

Digital Twin, IoT e Blockchain: Una Triade Tecnologica per il Monitoraggio delle Infrastrutture

Digital Twin, IoT and Blockchain: A Technological Triad for Infrastructure Monitoring

Gabriele Fredduzzi

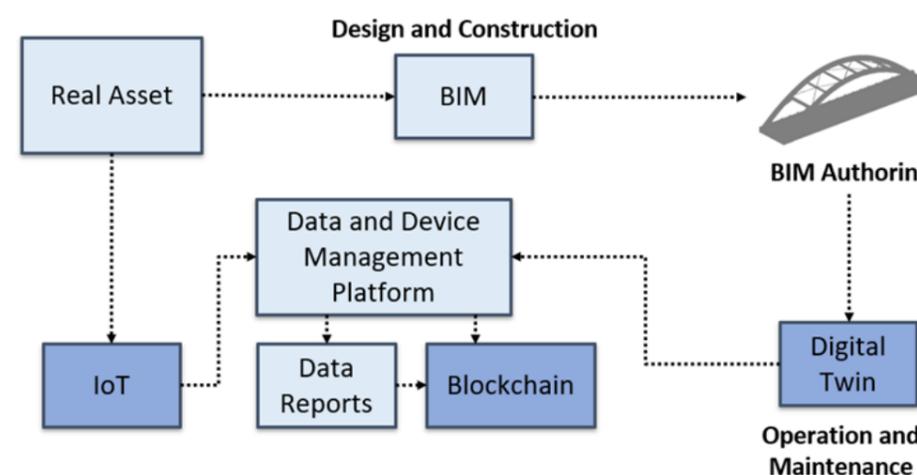
Civil and Environmental Engineer | PhD Student – University of Ferrara | gabriele.fredduzzi@unife.it

Questo studio introduce un framework innovativo che unisce Digital Twin (DT), Internet of Things (IoT) e Blockchain, offrendo un avanzamento significativo nella manutenzione e sicurezza delle infrastrutture. Implementato su un ponte in Italia, il modello evidenzia l'efficacia di un approccio olistico nella gestione infrastrutturale. Il framework si articola in sei fasi principali: geolocalizzazione e acquisizione dati (Purpose and Data Capture); creazione di modelli digitali (Virtual Modeling); gestione continua dei dati (Data Flow); aggiornamento dinamico del modello virtuale (Integrated Data Synthesis); gestione operativa (Operational Management) e registrazione dei dati in Blockchain (Blockchain Validation). Importante è il ruolo della Blockchain, che oltre a garantire sicurezza, funge da acceleratore di competenze. I report su Blockchain consentono ad altri professionisti e gestori di infrastrutture di accrescere le loro conoscenze, utilizzando un database di dati e esperienze su infrastrutture simili. Questo approccio migliora l'efficienza e la sicurezza e promuove lo scambio di conoscenze, sfruttando la tecnologia per una gestione più efficace e informata delle infrastrutture.

This study introduces an innovative framework that combines Digital Twin (DT), Internet of Things (IoT) and Blockchain, offering a significant advancement in infrastructure maintenance and security. Implemented on a bridge in Italy, the model highlights the effectiveness of a holistic approach to infrastructure management. The framework consists of six main phases: geolocalisation and data capture (Purpose and Data Capture); creation of digital models (Virtual Modeling); continuous data management (Data Flow); dynamic updating of the virtual model (Integrated Data Synthesis); operational management (Operational Management) and registration of data in Blockchain (Blockchain Validation). Important is the role of the Blockchain, which not only provides security, but also acts as a skills accelerator. Blockchain reports allow other professionals and infrastructure managers to increase their knowledge, using a database of data and experiences on similar infrastructures. This approach improves efficiency and security and promotes knowledge exchange, harnessing the technology for more effective and informed infrastructure management.

FRAMEWORK DIGITAL TWIN – IOT – BLOCKCHAIN

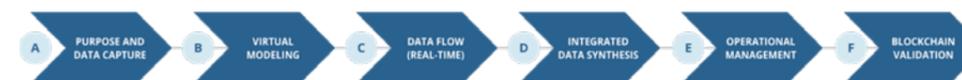
In questo framework viene esplorato un approccio innovativo per la manutenzione delle infrastrutture e la salvaguardia del patrimonio costruito. Il framework proposto si basa su un modello DT-IoT-Blockchain ispirato dagli studi di (Lu et al., 2019) e (Pregolato et al., 2022). Questa metodologia sarà messa alla prova attraverso un progetto pilota su un ponte in Italia, distinguendosi per il suo flusso di lavoro personalizzato e una struttura architettonica innovativa.



00.
Background

Il framework si articola in sei livelli operativi distinti ma integrati:

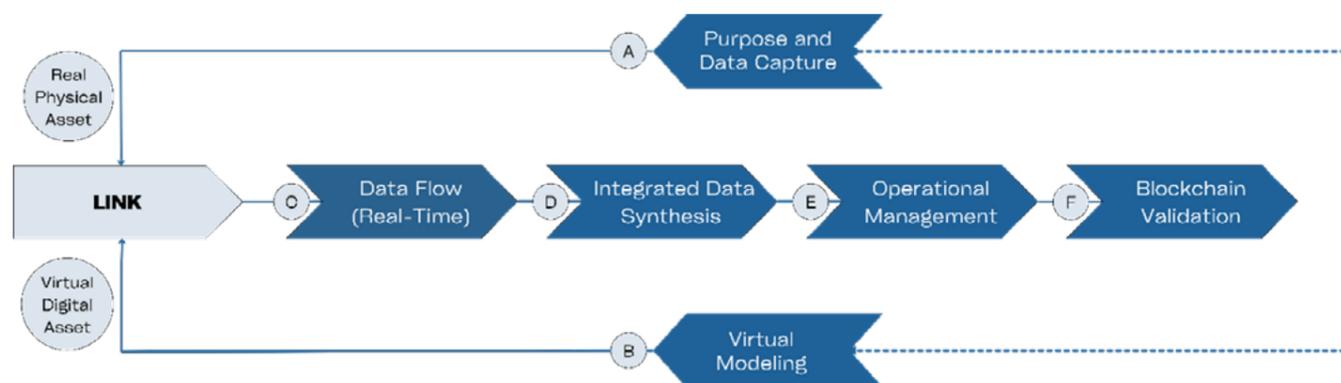
- A) Purpose and Data Capture:** Questa fase si focalizza sulla geolocalizzazione dell'infrastruttura e sull'acquisizione dei dati essenziali per una modellazione accurata del DT.
- B) Virtual Modeling:** In questo livello, viene creato il modello digitale che rappresenta fedelmente la struttura fisica, permettendo analisi e simulazioni dettagliate.
- C) Data Flow:** Questa fase gestisce la trasmissione continua dei dati raccolti dai sensori installati sull'infrastruttura.
- D) Integrated Data Synthesis:** In questa fase avviene l'integrazione dei dati raccolti, che vengono sincronizzati e assimilati nel modello virtuale permettendo un aggiornamento dinamico e continuo dello stato dell'infrastruttura.
- E) Operational Management:** In questo livello, l'attenzione è rivolta alla gestione operativa, stabilendo soglie specifiche e intraprendendo azioni basate su queste soglie prestabilite.
- F) Blockchain Validation:** Nella fase finale, per garantire la tracciabilità e la sicurezza dell'archivio dei dati derivanti dai sensori e per promuovere la condivisione delle informazioni, vengono caricati in un registro Blockchain dei report periodici. Questi report sono basati sul flusso di dati e sugli interventi effettuati a seguito del superamento delle soglie precedentemente descritte.



01.
Livelli Operativi del Framework | Framework Operational Levels

La fase A e la fase B rappresentano i contesti distinti dell'asset fisico e dell'asset digitale che sono fondamentali nella realizzazione di un DT. La fase A, "Purpose and Data Capture" è legata direttamente all'asset fisico e implica l'identificazione dello scopo del monitoraggio e la raccolta dei dati da tale asset. Questo è il punto di partenza per qualsiasi DT, dove i dati sono raccolti dal mondo fisico per essere poi utilizzati nel contesto digitale. La fase B, "Virtual Modeling" si trova invece nel contesto dell'asset digitale e riguarda la creazione di un modello virtuale che rappresenta l'asset fisico. Qui, i dati raccolti durante la fase A vengono utilizzati per costruire un modello digitale che emula le caratteristiche e le prestazioni dell'asset fisico nel mondo digitale. Queste due fasi fungono da punti di ancoraggio per il processo che lega il mondo fisico e quello digitale, essenziali per sviluppare e mantenere un DT accurato e funzionale. La connessione tra queste due fasi è realizzata attraverso un flusso di dati continuo e real-time, che assicura che il modello digitale sia sempre aggiornato e rifletta lo stato corrente dell'asset fisico.

Passando dalla panoramica generale delle fasi "Purpose and Data Capture" e "Virtual Modeling", vengono esaminate di seguito tutte le fasi coinvolte nel processo di sviluppo del DT. Ogni fase ha un ruolo unico e cruciale non solo per la creazione del DT, ma anche per il suo efficace utilizzo a seconda degli scopi specifici per cui viene creato. Questa progressione di fasi assicura che il DT sia non solo una replica digitale accurata, ma anche uno strumento versatile e adattabile a vari contesti operativi e decisionali.



02. Integrazione dei Livelli Operativi per la creazione del DT | Integration of Operational Levels for the creation of the DT



03. Ponte Caso Studio (Vicenza, Italia) | Bridge Case Study (Vicenza, Italy)

A – PURPOSE AND DATA CAPTURE

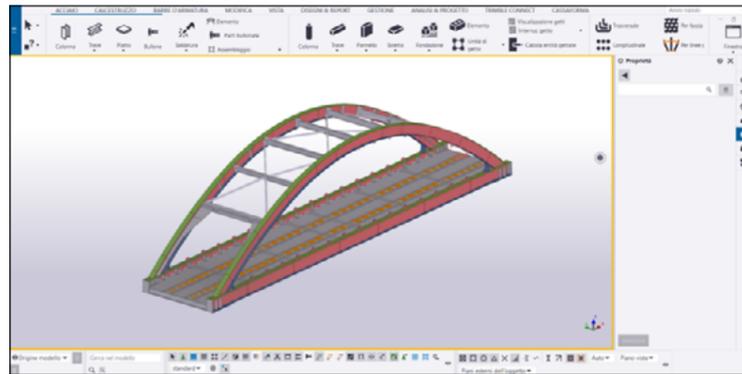
Nel quadro di un innovativo metodo di monitoraggio strutturale, questa fase si concentra sull'analisi del contesto fisico e sulla raccolta di dati essenziali per la creazione di un DT. Il ponte preso in esame (IMG 03) in questo progetto pilota si trova a Montebello Vicentino, in Italia. L'approccio propone l'utilizzo di varie tecnologie per acquisire dati accurati e dettagliati, come il Laser Scanner, la Fotogrammetria e la Videogrammetria. Questi metodi consentono di ottenere una visione completa e affidabile dello stato attuale di una struttura, fondamentale per prevedere le sue reazioni future e pianificare interventi di manutenzione efficienti e sicuri. La gestione e l'analisi dei dati raccolti sono anch'esse elementi chiave. Si esplora l'uso di database avanzati come HyperIoT di ACSsoftware, che permette una gestione efficace dei dati, facilitandone l'organizzazione, l'archiviazione e il recupero. Inoltre, si valuta l'impiego di sensori specifici per monitorare parametri strutturali critici (Rinaldi et al., 2023) e il possibile utilizzo della tecnologia Blockchain per garantire la sicurezza e l'inalterabilità dei dati. Infine, si definiscono gli obiettivi del DT, quali monitoraggio costante dei parametri strutturali, manutenzione predittiva e simulazione di scenari per migliorare la resilienza e l'efficienza operativa della struttura. Questo metodo promuove un approccio proattivo e informato nella gestione delle infrastrutture, utilizzando la tecnologia per ottimizzare la sicurezza e la manutenzione.

B – VIRTUAL MODELING

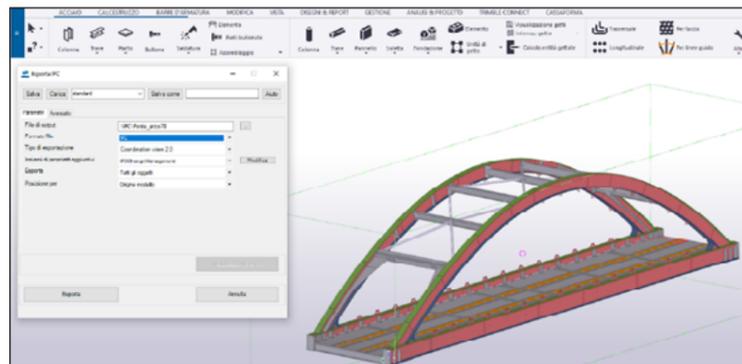
Nel contesto della creazione di modelli 3D as-built per la creazione di DT, un metodo innovativo di modellazione è stato sviluppato attraverso la collaborazione di quattro entità leader nel settore: LocLab Consulting, Arup, l'Università di Cambridge e la Technische Universität di Berlino. Queste istituzioni hanno congiuntamente elaborato procedure avanzate per la generazione parzialmente automatizzata di modelli BIM di ponti stradali esistenti, unendo le loro competenze e innovazioni per affrontare questa sfida ingegneristica. Prendendo spunto

da questo metodo, si stabilisce un solido punto di riferimento per le future iniziative nel settore del DT. Vengono identificati tre metodi di modellazione: Modellazione manuale con software di BIM Authoring basata su dati esistenti; Modellazione a partire da nuovi dati da registrare; Modellazione attraverso l'utilizzo di Artificial Intelligence (AI) e Machine Learning (ML). Il caso studio in questione è stato elaborato utilizzando il software di BIM Authoring Tekla Structures (IMG 04). Questo strumento ha permesso la creazione di un file di interscambio in formato Industry Foundation Classes (IFC) (IMG 05), facilitando così lo scambio e la gestione dei dati del progetto e la sua successiva importazione nella piattaforma "Data and Device Management" HyperIoT (IMG 06).

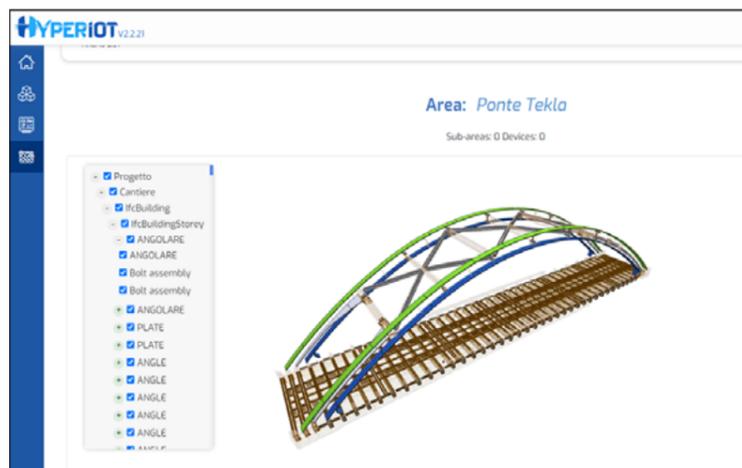
04a. Modellazione Ponte con Software di BIM Authoring Tekla Structures | Bridge modeling with Tekla Structures BIM Authoring Software



04b. Esportazione del file IFC da Tekla Structures | Exporting the IFC file from Tekla Structures

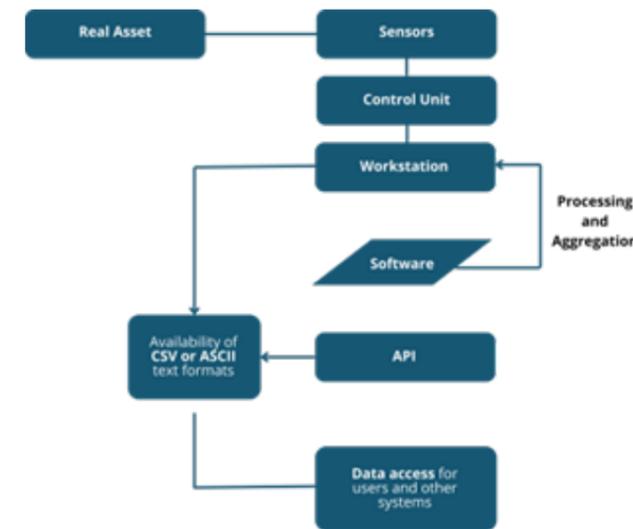


04c. Importazione del file IFC nella piattaforma HyperIoT | Importing the IFC file into the HyperIoT platform

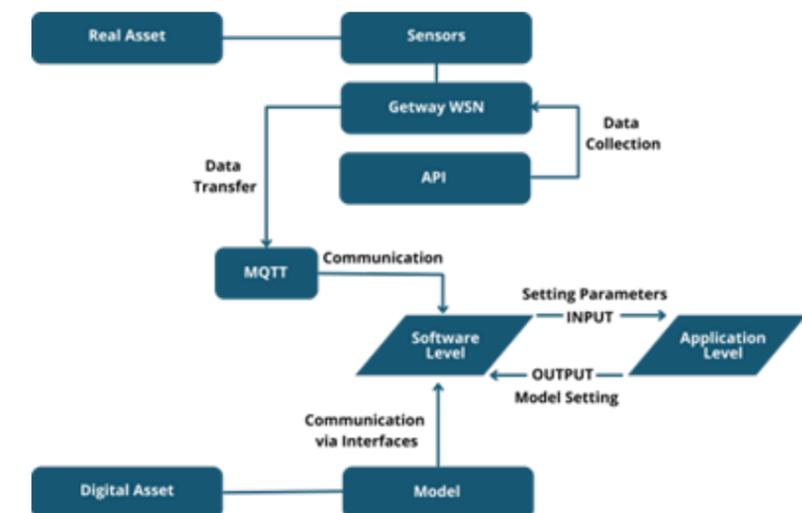


C – DATA FLOW (REAL-TIME)

Nel campo del DT, ci si concentra su due metodi principali per la raccolta e trasmissione dei dati: l'utilizzo di sensori cablati (IMG 07) e di sensori wireless (WSN) (IMG 08). I sensori cablati, collegati direttamente ad una centralina, sono scelti per la loro capacità di ridurre la latenza e garantire una sincronizzazione precisa dei dati. Questi dati vengono poi aggregati in formati facilmente accessibili. D'altro canto, i sensori WSN lavorano tramite API per trasmettere i dati a un broker MQTT, permettendo un'integrazione in real-time con il DT. Entrambi i sistemi danno grande importanza alla sicurezza dei dati attraverso l'uso della crittografia end-to-end, assicurando così non solo la protezione dei dati ma anche la loro integrità, un aspetto cruciale in un campo dove le decisioni dipendono dalla precisione dei dati raccolti. Questo livello di sicurezza aiuta anche a soddisfare le normative vigenti sulla privacy e sulla protezione dei dati.



05. Trasmissione Dati Sensori Cablati | Data Transmission Wired Sensors



06. Trasmissione Dati Sensori WSN | WSN Sensor Data Transmission

D – INTEGRATED DATA SYNTHESIS

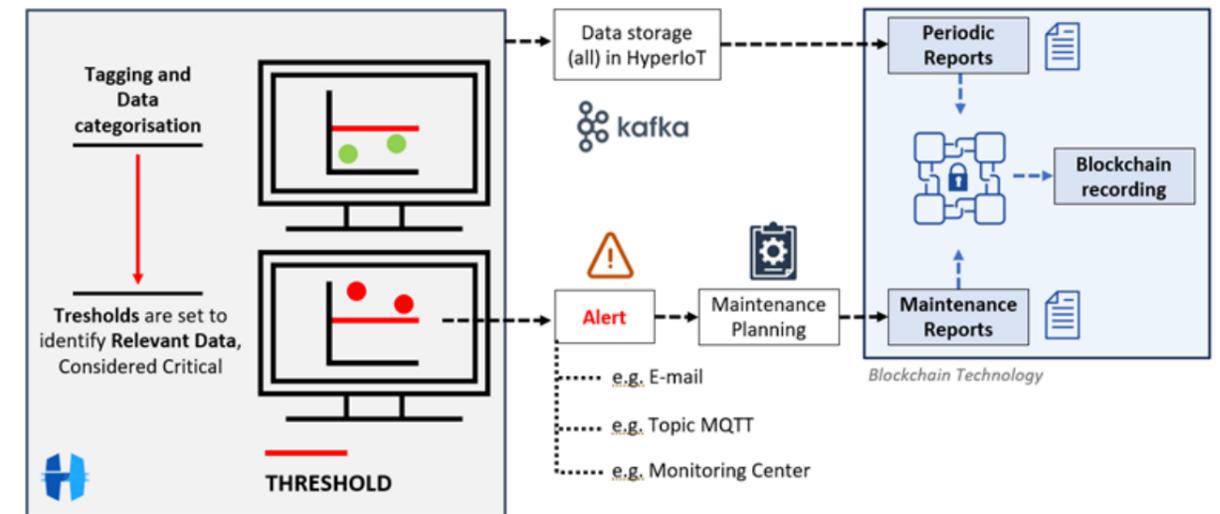
Il concetto di DT crea valore grazie alla sua struttura integrata che semplifica l'interazione dei dati, l'aggiornamento dei parametri e la convalida. Alcuni dati vengono integrati ed utilizzati per la convalida, altri devono essere prima elaborati (es. i carichi del traffico devono essere convertiti in carichi puntuali). Il DT dovrà essere collegato ad un software di elaborazione per la conversione dei dati. La diversa integrazione dei dati provenienti dai sensori può variare a seconda del tipo di dati rappresentati. Questo approccio flessibile consente un monitoraggio accurato in diversi contesti. All'interno del processo di "rispecchiamento" o "gemellaggio" definito da (Jones et al., 2020), il "tasso di gemellaggio" rappresenta la frequenza con cui avviene la sincronizzazione tra lo stato fisico e virtuale. Tale tasso di gemellaggio viene aggiornato differenzialmente a seconda dei dati da monitorare. I dati che influenzano il ponte a lungo termine saranno integrati e monitorati regolarmente ad intervalli regolari; i dati generati successivamente ad eventi eccezionali, saranno monitorati in real-time e dopo tali eventi. In entrambi i casi, i dati sono registrati e archiviati come una cronologia del comportamento della struttura. Questa cronologia dei dati fornisce una base essenziale per valutare e considerare eventuali interventi migliorativi.

E – OPERATIONAL MANAGEMENT

Nella piattaforma HyperIoT, la funzionalità "Enrichment" consente di arricchire i dati con informazioni aggiuntive. In questa sezione, i dati possono essere categorizzati impostando regole che definiscono la loro validità in relazione a un tag specifico. L'applicazione di un tag si basa su regole predefinite che determinano la sua assegnazione. Il principale vantaggio di questo sistema di tagging è la possibilità di effettuare analisi statistiche su specifici sottoinsiemi di dati associati a determinati tag. Nel nostro caso, il tagging implica l'impostazione di soglie che segnalano potenziali problemi, come il superamento di limiti critici o malfunzionamenti dei sensori. Queste segnalazioni tempestive permettono interventi mirati e la pianificazione delle manutenzioni. In risposta a queste segnalazioni, la piattaforma può intraprendere azioni specifiche come l'invio di alert direttamente al DT o l'invio di e-mail. In sintesi, questa funzionalità consente una gestione dei dati più efficace, facilitando il monitoraggio e la manutenzione attraverso un sistema di notifiche automatizzato.

F – BLOCKCHAIN VALIDATION

L'implementazione della tecnologia Blockchain necessita di un'attenta valutazione per massimizzare la sua efficacia mantenendo al contempo la sostenibilità economica. L'obiettivo è di utilizzare questa tecnologia non solo per garantire la sicurezza e l'inalterabilità dei dati, ma anche per farlo in maniera efficiente e razionale. Quando si considera l'utilizzo della Blockchain in combinazione con i sensori per il monitoraggio strutturale, emerge un importante quesito decisionale: quali dati meritano di essere registrati sulla Blockchain? La registrazione del flusso di dati in real-time sarebbe economicamente insostenibile. Dopo un'attenta valutazione e numerosi confronti con esperti del settore, si è deciso di modificare l'approccio iniziale che prevedeva la registrazione esclusiva dei soli dati critici. In alternativa, è stata scelta una strategia più inclusiva: verranno registrati sulla Blockchain dei report periodici che includono non solo i dati critici, ma anche quelli che non superano le soglie prestabilite. In aggiunta, verranno registrati anche i report relativi agli interventi di manutenzione, attuati in risposta al superamento delle soglie stabilite. Questa scelta rappresenta un approccio più comprensivo e dettagliato nel documentare l'intero spettro di attività rilevanti per il progetto. Questo approccio mira a sfruttare la Blockchain non solo come garanzia delle responsabilità, ma anche come acceleratore di competenze. Si intende offrire ad altri professionisti e gestori di infrastrutture la possibilità di attingere a questi dati per sviluppare esperienza e competenza. Nonostante questo concetto di base, va sottolineato che non è stata ancora identificata una specifica Blockchain di riferimento per l'implementazione di questo modello. Questa selezione rappresenta un passo fondamentale verso la realizzazione del progetto e richiede un'ulteriore analisi per assicurare che la Blockchain scelta sia in linea con le esigenze di sicurezza, efficienza e sostenibilità economica stabilite.



"Enrichment" section of the HyperIoT Platform

07.

Importazione del file IFC nella piattaforma HyperIoT | Importing the IFC file into the HyperIoT platform

CONCLUSIONI

Il framework integra DT, IoT e Blockchain e rappresenta un'innovazione significativa per il monitoraggio e la manutenzione delle infrastrutture. La sua applicazione su un ponte in Italia ha dimostrato come l'unione di queste tecnologie possa migliorare notevolmente la manutenzione infrastrutturale, aumentando sicurezza e affidabilità. Questo approccio apre prospettive ampie per il futuro, rendendo la manutenzione preventiva più efficiente ed economica grazie all'analisi dei dati in real-time. Inoltre la condivisione dei dati sulla Blockchain stimola la collaborazione tra professionisti del settore, arricchendo collettivamente il campo infrastrutturale. Il progetto pilota incoraggia ulteriori ricerche e l'espansione del framework a diverse infrastrutture, affrontando la sfida di integrare questi sistemi complessi in modo sostenibile. In sintesi, l'integrazione DT-IoT-Blockchain segna un avanzamento verso infrastrutture più intelligenti e resilienti, con benefici significativi per lo sviluppo delle infrastrutture e la qualità della vita delle comunità.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI | BIBLIOGRAPHICAL REFERENCES

- Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36–52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>
- Lu, Q., Parlikad, A. K., Woodall, P., Xie, X., Liang, Z., Konstantinou, E., Heaton, J., & Schooling, J. (2019). Developing a dynamic digital twin at building and city levels: A case study of the West Cambridge campus. *Journal of Management in Engineering*, 36. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000763](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000763)
- Pregolato, M., Gunner, S., Voyagaki, E., De Risi, R., Carhart, N., Gavriel, G., Tully, P., Tryfonas, T., Macdonald, J., & Taylor, C. (2022). Towards Civil Engineering 4.0: Concept, workflow and application of Digital Twins for existing infrastructure. *Automation in Construction*, 141, 104421. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104421>
- Rinaldi, S., Ferrari, P., Flammini, A., Reggia, A., Pizzari, G., & Maternini, G. (2023). Design of an IoT infrastructure during bridge renovation: A practical experience from mosore project. 4, 0–0. <https://doi.org/10.35490/EC3.2023.322>