre dai risultati del progetto le diverse tipologie di utente.

- Gli operatori di rete, avendo libero accesso ai risultati del progetto tramite il sito ENEA dedicato alla Ricerca di Sistema Elettrico, potranno consultare i report conclusivi delle attività, che includeranno i dati della sperimentazione e la descrizione di nuovi strumenti come modelli, metodologie e progetti innovativi (es. il convertitore proposto nelle LA2.9 e LA2.10). Questo permetterà loro di analizzare, comparare e utilizzare eventuali dati di interesse per implementare soluzioni tecnologiche innovative, soprattutto riguardo alle problematiche legate all'impatto del cambiamento climatico sulla componentistica delle reti. In questo modo, potranno offrire servizi di qualità superiore agli utenti finali. L'organizzazione di un workshop tecnico/scientifico rivolto agli stakeholder della filiera energetica, tra cui aziende, liberi professionisti e organismi di ricerca, alla conclusione del progetto, favorirà la promozione e l'utilizzo degli output del progetto.
- Gli operatori dell'industria di settore potranno sfruttare i risultati del progetto per progettare e sviluppare tecnologie avanzate, capaci di affrontare le sfide imposte dai cambiamenti climatici e migliorare la resilienza della componentistica delle reti. Questa capacità di innovazione non solo rafforzerà le infrastrutture, ma consentirà alle industrie di anticipare le esigenze normative e di adottare soluzioni sostenibili, favorendo una rete più efficiente e conforme agli standard ambientali in evoluzione.
- La disponibilità dei risultati del progetto sarà utile anche ai ricercatori non direttamente coinvolti nel progetto, come quelli delle università e degli organismi di ricerca non co-beneficiari. Questi ricercatori potranno utilizzare i dati, i metodi e i modelli proposti per le loro sperimentazioni, oltre a sfruttare il software open source per sviluppare ulteriori innovazioni e contribuire al progresso tecnologico. Il confronto tra i ricercatori coinvolti nel progetto e quelli non coinvolti, attraverso gruppi di lavoro tematici e conferenze, favorirà la promozione di nuove innovazioni e il progresso tecnologico del settore.
- La formazione offerta alle scuole e alle università, attraverso tesi, dottorati, workshop ed eventi divulgativi, garantirà la diffusione delle conoscenze acquisite. Questo offrirà un'occasione di approfondimento specialistico per futuri tecnici, professionisti e ricercatori, interessati alle tematiche del progetto.

### c) Previsione delle ricadute applicative

I risultati del progetto sono di interesse di diversi stakeholder della filiera energetica. Il principale settore applicativo riguarda le reti elettriche. Gli strumenti proposti forniscono ritorni di interesse degli operatori di rete ma anche, in maniera indiretta, di eventuali operatori di mercato che potranno essere coinvolti nelle reti future per abilitare nuovi meccanismi di gestione (es. la gestione in isola potrà essere affidata agli aggregatori).

Le soluzioni proposte mirano a favorire la transizione verso un sistema elettrico decarbonizzato e sostenibile, allineandosi agli obiettivi climatici europei. Gli stakeholder trarranno vantaggio dalla maggiore efficienza operativa e dalla possibilità di offrire servizi più affidabili, contribuendo a generare ritorni economici e incrementando la competitività sul mercato. Inoltre, l'inclusione di modelli che considerano le preferenze dei consumatori aumenta l'accettazione delle nuove tecnologie, come i veicoli elettrici, facilitando investimenti futuri e favorendo l'industrializzazione delle innovazioni sviluppate. Un elemento cruciale di questo processo è la potenzialità dei prototipi di convertitore, attualmente non disponibili sul mercato, di aprire nuovi segmenti industriali e di rispondere a esigenze specifiche degli operatori di rete.

Gli output della ricerca, inoltre, agevolano lo sviluppo della filiera delle rinnovabili a beneficio di produttori e installatori di tecnologie di generazione da fonti rinnovabili e della componentistica correlata.

La divulgazione dei dati relativi allo studio sperimentale attraverso i rapporti tecnici, inoltre, fornirà informazioni che potranno essere utili ai produttori di tecnologie ma anche al mondo della ricerca.

In relazione alle ricadute applicative per i proponenti, la ricerca condotta favorirà la capacità di produrre nuove conoscenze e realizzare nuovi prodotti ad alto valore aggiunto, anche grazie al testing sperimentale, su tematiche fondamentali connesse alla abilitazione della transizione energetica.

Facendo seguito alla richiesta di integrazione degli esperti valutatori, di seguito, si illustrano i benefici attesi e le ricadute applicative per il

sistema, per l'utente finale e per l'industria di settore per ogni categoria di prodotto/risultato descritta nello "Stato dell'arte" del progetto e per le corrispondenti LA

#### MODELLI AVANZATI DI PREVISIONE DELLA GENERAZIONE FER CHE TENGANO CONTO DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO

Tema proposto nel progetto - definizione di modello di previsione per la produzione fotovoltaica ed eolica a lungo termine basato su sistemi che realizzano il downscale temporale su base oraria partendo da previsioni giornaliere ottenuti da modelli climatici ad alta risoluzione.

Beneficio per il sistema/utente e/o per l'industria di settore:

La disponibilità di previsioni orarie su orizzonti temporali lunghi ha ricadute importanti sulla pianificazione strategica dei sistemi energetici permettendo di anticipare scenari di stress sulla rete e pianificare in modo più efficiente gli interventi necessari. Questo significa, per gli utenti finali, poter contare su una maggiore adeguatezza della fornitura anche in presenza di scenari climatici futuri caratterizzati da maggiore incertezza (es. eventi estremi).

LA di riferimento: LA1.3

#### MODELLI AVANZATI DI PREVISIONE DEL CONSUMO ENERGETICO

Tema proposto nel progetto - sviluppo di un modello di previsione del consumo a breve termine adatto anche alle situazioni in cui vi siano pochi dati storici disponibili

Beneficio per il sistema/utente e/o per l'industria di settore

La disponibilità di previsioni orarie su orizzonti temporali lunghi ha ricadute importanti sulla pianificazione strategica dei sistemi energetici permettendo di anticipare scenari di stress sulla rete e pianificare in modo più efficiente gli interventi necessari. Questo significa, per gli utenti finali, poter contare su una maggiore adeguatezza della fornitura anche in presenza di scenari climatici futuri caratterizzati da maggiore incertezza (es. eventi estremi).

LA di riferimento: LA2.1

Tema proposto nel progetto - valutazione e stima dei profili di carico per la pianificazione a lungo termine su base caso d'uso

Beneficio per il sistema/utente e/o per l'industria di settore

La riduzione del CV(RMSE) orario, migliorando l'affidabilità dei profili di carico previsti, consente un incremento del 10% dell'efficienza nella progettazione della rete, grazie a una previsione più precisa dei picchi di domanda e della stagionalità dei carichi.

LA di riferimento: LA1.4, LA1.5

#### VARIABILI AGGIORNATE E AMPIATE CHE RIFLETTANO IL NUOVO CONTESTO ENERGETICO

Tema proposto nel progetto - implementazione di modelli di ottimizzazione multiobiettivo avanzati a supporto della pianificazione a breve termine delle reti

Beneficio per il sistema/utente e/o per l'industria di settore

L'integrazione delle variabili sociali consente una stima più rappresentativa della flessibilità a disposizione del gestore della rete, garantendo una più attendibile pianificazione del sistema energetico con evidenti vantaggi in termini di adeguatezza.

LA di riferimento: LA1.13, LA1.14

Tema proposto nel progetto - sviluppo di un metodo euristico basato su un modello digitale di funzionamento della rete idrica e casi specifici di guasto della rete elettrica che consente di analizzare i relativi impatti sulla distribuzione idrica e derivare regole generali di mitigazione

Beneficio per il sistema/utente e/o per l'industria di settore

Lo studio dell'interdipendenza tra reti per una gestione proattiva riduce i rischi connessi agli effetti a cascata e migliora l'affidabilità del servizio idrico per l'utente finale. Inoltre, lo sviluppo del Digital Twin favorisce l'innovazione e la digitalizzazione del settore delle smart utility.

LA di riferimento: LA1.16, LA2.5

Tema proposto nel progetto - studio di fattibilità di modelli statistici e di machine learning per la valutazione o la previsione di effetti sulla operatività di infrastrutture elettriche locali in condizioni meteorologiche estreme

Beneficio per il sistema/utente e/o per l'industria di settore

Con una valutazione accurata degli impatti meteorologici, le infrastrutture elettriche possono essere progettate e adattate per resistere meglio a eventi estremi, aumentando la resilienza complessiva del sistema a beneficio dell'utente finale. Inoltre, l'utilizzo di modelli per valutazione o la previsione degli effetti delle condizioni meteorologiche estreme sull'operatività delle infrastrutture elettriche locali consentirebbe una migliore pianificazione da parte dei gestori del sistema di distribuzione.

LA di riferimento: LA1.6, LA2.8

## NUOVI METODI E STRUMENTI PER LA PIANIFICAZIONE DELLE RETI DI TRASMISSIONE E DISTRIBUZIONE, ANCHE IBRIDE (AC-DC) PER ABILITARE CONFIGURAZIONI TECNOLOGICHE e ARCHITETTURE DI RETE AVANZATE

Tema proposto nel progetto - Applicazione del Wide-Synchronization Control nelle reti di distribuzione ibride per incrementare la sicurezza e la stabilità

Beneficio per il sistema/utente e/o per l'industria di settore

Un incremento dello smorzamento, da 2 a 10 volte i valori originari, nel sistema elettrico migliora la stabilità del sistema, riduce le perdite di energia aumentando l'efficienza operativa, protegge le apparecchiature elettriche da sovratensioni e sovracorrenti, e fornisce una qualità dell'energia più elevata con meno disturbi e interruzioni. Questi benefici contribuiscono a un sistema elettrico più efficiente, affidabile e sostenibile con evidenti vantaggi sia per il gestore di rete che per l'utente finale.

LA di riferimento LA1.7, LA2.11

Tema proposto nel progetto - sviluppo di modelli, metodi di calcolo innovativi e di un software per la pianificazione risk-based a lungo termine delle reti elettriche di distribuzione MT finalizzata all'incremento dell'Hosting Capacity e al miglioramento della resilienza

Beneficio per il sistema/utente e/o per l'industria di settore

I metodi proposti agevolano l'integrazione delle fonti rinnovabili non programmabili e lo sviluppo della mobilità sostenibile, in particolare della mobilità elettrica, apportando vantaggi ai gestori del sistema elettrico, agli utenti finali e agli operatori del settore, come i produttori di tecnologie per le energie rinnovabili.

LA di riferimento LA1.8, LA2.12

Tema proposto nel progetto: sviluppo di una metodologia per la riconfigurazione delle reti a supporto della pianificazione delle reti elettriche di distribuzione e applicazione a casi studio

Beneficio per il sistema/utente e/o per l'industria di settore

La metodologia proposta produrrà benefici per il sistema elettrico e per i suoi utenti in termini di hosting capacity, riduzione di numero di congestioni e di altre violazioni dei vincoli di sicurezza. Tali benefici saranno quantificati sugli use case proposti e simulati nell'ambito della LA2.13.

LA di riferimento LA1.9, LA2.13

Tema proposto nel progetto - Sviluppo di un software per la pianificazione delle reti di distribuzione, anche ibride AC-DC

Beneficio per il sistema/utente e/o per l'industria di settore

Il libero accesso a uno strumento software con le caratteristiche indicate amplia la gamma di strumenti disponibili per gli stakeholder della filiera energetica. Questo offre la possibilità di condurre studi non previsti dai software commerciali attualmente sul mercato, con ricadute positive per l'industria di settore. Inoltre, la disponibilità di un software gratuito per ricercatori non coinvolti nel progetto, come quelli delle università e degli organismi di ricerca non co-beneficiari, consentirà di avviare ulteriori ricerche, promuovere nuove innovazioni e contribuire ulteriormente al progresso tecnologico. In questo modo, si innesca un circolo virtuoso che favorisce il continuo miglioramento e l'evoluzione del settore energetico.

LA di riferimento LA1.1, LA1.2, LA1.3, LA1.5, LA1.13, LA1.14, LA1.15, LA2.1, LA2.6, LA2.14

Tema proposto nel progetto Valutazione degli impatti e stress termici, dovuti alle distorsioni armoniche ed al cambiamento climatico, sugli apparati, componenti e sulla power quality della rete, basandosi anche sulla caratterizzazione prestazionale delle soluzioni per la mitigazione e/o compensazione delle armoniche.

Beneficio per il sistema/utente e/o per l'industria di settore

La valutazione delle distorsioni di grandezze elettriche ed il relativo impatto sugli apparati di un utente finale (industriale, residenziale, PA) o del sistema elettrico con la possibilità di mettere in atto azioni mitigative basate su soluzioni di filtraggio potrà apportare:

- benefici diretti: minori costi energetici;
- benefici indiretti: mitigazione dei danni e dell'invecchiamento prematuro delle attrezzature con conseguenti minori costi di manutenzione, produttività, allungamento del tempo di esercizio di un apparato

La valutazione quantitativa di tali benefici risulta strettamente dipendente dalla tipologia dell'utente e del sistema elettrico. Le società distributrici potranno beneficiare di modelli accurati, rapidi e dalla semplice interfaccia grafica per la previsione di fenomeni di power quality (inquinamento armonico e buchi di tensione) con benefici indotti anche sugli utenti finali, che potranno beneficiare di una migliore Power Quality sia negli scenari climatici attuali che futuri.

LA di riferimento LA1.10, LA2.2, LA2.7, LA2.14

Tema proposto nel progetto - metodologia e tecnica di modellazione geospaziale di sistemi di distribuzione

Beneficio per il sistema/utente e/o per l'industria di settore

La disponibilità di dati georeferenziati e/o tecniche che considerino la caratteristica spaziale del sistema, consentono una migliore rappresentazione del sistema reale con ricadute importanti sulla pianificazione strategica dei sistemi energetici a beneficio dei gestori del

sistema elettrico e degli utenti finali  
LA di riferimento LA1.11, LA1.12

#### DATASET SPERIMENTALI

Tema proposto nel progetto - Produzione di dataset di dati sperimentali risultanti da test stress termo-igrometrici su componenti delle reti elettriche di distribuzione

Beneficio per il sistema/utente e/o per l'industria di settore

I diversi stakeholder della filiera energetica (es. industria di settore, organismi di ricerca non coinvolti nel progetto, ecc.) potranno consultare i dati della sperimentazione con la possibilità di analizzare, comparare e utilizzare eventuali dati di interesse per implementare soluzioni tecnologiche innovative, soprattutto riguardo alle problematiche legate all'impatto del cambiamento climatico sulla componentistica delle reti. Tutto questo potrà avere ricadute positive sulla resilienza del sistema energetico e sull'affidabilità della fornitura a beneficio degli utenti finali.

LA di riferimento LA2.3, LA2.4

#### PROGETTAZIONE DEGLI APPARATI HARDWARE

Tema proposto nel progetto - Prototipo di convertitore grid-forming trifase a tensione e frequenza industriale 400V, 50Hz di taglia 100 kVA validato sperimentalmente

Beneficio per il sistema/utente e/o per l'industria di settore

L'installazione di un convertitore grid forming con capacità di assistenza alla rete di tipo VSG risolve il problema dell'aumento dei rischi di instabilità legati alla crescita delle energie rinnovabili. Invece di compromettere la stabilità della rete, la migliora con l'aumentare della quantità di rinnovabili. Il prototipo proposto, quindi, potrà facilitare la diffusione degli impianti da fonti rinnovabili non programmabili, con benefici per i gestori del sistema elettrico, per gli utenti finali e per l'industria di settore (es. produttori di fonti rinnovabili).

LA di riferimento LA2.9, LA2.10

## 2.8 Verifica dell'esito del progetto

### a) Oggetti e documentazione dei risultati finali

Di seguito si riporta elenco dei possibili test di verifica per ciascuna Linea di Attività del Progetto.

LA1.1 Analisi degli impatti del cambiamento climatico sull'affidabilità dei componenti delle reti elettriche

Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA fornisca: i modelli affidabilistici dei componenti di rete analizzati e un rapporto tecnico descrittivo dei modelli sviluppati.

LA1.2 Studio e sviluppo di configurazioni di reti ibride in ambiente OpenDSS

Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA riporti: (i) la definizione di una o più reti di riferimento (AC, DC, ibride) caratterizzate da architetture e configurazioni di rilievo rispetto all'evoluzione futura del panorama energetico (es. differenti gradi di penetrazione delle fonti rinnovabili); (ii) un modello sviluppato in linguaggio OpenDSS per ciascuna delle configurazioni definite; (iii) rapporto tecnico descrittivo delle configurazioni e degli scenari definiti.

LA1.3: Metodi avanzati di previsione di generazione rinnovabile a lungo termine propedeutici all'identificazione dei nodi critici

Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA abbia implementato i seguenti prodotti: (i) modello di previsione della produzione fotovoltaica a lungo termine; (ii) modello di previsione della produzione eolica a lungo termine; (iii) rapporto tecnico che descriva l'approccio utilizzato per la previsione a lungo termine di generazione fotovoltaica ed eolica.

LA1.4: Definizione di casi studio per la progettazione e realizzazione di modelli avanzati di stima del carico per la pianificazione a lungo termine

Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA fornisca: (i) i casi d'uso per la modellazione energetica che serviranno come base per sviluppare modelli avanzati di stima del carico termico (soddisfatto da vettore elettrico) ed elettrico nell'ambito della LA1.5.; (ii) un dataset costituito da una raccolta organizzata di dati sui consumi energetici, profili di occupazione degli edifici, tendenze migratorie e proiezioni demografiche, che sarà utilizzabile per studi futuri e per calibrare i modelli di simulazione; (iii) un rapporto tecnico che descriva i casi studio e il dataset. In particolare, il rapporto tecnico dovrà fungere anche da strumento di supporto per la definizione di nuovi casi d'uso (allegato al rapporto tecnico); in tal senso, esso esplicherà le linee guida per la generazione e gestione di scenari complessi che includano variabili edilizie, climatiche, demografiche e socioeconomiche, facilitando la replica e l'aggiornamento delle analisi.

LA1.5: Valutazione e stima dei profili di carico per la pianificazione a lungo termine sui casi d'uso definiti.

Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA abbia fornito: (i) valutazione e stima dei profili di carico per la pianificazione a lungo termine sui casi d'uso definiti nella LA1.4; (ii) dataset strutturato dei profili di carico elettrico e termico stimati per diverse tipologie di edifici e scenari futuri; (iii) rapporto tecnico descrittivo dei risultati delle simulazioni dei profili di carico per ciascun caso.

LA1.6: Analisi di dataset di tipo energetico e climatico e di modelli per la valutazione e la previsione di effetti sulla operatività di infrastrutture elettriche locali in condizioni meteorologiche estreme

Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA abbia fornito l'analisi di dataset di tipo energetico e climatico e di modelli per la valutazione e la previsione di effetti sulla operatività di infrastrutture elettriche locali in condizioni meteorologiche estreme. I risultati della linea, sintetizzati nel rapporto tecnico, dovranno riportare descrizione dell'analisi dei dati raccolti e delle tecniche di previsione selezionate finalizzate a tracciare un perimetro informativo all'interno del quale studiare la fattibilità di modelli di valutazione e previsione dell'impatto di eventi naturali pericolosi su infrastrutture critiche quali quelle elettriche.

LA1.7 Applicazioni del Wide-Synchronization Control nelle reti di distribuzioni ibride per incrementare la sicurezza e la stabilità – Analisi teorica

Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA abbia definito un innovativo schema di controllo wide-area per i sistemi di potenza. Lo schema dovrà essere descritto nel rapporto tecnico che dovrà includere: (i) la definizione delle basi teoriche e del complesso delle equazioni matematiche per l'adozione del wide-synchronization control; (ii) le principali differenze con il caso della trasmissione; (iii) vincoli da tenere in considerazione per l'implementazione del controllo (iv) vantaggi per la sicurezza e la stabilità del sistema elettrico; (v) i limiti di implementazione della tecnologia.

LA1.8 Sviluppo di modelli e metodo di calcolo innovativi per la pianificazione risk-based a lungo termine delle reti elettriche di distribuzione MT finalizzata all'incremento dell'Hosting Capacity e il miglioramento della resilienza

Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA abbia sviluppato un metodo di calcolo innovativo per la pianificazione risk-based a lungo termine delle reti elettriche di distribuzione MT finalizzato all'incremento dell'Hosting Capacity e al miglioramento della resilienza. Il raggiungimento dei risultati sarà verificabile attraverso il rilascio di: (i) prototipi software dei singoli tool di calcolo (sviluppati in linguaggio Python) per la valutazione delle prestazioni dei vari modelli sviluppati; (ii) un rapporto tecnico sulla descrizione delle metriche di misura dell'Hosting Capacity e della resilienza delle reti elettriche di distribuzione, dei modelli stocastici delle risorse energetiche e della loro flessibilità disponibile, del DTR applicato alle reti elettriche di distribuzione, dei modelli di calcolo avanzato delle reti; (iii) i prototipi dei singoli tool di calcolo per la valutazione delle prestazioni dei vari modelli sviluppati; (iii) i risultati dei test condotti per confrontare i differenti modelli in termini di precisione dei risultati e di onere computazionale; (iv) le scelte definitive sulle metriche e i modelli da implementare nel software di pianificazione della LA2.12.

LA1.9 Sviluppo di una metodologia e di uno strumento software per la riconfigurazione topologica delle reti nello studio dell'impatto di eventi climatici avversi sulla affidabilità delle reti elettriche di distribuzione.

Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA abbia sviluppato una metodologia per la riconfigurazione delle reti a supporto della pianificazione delle reti elettriche di distribuzione. La metodologia potrà essere verificata attraverso la descrizione riportata nel rapporto tecnico che documenterà: (i) definizione e basi teoriche per lo sviluppo di un problema di riconfigurazione ottimale in presenza di più sorgenti di alimentazione e per l'integrazione delle equazioni di rete; (ii) formulazione e soluzione del problema mediante tecnica di programmazione MISOCP; (iii) test degli algoritmi risolutivi e valutazione dei limiti delle metodologie proposte; (iv) sviluppo degli use case relativi a problemi di pianificazione, espansione, evoluzione delle reti di distribuzione da sviluppare nella attività LA2.13.

LA1.10 Modellazione avanzata della distorsione di grandezze elettriche di convertitori elettronici di potenza nelle reti e microreti di distribuzione

Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA abbia fornito modelli software per la valutazione delle distorsioni armoniche di convertitori elettronici. Le descrizioni dei modelli sviluppati, la teoria utilizzata per ottenerli e i risultati ottenuti dalle simulazioni su caso studio saranno sintetizzati nel rapporto tecnico della linea.

LA1.11 Definizione e sviluppo di tecniche di modellazione geospaziali di sistemi di distribuzione

Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA abbia definito una metodologia per la definizione di modelli di distribuzione per regioni di interesse dell'utente, sulla base delle informazioni georeferenziate

disponibili in letteratura combinate ad appropriati algoritmi di analisi ed ottimizzazione delle stesse. La metodologia proposta sarà descritta nel rapporto tecnico della linea.

**LA1.12** Calibrazione e messa a punto sperimentale su casi studio di tecniche di modellazione geospaziali di sistemi di distribuzione  
Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che nell'ambito della linea sia stata condotta la calibrazione e messa a punto della metodologia e tecnica di modellazione geospaziale della LA1.11. I risultati di questa attività potranno essere verificati attraverso l'analisi del rapporto tecnico della linea.

**LA1.13** Implementazione di modelli di ottimizzazione multiobiettivo avanzati a supporto della pianificazione a breve termine delle reti  
Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA abbia fornito modelli di ottimizzazione multiobiettivo a supporto della pianificazione a breve termine delle reti elettriche che tengano conto anche di aspetti connessi all'accettabilità sociale. I modelli implementati e i risultati dei test su base scenario di simulazione corredati di analisi degli aspetti sociologici saranno descritti nel rapporto tecnico, che consentirà, quindi, di verificare il raggiungimento degli obiettivi della linea.

**LA1.14** Studio delle tecnologie per la pianificazione di scenari energetici a medio-lungo termine da implementare nelle configurazioni delle reti elettriche e implementazione dei relativi modelli di pianificazione a breve termine.  
Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA abbia condotto un'analisi delle tecnologie emergenti al fine di individuare configurazioni di reti elettriche nei futuri scenari energetici e implementato un modello di ottimizzazione multiobiettivo a supporto della pianificazione a breve termine delle reti negli scenari energetici futuri. I risultati dello studio e la descrizione del mondo saranno documentati nel rapporto tecnico, che consentirà, quindi, di verificare il raggiungimento degli obiettivi della linea.

**LA1.15** Sviluppo dei modelli affidabilistici dei componenti delle reti elettriche in funzione degli scenari climatici futuri  
Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA abbia fornito alla LA2.6 gli algoritmi per la valutazione dell'affidabilità di componente e di fornitura. Il Rapporto tecnico della linea riporterà la descrizione dei codici Python sviluppati e i risultati dei test su dizionario prova condotti, permettendo, quindi, di verificare il raggiungimento degli obiettivi della linea.

**LA1.16** Definizione di un modello per la caratterizzazione degli effetti dei guasti alla rete elettrica sulle reti idriche  
Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA abbia sviluppato un modello digitale per la caratterizzazione degli effetti dei guasti alla rete elettrica sulle reti idriche. Il rapporto tecnico della linea riporterà la descrizione del gemello digitale messo a punto per simulare il comportamento idraulico della rete in funzione del funzionamento ordinario o straordinario degli elementi fisici energivori, permettendo di verificare il raggiungimento degli obiettivi della linea.

**LA2.1** Modelli avanzati di previsione del consumo energetico e generazione rinnovabile a breve termine propedeutici alla previsione dei nodi critici  
Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA abbia individuato almeno un modello di previsione del consumo energetico a breve termine applicabile in un contesto con scarsa disponibilità di dati storici. Il rapporto tecnico descriverà i diversi approcci di previsione del consumo energetico a breve termine applicabili nei contesti applicativi dove vi è una scarsa disponibilità di dati storici e mostrerà anche i dettagli degli approcci di previsione della generazione rinnovabile (fotovoltaico ed eolico) considerati.

**LA2.2** Definizione dei requisiti e avvio della realizzazione di una infrastruttura sperimentale per l'analisi delle distorsioni delle grandezze elettriche e la valutazione della Power Quality delle reti e microreti di distribuzione e delle relative procedure di test  
Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA abbia definito i requisiti di una infrastruttura sperimentale per l'analisi delle distorsioni delle grandezze elettriche e la valutazione della Power Quality delle reti e microreti di distribuzione e delle relative procedure di test e abbia avviato le gare propedeutiche alla realizzazione dell'infrastruttura stessa. Il rapporto tecnico della linea descriverà sia i requisiti dell'infrastruttura definiti che i dettagli relativi alle gare avviate.

**LA2.3** Setup dei Test sperimentali per la valutazione della sensitività di componenti delle reti elettriche soggetti a stress termo-igrometrici  
Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA abbia definito la metodologia di prova e di esecuzione dei test sperimentali da adottare nella LA2.4 e completato il setup dell'infrastruttura di test sperimentale (es. cablaggi, calibrature, acquisti nuove apparecchiature, ecc.). Il rapporto tecnico della linea descriverà sia le metodologie di prova definite che le informazioni relative al setup dell'infrastruttura di test.

LA2.4 Test sperimentali, creazione e popolazione di un dataset di dati sperimentali risultanti da test stress termo-igrometrici su componenti delle reti elettriche

Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA abbia condotto i test sperimentali previsti e fornito i relativi risultati in un dataset di dati sperimentali messo a disposizione sul sito della Ricerca di Sistema ENEA. Il rapporto tecnico della linea descriverà sia le prove condotte che i risultati dei test, fornendo informazioni utili all'utilizzo del dataset.

LA2.5 Quantificazione e analisi degli impatti di malfunzionamenti della rete elettrica sulla rete idrica

Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che LA abbia fornito i risultati della stima della resilienza di reti idriche in relazione alla loro dipendenza dalle reti elettriche, attraverso lo sviluppo di una metodologia in grado di valutare quantitativamente l'interdipendenza tra reti elettriche e reti idriche a scala urbana. Tale valutazione sarà condotta utilizzando il caso studio e il gemello digitale implementati nella LA1.16. I risultati ottenuti saranno sintetizzati nel rapporto tecnico della linea, che riporterà: (i) descrizione della metodologia di analisi degli impatti dei malfunzionamenti di reti elettriche su reti di utilità quali quella di distribuzione idrica; (ii) definizione e descrizione degli scenari elaborati e relativa quantificazione.

LA2.6 Sviluppo di un software per la pianificazione delle reti di distribuzione, anche ibride AC-DC

Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che LA abbia reso disponibile un software per la pianificazione delle reti di distribuzione, anche ibride AC-DC. Il rapporto tecnico descriverà le funzionalità del software sviluppato, fungendo anche da manuale d'uso.

LA2.7 Valutazione sperimentale delle distorsioni di grandezze elettriche e della Power Quality di reti e microreti di distribuzione

Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che nell'ambito della LA siano state condotti test in ambiente sperimentale delle distorsioni di grandezze elettriche e della Power Quality delle reti e microreti di distribuzione finalizzati alla valutazione prestazionale di soluzioni per la mitigazione e/o compensazione delle armoniche. La descrizione dei test e i relativi risultati saranno sintetizzati nel rapporto tecnico della linea.

LA2.8: Studio di fattibilità di modelli statistici e di machine learning per la valutazione o la previsione di effetti sulla operatività di infrastrutture elettriche locali in condizioni meteorologiche estreme

Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA abbia verificato, attraverso la conduzione di uno studio di fattibilità, la possibilità di definire modelli per la valutazione o la previsione di effetti sulla operatività di infrastrutture elettriche locali in condizioni meteorologiche estreme. Il rapporto tecnico della linea documenterà lo studio di fattibilità condotto e i risultati ottenuti.

LA2.9 Messa a punto e test P-HiL di un convertitore grid-forming con avanzata capacità diagnostica e funzionalità di supporto alla rete con sovraccaricabilità adattativa e massima affidabilità

Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA abbia finalizzato l'assemblaggio del prototipo di convertitore grid-forming trifase a tensione e frequenza industriale 400V, 50Hz di taglia 100 kVA, sviluppando e integrando i relativi firmware (controllo per la diagnostica del convertitore, firmware lato microcontrollore e software per permettere un debug avanzato del convertitore; firmware lato microcontrollore e software (lato PC) dell'interfaccia di controllo MODBUS avanzata) e validando funzionalmente il prototipo in ambiente sperimentale di laboratorio. La descrizione dei firmware e dei risultati della validazione funzionale saranno sintetizzati nel rapporto tecnico della linea.

LA2.10 Prove di endurance del convertitore grid-forming per la raccolta di dati di affidabilità e per l'implementazione di una strategia di manutenzione predittiva

Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA abbia aggiornato il prototipo di convertitore della LA2.9 per dotarlo di funzionalità di prognostica avanzate (aggiornamento hardware e dei firmware). Nell'ambito della LA dovranno anche essere condotti test sperimentali riguardanti il sistema di prognostica implementato, sottoponendo i moduli di potenza a cicli termici fino a portarli a rottura, per valutarne l'affidabilità. Il rapporto tecnico della linea descriverà il prototipo dotato delle funzionalità aggiuntive, i firmware sviluppati e sintetizzerà i risultati sperimentali riguardanti l'affidabilità del convertitore dopo un numero di ore di lavoro pari ad almeno 300 e a seguito di almeno 20 000 eventi di sovraccarico transitori.

LA2.11 Applicazioni del Wide-Synchronization Control nelle reti di distribuzioni ibride per incrementare la sicurezza e la stabilità – Casi studio e dimostrazione

Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA abbia individuato almeno due casi studio significativi per l'implementazione del WSC nelle reti di distribuzione e dimostrato come l'applicazione del WSC possa fornire dei benefici alla sicurezza e alla stabilità del sistema elettrico in diverse condizioni di esercizio e in diversi assetti. I casi

studio individuati e i risultati dei test in simulazione saranno sintetizzati nel rapporto tecnico della linea.

**LA2.12 Sviluppo di software di pianificazione risk-based a lungo termine delle reti elettriche di distribuzione MT finalizzato all'incremento dell'Hosting Capacity e al miglioramento della resilienza**

Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA abbia sviluppato un software per la pianificazione risk-based a lungo termine delle reti elettriche di distribuzione in linguaggio Python. Il rapporto tecnico della linea riporterà: 1) i risultati della ricerca bibliografica degli approcci di ottimizzazione disponibili nella letteratura scientifica condotta; 2) la descrizione teorica dell'algoritmo di pianificazione risk-based multi-obiettivo e multi-periodo implementato; 3) la descrizione teorica dell'algoritmo di allocazione ottima di SOP risk-based e multi-obiettivo implementato; 4) la descrizione dei risultati delle simulazioni.

**LA2.13 Applicazione di metodologie di riconfigurazione ottimale alla soluzione di problemi di pianificazione, evoluzione o espansione delle reti di distribuzione**

Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA abbia applicato metodologie di riconfigurazione ottimale per la soluzione di problemi di pianificazione, evoluzione o espansione delle reti di distribuzione a casi studio. L'applicazione sarà mirata a valutare l'efficacia delle metodologie di riconfigurazione ottimale alla soluzione di problemi di pianificazione, evoluzione o espansione delle reti di distribuzione. Nel rapporto tecnico saranno descritti i casi d'uso, le metodologie e commentati i risultati delle simulazioni condotte.

**LA2.14 Sviluppo di funzionalità integrative del software ArsTool per la previsione dell'inquinamento armonico e dei buchi di tensione nelle reti di distribuzione**

Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che la LA abbia sviluppato e fornito alla LA2.6 pacchetti software in linguaggio Python per la previsione dell'inquinamento armonico e dei buchi di tensione nelle reti di distribuzione. Tali algoritmi, opportunamente integrati nel software di pianificazione implementato nella LA2.6, abiliteranno funzionalità per la previsione dell'inquinamento armonico e dei buchi di tensione nelle reti di distribuzione. La descrizione degli algoritmi e dei risultati relativi alla simulazione degli stessi, finalizzata alla valutazione dei principali indici di Power Quality, sarà sintetizzata nel rapporto tecnico della linea.

**LA3.1: Attività di diffusione I SAL**

Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che nel corso della LA siano stati prodotti: (i) rapporto tecnico descrittivo delle attività di disseminazione realizzate nel corso del SAL; (ii) pubblicazioni tecnico-scientifiche di varia tipologia tra cui articoli su rivista e memorie/poster/presentazioni a convegni; (iii) applicativo software di realtà immersiva per la divulgazione dei risultati del progetto a un pubblico non specialistico.

**LA3.2: Attività di diffusione II SAL**

Test di verifica: al fine di valutare la rispondenza tra risultati ottenuti e risultati attesi, si potrà verificare che nel corso della LA siano stati prodotti: (i) rapporto tecnico descrittivo delle attività di disseminazione realizzate nel corso del SAL; (ii) pubblicazioni tecnico-scientifiche di varia tipologia tra cui articoli su rivista e memorie/poster/presentazioni a convegni. In aggiunta, i risultati del progetto dovranno essere presentati a pubblico non specialistico in almeno 1 evento (es. workshop, fiera, visite scolastiche presso il CR ENEA di Portici, Notte dei Ricercatori, ecc.) anche avvalendosi dell'applicativo software di realtà immersiva sviluppato nella LA3.1.