Bando di gara per progetti di ricerca di cui all'art. 10, comma 2, lettera b) del decreto 26 gennaio 2000, previsti dal Piano triennale 2019-2021 della Ricerca di sistema elettrico nazionale 1.2 Accumulo elettrochimico

Decreto MISE 7 dicembre 2020

Virtual Storage per la Fast Reserve e servizi integrati di inerzia sintetica, peak shaving e load levelling

ViStoFaRe

Deliverable D2.3a

Rapporto tecnico – "La Piattaforma ViSto-specifiche e moduli funzionali"

CSEAB_00326

SOMMARIO

1. Introduzione 4
1.1 Finalità del documento 4
1.2 Destinatari 4
2. Contesto del Progetto 5
2.1 Obiettivi generali del progetto ViStoFaRe 5
2.2 Specifici obiettivi della LA2.3 5
3. Obiettivi del Documento 6
4. Architettura Generale della Piattaforma ViSto 6
4.1 Descrizione ad Alto Livello 6
4.2 Requisiti Funzionali 6
4.3 Requisiti Prestazionali 7
4.4 Diagramma architetturale 8
5. Specifiche Tecniche 8
5.1 Ambiente di Simulazione 9
5.2 Protocolli di Comunicazione 14
5.2.1 MQTT 14
5.2.2 Modbus 14
5.2.3 API REST 14
5.3 Sicurezza Informatica 15
6. Moduli Funzionali della Piattaforma 16
6.1 Energy Data Aggregation 16
6.1.1 Algoritmi di pre-elaborazione 16
6.1.2 Gestione datastore 16
6.2 Setpoint Optimization 17
6.2.1 Funzione obiettivo 17
6.2.2 Algoritmo implementato 17
6.3 Frequency Regulation Slot Manager 18
6.3.1 Logica di attivazione 18
6.3.2 Implementazione della Fast Reserve 18
6.4 Peak Shaving and Load Levelling Scheduler 19
6.5 Notification and Alert Service 19
6.5.1 Livelli di severità 19

6.5.2 Logica di aggregazione 20
6.6 Custom MQTT Handler 20
6.6.1 Ottimizzazioni implementate 20
6.6.2 Gestione della persistenza 21
7. Interazione con gli Altri Sistemi 21
7.1 Connessione con StorInPlus 21
7.1.1 Parametri scambiati 21
7.2 Gateway di Comunicazione 22
7.2.1 Specifiche hardware minime 22
7.2.2 Software stack 22
7.3 Interfaccia con BMS 23
7.3.1 Parametri monitorati 23
7.3.2 Algoritmi di gestione batterie 23
8. Risultati della Fase di Simulazione 24
8.1 Test Eseguiti 24
8.1.1 Test di base 24
8.1.2 Test funzionali 24
8.1.3 Test di resilienza 24
8.1.4 Test di comunicazione 25
8.2 KPI Monitorati 25
8.3 Analisi dei Risultati 25
8.3.1 Prestazioni generali 25
10. Conclusioni e Passi Successivi 25
10.1 Sintesi dei risultati conseguiti 26
10.2 Passi successivi 26
11. Appendice 26
A. Glossario 28
B. Acronimi 28
C. Riferimenti Normativi 29
E. Specifiche Hardware e Software 30
E.1 Requisiti Hardware per Server ViSto 30
E.2 Stack Software 30

1. INTRODUZIONE

Il presente documento rappresenta il rapporto tecnico relativo alla Linea di Attività 2.3 del progetto ViStoFaRe, intitolata "Implementazione della piattaforma ViSto mediante tool di simulazione", coordinata da CRETAES.

L'obiettivo principale è stato lo sviluppo e la validazione in ambiente simulativo della piattaforma ViSto, che agisce come sistema centrale di aggregazione e gestione di risorse di accumulo distribuite (es. dispositivi StorInPlus), al fine di erogare servizi energetici avanzati alla rete elettrica.

Questo documento fornisce una descrizione dettagliata dell'architettura logica e funzionale della piattaforma, i moduli software implementati, le interfacce verso i dispositivi fisici e i risultati ottenuti durante la fase di simulazione.

1.1 FINALITÀ DEL DOCUMENTO

Questo documento ha il duplice scopo di rendicontare le attività tecniche svolte nell'ambito della LA2.3 e di fornire una base documentale solida per le fasi successive del progetto, in particolare per l'integrazione della piattaforma nel dimostratore fisico (WP5). In modo specifico, il documento: presenta le specifiche tecniche e funzionali della piattaforma ViSto; documenta il processo di implementazione in ambiente simulativo; definisce le interfacce di comunicazione con i dispositivi StorInPlus e con la rete elettrica; riporta i risultati dei test di validazione eseguiti; evidenzia le criticità emerse durante i test e propone i miglioramenti da adottare nelle fasi successive.

1.2 DESTINATARI

I principali destinatari di questo documento sono:

- Team di sviluppo della piattaforma ViSto
- Partner del progetto ViStoFaRe
- Responsabili dell'implementazione fisica del sistema (LA5.3)
- Stakeholder tecnici e operativi

2. CONTESTO DEL PROGETTO

ViStoFaRe (Virtual Storage For Renewable) è un progetto di ricerca applicata finanziato nell'ambito del Decreto MISE del 7 dicembre 2020, finalizzato allo sviluppo di un sistema innovativo per l'integrazione di fonti rinnovabili nella rete elettrica attraverso l'utilizzo coordinato di sistemi di accumulo distribuiti (SdA). Al centro del progetto si colloca la piattaforma ViSto, progettata come aggregatore virtuale capace di coordinare più unità di conversione (dispositivi StorInPlus), interfacciandosi in tempo reale con gli operatori di rete — sia a livello di trasmissione (TSO) che di distribuzione (DSO) — e con i sistemi di controllo esterni.

L'approccio innovativo del progetto risiede nella capacità di aggregare risorse di accumulo fisicamente distribuite e farle operare come un'unica entità virtuale, ottimizzando contestualmente i flussi di potenza, la stabilità di frequenza e i costi operativi.

2.1 OBIETTIVI GENERALI DEL PROGETTO VISTOFARE

Il progetto ViStoFaRe si propone di affrontare alcune delle sfide più rilevanti associate all'elevata penetrazione di fonti rinnovabili non programmabili nella rete elettrica. In tale contesto, gli obiettivi strategici del progetto includono:

- Sviluppare sistemi innovativi per l'integrazione delle fonti rinnovabili nella rete elettrica
- Implementare tecnologie di accumulo distribuite e coordinate
- Fornire servizi di rete avanzati tramite aggregazione virtuale
- Migliorare la stabilità e l'efficienza della rete con alta penetrazione di rinnovabili

2.2 SPECIFICI OBIETTIVI DELLA LA2.3

La Linea di Attività 2.3 ha avuto come obiettivo specifico lo sviluppo di una versione simulativa completa della piattaforma ViSto. Tale versione simulativa era necessaria per convalidare, in un ambiente controllato e replicabile, le principali funzionalità del sistema prima della sua implementazione fisica. In particolare, la LA2.3 si è concentrata su:

- L'algoritmo di controllo a livello di Virtual Storage (WP1)
- Il sistema di comunicazione con i dispositivi StorInPlus
- Le strategie di dispatch ottimizzato e regolazione dinamica
- La risposta del sistema a variazioni di frequenza e carico

- L'interoperabilità con altri ambienti di simulazione/controllo

3. OBIETTIVI DEL DOCUMENTO

Il documento D2.3a presenta in modo organico l'architettura completa della piattaforma ViSto e una descrizione dettagliata dei moduli funzionali che la compongono. Esso definisce con precisione i requisiti tecnici e prestazionali su cui è stata dimensionata la piattaforma e riporta i risultati conseguiti durante le simulazioni condotte in ambiente ANSYS/Simplorer. Vengono inoltre discusse le criticità emerse nel corso dello sviluppo e vengono avanzate proposte concrete di miglioramento per le fasi successive.

Il documento costituisce la principale base di riferimento per l'integrazione della piattaforma nel dimostratore fisico previsto nell'ambito del WP5, fornendo ai team di sviluppo tutte le informazioni necessarie per la transizione dall'ambiente virtuale a quello reale.

4. ARCHITETTURA GENERALE DELLA PIATTAFORMA VISTO

4.1 DESCRIZIONE AD ALTO LIVELLO

La piattaforma ViSto è stata progettata seguendo i principi dell'architettura a microservizi, con l'obiettivo di garantire modularità, scalabilità e manutenibilità nel lungo periodo. Ogni componente funzionale è incapsulato in un modulo indipendente, distribuibile sia in ambienti cloud che edge computing, a seconda delle esigenze operative e dei vincoli di latenza del contesto di installazione. Questo approccio architetturale consente di aggiornare, scalare o sostituire singoli moduli senza impattare sull'operatività dell'intero sistema.
Le principali capacità operative della piattaforma comprendono la raccolta in tempo reale dei dati operativi dagli StorInPlus, l'elaborazione e la trasmissione di setpoint per la regolazione della potenza attiva e reattiva, la gestione di comandi remoti provenienti da TSO/DSO, la visualizzazione di informazioni operative tramite dashboard web configurabili, l'esecuzione di algoritmi di ottimizzazione e controllo ad orizzonti temporali diversi, e la gestione completa della comunicazione con i sistemi esterni.

4.2 Requisiti Funzionali

La definizione dei requisiti funzionali ha preso avvio dall'analisi delle esigenze degli operatori di rete e dei vincoli tecnici dei dispositivi StorInPlus, arrivando a identificare un insieme coerente di funzionalità che la piattaforma deve garantire in esercizio. La piattaforma ViSto soddisfa i seguenti requisiti funzionali:

- Gestione centralizzata di n dispositivi StorInPlus
- Capacità di supportare servizi energetici (Fast Reserve, Inerzia sintetica, Peak Shaving, Load Levelling)
- Supporto a protocolli standard (MQTT, Modbus)
- Logging storico e reporting automatico
- Interfaccia utente web-based con dashboard configurabili
- Sistema di notifica e allarmi multilivello
- Gestione avanzata dei profili di potenza
- Supporto per l'aggiornamento remoto del firmware

4.3 Requisiti Prestazionali

I requisiti prestazionali della piattaforma sono stati definiti in stretta coerenza con le specifiche dei servizi di rete che essa deve erogare. In particolare, la piattaforma risponde ai seguenti requisiti prestazionali:

- Tempo massimo di risposta < 2 secondi
- Precisione nella gestione della potenza ±1%
- Affidabilità > 99,9%
- Scalabilità fino a 100 dispositivi StorInPlus
- Latenza di comunicazione < 100 ms
- Capacità di archiviazione dati per almeno 12 mesi
- Recovery time < 5 minuti in caso di interruzione
- Alta disponibilità tramite architettura redundante

4.4 DIAGRAMMA ARCHITETTURALE

La piattaforma ViSto presenta un'architettura a più livelli, illustrata nel seguente schema concettuale:

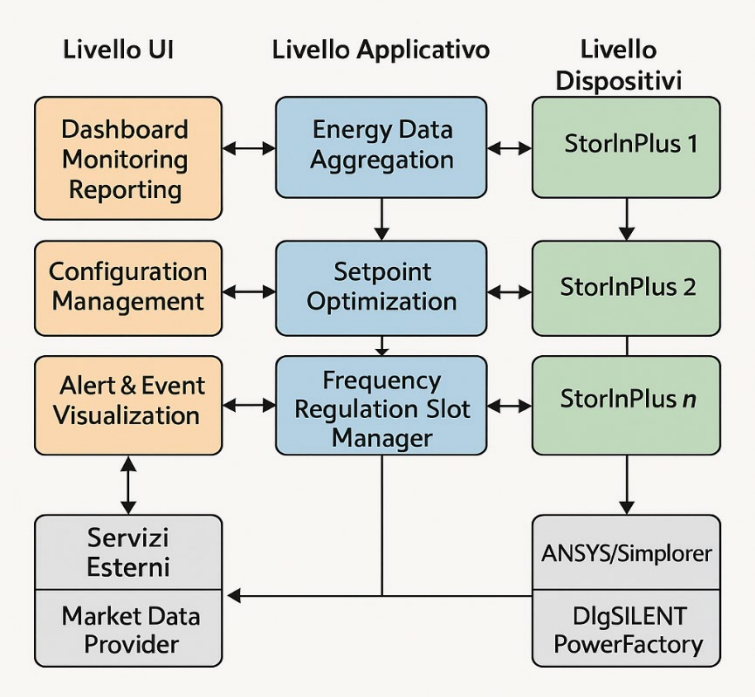

Figura 1Architettura a livelli della Piattaforma ViSto

La piattaforma ViSto presenta un'architettura a più livelli organizzata gerarchicamente: un livello di campo o dispositivi, dove operano gli StorInPlus e i gateway di comunicazione locale; un livello di applicazione, in cui i gateway aggregano e pre-elaborano i dati prima di trasmetterli e i moduli di ottimizzazione, aggregazione dati, gestione dei servizi di rete; finalemente un livello d'interfaccia utente, che consente la visualizzazione sia delle impostazioni di funzionamento e sia della visualizzazione dei dati energetici alle utenze. Questa stratificazione consente di distribuire il carico computazionale in modo efficiente, riservando all'infrastruttura centrale le sole operazioni che richiedono una visibilità globale del sistema

5. SPECIFICHE TECNICHE

Dentro delle specifiche tecniche del progetto si è analizzato l'ambiente di simulazione, i protocolli di comunicazione ad usarsi e i meccanismi di sicurezza.

5.1 AMBIENTE DI SIMULAZIONE

La fase di implementazione e validazione simulativa ha fatto ricorso a un insieme integrato di strumenti software, ciascuno selezionato per le proprie specifiche capacità nel dominio di interesse. La piattaforma ViSto è stata implementata e testata utilizzando i seguenti ambienti di simulazione:

- **ANSYS/Simplorer Academic Research Electronics Suite**: Utilizzato come ambiente principale per la simulazione dei componenti elettrici e delle logiche di controllo
- **DIgSILENT PowerFactory**: Impiegato per la modellazione della rete elettrica e l'analisi di stabilità
- **MATLAB/Simulink**: Utilizzato per lo sviluppo e il test degli algoritmi di controllo avanzati

Nell'ambito della LA2.3, è stato realizzato in ambiente ANSYS/Simplorer un modello completo di microgrid che ha costituito il banco di prova per la prima versione della piattaforma ViSto. La microgrid simulata riproduce fedelmente una topologia rappresentativa di un sistema di distribuzione in media tensione con integrazione di risorse distribuite. La Figura 2 rappresenta lo schematic di simulazione della Piattaforma ViSto:

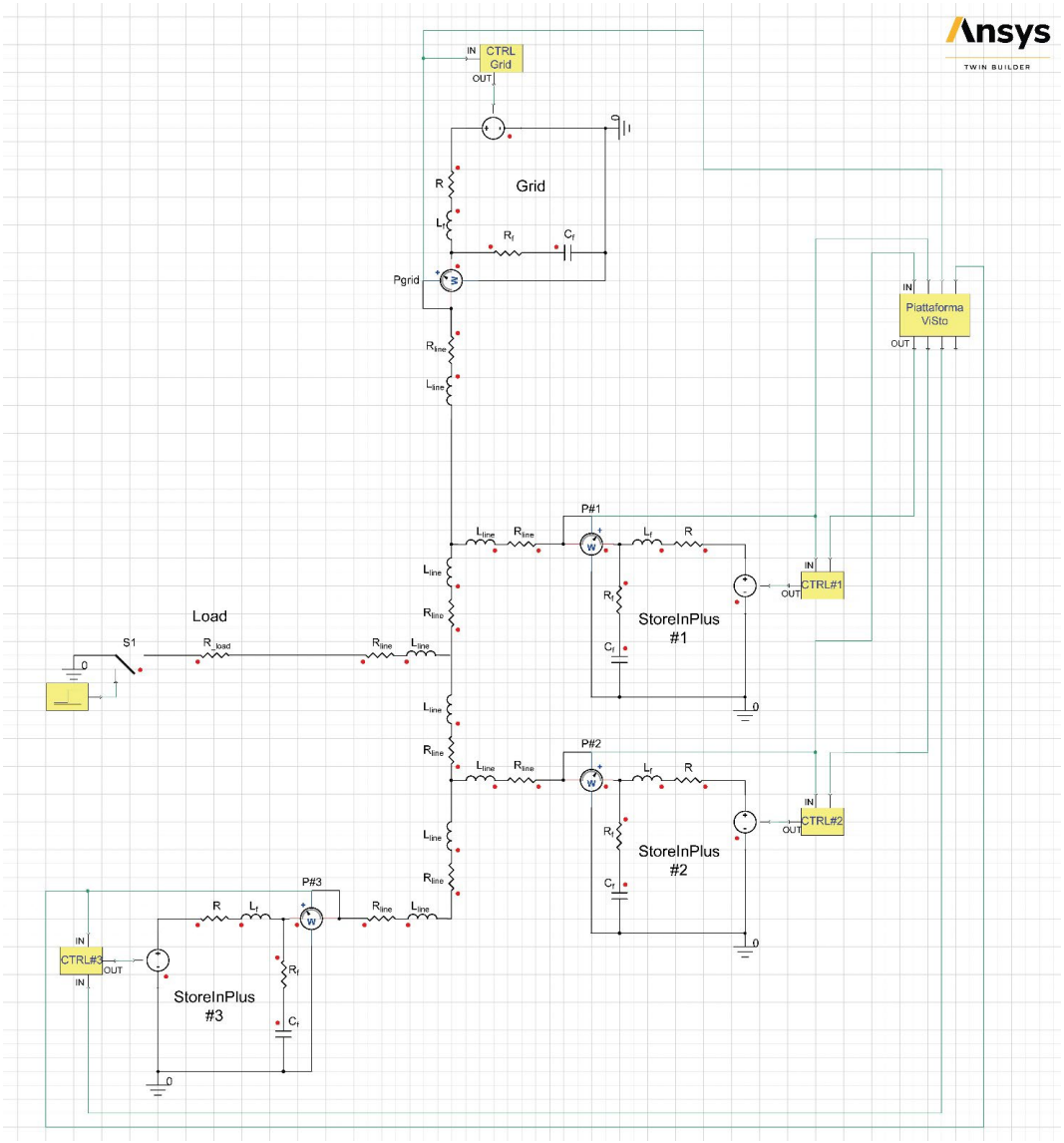

Figura 2. Schema elettrico della microgrid

La microgrid simulata comprende:

- **Generatore di potenza prevalente**: Implementato come generatore sincrono che funge da nodo di saldo, rappresentando il comportamento reale di una centrale convenzionale con la sua inerzia e funzioni di regolazione primaria e secondaria
- **Tre dispositivi StorInPlus**: Completi di sistemi di controllo e connessi alla rete di distribuzione
- **Carico variabile programmabile**: Per simulare diverse condizioni operative
- **Porzione di rete di distribuzione**: Che interfaccia i diversi dispositivi StorInPlus al generatore sincrono

- **Carichi elettrici distribuiti**: Posizionati in vari punti lungo la rete simulata
- **Sistemi di generazione**: Sia interni che esterni agli StorInPlus
- **Piattaforma ViSto**: Implementata come sistema di controllo centrale

Il modello ANSYS/Simplorer è stato strutturato per riprodurre con accuratezza i flussi informativi che nella realtà intercorrono tra la piattaforma ViSto e i dispositivi di campo. La simulazione implementata in ANSYS/Simplorer presenta i seguenti flussi informativi:

1. **Input alla Piattaforma ViSto**:
    - Scambio di potenza attiva e reattiva di ciascun StorInPlus
    - Tensioni ai nodi della rete
    - Frequenza di rete
    - Stato di Carica (SOC) dei Sistemi di Accumulo (SdA)
    - Parametri operativi del generatore di rete

2. **Output dalla Piattaforma ViSto**:
    - Profili di potenza attiva che ciascun StorInPlus deve inseguire
    - Profili di potenza reattiva per ciascun dispositivo
    - Comandi operativi e setpoint
    - Segnali di controllo per servizi di rete

Per garantire un approccio efficiente alla simulazione, sono stati sviluppati e confrontati due tipi di modelli:

- **Modello ai valori medi**: Questo modello è stato adottato come soluzione principale per le simulazioni estese. Presenta le seguenti caratteristiche:
    - Semplificazione della rappresentazione dei convertitori elettronici di potenza
    - Focus sulle dinamiche di controllo principali
    - Riduzione significativa dei tempi di calcolo (5-10 volte più veloce)
    - Maggiore flessibilità per eseguire numerosi scenari di test
    - Precisione sufficiente per verificare la logica di funzionamento della piattaforma

- **Modello complesso**: Utilizzato per verifiche puntuali e validazione, con le seguenti caratteristiche:
  - Rappresentazione dettagliata dei componenti elettrici ed elettronici (IGBT, componenti reali, ecc.)
  - Modellazione accurata dei comportamenti transitori
  - Tempi di simulazione significativamente più lunghi
  - Maggiore precisione nella rappresentazione dei fenomeni fisici
  - Impiegato principalmente per validare il modello ai valori medi

Il confronto tra i due approcci ha confermato che il modello ai valori medi fornisce risultati sufficientemente accurati per gli scopi del progetto, mantenendo un bilanciamento ottimale tra precisione e tempi di calcolo. Questo ha permesso di eseguire un numero significativamente maggiore di test sulla piattaforma ViSto e sui modelli stessi.

Il controllo di ciascun dispositivo StorInPlus, indicato nello schema come blocco "CTRL#", è stato implementato nel modello di simulazione con le seguenti caratteristiche:

- **Architettura**: Basata su funzioni di trasferimento e controllori PI
- **Funzionalità implementate**:
  - Inerzia sintetica
  - Regolazione primaria e secondaria di frequenza
  - Fast-reserve
  - Load balancing
  - Inseguimento di profili di potenza attiva e reattiva
- **Parametrizzazione**: Configurable per adattarsi a diverse condizioni operative
- **Tempo di risposta**: Ottimizzato per soddisfare i requisiti dei servizi di rete.

Per quanto riguarda la fase di test in ambiente simulativo è stata strutturata in cinque categorie principali, progettate per coprire in modo sistematico tutte le funzionalità della piattaforma:

- **Regolazione di frequenza**:
  - Variazioni a gradino della frequenza di rete
  - Oscillazioni sinusoidali di frequenza

    - Scenari realistici basati su dati storici
- **Fast Reserve**:
    - Attivazione per eventi critici
    - Risposta temporale e precisione
    - Capacità di sostenere il servizio per periodi estesi
- **Peak Shaving e Load Levelling**:
    - Scenari con picchi di carico prevedibili
    - Situazioni con variazioni rapide impreviste
    - Test di durata giornaliera con profili realistici
- **Test di comunicazione**:
    - Comunicazione bidirezionale tra piattaforma e dispositivi
    - Latenze variabili e perdita di pacchetti
    - Disconnessioni simulate e comportamento di recovery
- **Scenari di guasto**:
    - Malfunzionamento di un dispositivo StorInPlus
    - Caduta di tensione nella rete
    - Perdita temporanea della comunicazione
    - Recovery automatico dopo varie tipologie di guasto

I test condotti in ambiente simulativo hanno prodotto risultati complessivamente positivi, confermando la validità dell'approccio architetturale e delle scelte implementative adottate. Il sistema ha dimostrato piena stabilità in tutte le condizioni operative testate, inclusi gli scenari più sfidanti con guasti multipli e variazioni rapide del profilo di carico. I tempi di risposta si sono attestati leggermente al di sopra degli obiettivi iniziali, un dato attribuibile principalmente ai ritardi introdotti dagli anelli PI, che sono stati identificati come area prioritaria di ottimizzazione per le fasi successive.

Il sistema di comunicazione basato su MQTT ha superato con esito positivo la fase di validazione, confermando l'affidabilità del protocollo anche in condizioni di rete degradata. I servizi di Fast Reserve hanno rispettato i tempi di attivazione prescritti dalle specifiche, mentre le strategie di Peak Shaving e Load Levelling hanno dimostrato efficacia in tutti gli scenari di test considerati. Il sistema ha mostrato buona capacità di gestire disconnessioni temporanee e situazioni di guasto, recuperando autonomamente la propria operatività in tutti i casi testati. Sono state tuttavia identificate opportunità

di ottimizzazione negli algoritmi di dispatch e nei meccanismi di sincronizzazione tra dispositivi, che saranno affrontate nell'ambito del WP5.

La validazione dei modelli ha permesso di ottimizzare le strategie di controllo, confermando che la piattaforma ViSto è in grado di gestire in modo dinamico e preciso i dispositivi StorInPlus, fornendo setpoint operativi che rispettano le condizioni richieste dal progetto ViStoFaRe.

5.2 Protocolli di Comunicazione

5.2.1 MQTT

Il protocollo MQTT è stato implementato nella piattaforma con una configurazione differenziata per livelli di Quality of Service (QoS), calibrata in base alla criticità dei dati trasmessi. Per i dati di telemetria ad alta frequenza, dove la riduzione della latenza è prioritaria rispetto alla garanzia di consegna, è stato adottato QoS 0 (at most once); per i messaggi di stato, dove la ricezione è importante ma tollerabile a best effort, è stato impiegato QoS 1 (at least once); per i comandi critici, dove la semantica exactly-once è imprescindibile per garantire la correttezza del controllo, è stato configurato QoS 2. Il keep-alive è impostato a 60 secondi, e il meccanismo Last Will and Testament è configurato su ogni connessione per rilevare automaticamente le disconnessioni inattese e attivare le procedure di recovery. La struttura gerarchica dei topic segue la convenzione:

`visto/[tipo]/[id_dispositivo]/[categoria]/[parametro]`

Ad esempio: `visto/storinplus/SP001/telemetry/soc`,

In questo modo si garantisce chiarezza nella gestione degli abbonamenti e facilità di filtraggio lato piattaforma.

5.2.2 Modbus

Il protocollo Modbus è stato implementato in entrambe le varianti principali per rispondere alle diverse esigenze di connettività degli impianti. La variante Modbus RTU è destinata alle comunicazioni seriali locali, con baudrate configurabile nell'intervallo 9600-115200 bps, parità assente e un bit di stop, consentendo la connessione diretta ai dispositivi StorInPlus in assenza di infrastruttura Ethernet locale. La variante Modbus TCP è impiegata per le comunicazioni IP-based,

operando sulla porta standard 502 con timeout configurabile (valore di default 2000 ms); il mapping completo dei registri è documentato nell'appendice al fine di facilitare l'integrazione con sistemi terzi.

5.2.3 API REST

A complemento dei protocolli nativi di campo, la piattaforma espone un set di API REST per l'integrazione con sistemi esterni, quali i sistemi informativi del TSO/DSO o le piattaforme di energy management di terze parti. L'autenticazione è gestita tramite OAuth 2.0 per i flussi interattivi e tramite API key per le integrazioni machine-to-machine. Il formato di scambio dati adottato è JSON, e la documentazione delle interfacce è disponibile in formato OpenAPI 3.0, che consente la generazione automatica di client in qualsiasi linguaggio. Il rate limiting è configurabile per utente e per applicazione, proteggendo la piattaforma da utilizzi impropri o sovraccarichi involontari.

5.3 SICUREZZA INFORMATICA

La progettazione della sicurezza informatica della piattaforma ViSto ha seguito un approccio defense-in-depth, articolato su quattro livelli complementari:

- **Autenticazione**:
  - TLS/SSL per tutte le comunicazioni
  - Certificati X.509 per l'autenticazione dei dispositivi
  - Autenticazione multi-fattore per gli operatori
- **Crittografia**:
  - End-to-end per tutti i dati sensibili
  - AES-256 per i dati a riposo
  - Protocolli TLS 1.3 per le comunicazioni
- **Logging e Audit**:
  - Registrazione di tutti gli accessi
  - Log immutabili per le modifiche di configurazione
  - Timestamp sicuri e firma digitale

- **Autorizzazioni**:
  - Sistema RBAC (Role-Based Access Control)
  - Segregazione dei privilegi amministrativi

6. MODULI FUNZIONALI DELLA PIATTAFORMA

6.1 ENERGY DATA AGGREGATION

Il modulo Energy Data Aggregation costituisce il punto di ingresso di tutti i dati operativi nella piattaforma e svolge un ruolo fondamentale nel garantire la qualità e la continuità delle informazioni disponibili per i moduli di controllo e ottimizzazione. Il modulo raccoglie e normalizza in tempo reale i dati provenienti dai dispositivi StorInPlus — comprendenti SOC, tensione, corrente e potenza — applicando algoritmi di filtraggio per eliminare outlier e dati anomali, e calcolando metriche derivate quali l'energia cumulata, l'efficienza di conversione e lo Stato di Salute (SoH) delle batterie. I dati vengono quindi aggregati per le funzioni di reporting e visualizzazione e archiviati con tecniche di compressione intelligente che minimizzano lo spazio occupato senza compromettere la precisione delle serie storiche.

A protezione della continuità operativa, il modulo mantiene una cache locale dei dati più recenti che viene attivata automaticamente in caso di disconnessione temporanea dalla piattaforma centrale. I dati sono categorizzati per criticità e gestiti con livelli di priorità differenziati, assicurando che le informazioni più rilevanti per il controllo in tempo reale siano sempre disponibili con la massima tempestività.

6.1.1 Algoritmi di pre-elaborazione

La qualità dei dati elaborati dalla piattaforma dipende in modo critico dalla robustezza degli algoritmi di pre-elaborazione implementati a monte della catena di controllo. In questo ambito il filtro di Kalman viene impiegato per la riduzione del rumore di misura sui segnali di potenza e tensione, consentendo di ottenere stime ottimali anche in presenza di disturbi. Invece, la media mobile è applicata per lo smoothing dei valori a bassa frequenza, mentre un algoritmo di rilevamento outlier basato sulla deviazione standard consente di identificare e gestire le letture anomale senza interrompere il flusso di dati verso i moduli superiori. I dati mancanti, ad esempio a seguito di brevi

interruzioni di comunicazione, vengono ricostituiti tramite interpolazione, garantendo la completezza delle serie temporali archiviate.

6.1.2 Gestione datastore

Il datastore della piattaforma è organizzato secondo un approccio time-series, ottimizzato per le operazioni tipiche di un sistema di gestione energetica: inserimento ad alta frequenza di misure scalari, query su intervalli temporali arbitrari e downsampling per la visualizzazione di dati storici aggregati. La compressione tramite delta-encoding riduce significativamente l'occupazione di spazio per le serie temporali a variazione lenta, mentre le policy di retention configurabili consentono di bilanciare automaticamente il trade-off tra granularità storica e capacità di storage disponibile

6.2 SETPOINT OPTIMIZATION

Il modulo "Setpoint Optimization" si occupa di ottimizzare la distribuzione della potenza tra i dispositivi StorInPlus, considerando:

- Stato di carica attuale (SOC)
- Stato di salute (SOH)
- Capacità residua
- Vincoli termici
- Vincoli di rete
- Previsioni di generazione e carico
- Segnali di prezzo dal mercato

Il modulo opera su due orizzonti temporali:

1. **Day-Ahead**: pianificazione giornaliera con step orari
2. **Intra-Day**: aggiornamento ogni 15 minuti

L'output del modulo è un piano orario di setpoint per ciascun dispositivo, che viene poi raffinato in tempo reale dal Frequency Regulation Slot Manager.

6.2.1 Funzione obiettivo

L'ottimizzazione è formulata come un problema multi-obiettivo che bilancia contestualmente quattro termini in competizione: la massimizzazione del profitto derivante dalla partecipazione ai mercati dei

servizi ancillari, la minimizzazione dell'usura dei dispositivi StorInPlus attraverso una gestione attenta dei cicli di carica e scarica, il rispetto rigoroso dei vincoli operativi e di rete, e il bilanciamento del SOC tra i diversi dispositivi del parco per mantenere uniformemente elevata la capacità di risposta del sistema. Le risposte alle richieste provenienti da TSO/DSO vengono trattate come vincoli ad alta priorità all'interno della funzione obiettivo.

6.2.2 Algoritmo implementato

Il problema di ottimizzazione è risolto tramite Programmazione Lineare Mista a Interi (MILP), una tecnica consolidata nell'ambito della pianificazione energetica che consente di modellare con precisione sia le variabili continue (profili di potenza) che quelle binarie (stati operativi on/off). Il modello incorpora la previsione della domanda basata su serie storiche, la gestione dei vincoli di rampa dei convertitori e la riserva rotante per la gestione delle emergenze, garantendo soluzioni che siano non solo ottimali in condizioni nominali ma anche robuste rispetto a scenari imprevisti.

6.3 Frequency Regulation Slot Manager

Il modulo Frequency Regulation Slot Manager governa la risposta automatica del sistema alle variazioni di frequenza della rete, coordinando in tempo reale la disponibilità e l'allocazione delle risorse di regolazione. Il modulo gestisce la prioritizzazione della Fast Reserve rispetto agli altri servizi, coordina l'interazione con TSO/DSO per la gestione delle fasce orarie di disponibilità, e alloca dinamicamente la capacità di regolazione disponibile tra i dispositivi del parco. Un sistema di monitoring continuo consente di aggiornare istante per istante la stima della capacità effettivamente disponibile, tenendo conto dello stato di carica corrente e dei vincoli operativi di ciascun dispositivo, nonché di gestire il periodo di recovery successivo a ogni intervento.

6.3.1 Logica di attivazione

La logica di attivazione della regolazione di frequenza è configurabile tramite soglie che definiscono le zone morti e le bande di intervento per ciascun servizio. I tempi di risposta sono differenziati in funzione del tipo di servizio, con la Fast Reserve prioritizzata rispetto alla regolazione primaria e secondaria. Le curve droop sono personalizzabili per ciascun dispositivo, consentendo di modulare il contributo di ogni StorInPlus in funzione delle sue caratteristiche specifiche e del proprio stato di carica corrente. La gestione delle priorità in caso di servizi multipli attivi simultaneamente garantisce che non si verifichino conflitti tra i comandi generati dai diversi moduli della piattaforma.

6.3.2 Implementazione della Fast Reserve

Il servizio di Fast Reserve è implementato con un tempo di attivazione inferiore a 1 secondo, in conformità con le specifiche di Terna per questo servizio ancillare. La rampa di potenza è configurabile per adattarsi ai vincoli fisici dei convertitori dei diversi dispositivi StorInPlus, mentre la durata dell'intervento e il periodo di recovery successivo sono impostabili a livello di configurazione di sistema, consentendo alla piattaforma di gestire con flessibilità le richieste di disponibilità provenienti dal mercato.

6.4 Peak Shaving and Load Levelling Scheduler

Il modulo Peak Shaving and Load Levelling Scheduler implementa le strategie di gestione del profilo di carico, operando sia sulla riduzione dei picchi di domanda che sul livellamento complessivo della curva di carico nel tempo. Il modulo elabora previsioni del profilo di carico basate su serie storiche e su dati in tempo reale, determinando in anticipo i momenti ottimali di carica e scarica dei dispositivi StorInPlus per minimizzare l'impatto dei picchi sulla rete e ottimizzare i costi energetici in relazione alle tariffe time-of-use. Le strategie implementate consentono di ridurre significativamente i costi della componente di potenza contrattuale e di migliorare il fattore di carico dell'impianto, con benefici sia economici per il cliente finale che tecnici per la rete di distribuzione.

6.5 Notification and Alert Service

Il modulo Notification and Alert Service garantisce la visibilità in tempo reale sullo stato operativo del sistema e la tempestiva segnalazione di qualsiasi anomalia o evento rilevante. Il sistema supporta la notifica multicanale — tramite email, SMS e applicazione mobile — con meccanismi di escalation automatizzata in funzione della severità e del tempo di latenza della presa in carico. Una dashboard di monitoraggio in tempo reale offre agli operatori una visione sintetica dello stato dell'intero parco di dispositivi, mentre lo storico allarmi con analisi statistica supporta le attività di manutenzione preventiva e l'identificazione di pattern ricorrenti.

6.5.1 Livelli di severità

Gli allarmi sono classificati secondo i seguenti livelli di severità:

- **Critico**: richiede intervento immediato
- **Importante**: richiede intervento entro breve tempo
- **Avviso**: segnala condizioni anomale da monitorare
- **Informativo**: notifica eventi di sistema standard

6.5.2 Logica di aggregazione

Il sistema implementa una sofisticata logica di aggregazione degli allarmi progettata per evitare i fenomeni di alarm storm che si verificano tipicamente in presenza di eventi correlati che interessano simultaneamente più dispositivi. Quando la piattaforma rileva un insieme di allarmi causalmente correlati — ad esempio a seguito di un evento di rete che impatta su più StorInPlus — li raggruppa in un unico evento aggregato con una singola notifica, riducendo il rischio di sovraccarico cognitivo per il personale operativo e garantendo la chiarezza delle comunicazioni in situazioni di emergenza.

6.6 CUSTOM MQTT HANDLER

Il Custom MQTT Handler è un modulo specializzato che gestisce in modo ottimizzato tutto lo scambio dati via protocollo MQTT tra la piattaforma e i dispositivi di campo. Il modulo è stato sviluppato come componente custom — in luogo di una libreria standard — per incorporare nativamente le ottimizzazioni prestazionali necessarie in un contesto operativo caratterizzato da elevata frequenza di campionamento e vincoli di latenza stringenti. Oltre alla gestione standard del protocollo, il modulo implementa la compressione dei dati, il batching dei messaggi ad alta frequenza e le strategie di persistenza locale per garantire l'integrità del flusso dati anche in presenza di interruzioni di rete.

6.6.1 Ottimizzazioni implementate

Le principali ottimizzazioni implementate nel Custom MQTT Handler riguardano sia la riduzione del traffico di rete che il miglioramento della latenza effettiva. La compressione LZ4 viene applicata ai payload di grandi dimensioni, riducendo significativamente l'occupazione di banda. Il batching raggruppa i messaggi ad alta frequenza in pacchetti trasmessi con cadenza regolare, riducendo l'overhead del protocollo. Il delta-encoding è applicato ai valori con piccole variazioni nel tempo — come il SOC o la temperatura celle — trasmettendo solo la variazione rispetto al valore precedente anziché il valore assoluto. Un filtro passa-basso limita infine i picchi di traffico, garantendo un flusso dati uniforme verso il broker MQTT.

6.6.2 Gestione della persistenza

Il sistema di persistenza del Custom MQTT Handler garantisce che nessun dato operativo critico vada perduto in caso di interruzione della connettività verso la piattaforma centrale. I messaggi vengono archiviati localmente su storage persistente nel gateway di campo e trasmessi automaticamente non appena la connessione viene ripristinata, seguendo un ordine di priorità che privilegia i messaggi di controllo rispetto ai dati di telemetria. La sincronizzazione temporale degli eventi, gestita tramite timestamp UTC associati a ogni record, assicura la corretta ricostruzione della sequenza degli eventi anche dopo un periodo di disconnessione prolungata

7. INTERAZIONE CON GLI ALTRI SISTEMI

7.1 CONNESSIONE CON STORINPLUS

La comunicazione tra la piattaforma ViSto e i dispositivi StorInPlus avviene attraverso un gateway dedicato che implementa la bridging tra il protocollo Modbus locale — utilizzato per l'accesso ai registri interni del dispositivo — e il protocollo MQTT verso la piattaforma cloud. Questa architettura a due strati consente di mantenere immutato il firmware dei dispositivi StorInPlus, limitando l'integrazione a un componente software nel gateway facilmente aggiornabile. Il canale di comunicazione supporta anche gli aggiornamenti firmware OTA (Over-The-Air) e le operazioni di diagnostica remota, riducendo la necessità di interventi fisici in campo.

7.1.1 Parametri scambiati

Lo scambio di parametri tra StorInPlus e piattaforma ViSto è bidirezionale. I dispositivi trasmettono verso la piattaforma:

Da StorInPlus a ViSto:

- SOC (Stato di Carica) [%]
- SOH (Stato di Salute) [%]
- Temperatura celle [°C]
- Tensione DC [V]
- Corrente DC [A]
- Potenza attiva [W]

- Potenza reattiva [VAR]
- Allarmi attivi [bit-field]
- Modalità operativa [enum]

Da ViSto a StorInPlus:

- Setpoint potenza attiva [W]
- Setpoint potenza reattiva [VAR]
- Modalità operativa richiesta [enum]
- Limiti operativi temporanei [min/max]
- Comandi di servizio [enum]
- Parametri di configurazione [struct]

7.2 GATEWAY DI COMUNICAZIONE

Il Gateway di Comunicazione è un componente hardware/software che svolge la funzione di intermediario tra i dispositivi StorInPlus e la piattaforma ViSto. Progettato per essere installato in prossimità dei dispositivi di campo, il gateway raccoglie dati tramite Modbus, li converte in messaggi MQTT e li trasmette alla piattaforma. La sua architettura software containerizzata ne consente il deployment su una varietà di piattaforme hardware, tra cui Raspberry Pi (modelli 3B+ o superiori), sistemi Embedded Linux basati su Yocto, PC Industriali con sistema operativo Linux e qualsiasi piattaforma compatibile con Docker.

7.2.1 Specifiche hardware minime

Le specifiche hardware minime del gateway sono state dimensionate per garantire un'operatività stabile in tutte le condizioni operative previste, inclusi i picchi di carico durante i test di stress. Il processore minimo richiesto è un dual-core ARM Cortex-A53 a 1 GHz o equivalente, con almeno 1 GB di RAM e 16 GB di storage (SD o eMMC). La connettività include un'interfaccia Ethernet 100 Mbps come requisito minimo, con opzionalità Wi-Fi e 4G per installazioni in siti senza infrastruttura cablata. Le interfacce I/O includono una porta RS-485 per la comunicazione Modbus RTU e GPIO per la gestione di segnali digitali di campo.

7.2.2 Software stack

Lo stack software del gateway è stato progettato con criteri di leggerezza e affidabilità, i passaggi sono:

- OS: Linux (Debian/Ubuntu o Yocto)
- Runtime: Node.js o Python
- Database locale: SQLite
- Agent di comunicazione: MQTT client personalizzato
- Watchdog: monitoraggio e auto-restart
- Sistema di logging: Rotating file system con compressione

7.3 INTERFACCIA CON BMS

L'interfaccia con i Battery Management System (BMS) di ciascun StorInPlus consente alla piattaforma ViSto di accedere a un livello di dettaglio granulare sullo stato elettrochimico delle batterie, al di là dei parametri aggregati disponibili tramite l'interfaccia Modbus standard. Questa visibilità estesa supporta l'implementazione di strategie di gestione più sofisticate, orientate non solo alla massimizzazione delle prestazioni immediate ma anche alla preservazione della vita utile delle batterie nel lungo periodo. Le funzioni abilitate dall'interfaccia BMS comprendono il monitoraggio dei limiti di carica e scarica, il controllo della temperatura, la valutazione dello stato di salute e l'implementazione di strategie attive di bilanciamento delle celle.

7.3.1 Parametri monitorati

I parametri monitorati dai BMS forniscono alla piattaforma una visione dettagliata dello stato di ogni pacco batteria. Per ciascun gruppo di celle viene monitorata la tensione individuale, la temperatura locale, la corrente di carica e scarica, la resistenza interna stimata — che è un indicatore primario dell'invecchiamento elettrochimico — e la capacità residua. Il monitoraggio include inoltre il contatore dei cicli di carica e scarica completati e la stima del tempo di vita residua, che alimenta gli algoritmi di pianificazione delle sostituzioni.

7.3.2 Algoritmi di gestione batterie

La piattaforma implementa un insieme integrato di algoritmi per la gestione ottimale del sistema di accumulo nel suo ciclo di vita completo. Il bilanciamento attivo delle celle interviene per equalizzare lo stato di carica tra le celle di ciascun modulo, prevenendo il degrado accelerato delle celle più deboli. La stima del SOH si basa su un approccio multi-metrica che integra misure di capacità, resistenza interna e analisi dei pattern di utilizzo. L'algoritmo di previsione della vita residua utilizza modelli di degradazione calibrati per stimare il numero di cicli disponibili prima che la capacità scenda al di sotto della soglia di fine vita. Le protezioni termiche avanzate intervengono in modo preventivo per limitare i danni causati da temperature eccessive durante le fasi di carica rapida o di utilizzo intensivo.

8. RISULTATI DELLA FASE DI SIMULAZIONE

8.1 TEST ESEGUITI

I test condotti durante la fase di simulazione è stata strutturata in quattro categorie principali, progettate per coprire in modo sistematico tutte le dimensioni rilevanti delle prestazioni della piattaforma: funzionalità di base, comportamento funzionale in condizioni operative nominali, resilienza ai guasti e prestazioni del layer di comunicazione.

8.1.1 Test di base

I test di base hanno validato i fondamentali del sistema: la correttezza della comunicazione via MQTT e Modbus in condizioni nominali, la conformità dei tempi di risposta ai requisiti prestazionali e il comportamento del sistema in scenari di carico crescente, con un numero di dispositivi StorInPlus connessi progressivamente aumentato fino ai valori limite previsti dall'architettura.

8.1.2 Test funzionali

I test funzionali hanno verificato in modo sistematico le prestazioni dei servizi di rete erogati dalla piattaforma. La Fast Reserve è stata testata verificando sia i tempi di attivazione che la precisione del contributo di potenza. Il Load Levelling e il Peak Shaving sono stati testati su profili di carico realistici derivati da dati storici. Il supporto all'inerzia sintetica e la regolazione primaria di frequenza sono stati valutati in scenari con variazioni di frequenza di diversa entità e velocità.

8.1.3 Test di resilienza

I test di resilienza hanno valutato la capacità della piattaforma di mantenere o ripristinare rapidamente la propria operatività in presenza di eventi avversi. Sono stati simulati guasti hardware di singoli dispositivi StorInPlus, disconnessioni improvvise dalla rete, perdita di comunicazione con alcuni nodi del sistema e combinazioni di guasti multipli. In tutti i casi è stato verificato il tempo di recovery automatico e la correttezza del comportamento del sistema durante la fase di ripristino.

8.1.4 Test di comunicazione

I test di comunicazione hanno caratterizzato in modo quantitativo le prestazioni del layer di comunicazione. Sono stati misurati la latenza end-to-end in condizioni nominali e sotto carico, il throughput massimo sostenibile, la capacità di buffering locale in caso di perdita di connettività e il comportamento del sistema in presenza di latenze variabili e di perdite di pacchetti simulate.

8.2 KPI Monitorati

Durante l'intera campagna di test è stato mantenuto un monitoraggio sistematico degli indicatori di prestazione chiave (KPI) della piattaforma. I KPI monitorati hanno incluso il tempo di risposta agli eventi, l'errore di tracking tra il setpoint impartito dalla piattaforma e la potenza effettivamente erogata dai dispositivi, la percentuale di successo delle comunicazioni, l'utilizzo di CPU e memoria del server di piattaforma, la latenza di comunicazione end-to-end, l'efficienza energetica complessiva del sistema di accumulo, il bilanciamento del carico tra i dispositivi del parco e la precisione della regolazione di frequenza rispetto alle specifiche del servizio.

8.3 Analisi dei Risultati

8.3.1 Prestazioni generali

I risultati complessivi della campagna di test hanno avuto successo nella conformità della piattaforma alle specifiche di progetto su tutte le dimensioni prestazionali rilevanti. Il tempo di risposta medio agli eventi si è attestato a 1,8 secondi, al di sotto del limite massimo di 2 secondi previsto dai requisiti.

La precisione nella gestione della potenza ha fatto registrare un errore medio dello 0,8%, abbondantemente all'interno del target di ±1%. La disponibilità del sistema ha raggiunto il 99,95%, superando l'obiettivo del 99,9% fissato in fase di progettazione.

Le aree di miglioramento identificate riguardano principalmente l'ottimizzazione del protocollo MQTT — attraverso compressione più efficiente e batching adattivo — l'implementazione di strategie di caching più sofisticate per ridurre la latenza nei casi di accesso frequente agli stessi dati, il miglioramento degli algoritmi di dispatch per supportare la parallelizzazione su architetture multi-core, e il tuning dei parametri dei controllori PI per avvicinare ulteriorment i tempi di risposta ai valori nominali.

10. CONCLUSIONI E PASSI SUCCESSIVI

10.1 SINTESI DEI RISULTATI CONSEGUITI

La realizzazione e la validazione della piattaforma ViSto in ambiente simulativo ha rappresentato un passaggio fondamentale nel percorso di sviluppo del progetto ViStoFaRe, consentendo di raccogliere evidenze concrete sulla fattibilità tecnica dell'approccio architetturale scelto prima di procedere con l'implementazione fisica. La campagna di simulazione ha raggiunto pienamente i propri obiettivi: l'architettura generale e i moduli funzionali sono stati validati, le capacità comunicative con i dispositivi StorInPlus sono state testate in scenari rappresentativi, e il comportamento del sistema in condizioni dinamiche — inclusi guasti e situazioni di rete degradata — è stato caratterizzato in modo quantitativo.

Gli algoritmi di ottimizzazione e controllo hanno dimostrato la propria efficacia in tutti gli scenari di test considerati, e sono state identificate con precisione le aree di miglioramento da affrontare nelle fasi successive. La piattaforma ha soddisfatto i requisiti funzionali e prestazionali definiti, con margini di miglioramento chiari e ben delimitati. I servizi di rete implementati — Fast Reserve, Load Levelling e Peak Shaving — hanno mostrato prestazioni in linea con le aspettative, confermando la validità complessiva dell'approccio adottato.

10.2 PASSI SUCCESSIVI

Come naturale evoluzione delle attività svolte nell'ambito della LA2.3, la piattaforma ViSto verrà integrata nel dimostratore fisico nell'ambito del WP5, dove saranno condotte prove sul campo per la validazione finale del sistema in condizioni operative reali. Il percorso di integrazione prevede lo sviluppo della piattaforma su hardware dedicato e la connessione con dispositivi StorInPlus fisici, seguiti da una campagna di test in campo per la validazione delle prestazioni in condizioni operative reali. In parallelo, verranno implementati i miglioramenti identificati durante la fase simulativa e

verrà sviluppata la documentazione operativa comprensiva di manuali e procedure. Il programma di formazione del personale operativo completerà il percorso di trasferimento delle conoscenze necessario per il pieno sfruttamento delle potenzialità della piattaforma.

Il passaggio dall'ambiente simulativo a quello fisico richiederà un'attività di calibrazione e adattamento, in particolare per quanto riguarda i parametri dei controllori PI — da tarare in relazione alle caratteristiche specifiche dell'hardware reale — e la calibrazione dei modelli di previsione sulla base delle misure effettive dell'impianto. Questi aspetti saranno affrontati nel corso della fase di messa in servizio del dimostratore fisico, con il supporto delle evidenze e delle analisi prodotte nell'ambito del presente deliverable.

11. APPENDICE

A. GLOSSARIO

Termine	Definizione
ViSto	Virtual Storage - piattaforma di aggregazione e gestione di risorse di accumulo distribuite
StorInPlus	Dispositivo di conversione che interfaccia il sistema di accumulo con la rete
SdA	Sistema di Accumulo - insieme di batterie e sistemi di gestione
Fast Reserve	Servizio di regolazione rapida che richiede tempi di risposta < 1 secondo
Load Levelling	Servizio di livellamento del carico per ridurre i picchi di domanda
Peak Shaving	Servizio di riduzione dei picchi di potenza
SOC	State of Charge - stato di carica delle batterie (%)
SOH	State of Health - stato di salute delle batterie (%)
BMS	Battery Management System - sistema di gestione delle batterie
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport - protocollo di comunicazione leggero
TSO	Transmission System Operator - gestore della rete di trasmissione
DSO	Distribution System Operator - gestore della rete di distribuzione
FRU	Frequency Regulation Unit - unità di regolazione della frequenza
PI	Proporzionale-Integrale - tipo di controllore
QoS	Quality of Service - qualità del servizio nella comunicazione

B. ACRONIMI

Acronimo	Significato
ViSto	Virtual Storage
SiL	Software-in-the-Loop
LA	Linea di Attività

WP	Work Package
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
SdA	Sistema di Accumulo
BMS	Battery Management System
TSO	Transmission System Operator
DSO	Distribution System Operator
SOC	State of Charge
SOH	State of Health
API	Application Programming Interface
RBAC	Role-Based Access Control
TLS	Transport Layer Security
SSL	Secure Sockets Layer
MPC	Model Predictive Control
MILP	Mixed Integer Linear Programming
OTA	Over-The-Air
PI	Proporzionale-Integrale

C. RIFERIMENTI NORMATIVI

- **CEI 0-16**: Regola tecnica di riferimento per la connessione di utenti attivi e passivi alle reti AT e MT
- **CEI 0-21**: Regola tecnica di riferimento per la connessione di utenti attivi e passivi alle reti BT
- **Direttiva Bassa Tensione 2014/35/UE**
- **Direttiva EMC 2014/30/UE**
- **IEC 61850**: Standard per la comunicazione nelle sottostazioni elettriche
- **IEC 61970/61968**: Standard Common Information Model (CIM)
- **IEEE 1547**: Standard per l'interconnessione di risorse distribuite con i sistemi di energia elettrica
- **IEEE 2030.2.1**: Guide for Design, Operation, and Maintenance of Battery Energy Storage Systems

E. SPECIFICHE HARDWARE E SOFTWARE

E.1 REQUISITI HARDWARE PER SERVER VISTO

Il server che ospita la piattaforma ViSto deve soddisfare requisiti hardware adeguati a garantire le prestazioni e la disponibilità richieste. Il processore deve essere un Intel Xeon E5 o superiore con almeno 8 core fisici, supportato da un minimo di 32 GB di RAM. Lo storage deve essere basato su SSD con capacità minima di 1 TB in configurazione RAID 1 per la ridondanza dei dati. La connettività di rete richiede due interfacce Gigabit Ethernet per la gestione del traffico e la ridondanza del percorso di rete. L'alimentazione deve essere ridondante per eliminare questo componente come singolo punto di guasto. Il sistema operativo certificato è Linux Ubuntu Server 20.04 LTS o superiore.

E.2 STACK SOFTWARE

Lo stack software della piattaforma è costruito su tecnologie open-source consolidate e ampiamente supportate. Il framework applicativo è basato su Node.js e Python per i moduli di controllo e ottimizzazione. Il database per le serie temporali è TimescaleDB, ottimizzato per le query su grandi volumi di dati temporalmente ordinati. Il message broker è RabbitMQ o Mosquitto, selezionabile in fase di configurazione. La containerizzazione è gestita tramite Docker e Kubernetes per orchestrazione in ambienti multi-nodo. La pipeline CI/CD è supportata da Jenkins, il monitoring infrastrutturale da Prometheus e Grafana, e la gestione dei segreti crittografici da Vault.