

**PIANO TRIENNALE DI REALIZZAZIONE 2022-24 - RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO
NAZIONALE**

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

AFFIDATARIO ENEA

Tema 2.3 - Evoluzione, pianificazione, gestione ed esercizio delle reti elettriche

Durata: 36 Mesi

Semestre n. 5 – Periodo attività: 01/01/2024 – 30/06/2024

ABSTRACT ATTIVITA' SEMESTRALE:

Il presente documento descrive le attività di ricerca del progetto “Evoluzione, pianificazione, gestione ed esercizio delle reti elettriche” svolte durante il quinto semestre di progetto.

Le attività di ricerca hanno riguardato le seguenti Linee di Attività:

- ENEA (affidatario del progetto) per LA1.2, LA1.3, LA1.4, LA1.5; LA1.15; LA1.16; LA1.18;
- Università di Palermo (co-beneficiario del progetto) per LA1.6 e LA1.7;
- Università di Cagliari (co-beneficiario del progetto) per LA1.8 e LA1.9;
- Politecnico di Bari (co-beneficiario del progetto) per LA1.10 e LA1.11;
- Politecnico di Torino (co-beneficiario del progetto) per LA1.12 e LA1.13.

AFFIDATARIO / COBENEFICIARIO	SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE E RISULTATI CONSEGUITI
ENEA	Nell'ambito del presente semestre, ENEA ha condotto attività di ricerca relativamente alle seguenti linee di attività: LA1.2, LA1.3, LA1.4, LA1.5; LA1.15; LA1.16; LA1.18. La linea LA 1.2 “Progettazione e sviluppo di modelli di predizione delle risorse di generazione e carico di reti e microreti elettriche” mira a progettare e sviluppare modelli di previsione per le sorgenti di generazione da FER solare ed eolica e ad implementare un modello di previsione per il carico elettrico da integrare nelle reti test per la fase di validazione sperimentale delle diverse funzionalità del tool. Lo studio della letteratura tecnico-scientifica condotto nel quarto semestre con il fine di individuare dataset di consumo, produzione da FER e meteo da utilizzare in scenari previsionali da breve a lungo termine, ha evidenziato una limitata disponibilità di dataset previsionali di potenza generata da FER e di carico, che coniughino variabili meteorologiche e climatiche con la generazione ed il consumo di energia. Pertanto, nel presente

semestre, l'attività si è focalizzata sulla progettazione di una metodologia per modellare organicamente generazione rinnovabile e consumo all'interno della stessa area geografica. A partire da tale metodologia, è stata, quindi, avviato lo sviluppo degli algoritmi di previsione delle risorse di generazione solare, eolica e del carico. Le previsioni derivanti dall'applicazione dei tre modelli potranno essere aggregate in curve, in base alla risoluzione e all'orizzonte temporale. La metodologia adottata integra modelli fisici e data driven: il pattern "model chain", che consiste in una cascata di modelli fisici per convertire le variabili meteorologiche previste —radiazione solare e vento— in energia generata; un modello di machine learning invece stima il consumo, utilizzando anche dati storici. La scelta di non impiegare modelli di machine learning per la previsione della produzione rinnovabile è stata legata all'indisponibilità di dati storici misurati nei contesti analizzati. I modelli implementati saranno impiegati nel sesto semestre per costruire le serie temporali previsionali, ovvero i dataset previsionali forniti in output al progetto.

La linea **LA1.3 “Definizione di modelli di anomaly detection utili alle valutazioni di adeguatezza, sicurezza e resilienza delle reti e microreti elettriche”**, si pone i seguenti obiettivi: i) implementazione di un modello di anomaly detection per l'individuazione di anomalie dei componenti integrati in reti e microreti elettriche; ii) sviluppo di un dataset dei profili di funzionamento dei componenti di rete; iii) progettazione e sviluppo di un generatore di un modulo software per la generazione di anomalie in diversi componenti di rete da integrare in ARS Tool (LA1.15).

Nel semestre in corso, a partire dai risultati ottenuti nel quarto semestre relativi allo studio della letteratura sugli approcci di anomaly detection applicabili alle reti e microreti elettriche, è stato sviluppato un modello finalizzato all'identificazione di anomalie nei componenti di tali sistemi. Il modello si basa sull'analisi delle correlazioni tra variabili significative del sistema, con l'obiettivo di rilevare condizioni di funzionamento anomale.

Parallelamente, è stato progettato e realizzato un generatore di anomalie, concepito per simulare scenari realistici di malfunzionamento dei componenti di una rete elettrica. Tra gli scenari simulati figurano, ad esempio, l'accumulo di polvere e deiezioni sui pannelli fotovoltaici, il deterioramento dei componenti e altre condizioni critiche.

Nel prossimo semestre si procederà alla valutazione dell'efficacia del modello di anomaly detection implementato e all'integrazione sia del modello di anomaly detection che del generatore di anomalie all'interno dell'ARS Tool.

La linea **LA1.4 “Definizione del modello per la valutazione dei sistemi di accumulo e delle FER per il supporto dell'adeguatezza di sistemi elettrici decarbonizzati”** si pone come obiettivo la definizione di un modello di calcolo che, fissati alcuni vincoli di sistema consenta di valutare, per il sistema energetico analizzato, la quantità di energia da stoccare per rispettare i vincoli di sistema scelti, e di analizzarne l'impatto sull'adeguatezza del sistema. Nel presente semestre, dopo le analisi di letteratura preliminarmente condotte

nel quarto SAL, sono state ricostruite le curve “frazione di accumulo penetrazione FRNP” e fornita la relativa correlazione matematica. Nel semestre successivo si procederà con la definizione del modello previsto nella LA1.4 (pseudocodice) e con la sua codifica in Python.

La linea **LA1.5 “Implementazione e testing di modelli per la valutazione dell’adeguatezza di reti elettriche in funzione dell’affidabilità del sistema e dei suoi componenti”** ha come scopo principale l’implementazione e il testing di modelli per la valutazione dell’adeguatezza di sistemi elettrici ad alta penetrazione di risorse distribuite anche di tipo rinnovabile non programmabile. Nel presente semestre, dopo la definizione del modello eseguita nel quarto SAL, si è proceduto alla sua codifica Python.

Inoltre, l’attività è stata focalizzata sulla realizzazione del modulo di integrazione del modello (codici Python) con il software ARS tool. Tale fase ha previsto la progettazione e la realizzazione dell’interfaccia di input da parte degli utenti e dell’interfaccia di visualizzazione dei risultati.

Nel semestre successivo si procederà alla simulazione di 3 casi studio mediante il software sviluppato. Infine, acquisito il codice Python per la valutazione dei sistemi di accumulo e delle FER per il supporto dell’adeguatezza di sistemi elettrici decarbonizzati dalla LA1.4, si procederà allo sviluppo del modulo di integrazione nel software ARS tool. In particolare, verrà progettata e realizzata l’interfaccia di input da parte degli utenti e l’implementazione dell’interfaccia di visualizzazione dei risultati.

La linea **LA1.15 “Sviluppo di un tool per valutazioni di adeguatezza, affidabilità e resilienza di sistemi di potenza”** ha come principale scopo l’implementazione di uno strumento software capace di rendere disponibile agli utenti i diversi modelli, ed i relativi output, implementati dalle altre linee di attività del progetto.

Nel presente semestre, in particolare, è stata portata a termine la progettazione ed implementazione del dizionario di rete, e della comunicazione di questo con l’interfaccia grafica sviluppata nel precedente SAL.

Infine, sono state ideate e configurate due reti benchmark per l’esecuzione delle funzionalità del software. La progettazione delle reti è stata effettuata in coordinamento con i responsabili delle altre LA, in quanto tali reti devono essere in grado di evidenziare al meglio le funzionalità da sviluppare e da integrare nel software. Pertanto, sono state progettate sia reti AC (in media tensione, caratteristiche di una rete di distribuzione) che reti ibride, in cui la penetrazione delle tecnologie DC è particolarmente rilevante.

Nel successivo semestre si procederà all’integrazione delle funzionalità sviluppate all’interno delle altre LA a alla fase di test e debug.

La linea **LA1.16 “Attività di testing dei modelli di valutazione per l’adeguatezza, la sicurezza e la resilienza delle reti elettriche e caratterizzazione sperimentale dei componenti”** è focalizzata sull’esecuzione delle attività sperimentali e, più nello specifico, su:

	• testing dei modelli di valutazione per l'adeguatezza, la sicurezza e la resilienza delle reti elettriche; • caratterizzazione sperimentale di componenti di reti di distribuzione BT. Le attività svolte nel semestre corrente si sono concentrate sulla caratterizzazione sperimentale della componentistica integrata nelle reti elettriche in bassa tensione (BT). Più nello specifico, sono state eseguite prove sperimentali su campioni di cavi in bassa tensione di sezione 4mmq, 6mmq e 10mmq e di lunghezza pari a 10 m cadauno. Per simulare gli effetti degli stress termici sulle prestazioni elettriche dei campioni, questi sono stati sottoposti a profili variabili di temperatura e umidità operativa, generati all'interno di una camera climatica. Attraverso la misurazione delle grandezze elettriche, quali tensione e corrente di funzionamento, sono state determinate le impedenze elettriche dei campioni in funzione delle diverse condizioni ambientali di test. Le prove sono state condotte in corrente continua, poiché, date le ridotte lunghezze dei campioni, si è ritenuto trascurabile l'effetto delle variazioni di impedenza che si manifesterebbero in corrente alternata, in particolare quelle riconducibili alla reattanza induttiva e/o capacitiva. I dataset sperimentali ottenuti sono stati infine confrontati con i valori teorici, calcolati applicando le leggi fondamentali dell'elettrotecnica in funzione della variazione dei parametri termici. La linea LA1.18 "Attività di diffusione II SAL" ha come obiettivo la divulgazione dei risultati di progetto conseguiti da ENEA e dai relativi co-beneficiari. Nel quinto semestre, ENEA e i propri co-beneficiari hanno avviato un insieme di attività preparatorie finalizzate alla partecipazione agli eventi di disseminazione scientifica previsti nel sesto semestre. Tali attività hanno riguardato la pianificazione dei contenuti, la selezione dei contributi tecnico-scientifici e la coordinazione tra i partner per garantire una comunicazione integrata e rappresentativa del progetto. In particolare, sono stati predisposti gli interventi per il seminario organizzato nell'ambito della fiera divulgativa <i>ENLIT 2024</i> (ottobre 2024), per la conferenza <i>NanoInnovation 2024</i> (settembre 2024) e per l'evento finale di divulgazione che sarà organizzato presso il Centro Ricerche ENEA di Portici (dicembre 2024). In parallelo, sono proseguite le attività di sviluppo di un'applicazione software interattiva a scopo divulgativo (Mastergrid) e la disseminazione scientifica attraverso la pubblicazione di articoli e la partecipazione ai tavoli tecnici di settore sia nazionali che europei.
UNIPA	Nell'ambito del presente semestre, UNIPA ha condotto attività di ricerca relativamente alle seguenti linee di attività: LA1.6, LA1.7. La linea LA1.6 "Progettazione e sviluppo di un modello per l'analisi in simulazione dell'impatto delle influenze esterne sulla sicurezza, adeguatezza e resilienza di porzioni di reti pubbliche o di utenti privati" ha come scopo la progettazione e lo sviluppo di un modello per l'analisi in simulazione di reti di distribuzione in presenza di influenze esterne quali fattori climatici, informatici ed elettrici (es. tensione e frequenza fortemente variabili). A

	partire dai risultati degli studi condotti e dalle equazioni dell'OPF scritte nel precedente semestre, nel presente semestre, è stato definito un algoritmo di OPF originale che consente, da un lato di ottimizzare dal punto di vista economico gli scambi di energia tra una porzione di rete di distribuzione e la rete principale, e dall'altro di gestire i sistemi di accumulo tenendo conto della possibilità che la porzione di rete vada in isola e che questi debbano alimentare i carichi critici. Successivamente, si è proceduto con l'estensione dell'algoritmo, aggiungendo alla formulazione del problema, un controllo addizionale della carica/scarica dei sistemi di accumulo che consenta, in caso di più sistemi di accumulo presenti nella rete in esame, un loro utilizzo ottimale e coordinato. Infine, sono stati definiti scenari operativi critici per valutare l'effetto di fattori esterni (parametri climatici), quali la variabilità degli input da fonte rinnovabile che saranno oggetto sia delle simulazioni del successivo semestre sia della analisi condotte nella LA1.7. Le attività proseguiranno nel successivo semestre, con la definizione di un modello di simulazione basato sul bootstrap per generare serie storiche sintetiche orarie in diversi scenari di funzionamento di diversi tipi di rete di distribuzione ibrida (AC/DC) e la simulazione su scenari operativi critici per valutare l'effetto di fattori esterni (parametri climatici), quali la variabilità degli input da fonte rinnovabile. La linea LA1.7 "Definizione di matrici di correlazione tra influenze esterne e aspetti di sicurezza, adeguatezza e resilienza di porzioni di reti pubbliche o di utenti privati" ha come scopo la definizione di opportune matrici di correlazione tra i parametri climatici, informatici ed elettrici in grado di influenzare il corretto funzionamento e la vita utile dei componenti di una rete e i principali indicatori per la valutazione della sicurezza, dell'adeguatezza e della resilienza della medesima rete. Nel semestre in corso è stata condotta l'analisi di tre reti test in differenti scenari, definiti nell'ambito della LA1.6, considerando le influenze esterne sulle condizioni operative. Parallelamente, è stato costruito un dataset per l'analisi di sopravvivenza, identificando come evento critico il raggiungimento di una soglia minima di State of Charge (SoC) pari al 20%. Nel semestre successivo verrà applicato il modello di Cox per stimare il rischio di raggiungimento della soglia minima di carica della batteria nei diversi scenari analizzati. Seguiranno l'analisi e l'interpretazione dei risultati, nonché la costruzione delle matrici di correlazione, attraverso la definizione e il calcolo di due indici di resilienza delle microreti.
UNICA	Nell'ambito del presente semestre, UNICA ha condotto attività di ricerca relativamente alle seguenti linee di attività: LA1.8, LA1.9. La linea LA1.8 "Sviluppo di modelli per la pianificazione della gestione delle reti elettriche di distribuzione con capacità di formazione di isole autonome"

intenzionali o micro reti in ottica di miglioramento dell'adeguatezza e sicurezza delle singole isole e resilienza nell'intero sistema di distribuzione" ha come scopo principale lo sviluppo di strumenti software per la pianificazione operativa delle reti elettriche di distribuzione sia in MT (sistema equilibrato a tre fili) sia in BT (sistema squilibrato a 4 fili), con l'obiettivo di determinare la quantità di flessibilità necessaria per la gestione ottima e in sicurezza dell'intero sistema.

Le attività del presente semestre hanno riguardato la ricerca bibliografica sugli studi di:

- Operational Planning per il sistema elettrico di distribuzione e sulle tecniche di ottimizzazione implementate.
- Ricerca bibliografica sui modelli per la rappresentazione di:
 1. flessibilità da risorse energetiche distribuite,
 2. "generation curtailment" da fonti energetiche rinnovabili,
 3. "demand response" dei carichi,
 4. gestione dei sistemi di accumulo a batteria;
 5. Soft Open Points;
 6. isole intenzionali.

Alla luce dei risultati ottenuti con la ricerca bibliografica, è stato formalizzato il problema di Operational Planning (minimizzazione dei costi di acquisizione della flessibilità necessaria alla gestione adeguata e sicura di una rete di distribuzione MT) ed è stata scelta la tecnica di ottimizzazione (Programmazione Lineare).

La linea la **LA1.9 "Testing dei modelli per la pianificazione della gestione delle reti e micro reti di distribuzione in ottica di miglioramento della adeguatezza, sicurezza e resilienza"** ha come obiettivo il perfezionamento del software del modello di pianificazione della gestione ottimale delle reti di distribuzione proposto nella LA 1.8 in versione beta.

Nel presente semestre è stata portata a termine l'attività, precedentemente avviata, di selezione delle reti elettriche su cui saranno svolti i test di verifica degli strumenti di calcolo che saranno sviluppati durante la LA1.8.

Nello specifico, sono state individuate tre reti sintetiche di MT, rappresentative del sistema elettrico nazionale e sviluppate durante un precedente progetto:

- i) una rete rappresentativa della distribuzione rurale (feeder lunghi, linee prevalentemente aeree, presenza massiccia di generatori fotovoltaici e carico relativamente basso);
- ii) una rete rappresentativa della distribuzione industriale (feeder misti sia di ridotta lunghezza alto carico e sviluppo a congiungenti, sia estesi con carico diffuso e struttura ramificata, presenza di generatori di varia tecnologia);
- iii) una rete rappresentativa della distribuzione urbana (molti feeder corti, topologia prevalentemente a congiungenti, linee prevalentemente in cavo, carico concentrato, ridotta presenza di generazione).

POLIBA	Nell'ambito del presente semestre, POLIBA ha condotto attività di ricerca relativamente alle seguenti linee di attività: LA1.10, LA1.11. La linea <u>LA1.10 “Progettazione e implementazione di modelli per la riconfigurazione delle reti e microreti di distribuzione in presenza di guasti in ottica di miglioramento dell'adeguatezza, sicurezza e resilienza”</u> ha come scopo lo sviluppo di metodologie e modelli che possano essere applicati al problema di riconfigurazione ottimale (Optimal Network Reconfiguration - ONR) delle reti di distribuzione dell'energia elettrica, nell'ambito delle funzioni di controllo in supervisione dei sistemi SCADA/DMS (Distribution Management System). Nel presente semestre è stato finalizzato il problema di ONR. In particolare, le attività sono state mirate alla individuazione delle tecniche di programmazione matematica più opportune per la soluzione del problema, privilegiando nella scelta metodologie che possano essere facilmente implementate su piattaforme di ottimizzazione open-source. Questa attività è stata svolta in stretto coordinamento con la LA1.11, poiché modellazione e validazione degli algoritmi risolutivi richiedono la definizione di un processo iterativo. In questa fase sono stati testati due algoritmi risolutivi, uno basato su tecniche MILP e uno su algoritmi genetici. A seguito dei test, è stato scelto di privilegiare l'approccio analitico alla soluzione del problema, utilizzando tecniche di programmazione lineare-mista interi (MILP). L'approccio analitico è stato preferito ad approcci di tipo metaeuristico poiché, essendo basato su fondamenti matematici solidi e rigorosi, conduce a formulazioni più facili da comprendere e interpretare, permette di analizzare in dettaglio i risultati ottenuti, e garantisce una maggiore affidabilità dei risultati. Inoltre, l'approccio analitico si è dimostrato capace di trovare soluzioni migliori, con tempi più ridotti. Questa scelta ha permesso l'utilizzo di applicativi open-source facilmente integrabili nella piattaforma complessiva di sviluppo in ambiente Python. L'attività proseguirà nel semestre successivo con lo sviluppo dell'applicativo software da integrare nella piattaforma di progetto ARS tool. La linea <u>LA1.11 “Testing di modelli per la riconfigurazione delle reti e microreti di distribuzione in presenza di guasti in ottica di miglioramento dell'adeguatezza, sicurezza e resilienza”</u> ha come obiettivo la verifica dei modelli e delle metodologie sviluppate nell'ambito dell'attività LA1.10. A tale scopo, nel presente semestre si è proceduto allo sviluppo di una piattaforma di simulazione real-time finalizzata alla rappresentazione in tempo reale di un sistema cyber-fisico, comprendente i principali componenti di una rete di distribuzione e della relativa automazione. Il modello di Distribution Automation implementato è basato sulla tecnica di automazione SFS che si basa sull'invio di messaggi tra i dispositivi di protezione distribuiti lungo il

	feeder. Lo sviluppo in ambiente Power Hardware-in-the-Loop (P-HIL) ha richiesto, pertanto, la riproduzione del flusso di informazioni in una architettura di comunicazione di tipo peer-to-peer basata su protocollo IEC 61850 (invio e ricezione di messaggi GOOSE). I messaggi sono inviati/ricevuti sia da protezioni virtuali (simulate nel modello real-time) che da protezioni reali. Il modello per simulazioni real-time è stato sviluppato sulla piattaforma RT-Lab utilizzata per i simulatori real-time OPAL. La modellazione ha comportato l'esecuzione delle seguenti sub-attività: 1. studio e preparazione di un modello semplificato di un sistema di distribuzione per studi EMT in tempo reale su piattaforma Simulink/RT-Lab: caratterizzazione e modellazione di linee, sbarre, carichi, interruttori e circuiti di misura; 2. creazione di IED virtuali e integrazione delle logiche di intervento nel modello RT-Lab; 3. programmazione delle variabili I/O e integrazione del protocollo IEC 61850; 4. test funzionali di comunicazione con IED reale (protezione ABB, serie 620); 5. accoppiamento della simulazione con amplificatore real-time per la riproduzione dei segnali EMT sulla IED reale; 6. programmazione delle logiche di intervento e di selettività SFS sulla protezione reale. L'attività proseguirà nel successivo semestre con la creazione della piattaforma di co-simulazione ENEA-POLIBA.
POLITO	Nell'ambito del presente semestre, POLITO ha condotto attività di ricerca relativamente alle seguenti linee di attività: LA1.12, LA1.13. L'attività di ricerca LA1.12 "Progettazione e sviluppo preliminare di un convertitore grid-forming con dispositivi Wide-Bandgap ed avanzata capacità diagnostica, e funzionalità di supporto alla rete con sovraccaricabilità adattativa e massima affidabilità" prevede la progettazione e lo sviluppo preliminare di un convertitore grid-forming trifase a tensione e frequenza industriale 400V, 50Hz di taglia proposta 100 kVA. Nel presente semestre, si è proceduto con la progettazione preliminare del convertitore e lo sviluppo delle interfacce di comunicazione e debug del prototipo. In particolare, è stata sviluppata un'interfaccia di comunicazione e debug dedicata per consentire il controllo e il monitoraggio del convertitore. In particolare, si è reso necessario progettare un'interfaccia ad alto bitrate per acquisire in tempo reale l'andamento delle variabili interne al microcontrollore. L'interfaccia di debug fornita dal produttore del microcontrollore non è risultata adeguata, in quanto non permette di monitorare in modo efficace le variabili di controllo, che vengono aggiornate alla frequenza di switching del convertitore, pari a 20 kHz. Per superare questa limitazione, è stata sviluppata un'interfaccia basata su comunicazione USART, che attraverso un bridge di

	comunicazione converte i dati in USB (protocollo Virtual COM) per il collegamento diretto al PC. Lato software è stata sviluppata una GUI (Graphic User Interface) in ambiente Matlab per l'acquisizione e la visualizzazione dei dati. È stata inoltre sviluppato un sistema di comunicazione via CAN e via MODBUS per poter comandare il convertitore dall'esterno e poterlo interfacciare ad altri convertitori. Nel successivo semestre, le attività proseguiranno con l'esecuzione di simulazioni termo-elettriche tramite PLECS del convertitore finalizzate a validarne l'algoritmo di controllo proposto e le funzionalità. La linea di attività LA1.13 – “Test P-HiL preliminare di un convertitore grid-forming con avanzate capacità diagnostiche e funzionalità di supporto alla rete” è finalizzata alla validazione preliminare del convertitore sviluppato nell'ambito della LA1.12 in termini di capacità diagnostiche e funzionalità di supporto alla rete. La validazione sperimentale delle funzionalità intrinseche dell'apparato è oggetto della LA1.12. Nel semestre in corso è stata avviata la campagna di test sperimentali e, in particolare, sono stati definite le specifiche dei test da condurre tra il quinto e il sesto semestre di progetto. Tali test, condotti in modalità Power Hardware-in-the-Loop (P-HiL), sono orientati alla validazione funzionale del sistema integrato con la rete, alla verifica delle tecniche di stima della temperatura e all'analisi delle strategie di controllo implementate, tra cui il funzionamento in modalità <i>islanding</i>, il supporto tipo VSG (<i>Virtual Synchronous Generator</i>) e la regolazione diretta della sovraccaricabilità. Le attività proseguiranno nel successivo semestre con il completamento dei test.
--	--