Le applicazioni della Blockchain al servizio di territori e infrastrutture

La Divisione "strumenti e servizi per le Infrastrutture Critiche e le Comunità Energetiche" (TERIN-ICER) fonda il proprio approccio metodologico nello sviluppo di soluzioni digitali innovative per supportare il conseguimento degli obiettivi di transizione energetica e digitale. In tale contesto la Divisione ha avviato alcune progettualità innovative basate su tecnologia Blockchain. In particolare, un prototipo di Local Token Economy per le Comunità Energetiche che si prefiggono lo scopo di incrementare gli impatti economici e sociali in ottica Smart Communities; la resilienza delle Infrastrutture Critiche ed i territori attraverso la mitigazione e recupero dei servizi; la trasparenza e la sicurezza nella gestione dei dati dell'infrastruttura di pubblica illuminazione dei comuni italiani.

DOI 10.12910/EAI-2025-025

di Laura Blaso, Gianluca D'Agosta, Gilda Massa, Claudia Meloni, Fabio Moretti, Stefano Pizzuti, Maurizio Pollino, Alberto Tofani - ENEA

Lo strumento Local Token Economy (LTE) è un'innovativa piattaforma web-based, progettata e sviluppata all'interno del Accordo di Programma ENEA – MASE "Ricerca di Sistema Elettrico", progetto 1.7 Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali. La piattaforma sviluppa modelli avanzati per la gestione delle risorse locali. Il cuore del sistema è rappresentato da un marketplace che sfrutta tecnologie di frontiera come le **Distributed Ledger** tra cui la **blockchain**, per creare un ecosistema digitale che coniughi **sostenibilità ambientale, economica e sociale. Questo strumento è pensato per supportare le comunità locali, gli enti pubblici e le reti territoriali nello sviluppo di modelli di economia circolare, promuovendo la resilienza e la crescita sostenibile dei territori**.

Gli obiettivi di innovazione dello strumento LTE sono la ricerca tecnologica avanzata e lo sviluppo di Smart Energy Community, che sono comunità in grado di gestire il proprio fabbisogno energetico in maniera attiva. A livello tecnologico, il tool LTE rappresenta un punto di convergenza tra diverse componenti innovative:

1. **Ambiente front-end user-friendly**: una piattaforma interattiva che consente agli utenti di accedere facilmente al marketplace e tenere traccia dei loro scambi di beni e servizi.
2. **Algoritmi di ottimizzazione energetica**: L'integrazione di algoritmi avanzati permette di trasformare in token l'uso efficiente della risorsa energetica dei membri di una CER, favorendo una gestione più efficiente della stessa.
3. **Tecnologia blockchain**: utilizzata

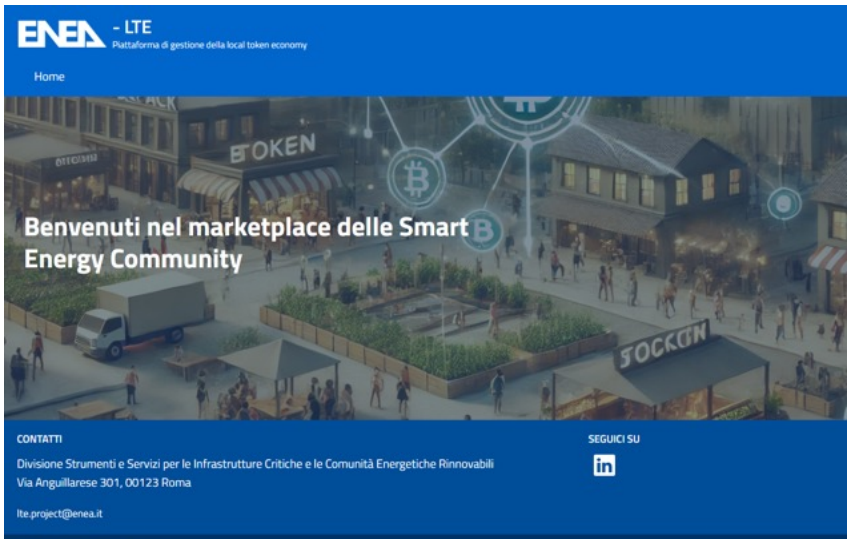

Figura 1. Homepage della piattaforma LTE

per garantire la sicurezza, l'affidabilità e la trasparenza delle transazioni, nonché per gestire i token digitali.

La tecnologia blockchain è una componente cruciale dello strumento LTE per le sue caratteristiche intrinseche di:

1. **Tracciabilità**: ogni transazione viene registrata in modo trasparente e immutabile, creando un registro affidabile e accessibile.
2. **Sicurezza**: i dati e gli scambi sono protetti da una crittografia avanzata, che riduce al minimo i rischi di frode o manipolazione.
3. **Decentralizzazione**: la gestione distribuita elimina la necessità di un'autorità centrale, aumentando la resilienza del sistema.

Premiare direttamente i comportamenti virtuosi. I **token locali, creati e gestiti sulla blockchain, rappresentano il principale mezzo per favorire l'economia circolare all'interno della comunità. Questi token, oltre a fungere da strumento di scambio, vengono distribuiti sulla base di algoritmi di ricompensa e valorizzazione che utilizzano i dati energetici dei consumatori. Gli smart contract automatizzano il processo, permettendo di premiare direttamente i comportamenti virtuosi**.

I token, conservati nei wallet degli utenti, possono essere facilmente scambiati all'interno della community per acquistare servizi specifici. Il design della piattaforma enfatizza la semplicità, consentendo agli utenti di interagire con i propri token senza richiedere conoscenze tecniche approfondite, abbassando così la barriera all'ingresso per la partecipazione della comunità.

L'accesso degli utenti al marketplace è facilitato da un'interfaccia web, appositamente integrata con il plugin MetaMask, che funge da gateway per interagire con una blockchain privata basata su Ethereum. L'autenticazione è gestita da un servizio di Identity and Access Management (IAM), che utilizza l'Identity Provider di ENEA per garantire un'autenticazione utente sicura e affidabile. Questa integrazione garantisce che solo gli utenti autorizzati possano partecipare al marketplace, migliorando la sicurezza della piattaforma e fornendo un'esperienza utente semplice.

Gli algoritmi di ricompensa, che costituiscono la base del sistema di remunerazione dei token, si basano sui dati relativi al consumo e alla produzione di energia elettrica: questi dati provengono dai sistemi di backend di ENEA, esterni alla piattaforma LTE, e vengono utilizzati per misurare e valutare in modo accurato il comportamento degli utenti all'interno della comunità energetica. **La piattaforma garantisce che i comportamenti energetici virtuosi siano incentivati in modo equo e misurabile, basando le ricompense su metriche reali di consumo e produzione di energia**.

Inoltre, i dati relativi alle funzionalità del marketplace, come le offerte di servizi e i metadati delle transazioni, sono memorizzati all'interno del componente dell'app web. Questo componente gestisce i dati off-chain e fornisce un ambiente per l'archiviazione di informazioni sulle interazioni e sui servizi degli utenti.

L'architettura è strutturata attorno a cinque componenti principali, ciascuno responsabile di funzionalità specifiche relative alla gestione dei token e alle transazioni di mercato all'interno di un ecosistema di comunità energetiche. Questi cinque componenti sono:

1. L'app Web Oracle.
2. Il servizio di autorizzazione.
3. La DApp Web, in esecuzione in un browser utente.
4. Il sistema di tokenizzazione della blockchain.
5. La piattaforma dei Servizi ENEA.

L'architettura della piattaforma è descritta nella figura seguente

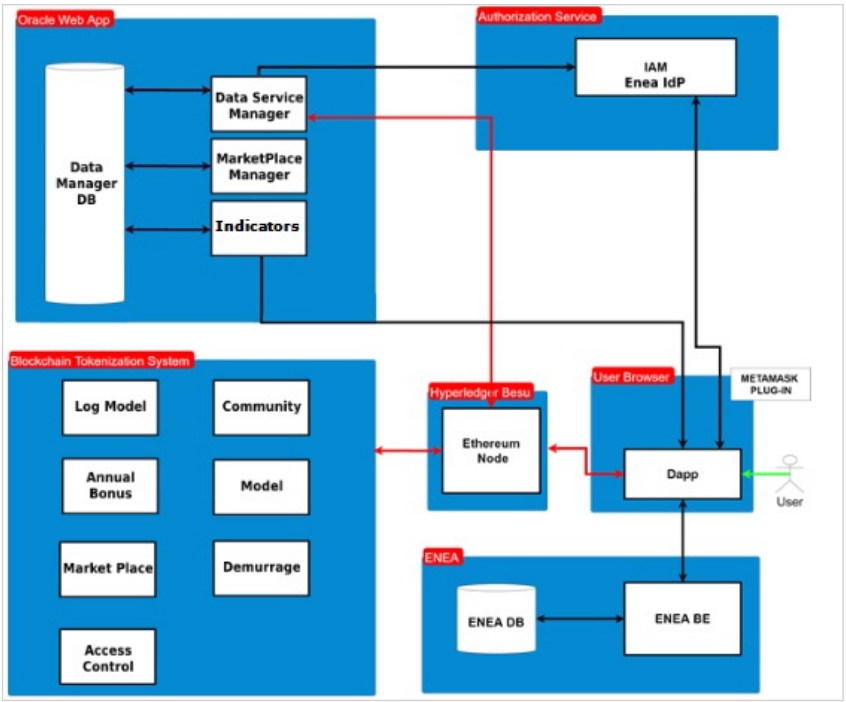

Figura 2. Architettura della piattaforma LTE.

Il sistema Oracle Web App è costituito da quattro sottocomponenti principali, principalmente legati alla gestione del marketplace:

- DB di Data Manager: è il database principale in cui sono archiviati tutti i dati relativi al marketplace e agli scambi di token.
- Data Service Manager: questo servizio gestisce le interazioni con i dati memorizzati nel DB di Data Manager.
- Marketplace Manager: supervisiona le operazioni del marketplace decentralizzato. È responsabile del coordinamento dell'acquisto e della vendita di servizi e della gestione delle interazioni tra gli utenti del marketplace.
- Indicatori: questo componente raccoglie e fornisce metriche o indicatori di performance pertinenti relativi alle prestazioni del marketplace e al suo utilizzo da parte degli utenti a fini di analisi o reportistica.

Il Servizio di Autorizzazione comprende:

- Il servizio IAM Management device (Identity and Access Management) che fornisce un'autenticazione e un'autorizzazione sicure per gli utenti della piattaforma.
- L'ENEA IdP (Identity Provider) che è il componente incaricato di verificare l'identità degli utenti quando accedono al marketplace; Solo gli utenti autenticati possono partecipare al marketplace, proteggendo così il sistema da accessi non autorizzati.

La Web DApp (Decentralized Application) è l'interfaccia con cui gli utenti interagiscono per accedere alle funzionalità della blockchain. La DApp viene eseguita all'interno del browser dell'utente ed è integrata con il plug-in MetaMask (un portafoglio basato su browser che consente agli utenti di gestire i propri token), consentendo un'interazione sicura con la rete blockchain privata. La DApp si connette al nodo Ethereum per facilitare la gestione dei token e le interazioni all'interno del marketplace.

Il Blockchain Tokenization System è il framework blockchain che alimenta il sistema di tokenizzazione ed è basato sul client Hyperledger Besu. Include varie funzionalità che vengono implementate negli smart contract utilizzando il linguaggio di programmazione Solidity:

- Log Model: tiene traccia delle attività degli utenti.
- Bonus annuale: componente per gestire l'assegnazione delle ricompense annuali.
- Demurrage: modelli specifici implementati all'interno della blockchain per gestire varie operazioni basate su token. Implementano una funzione che riduce il valore del token nel tempo (una forma di interesse negativo pensato sia per evitare l'accumulo sia per stimolare la partecipazione).
- Modello: questo componente definisce e gestisce i modelli e i parametri configurabili che impostano le modalità di emissione dei token in base al consumo e alla produzione di energia.
- Marketplace: questa parte del sistema di tokenizzazione interagisce con la blockchain, consentendo agli utenti di spendere o scambiare token acquistando beni e servizi da altri utenti.
- Il controllo degli accessi: garantisce che solo gli utenti autorizzati possano accedere alle varie funzionalità del sistema blockchain, probabilmente in base ai loro ruoli all'interno della comunità.

I servizi ENEA sono costituiti da un database e da un sistema di backend:

- ENEA DB: banca dati gestita da ENEA che memorizza le informazioni relative ai consumi e alla produzione di energia elettrica per le comunità energetiche. È esterno alla piattaforma LTE principale, ma fornisce dati essenziali per gli algoritmi di calcolo delle ricompense.
- ENEA BE (Backend): sistema di backend che gestisce l'integrazione e la comunicazione tra la piattaforma e i servizi esterni. Raccoglie dati sull'energia e li immette nella piattaforma per supportare gli algoritmi di ricompensa dei token.

Lo strumento LTE non è solo una piattaforma tecnologica, ma vuole definire uno strumento di cambiamento sistemico, capace di coniugare tecnologia, economia e sostenibilità per costruire comunità più resilienti e consapevoli.

Il modello utilizza la tecnologia blockchain per creare un archetipo di mercato decentralizzato per una comunità energetica al fine di incoraggiare e premiare un comportamento efficiente dal punto di vista energetico: questo si inserisce nella visione della Smart Energy Community come motore di interazione e collaborazione tra i partecipanti.

La resilienza delle infrastrutture critiche

Nel contesto della gestione di contingenze e disastri naturali, come ad esempio terremoti e alluvioni, è essenziale una coordinazione rapida ed efficiente delle attività di mitigazione e recupero dei servizi: la gestione ottimale delle risorse di salvataggio e di ripristino può rappresentare il discriminante per decretarne il successo.

Nell'ambito dello Spoke 5 del progetto PNRR ICSC, il laboratorio TERIN-ICER-ICS si è occupato anche di "Blockchain for disaster management", ovvero di sviluppare strumenti basati su registri condivisi, a livello di proof of concept, per ottimizzare la gestione delle emergenze, in modo da incrementare drasticamente il grado di tracciabilità delle operazioni.

L'idea alla base di questi strumenti consiste nell'aiutare gli operatori a

Figura 3. Il progetto PNRR ICSC

prendere decisioni informate con la garanzia di avere una tutela a posteriori sulle informazioni in loro possesso al momento della decisione e la tracciabilità delle azioni conseguenti.

Supponiamo, ad esempio, che a seguito di un terremoto in un'area densamente popolata sia avvenuto il collasso di alcune strutture sanitarie. Gli operatori specializzati saranno chiamati a prendere delle decisioni critiche in tempo rapido, come ad esempio il trasferimento dei feriti verso ospedali funzionanti oppure una ridistribuzione del personale sanitario nelle aree in cui se ne ravvisa una maggiore necessità. In questi contesti, le informazioni possono essere frammentarie e difficili da verificare, provocando anche una riluttanza degli operatori a prendere alcuni tipi di decisioni, per paura di critiche future su scelte adottate a partire da informazioni non corrette o autorizzazioni non complete.

Un registro condiviso fornisce un sistema in cui le informazioni di scenari critici vengono notarizzate (attraverso uno smart contract) e fornisce, quindi, una garanzia per gli operatori relativamente a qualsiasi verifica a posteriori sul contesto informativo nel quale le decisioni siano state adottate. Tale strumento garantisce allo stesso tempo la trasparenza dei dati e la conseguente tutela per le persone coinvolte nei processi decisionali.

Quale limite della applicazione della tecnologia, è opportuno sottolineare che la stessa operatività delle piattaforme a supporto dei registri condivisi in regime di non ripudiazione, non è garantita durante le contingenze potendo esse stesse risultare compromesse durante la contingenza.

La trasparenza e sicurezza dei dati di pubblica illuminazione

Nella necessità di digitalizzare infrastrutture pubbliche energivore, nell'ambito del progetto RAISE (Robotics and AI for Socioeconomic Empowerment), finanziato del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), abbiamo l'utilizzo della tecnologia blockchain per promuovere la trasparenza e la sicurezza nella gestione dei dati di pubblica illuminazione dei comuni italiani, gestiti dal progetto ENEA PELL Illuminazione Pubblica (PELL IP). Il progetto PELL IP prevede la raccolta di dati statici (consistenza degli impianti) e dinamici (dati elettrici ed energetici) dell'infrastruttura monitorata, con l'obbiettivo di raccogliere e monitorare un set minimo di dati necessari per conosce e gestire l'infrastruttura grazie ad un nuovo processo di efficientamento gestionale.

Nel progetto RAISE, in particolare, è stato sviluppato un esempio di un'infrastruttura basata su blockchain, per un comune della regione Liguria, per quanto riguarda i dati di alto valore (come previsto dal d.lg.s 8 novembre 2021, n°200 che recepisce la Direttiva europea Open Data).

Sono stati identificati due casi d'uso sui dati raccolti dalla Piattaforma PELL IP, identificati dai due seguenti obbiettivi:

1. **Dati Statici**: Certificazione la sottomissione delle schede di censimento.

È stato realizzato un sistema avanzato per certificare e registrare le schede di censimento direttamente sulla blockchain. Sono stati memorizzati dati fondamentali come:

- L'hash del file XML che rappresenta la scheda,
- Il timestamp di invio,
- L'identificativo del comune,
- Lo stato di validazione della scheda.

2. **Dati Dinamici**: Monitoraggio mensile dei dati dei comuni relativi a energia e potenza attiva, per garantirne la trasparenza e tracciabilità.

I dati mensili, aggregati per comune, relativi al consumo di:

- energia attiva
- potenza attiva

Le informazioni, sia dei dati statici che dinamici, sono state archiviate in uno smart contract specifico per ciascun caso d'uso, garantendo massima sicurezza e completa tracciabilità. È stato inoltre sviluppato un Web Service intuitivo, progettato per consentire agli utenti di accedere e consultare questi dati in modo rapido e semplice.

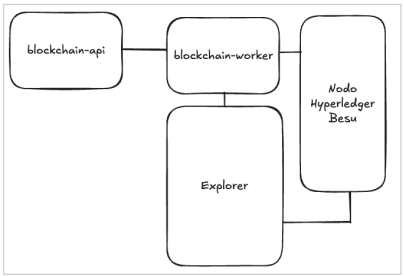

Figura 4. Schema architettura.

L'architettura si è basata su quattro componenti chiave:

- **Nodo Hyperledger Besu**: È stata creata una rete blockchain composta da quattro nodi, configurata per garantire piena compatibilità con le piattaforme IBSI (Italian Blockchain Service Infrastructure) ed EBSI (European Blockchain Services Infrastructure).
- **Blockchain-API**: Sono stati sviluppati endpoint REST per facilitare l'interazione dei dati con la blockchain. Questi consentono di gestire efficacemente sia i dati statici (ad esempio, schede di censimento) che i dati dinamici (consumi energetici).
- **Blockchain-Worker**: Un modulo autonomo progettato per ottimizzare l'inserimento dei dati nella blockchain, garantendo resilienza e automazione nei processi.
- **Explorer**: Uno strumento user-friendly che consente agli utenti di navigare tra le informazioni registrate sulla blockchain, migliorando la fruibilità e l'esperienza utente.
- **Smart Contract modulari e aggiornabili**: Grazie all'utilizzo di strutture basate su Access Control e UUPS (Upgradeable Proxy), è stata realizzata una piattaforma sicura, flessibile e predisposta per integrazioni e aggiornamenti futuri.

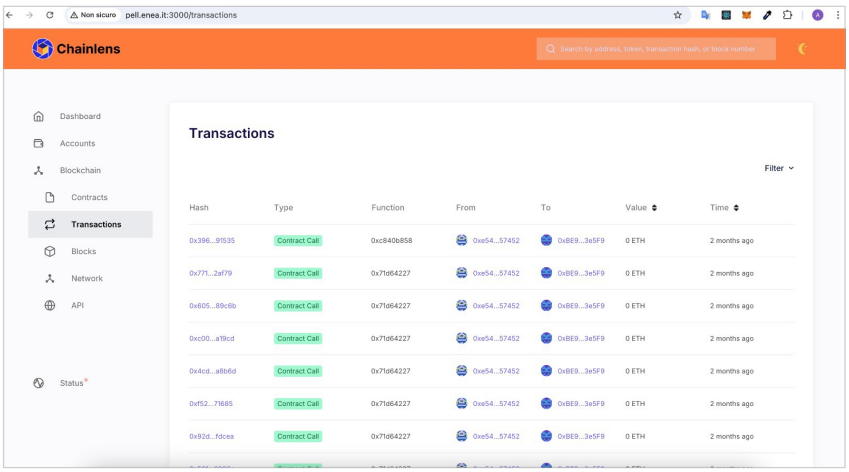

Figura 5. Vista del blockchain explorer sul sito PELL

Il raggiungimento di tali obiettivi, ha permesso significativi vantaggi tecnologici:

- **Tracciabilità Completa**: I dati statici e dinamici sono stati registrati su smart contract dedicati, garantendo trasparenza e sicurezza.
- **Scalabilità e Modularità**: L'architettura REST e l'uso di Hyperledger Besu assicurano adattabilità futura.
- **Esperienza Utente**: L'Explorer ha semplificato l'accesso alle informazioni anche per utenti non esperti.

Nella figura 5, possiamo vedere il blockchain explorer, hostato su pell.enea.it, che mostra le transazioni effettuate all'interno della rete blockchain. Come si vede dall'immagine sono tutte transazioni di tipo "contract call", dunque interazione con gli smart contract deployati sulla rete blockchain.

La realizzazione di questo prototipo, ha dimostrato come la tecnologia blockchain possa trasformare la gestione dei dati pubblici, promuovendo efficienza e fiducia. Il sistema è pronto per future evoluzioni e integrazioni con infrastrutture italiane ed europee, come IBSI ed EBSI. Questo progetto non è solo un successo tecnologico, ma anche un esempio di come innovazione e trasparenza possano essere strumenti di empowerment.

L'applicazione della Blockchain nell'ambito della Illuminazione Pubblica è il primo esempio applicativo predisposto per la messa a disposizione dei dati di altro valore quali i consumi di una infrastruttura Pubblica quali l'Illuminazione.

per info: stefano.pizzuti@enea.it