



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

DIPARTIMENTO DI MATEMATICA E INFORMATICA

Corso di Laurea Magistrale in Informatica

LA BLOCKCHAIN E GLI SMART CONTRACT PER LA TRACCIABILITÀ DELLE
BATTERIE E DEI R.A.E.E. PER APPLICAZIONI IN SECOND LIFE

RELATORE:

TESI DI LAUREA DI:

PROF. PIERLUIGI GALLO

GIULIA MARAVENTANO

CORRELATORE:

MATRICOLA 0586622

PROF.SSA ELEONORA RIVA

SANSEVERINO

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

MAGISTRALE



Abstract

Il lavoro descritto in questa tesi riguarda la ricerca di metodi per l'identificazione delle batterie a ioni di litio per veicoli elettrici e lo sviluppo di un sistema modulare, quindi estendibile, finalizzato al tracciamento delle relative informazioni in un passaporto digitale.

Nella realizzazione di questo sistema è stata utilizzata l'ontologia BattINFO per la struttura di base e le attuali tecnologie, Blockchain e IPFS, che sono orientate alla decentralizzazione dei dati. Lo smart contract sviluppato ed integrato nella rete blockchain implementata, ha lo scopo di stabilire le regole per l'accesso e la modifica dei dati del passaporto digitale.

Il progetto si inserisce nel contesto della ricerca a livello Europeo, che ha come obiettivo principale il raggiungimento della sostenibilità ambientale e la transizione verso un'economia circolare. Le batterie dovranno essere tracciate lungo tutto il percorso della catena di produzione, dall'estrazione dei materiali che le compongono, al riutilizzo in applicazioni second life, fino al loro smaltimento.

Indice

Abstract	1
Introduzione	4
1 Tecnologie e normative per la filiera delle batterie	6
1.1 I pregi e i difetti delle batterie a ioni di litio (LIBs)	6
1.2 La nuova normativa Europea sulle batterie	8
1.3 La Blockchain e le tecnologie decentralizzate	9
2 Lo stato dell'arte	10
2.1 Panoramica	10
2.2 Caratteristiche fisiche e chimiche delle LIBs	14
2.3 I parametri e gli stati di una batteria	16
2.4 I fattori relativi al degrado della batteria	19
2.5 Il riciclo e il riuso delle LIBs	21
2.6 Gli attori coinvolti nella catena e i casi d'uso	24
3 Costruzione di un modello di sistema per tracciare le LIBs	27
3.1 Introduzione	27
3.2 Identificazione univoca della batteria	29
3.3 Acquisizione e memorizzazione dei dati	32

3.4	BattINFO: l'ontologia del dominio delle batterie	34
3.5	Decentralizzazione dei dati	35
3.6	Metodo di accesso ai dati	37
4	Implementazione del sistema	38
4.1	Architettura del sistema	38
4.2	Hyperledger Fabric	44
4.3	Struttura dei dati del passaporto digitale	49
4.4	Acquisizione dei dati e workflows	51
5	Conclusioni	60
	Appendice	62
	Acronimi	62
	Informazioni utili	64
	Strutture dati e Codici	66
	Bibliografia	76

Introduzione

Il *Green Deal*, il piano strategico europeo per contrastare il surriscaldamento globale e tutelare la biodiversità del nostro pianeta, ha l'obiettivo di ridurre le emissioni di gas serra, fino al loro azzeramento, entro il 2050. Per conseguire tale obiettivo, i nuovi modelli di sviluppo e di commercio dovranno essere sostenibili e circolari.

Alla luce di ciò, l'industria automobilistica comincia a riscontrare una notevole crescita della richiesta di veicoli elettrici, che porta a un conseguente aumento della produzione di batterie a ioni di litio. Le batterie sono e rimarranno componenti essenziali del veicolo elettrico e sostituiranno completamente il serbatoio che ospita carburanti inquinanti nei convenzionali veicoli con motore a combustione interna. Sarà quindi opportuno porre l'attenzione su tutte le fasi della catena produttiva delle batterie per EV, dalle materie prime che le compongono al loro riciclo e riuso. Un problema che attualmente viene affrontato è quello dell'identificazione di ciascuna batteria, attraverso un passaporto digitale, che permetta di realizzare la tracciabilità lungo la catena di produzione (supply chain) e per tutto il ciclo di vita della batteria.

Nel Capitolo 1 vengono descritti i vantaggi e gli svantaggi dell'utilizzo delle batterie a ioni di litio. Successivamente sono riportate le nuove normative e i progetti dell'Unione Europea riguardanti la filiera delle batterie. Infine sono introdotte le tecnologie innovative che possono intervenire nello sviluppo di soluzioni robuste e

pertinenti.

Nel Capitolo 2 è descritto lo stato dell'arte delle batterie a ioni di litio, per quanto riguarda l'aspetto chimico ed elettrico, il riuso e il riciclo delle materie prime e gli attori coinvolti nell'intera catena di produzione.

Nel Capitolo 3 si propone un modello di sistema per la tracciabilità delle batterie a litio, basato sulle ontologie per l'identificazione univoca. Inoltre vengono descritte le tecnologie informatiche utilizzate per l'implementazione del sistema.

Nel Capitolo 4 è illustrato il procedimento di implementazione del sistema proposto.

Nel Capitolo 5 sono riportate le conclusioni riguardanti il lavoro svolto.

Capitolo 1

Tecnologie e normative per la filiera delle batterie

1.1 I pregi e i difetti delle batterie a ioni di litio (LIBs)

Recentemente le batterie a ioni di litio (LIBs) sono sempre più utilizzate in applicazioni high power, come i veicoli elettrici o ibridi, grazie alle loro caratteristiche [1]. Tra queste vi sono: assenza di effetto memoria, che è un'anomalia delle batterie ricaricabili, in quanto la tensione massima della batteria diminuisce anche se la potenza di ricarica rimane la stessa, poichè la batteria viene ricaricata prima della sua scarica completa; alta potenza specifica, alta energia specifica e alta densità di energia; alte correnti di carica; piccole correnti di autoscarica.

Inoltre, queste batterie hanno il vantaggio di essere leggere e compatte e non necessitano di cicli di carica e di scarica completi.

Il difetto principale delle batterie a litio è la grande sensibilità ai range operativi di temperatura e tensione. Questi due parametri, infatti, hanno la necessità di essere

monitorati. L'utilizzo a temperature al di fuori del range di sicurezza $[-20^{\circ} : +60^{\circ}]$ causa invecchiamento prematuro e danni interni alla batteria, che può arrivare a bruciarsi o ad esplodere.

Riguardo la produzione di questo tipo di batterie, vi sono molteplici aspetti critici che rendono la gestione della supply chain notevolmente problematica.

Alcune delle materie prime che compongono queste batterie sono minerali come il litio e il cobalto, difficili da reperire, poiché estratti in pochi paesi del pianeta. Per esempio, il 78% di litio viene importato dal Cile, mentre la maggior produzione di cobalto avviene nella Repubblica Democratica del Congo, dove, tra l'altro, l'estrazione del minerale è eseguita sfruttando il lavoro minorile e quindi violando i diritti umani.

Un altro fattore critico è legato alla valutazione dello stato di salute (State of Health, SoH), che dipende da un gran numero di parametri. Servono quindi dei metodi efficaci per ottenere un'alta precisione sui dati acquisiti e su quelli calcolati, impiegando minor tempo possibile.

Di notevole importanza è pure il tema del riciclo, processo che ad oggi avviene manualmente e senza una accurata procedura secondo cui vengano individuate e separate tutte le componenti elementari di una batteria. Questo comporta la perdita di informazioni sui materiali elementari utilizzati. Pertanto, per un riciclo ottimale, si punta solo al riuso della batteria che ha ancora delle potenzialità, e non al riciclo dei suoi materiali di scarto.

1.2 La nuova normativa Europea sulle batterie

Il 10 Dicembre 2020 la Commissione Europea ha presentato la proposta di un nuovo Regolamento per le batterie¹, in sostituzione della Direttiva 2006/66/EC, che è la legislazione europea attualmente in vigore. La direttiva attuale è applicata a tutti i tipi di batterie, indipendentemente dalla loro natura chimica, dimensione o design, ad eccezione di alcuni tipi di batterie utilizzate per esempio per scopi militari o aerospaziali.

Nella nuova proposta legislativa del Consiglio dell'UE, cambia la natura del provvedimento (da Direttiva a Regolamento e quindi di diretta applicazione senza normativa nazionale di trasposizione). Inoltre, le batterie sono suddivise in gruppi e trattate in modo diverso a seconda dell'applicazione per cui sono progettate.

Il nuovo Regolamento stabilisce il contenuto massimo di mercurio e di cadmio ed il valore soglia per il parametro dichiarato di 'impronta di carbonio'² e per il parametro del 'contenuto riciclato'. Tutte le batterie dovranno avere il marchio CE, che indicherà la conformità a tutta la normativa Europea applicabile.

Un **Passaporto Digitale (DBP, Digital Battery Passport)** dovrà fornire informazioni dettagliate sullo stato della batteria, in modo che questa possa essere riutilizzata o riciclata in maniera sicura ed efficiente.

Inoltre, il nuovo Regolamento fornisce un quadro di base per le applicazioni in 'Second Life' delle batterie usate, specificando le responsabilità del produttore e dell'operatore che rimette sul mercato la batteria.

¹<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020PC0798>

²Parametro per misurare le emissioni di gas serra, espresse in tonnellate di CO2 equivalente, causate da un prodotto, lungo tutto il suo ciclo di vita, dall'estrazione delle materie prime al suo smaltimento finale.

Come descritto dal documento rilasciato dall'ufficio stampa della segreteria generale del Consiglio³, il 9 dicembre 2022 il Consiglio ed il Parlamento europei hanno raggiunto un accordo provvisorio sul nuovo Regolamento, che deve ancora essere concluso, approvato e adottato formalmente da entrambe le istituzioni.

1.3 La Blockchain e le tecnologie decentralizzate

Le molteplici criticità riscontrate sul mercato delle LIBs, si possono affrontare efficacemente utilizzando le nuove tecnologie fondate sul paradigma della decentralizzazione. Quest'ultimo sta assumendo un ruolo innovativo in tutto il campo informatico.

Un sistema decentralizzato è un sistema in cui non esiste un ente o un'istituzione centrale che detiene il potere decisionale. Ogni singolo individuo appartenente al sistema ha bisogno del consenso di tutti altri, prima di poter prendere una decisione.

La Blockchain è una tecnologia che può risolvere molti problemi che si riscontrano nel percorso della supply chain delle batterie, in quanto può garantire solidità, sicurezza e trasparenza.

Tuttavia, poichè la blockchain è ideata per la distribuzione delle informazioni su tutti i nodi appartenenti alla rete, essa non è adatta per la gestione di quantità di dati molto elevate. In questo caso, si può ricorrere a tecnologie di storage decentralizzato alternative, come ad esempio IPFS (InterPlanetary File System).

³<https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2022/12/09/council-and-parliament-strike-provisional-deal-to-create-a-sustainable-life-cycle-for-batteries/>

Capitolo 2

Lo stato dell'arte

2.1 Panoramica

Il programma di lavoro dell'UE, relativo al clima, all'energia e alla mobilità, per raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 [2], stabilisce le attività da svolgere durante il biennio 2023-2024. Nella fattispecie, le call *HORIZON-CL5-2023-D2-01* e *HORIZON-CL5-2023-D2-02* riguardano la catena di produzione delle batterie.

La **BEPA**⁴ è un'associazione privata che collabora con la **Batt4EU** Partnership, nel programma *Horizon Europe R&I*, per un mercato delle batterie sostenibile e circolare. Nel Luglio del 2021, dopo la formazione della partnership, BEPA ha lanciato i seguenti 5 gruppi di lavoro:

- Materie prime e riciclo
- Materiali avanzati e produzione
- Utilizzi finali della batteria e applicazioni
- Sicurezza e Affidabilità
- Sostenibilità

⁴Batteries European Partnership Association - <https://bepassociation.eu/>

Nel Settembre 2021 è avvenuto il primo incontro tra BEPA e la Commissione Europea per concordare il Piano Strategico per la Ricerca e l'Innovazione (SRIA)⁵. Il piano è una tabella di marcia per perseguire gli obiettivi posti ed indirizzare le aree di ricerca e innovazione, che andranno aggiornate dagli esperti dei 5 gruppi di lavoro.

La BEPA Partnership ha organizzato il primo programma di attività aggiuntive, che ricopre tutto il 2022.

I tre obiettivi generali della Partnership sono:

- Rendere l'Europa il primo continente neutrale dal punto di vista climatico
- Rendere possibile la crescita economica, con lo sviluppo di un sistema industriale competitivo per la produzione di batterie a impatto ambientale basso o nullo
- Raggiungere l'obiettivo di inquinamento zero per un ambiente privo di sostanze tossiche

I tre obiettivi specifici sono:

- Sostenere lo sviluppo delle tecnologie di differenziazione dei materiali utilizzati per la realizzazione delle batterie
- Accelerare lo sviluppo e l'implementazione di soluzioni per batterie sostenibili ed economiche
- Abilitare l'integrazione economica delle fonti di energia rinnovabile nella rete elettrica, sviluppando delle batterie idonee alle applicazioni di accumulo energetico stazionario

⁵<https://bepassociation.eu/our-work/sria/>

I requisiti tecnici da raggiungere entro il 2030 sono:

- Aumentare la densità energetica della batteria (+60% rispetto ai valori del 2019)
- Aumentare la densità di potenza della batteria e la velocità di ricarica
- Migliorare la durata del ciclo (almeno di un fattore 2 rispetto ai valori dello stato dell'arte del 2019)
- Ridurre il costo della batteria (-60% rispetto ai valori del 2019)
- Garantire la sicurezza della batteria nei diversi settori applicativi
- Implementare le migliori tecnologie disponibili a livello mondiale per produzione e riciclo

Il 14 Novembre 2022, durante l'evento "Production of raw materials for batteries from European resources" tenuto a Bruxelles [3], sono stati discussi gli obiettivi e le attività relativi al recupero delle materie prime delle batterie. E' stato evidenziato l'urgente bisogno di un processo di riciclo e riutilizzo efficiente ed economico delle batterie a litio, in quanto si prevede che la crescita della produzione delle batterie in Europa, dal 2030, salirà fino 300 GWh/anno (Fig. 2.1).

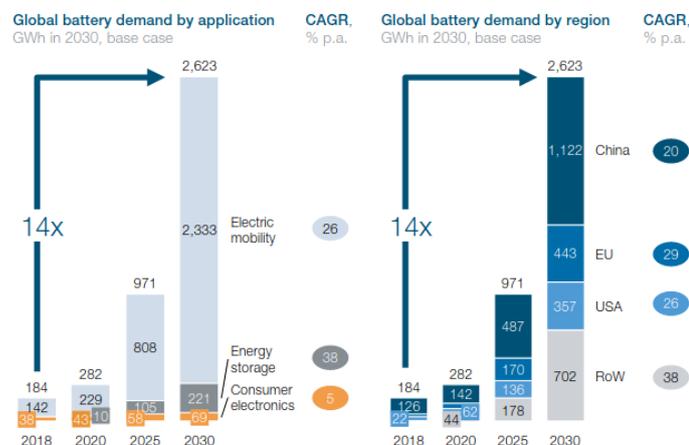


Figure 2.1: Richiesta globale di batteria, suddivisa per tipo di impiego e per paese.

I propositi fondamentali delle organizzazioni che hanno aderito all'evento sono: lo sviluppo di sistemi smart per la classificazione automatica, lo smantellamento e il riassetto delle LIBs; lo sviluppo di una serie di percorsi economici, flessibili e sostenibili per il riciclo di tutti i materiali presenti nelle LIBs; la identificazione dei rischi per la salute e gli impatti ambientali; la validazione dei materiali recuperati attraverso la sintesi di nuovi elettrodi ad alta performance e di elementi per le batterie di nuova generazione, adatti a soddisfare le performance delle batterie del 2030; il miglioramento dell'accesso ai materiali per rafforzare l'indipendenza Europea verso le materie prime; il recupero di tutti i materiali delle LIBs che hanno conseguito la fine del ciclo di vita; la creazione di un passaporto digitale per la batteria (DBP). Secondo l'Art. 65 della proposta di regolamento Europeo relativa alle batterie, tutte le informazioni che concernono la batteria dovranno essere inserite in un passaporto digitale, accessibile dalle parti coinvolte, per questioni di trasparenza e di manutenzione, ma anche dalle autorità locali, per questioni di controllo.

Ci sono ancora carenze in termini di contenuto di informazioni e di casi d'uso di DBPs. Bisogna prima di tutto identificare i requisiti rilevanti per le informazioni da inserire.

Nella ricerca [4], incentrata sul contenuto del DBP e sui suoi casi d'uso, è indicato uno schema con 4 categorie principali di informazioni della batteria:

- Battery
- Sustainability and Circularity
- Diagnostic, maintenance and performance
- Value chain actor

Inoltre vengono individuati gli elementi identificativi che dovranno essere contenuti nel DBP. Tali elementi saranno esaminati nei paragrafi successivi del presente lavoro.

2.2 Caratteristiche fisiche e chimiche delle LIBs

In una batteria a ioni di litio, le celle sono costituite essenzialmente da un catodo, composto da un ossido metallico di litio, da un anodo di carbonio grafítico, e da un elettrolita attraverso cui avviene la conduzione ionica. Inoltre, il separatore isola i due elettrodi l'uno dall'altro, impedendo il verificarsi di corto circuiti interni e fa sì che solamente gli ioni di litio possano passare da una parte all'altra.

Nei veicoli elettrici o ibridi, per raggiungere le tensioni richieste (centinaia di Volt), vengono connesse in serie molte celle a litio, a formare un modulo. Un pacco batteria è composto da più moduli.

Esistono tre tipi di strutture di celle LIBs: prismatiche, cilindriche e a sacchetto (pouch).

Le celle **prismatiche** sono composte da grandi fogli di catodi, anodi e separatori, arrotolati e compressi in un piatto a forma cubica.

Tra i vantaggi di questo tipo di celle c'è di avere un involucro molto resistente e avere una elevata capacità dei singoli elementi (si può arrivare fino a 300Ah con una singola cella). Un altro vantaggio importante è quello dei poli a vite, che rendono semplice e veloce l'assemblaggio e la sostituzione di un elemento.

Le celle **cilindriche** sono costituite da un unico foglio, con un separatore inserito tra il catodo e l'anodo, ricoperto da un involucro metallico di forma cilindrica.

I vantaggi delle celle cilindriche sono l'involucro resistente e la possibilità di cambiare chimica mantenendo invariata la meccanica di contenimento.

Gli svantaggi di queste celle sono la bassa capacità (una singola cella arriva al massimo a 3Ah) e il fatto che vengano assemblate in serie e in parallelo con una saldatura. A causa di questo, non si può sostituire una singola cella, ma viene imposta la sostituzione di un intero modulo, con interventi invasivi e costosi.

Le celle a **sacchetto** sono unite in un involucro da quattro per formare un modulo. I vantaggi di queste celle sono l'alta densità energetica che si riesce ad ottenere ed il basso costo dell'involucro. Tuttavia presentano il notevole inconveniente della scarsa robustezza dell'involucro.

La figura 2.2, riportata nell'articolo [5], illustra le percentuali degli elementi contenuti in ogni componente della batteria. La figura 2.3 descrive la composizione elettrochimica del pacco batteria.

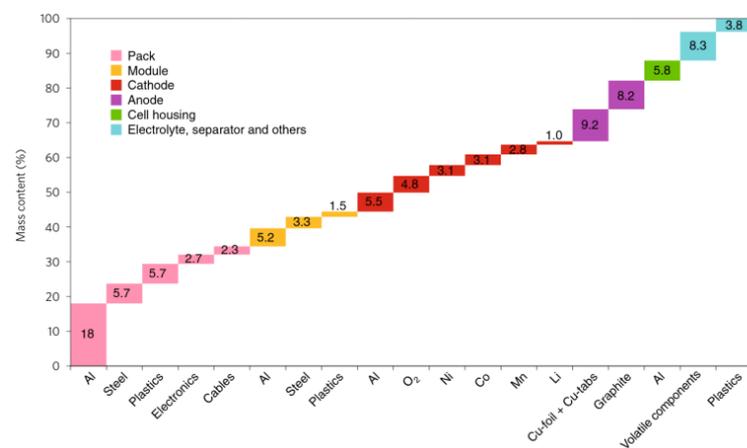


Figure 2.2: Percentuali del contenuto di materiali di una batteria a litio, distinte per ogni componente.

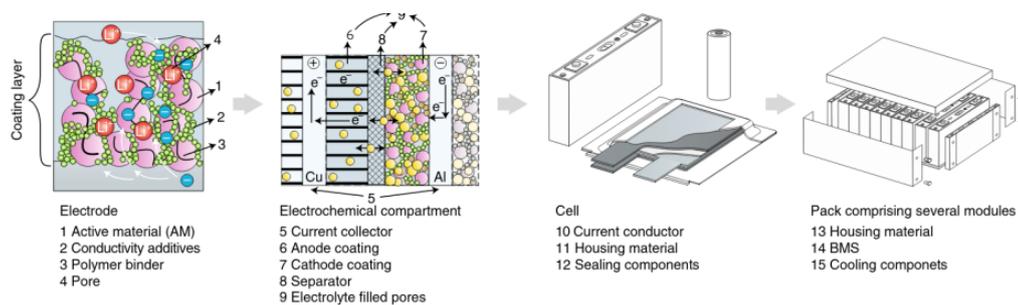


Figure 2.3: Composizione dell'elettrodo e del comparto elettrochimico. Componenti del pacco batteria (celle e moduli).

2.3 I parametri e gli stati di una batteria

Le batterie sono generalmente caratterizzate da parametri e da stati.

La **capacità nominale**, comunemente misurata in Ah (Ampere per ora), indica la carica che può attraversare il terminale positivo di una batteria prima che questa si scarichi completamente (per le batterie per auto SLI⁶ i valori vanno da 40 Ah a 90 Ah). Se si vuole misurare tale carica, impropriamente detta Capacità, in Coulomb si deve moltiplicare per 3600. Si usa invece questa unità di misura perché dà informazioni pratiche sul prodotto.

E' possibile trovare accanto all'indicazione in Ah anche la lettera C seguita da un numero, ad esempio 80 Ah C20 significa che la batteria è in grado di erogare una corrente di 4 A in 20 ore, in modo continuativo, dopo di che la differenza di potenziale ai capi della batteria risulterà insufficiente a fornire la stessa intensità di corrente.

Confrontare la capacità di due batterie equivale a confrontare le due cariche solo a parità di tensione. Infatti la capacità è definita come il rapporto Q/V e si misura in "farad".

La **resistenza interna** di una batteria è dovuta all'ostacolo subito dalla corrente nell'attraversare lo stesso generatore elettrico per cui una parte dell'energia fornita viene dissipata in energia termica (effetto Joule). Per questo motivo, a circuito chiuso, la tensione ai terminali della batteria è inferiore rispetto a quella a circuito aperto. Questa differenza è trascurabile quando la resistenza interna si attesta attorno a pochi milliohm.

La **tensione nominale**, espressa in Volt, è la differenza di potenziale tra i morsetti di una batteria mediamente carica, quando in essa non scorre corrente.

La tensione nominale di una batteria al litio per EV, per la stragrande maggioranza

⁶Starting, Lighting and Ignition. Tipologie di batterie che servono ad avviare e mantenere una fonte di alimentazione. Le comuni batterie delle auto a benzina, per esempio, sono batterie SLI.

dei casi, è di 400 Volt, ma si sta passando a batterie da 800 Volt.

Il contenuto di energia, espresso in KWh , è l'energia immagazzinata nella batteria. In alcuni casi è impropriamente chiamato "capacità", per indicare la capacità di immagazzinare energia.

L'energia specifica, espressa in kWh/kg , è l'energia accumulata per unità di massa.

La densità di energia, espressa in kWh/dm^3 è l'energia accumulata per unità di volume.

La potenza specifica, espressa in kW/kg , è la potenza erogata per unità di massa.

La densità di potenza, espressa in kW/dm^3 è la potenza erogata per unità di volume.

Lo **Stato di carica (SoC)** è definita come il rapporto tra la carica residua (quantità di carica estraibile dalla batteria in un determinato momento) e la capacità nominale della batteria stessa, a temperatura ambiente.

$$SoC = Q/Q_n$$

dove: Q è la carica residua e Q_n è la capacità nominale.

Questa definizione non tiene conto dell'invecchiamento della batteria.

In alternativa si può definire:

$$SoC = Q/Q_{max}$$

dove: Q_{max} è la massima carica immagazzinata e varia con la vita della batteria.

Per ottenere una stima dello SoC ci sono vari metodi con uso di algoritmi più o meno complessi dal punto di vista computazionale. Un metodo sperimentale è quello del test di scarica, che però non è utilizzabile in applicazioni real-time.

La **Profondità di scarica (Depth Of Discharge - DOD)** è una misura di quanta energia è stata prelevata da una batteria e viene espressa in una percentuale della capacità nominale della batteria. Si può considerare il complementare dello SoC.

$$DoD = Q/Q_n$$

dove: Q è la carica consumata, Q_n è la capacità nominale.

La **Temperatura** è un parametro importante, perchè influenza direttamente la quantità di energia che può essere estratta dalla cella (soprattutto nelle celle a litio); tale quantità di energia decresce fortemente con l'abbassarsi della temperatura, divenendo quasi nulla sotto gli zero gradi.

Il **Numero di cicli** misura il numero di cicli di carica e scarica a cui la batteria è soggetta da quando è stata prodotta.

Lo **Stato di salute (SoH)** è uno stato difficile da stimare, poichè dipende da diversi fattori. Esso indica qual è il livello di prestazioni generali che la batteria può garantire rispetto alla stessa batteria da nuova, considerando diversi parametri, come la tensione, l'autoscarica, la resistenza interna, SoC, ecc..

Le auto elettriche sono dotate di un circuito di gestione della batteria (BMS), che monitora i parametri e gli stati su più livelli, dalla singola cella all'intero pacco.

Le funzioni principali del BMS sono [6]:

- Misura delle tensioni per ciascuna cella
- Misura della corrente per evitare valori oltre i limiti massimi
- Misura della temperatura, non necessariamente per ciascuna cella

La durata delle batterie a Litio è di circa 8 anni, con un decadimento di circa il 10% della capacità dopo ben 500 cicli di ricarica. Superati i 160 mila chilometri di vita utile, la batteria funziona ancora all'80% e può essere utilizzata per applicazioni in

Second Life.

2.4 I fattori relativi al degrado della batteria

L'invecchiamento di una batteria a ioni di litio è un fenomeno complesso che dipende da molti fattori non lineari, interni (processi chimici) ed esterni (temperatura, intensità di corrente). Pertanto, per la ricerca attuale, identificare con accuratezza il processo di invecchiamento di una batteria è un obiettivo impegnativo.

In generale, l'invecchiamento viene classificato in due modi:

- **Calendar Life:** degrado della batteria in funzione del tempo, anche in condizioni di non utilizzo.
- **Cycle life:** degrado della batteria in funzione di cicli di carica, di tempo e di capacità (durante l'utilizzo).

Al netto di danni consistenti ed improvvisi alla batteria, è possibile misurare il graduale degrado della batteria fino al suo EOL (End Of Life). Fondamentalmente, questo degrado si misura attraverso la perdita progressiva della capacità (che porta ad una diminuzione di autonomia) e l'aumento della resistenza interna (che porta ad una diminuzione di potenza erogata).

Il documento dell'Enea, sullo *Stato dell'arte dei modelli di invecchiamento per le celle litio-ione* [7], riporta una tabella con i principali meccanismi di degrado delle celle LIBs (Fig. 2.4).

L'articolo [8] riporta una tabella comparativa dei metodi utilizzati per stimare l'invecchiamento di una LIB (Fig. 2.5).

Tabella 1: principali meccanismi di degrado all'anodo [8]

Causa	Effetti	Conseguenze	Ridotta da	Aumentata da
Decomposizione dell'elettrolita (SEI)	Perdita di litio Aumento della RI	Perdita di capacità Perdita di potenza	Additivi per la stabilizzazione del SEI	Alte temperature Alti SOC
Intercalazione spurie del solvente, sviluppo di gas e formazione di crack	Perdita di materiali attivi Perdita di litio	Perdita di capacità	Additivi per la stabilizzazione del SEI Pre-trattamenti del carbone	Sovraccarica
Diminuzione della superficie accessibile dovuta alla crescita del SEI	Aumento della RI	Perdita di potenza	Additivi per la stabilizzazione del SEI	Alte temperature Alti SOC
Cambio della porosità dovuta a cambi di volume (aumento del SEI)	Aumento della RI Sovrapotenziale	Perdita di potenza	Pressione esterna Additivi per la stabilizzazione del SEI	Alte correnti di ciclaggio Alti SOC
Perdita di contatti del materiale attivo	Perdita di materiali attivi	Perdita di capacità	Pressione esterna	Alte correnti di ciclaggio Alti DOD
Decomposizione del binder	Perdita di litio Perdita di stabilità meccanica	Perdita di capacità	Scelta del binder	Alte temperature Alti SOC
Corrosione del collettore di corrente	Sovrapotenziale Aumento della RI Distribuzione disomogenea della corrente e della tensione	Perdita di potenza Aumento di altri meccanismi di aging	Pretrattamento del collettore di corrente	Sovraccarica Bassi SOC
Placcatura del litio metallico e decomposizione dell'elettrolita	Perdita di litio (e di elettrolita)	Perdita di capacità Perdita di potenza	Diminuzione della finestra di tensione operativo	Basse temperature Alte correnti di ciclaggio Scarso bilanciamento delle celle e problemi geometrici

Figure 2.4: Meccanismi di degrado delle celle LIBs.

	Adaptation	Precision	Operate without data	Real time	Prediction
Direct measurement	Excellent	Excellent	Excellent	Very poor	Very poor
Equivalent circuit model	Very poor	Fair	Good	Good	Fair
Electrochemical model	Very poor	Excellent	Fair	Fair	Fair
Performance model	Very poor	Good	Poor	Fair	Good
Analytical model	Very poor	Good	Poor	Poor	Poor
Statistical method	Fair	Good	Very Poor	Good	Good

Figure 2.5: Modelli matematici per stimare l'invecchiamento di una LIB.

I risultati delle diagnosi di invecchiamento di una batteria, acquisite dinamicamente da un OBD-II⁷, e conservate nel DBP, in una sezione dedicata allo storico dei dati, possono essere di grande utilità per le fasi di smantellamento, di valutazione o di analisi future.

2.5 Il riciclo e il riuso delle LIBs

Nel mercato automobilistico, quando una batteria a litio arriva sotto l'80% della sua capacità nominale, non è più utilizzabile per l'alimentazione dei veicoli elettrici e va dismessa.

La possibilità di riciclare o riutilizzare tutte le batterie che non possono più assolvere il loro compito originario, evita molti problemi, sia dal punto di vista ambientale che da quello economico. Infatti, dare una seconda vita ("second life") a queste batterie, riduce notevolmente il rilascio nell'atmosfera di elementi chimici inquinanti e minimizza la produzione di nuove batterie e quindi l'estrazione di nuove materie prime.

Poiché la richiesta di accumulo energetico è destinata a crescere sensibilmente, per il forte incremento delle energie rinnovabili, le quali dipendono da fattori naturali esogeni (sole e vento), c'è la necessità di realizzare sistemi di storage per immagazzinare l'energia. La capacità residua delle batterie dismesse è idonea a soddisfare questa necessità.

La soluzione più semplice è quella di utilizzare il pacco batteria per intero, prendendo un numero di batterie sufficiente a raggiungere la potenza richiesta. Tuttavia, questa non è la soluzione più efficiente, poiché, per un buon funzionamento del sistema, è opportuno ricorrere a batterie quanto più omogenee possibili.

⁷On-Board Diagnostics Second Generation. Sistema di diagnosi del veicolo elettrico, che monitora le prestazioni di vari componenti, raccogliendo i dati da sensori ed altri dispositivi di monitoraggio.

Inoltre, anche utilizzando batterie dello stesso modello ma provenienti da due veicoli differenti, non si ha una performance ottimale. Questo dipende dal fatto che la storia pregressa delle batterie è diversa, ad esempio per il numero di cicli di carica e scarica effettuati, per le sollecitazioni meccaniche subite, per lo stato delle singole celle, ecc. . .

Non essendo possibile determinare questi fattori senza smontare il pacco, si rischia di compromettere l'efficienza dell'intero sistema.

Si deve quindi procedere con il disassemblaggio del pacco batteria e con l'estrazione delle singole componenti di accumulo, come le singole celle o i moduli.

Non è detto però che l'operazione di disassemblaggio risulti semplice e soprattutto conveniente. Se, per esempio, il costo delle operazioni di smontaggio supera il costo di produzione di una batteria nuova, è evidente che il processo perde di qualsiasi vantaggio.

L'articolo [9] propone un metodo per il disassemblaggio automatico delle batterie.

Nella figura 2.6 è riportato lo schema della struttura di base di un pacco batteria per EV.

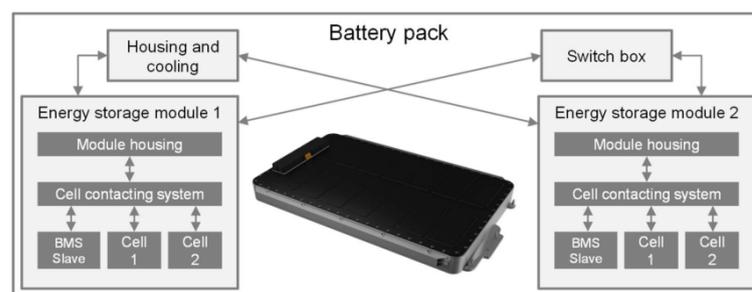


Figure 2.6: Rappresentazione schematica della struttura di base di una batteria per EV di ultima generazione. Le frecce rappresentano le connessioni fisiche tra i singoli componenti che devono essere separati durante lo smontaggio.

Con l'utilizzo di tecniche di Machine Learning, di sensori per il rilevamento di materiali, di una procedura di digitalizzazione e di un sistema di etichettatura, è possibile

realizzare un processo sofisticato di riciclo, che tiene conto della tipologia di batteria.

In generale, per un buon processo di riciclo sono da prendere in considerazione:

1. L'impronta di carbonio nel processo di produzione
2. La robustezza e la prestazione
3. La facilità di rimozione e sostituzione dei componenti
4. L'incremento dell'efficienza di riciclaggio del 65% dal 2025 e del 70% dal 2030, e del tasso di recupero per i singoli componenti
5. L'inserimento di informazioni come la composizione della batteria, inclusa la chimica del catodo, nel Passaporto della batteria.

Un altro studio attuale [10] riguarda lo sviluppo della digitalizzazione nella catena di produzione delle LIBs e mostra le prospettive future del settore. Esso propone un approccio per la costruzione di un Digital Twin della catena di produzione delle LIBs (fig.2.7).

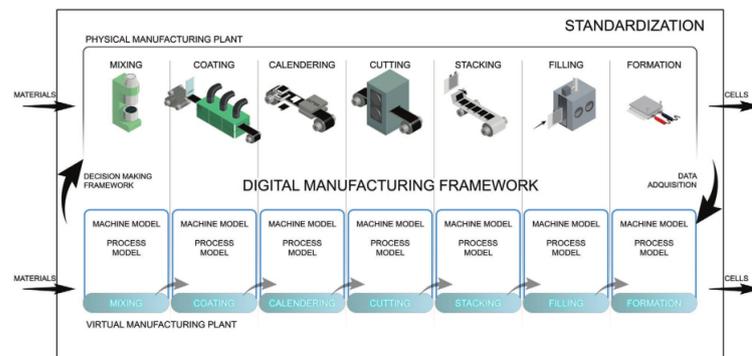


Figure 2.7: Struttura per il gemello digitale della catena di produzione LIB.

2.6 Gli attori coinvolti nella catena e i casi d'uso

Ogni componente di un pacco batteria ha un produttore specializzato. Partendo dalle materie prime, passando per le singole parti elettrochimiche, le celle e i moduli, fino ad arrivare al prodotto completo, gli attori che vengono coinvolti nella catena di produzione sono diversi (Fig. 2.8).

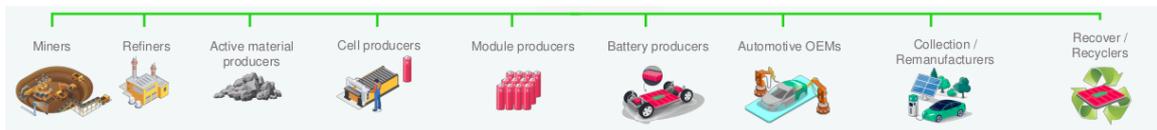


Figure 2.8: Parti interessate nella catena di produzione delle batterie.

L'articolo [4] analizza alcuni dei potenziali casi d'uso del DBP lungo la supply chain delle batterie:

- **OEM (Original Equipment Manufacturer).** Il produttore delle componenti principali ha bisogno di avere informazioni chiare sul prodotto, al fine di identificare la tipologia di batteria di interesse. Pertanto deve accedere sicuramente alle informazioni generali e specifiche della batteria. Inoltre deve conoscere lo status quo delle prestazioni di sostenibilità e circolarità della batteria.
- **Utente di EV.** L'utilizzatore di un veicolo elettrico vuole avere informazioni affidabili e di qualità sulla sostenibilità e circolarità della batteria. La batteria deve offrire un basso impatto ambientale e alte prestazioni di circolarità. Se viene acquistata una batteria usata, l'utente vuole conoscere lo stato di salute, lo storico della manutenzione e il chilometraggio percorso.
- **Riciclatore.** Attualmente i riciclatori hanno difficoltà di accesso alle informazioni sulla chimica della batteria e sulle opzioni di disassemblaggio. Quindi il passaporto digitale deve essere utile anche a loro, al fine di migliorare le

prestazioni di sostenibilità e circolarità nelle opzioni di riciclaggio. Di fondamentale importanza per il riciclatore sono le informazioni come la composizione chimica e la presenza di eventuali sostanze pericolose.

- **Organismo di regolamentazione.** L'organismo di regolamentazione stabilisce i requisiti legali, come per esempio le prestazioni ambientali richieste, il contenuto obbligatorio di materiale secondario, ecc...

Nella tabella 2.1 sono elencati i dati della batteria e quali attori hanno accesso ad essi.

Data Access				
Battery Data	OEM	EV User	Recycler	Regulatory
Battery Model	X	X	X	X
Manufacturing Date	X	X	X	X
EV Manufacturer	X	X	X	X
Battery producer	X	X	X	X
Country of battery prod	X	X	X	X
Cell Producer	X	X	X	X
Country Cell Producer	X	X	X	X
Cell Type	X	X	X	X
Chemistry	X	X	X	X
Weight	X	X	X	X
Voltage	X	X	X	X
CycleLife	X	X	X	X

Table 2.1: Accesso ai dati per singolo attore.

Data Access				
Battery Data	OEM	EV User	Recycler	Regulatory
Battery Energy	X		X	
Rated Capacity	X	X	X	X
Cycle Number	X	X	X	
Energy Density	X		X	
SoC		X		
SoH		X	X	
Temperature		X	X	
Internal Resistance			X	
Cell Voltage	X		X	X
Traced material	X	X	X	X
Raw material provenance	X	X	X	X
Raw material amount	X	X	X	X
Recycling Rate	X	X	X	X
Carbon Footprint	X	X		X
Co2 impact	X	X		X
Water wasting Impact	X	X		X
Renewable energy	X	X		X
Social Impact	X	X		X
Battery Owner		X	X	
Owner Country		X		
Battery Sale Date	X	X		
Maintenance date		X	X	
Recycling date		X	X	

Capitolo 3

Costruzione di un modello di sistema per tracciare le LIBs

3.1 Introduzione

Nel presente lavoro, è stato sviluppato un sistema per la gestione dei metadati del DBP, prendendo spunto dall'articolo [11], il quale propone una struttura per la implementazione di un sistema di tracciabilità basato sulle ontologie.

A differenza di molti sistemi esistenti, basati sulle ontologie e/o sulla tecnologia blockchain, il modello proposto in questa tesi possiede le seguenti caratteristiche:

- Un'architettura modulare e un software scalabile ed efficiente, grazie all'utilizzo di **docker containers** collegati tra loro.
- Una combinazione delle tecnologie **Blockchain** e **IPFS**, finalizzata alla gestione ottimale dello storage dei dati.
- Una crittografia per la sicurezza dei dati.
- La possibilità di accesso rapido a i dati, grazie all'utilizzo del QR code.

I passi seguiti per lo sviluppo del sistema sono i seguenti:

- Identificazione della batteria.
- Strategie di acquisizione e memorizzazione dei dati nel DBP.
- Sviluppo di un sistema di tracciabilità basato sull'ontologia del dominio della batteria.
- Decentralizzazione dei dati in una rete IPFS e in una rete blockchain.
- Metodi di accesso ai dati del passaporto.

La catena di produzione delle celle delle batterie a ioni di litio è un sistema complesso a causa delle molteplici interdipendenze processo-prodotto. Pertanto è necessario, prima di tutto, sviluppare una comprensione olistica del sistema e identificare le interazioni tra le fasi del processo all'interno della catena di produzione e i loro effetti sulle relative proprietà delle celle.

Le **ontologie** sono strutture di dati che consentono di descrivere le entità e le loro relazioni in un determinato dominio di conoscenza e quindi sono utili per fornire una terminologia specifica, rigorosa e condivisa.

E' possibile distinguere tra:

- **L'ontologia generale o top-level**, che indica un insieme di concetti universali applicabili a tutti i domini.
- **L'ontologia dedicata o di dominio**, applicabile solo ad un determinato dominio.

3.2 Identificazione univoca della batteria

Per l'identificazione univoca della batteria, sono stati presi in considerazione i seguenti metodi:

1. Applicazione di un'etichetta con un codice seriale, leggibile attraverso un bar code o un QR code (metodo applicato nel presente lavoro).
2. Inserimento di un microchip all'interno del pacco batteria, che si interfaccia con l'esterno, inviando le informazioni relative alla batteria (metodo integrabile).
3. Integrazione di un sistema OBD-II, per l'identificazione attraverso i parametri e gli stati della batteria nel tempo (metodo attualmente oggetto di ricerca).

Per quanto riguarda il metodo di etichettatura, una soluzione per la codifica univoca di una batteria è proposta dall'articolo [9] ed è descritta nella figura 3.1.

Essa consiste in un seriale composto da:

- 3 caratteri per l'OEM
- 3 caratteri per Type Key Number (secondo il Kraftfahrt-Bundesamt, KBA, autorità federale tedesca per il traffico stradale, subordinata al Ministero federale per gli affari digitali e i trasporti, BMDV).
- Un carattere tra E (Elettrico), H (Ibrido), P (Ibrido Plug-in).
- 3 caratteri per la potenza in KW.
- 4 caratteri per l'anno di costruzione.
- Un id finale di 5 caratteri.

Questo seriale, inciso nell'etichetta e che identifica univocamente ciascuna batteria, viene registrato nel sistema, insieme a tutte le altre informazioni riguardanti la stessa batteria.

Come si evince dal secondo punto dell'elenco, il metodo proposto dall'articolo [9]

può essere applicato solo a livello nazionale (in Germania), ma non a livello europeo.

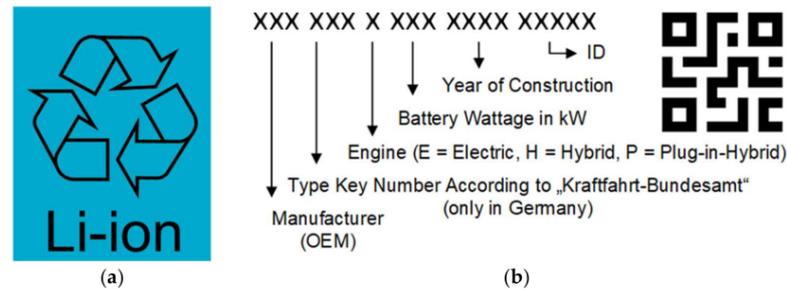


Figure 3.1: Etichettatura di una batteria al litio (a) e proposta di codifica con un identificativo univoco, in combinazione con un codice QR (b).

La **GBA** (Global Battery Alliance)⁸ e **GS1**⁹ in Europa hanno concordato un protocollo d'intesa, per fornire un passaporto digitale della batteria e stabilirne gli standard di identificazione.

Attualmente, le organizzazioni stanno lavorando allo sviluppo di un documento per soddisfare i requisiti del nuovo regolamento UE sulle batterie sostenibili, che sarà presto adottato definitivamente¹⁰. Per questo motivo, si è scelto di adottare la loro soluzione nel presente lavoro.

In base alla tipologia di GTIN¹¹, ad ogni prodotto viene assegnato un codice. Per esempio il GTIN-13, che si utilizza per i prodotti a peso fisso, è composto da un prefisso aziendale GS1, dal codice del prodotto e da una cifra di controllo, come descritto nella figura 3.2.

⁸Partnership, incubata dal World Economic Forum nel 2017 fino alla sua indipendenza nel 2021, che riunisce le principali organizzazioni internazionali, le quali collaborano per raggiungere gli obiettivi condivisi di circolarità, protezione ambientale e sviluppo sostenibile. <https://www.globalbattery.org/>

⁹Organizzazione che sviluppa standard globali per la comunicazione tra imprese. Il più noto fra questi standard è il codice a barre, un simbolo grafico stampato sui prodotti che può essere scannerizzato elettronicamente. Sito italiano: <https://gs1it.org/>

¹⁰Sito web: <https://gs1.eu/activities/batteries/>

¹¹Global Trade Item Number. chiave GS1 usata per identificare i prodotti (unità consumatore) e i colli (unità imballo) in tutto il mondo, per venderli nella grande distribuzione e online (Amazon, eBay, Alibaba, Google Shopping).



Figure 3.2: Codice GTIN-13.

Riguardo all'identificazione delle batterie mediante l'applicazione di un microchip, un esempio che attualmente esiste sul mercato è il chip **DS2434**¹², realizzato dalla Dallas Semiconductor¹³.

Le caratteristiche di questo chip sono:

- Fornitura di un ID univoco al pacco batteria.
- Monitoraggio della temperatura della batteria (senza la necessità di un termistore nel pacco batterie).
- Memoria utente non volatile a 256 bit, disponibile per archiviare i dati dell'utente e per le informazioni relative alla durata della batteria e le caratteristiche di carica/scarica.
- Intervallo operativo da -40°C a $+85^{\circ}\text{C}$.

Le informazioni vengono inviate a/da DS2434 tramite un'interfaccia 1-Wire¹⁴, in modo che i pacchi batteria debbano avere solo tre connettori di uscita: alimentazione, messa a terra e interfaccia 1-Wire.

¹²<https://docs.rs-online.com/e82f/0900766b800accfc.pdf>

¹³<https://www.celte.com/dallas-semiconductor-it>

¹⁴Sistema bus di comunicazione progettato da Dallas Semiconductor che fornisce dati, segnali e alimentazione a bassa velocità (16,3 kbit/s) su un singolo conduttore.

3.3 Acquisizione e memorizzazione dei dati

L'acquisizione da parte del sistema dei dati riguardanti la batteria può essere di due tipi:

- **Manuale**, attraverso un'interfaccia web.
- **Automatica**, attraverso sensori e controllori PLC, usando protocolli di comunicazione locale come PROFINET, Modbus, ecc...

Nella tabella di figura 3.3 sono classificate alcune fonti di dati relativi alla produzione delle LIBs e le informazioni rilevanti per la loro acquisizione [11].

Data Sources	Data Description	Data Access Point	Data Acquisition Interface	Data Format
Process Step/ Production Machine	Process Parameters State Variables	PLC	Communication Protocol (PROFINET, OPC UA, Modbus, PROFIBUS, etc.)	Time Series
Energy Carrier Metering	Energy Demand	Sensor	Analogue/ Digital Outputs	Time Series
		Measuring Device	Communication Protocol	
TBS/ Room Sensors	Ambient Conditions	PLC	Communication Protocol	Time Series
		Sensor	Analogue/ Digital Outputs	
Intermediate Product Analytics	Intermediate Product Features (IPF)	Sensor	Analogue/ Digital Outputs	Times Series, Distribution, Spatial, Discrete Data
		Analytical Device	Communication Protocol or Data File System (File)	
Final Product Analytics	Final Product Properties (FPP)	Analytical Device	Database (Query)	Time Series & Discrete Data
			Data File System	
Operational Data	Production Times Material Amount ...	Production Plan	Communication Protocol or Database (Query)	Discrete Data
			Spreadsheets or Data File System (File)	

Figure 3.3: Fonti dei dati nella produzione di LIBs e informazioni rilevanti per la loro acquisizione.

Nella figura 3.4 [12] è rappresentato lo schema di acquisizione dei dati secondo il concetto della Battery LabFactory Braunschweig¹⁵.

Le informazioni relative al prodotto finale e quelle relative alle operazioni effettuate durante la produzione vengono inserite manualmente, tramite interfaccia web. Invece, i dati rilevati e calcolati dai sensori, relativi allo stato della batteria, alla sua richiesta di energia e alle condizioni ambientali, sono acquisiti automaticamente mediante gli specifici protocolli di comunicazione. Successivamente, i dati acquisiti in entrambe le modalità, attraversano una fase di preprocessamento, all'interno di un datawarehouse, prima di essere memorizzati. Opportune tecniche di data mining possono infine essere applicate ai dati finali.

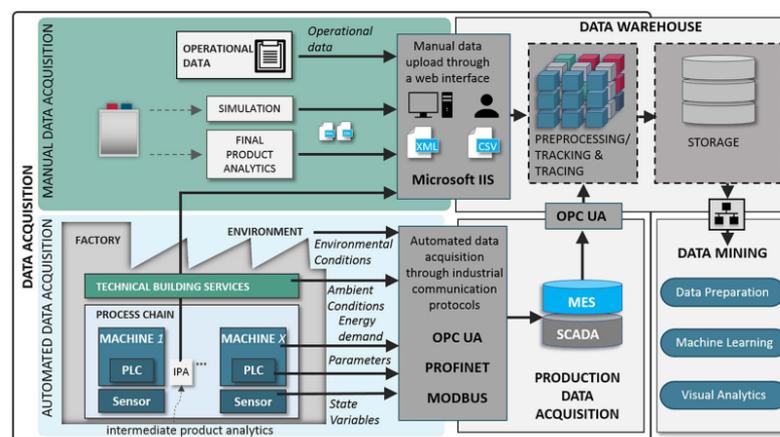


Figure 3.4: Concetto di acquisizione, gestione e analisi dei dati per il Battery LabFactory Braunschweig (BLB).

Nella parte sperimentale del presente lavoro, è stata sviluppata l'acquisizione manuale di alcuni dati. Questi ultimi, dopo la compilazione dei relativi campi in una interfaccia web, vengono strutturati e memorizzati nel database come metadati in formato *Json*.

¹⁵Centro di ricerca che sviluppa dispositivi di accumulo elettrochimico e mira alla produzione circolare sostenibile di celle per batterie. Lo spettro di ricerca copre l'intera catena del valore, dallo sviluppo dei materiali, alla produzione di elettrodi e celle fino al riciclaggio delle batterie. <https://www.tu-braunschweig.de>

3.4 BattINFO: l'ontologia del dominio delle batterie

Le informazioni acquisite (manualmente o automaticamente), devono essere formalizzate attraverso un modello logico-concettuale.

BattINFO¹⁶ è un'ontologia di dominio delle batterie e delle loro interfacce basata sull'ontologia Top-Level **European Materials and Modeling Ontology** (EMMO) e sviluppata per il progetto Battery Interface Genome – Materials Acceleration Platform (BIG-MAP)¹⁷ e BATTERY 2030+ [2].

Le definizioni incluse in BattINFO si basano su standard accettati e definiti dalla IUPAC (Unione Internazionale di Chimica Pura e Applicata). Gli oggetti BattINFO e le loro relazioni reciproche sono progettati seguendo tre obiettivi:

- Rigore e accuratezza scientifica.
- Osservazione dell'attuale gergo dominante della batteria.
- Flessibilità di descrizione della gamma di chimiche delle batterie.

Gli studi che adottano questo standard di ontologia in fase di sviluppo sono diversi. Ad esempio nel lavoro [10], citato al paragrafo 2.5, si utilizza l'ontologia BattINFO e l'ontologia BVCO¹⁸, entrambe basate sull'ontologia top-level EMMO, per lo sviluppo del processo di produzione dei singoli componenti delle LIBs.

Questa ontologia è stata utilizzata anche nel presente lavoro, come struttura dati base per l'implementazione del sistema.

¹⁶<https://github.com/BIG-MAP/BattINFO>

¹⁷<https://www.big-map.eu/>

¹⁸<https://gitlab.cc-asp.fraunhofer.de/ISC-Public/ISC-Digital/ontology/bvco>

3.5 Decentralizzazione dei dati

Se le ontologie sono utili per un'efficiente modifica ed acquisizione dei dati, la Blockchain è utile per la loro memorizzazione e il tracciamento delle loro modifiche. Le caratteristiche vincenti della Blockchain sono la trasparenza, la decentralizzazione e la resistenza alla manomissione, tutti requisiti ideali per la gestione delle ontologie [13].

La **Blockchain** è un libro mastro digitale distribuito e immutabile di transazioni (distribuito perchè le transazioni sono archiviate in più punti di una rete di computer, immutabile perchè la transazione non può essere modificata). Ogni transazione è archiviata in un "blocco" e le informazioni contenute in ogni blocco sono collegate alle informazioni del blocco precedente, formando così una catena di blocchi.

Esistono diversi tipi di Blockchain:

- Le **Blockchain pubbliche** sono reti di computer aperte e decentralizzate, accessibili a chiunque desideri richiedere o convalidare una transazione. Coloro che convalidano le transazioni (miners) ricevono delle ricompense. Le blockchain pubbliche utilizzano meccanismi di consenso, come per esempio il "proof of work"¹⁹. Due esempi comuni di blockchain pubbliche sono Bitcoin ed Ethereum.
- Le **Blockchain private o permissioned** hanno delle restrizioni di accesso. Coloro che desiderano partecipare richiedono l'autorizzazione dell'amministratore di sistema. Un esempio di blockchain privata è Hyperledger Fabric, di cui si parlerà nel Cap.4.
- Le **Blockchain ibride** contengono funzionalità delle Blockchain sia private che pubbliche. Un esempio può essere quello in cui chiunque può partecipare

¹⁹ Algoritmo di consenso utilizzato per confermare le transazioni e produrre nuovi blocchi della catena.

alla rete, ma solo alcuni nodi specifici possono validare le transazioni.

La Blockchain non è progettata per memorizzare quantità elevate di dati, poiché ogni client della rete deve scaricare tutti i dati memorizzati.

Per poter memorizzare una quantità più ampia di dati, in maniera decentralizzata, si può ricorrere all'utilizzo della rete IPFS, come è stato fatto nel presente lavoro, relativamente ai dati delle batterie.

L'**Interplanetary File System (IPFS)** è un protocollo di comunicazione e anche una rete p2p per l'archiviazione e la condivisione di dati in un file system distribuito. L'IPFS utilizza uno spazio di archiviazione associativo per identificare univocamente ogni file.

In generale, per accedere ai file memorizzati in uno storage IPFS, vengono usati gli identificatori di contenuto, chiamati *CID (Content Identifier)*. Un CID è l'*hash*²⁰ del contenuto di un file. Invece, l'indirizzo IPFS, o URI, che indica dove si trova il contenuto del file, è della forma seguente: `https://ipfs.io/ipfs/<CID>`.

Un CID IPFS è espresso da una stringa di 44 caratteri alfanumerici in base58, con il prefisso "Qm". Con 58 caratteri disponibili e una stringa di lunghezza 44 caratteri, si ottiene un totale di $58^{44} = 3,89 * 10^{77}$ identificativi diversi.

Lo **Smart Contract**, o contratto intelligente, è un accordo digitale autoeseguibile che consente a due o più parti di scambiare denaro, proprietà, azioni o qualsiasi cosa di valore in modo trasparente e senza conflitti, evitando la necessità di una terza parte. Un contratto intelligente definisce le regole e le sanzioni relative a un accordo allo stesso modo di un contratto tradizionale e applica automaticamente tali obblighi. Esso viene verificato, eseguito e applicato da un programma che gira su una rete blockchain. Quando entrambe le parti coinvolte accettano i suoi termini, il

²⁰Funzione non invertibile che mappa una stringa di lunghezza arbitraria in una stringa di lunghezza predefinita (detta digest). Essendo una funzione non invertibile, dalla stringa ottenuta non si può risalire al messaggio originale.

programma verrà eseguito automaticamente.

3.6 Metodo di accesso ai dati

L'accesso ai dati deve essere veloce. Ciò è possibile attraverso la scansione di un QR code. Per evitare la manomissione di tale QR code, lo si potrebbe incidere in rilievo su una parete metallica della batteria, invece di applicare un'etichetta adesiva.

Nel presente lavoro è stato sviluppato un metodo di accesso ai dati della batteria, riservato a coloro che si sono registrati nella blockchain e che si sono autenticati tramite l'applicazione. L'accesso ai dati viene effettuato tramite la scansione o l'upload dell'immagine del QR code che identifica la batteria.

Capitolo 4

Implementazione del sistema

4.1 Architettura del sistema

La parte sperimentale di questa tesi ha riguardato la progettazione e la realizzazione di un sistema modulare, quindi estendibile per future esigenze, finalizzato al tracciamento di una batteria per veicoli elettrici, lungo la catena di produzione.

Il sistema ha come funzione principale quella di contenere le informazioni di una LIB (le caratteristiche di produzione, le specifiche di funzionamento, gli indicatori di performance di sostenibilità, le materie prime utilizzate, lo storico delle fasi di produzione, ecc...). L'ulteriore importante funzionalità è quella della registrazione del passaggio di proprietà della batteria all'interno della blockchain.

L'esempio pratico descritto in questo capitolo riguarda i due attori seguenti: il *produttore* di un EV ed un *cliente* che acquista il veicolo con batteria a litio.

Il sistema sviluppato si articola in

- Una rete blockchain **Hyperledger Fabric** per il tracciamento degli stati dell'asset *batteria*.
- Una rete **IPFS** per la memorizzazione delle informazioni del passaporto della batteria.
- Un **Client** con piattaforma web.

La piattaforma web è realizzata in **Python Flask** per quanto riguarda il backend e in **HTML/CSS** per quanto riguarda il frontend.

Il processo ETL consiste nell'estrazione delle ontologie dal repository di BattINFO mediante dei parser in python, utilizzando le relative API. Il dati acquisiti (valori), serializzati in formato JSON, sono legati alle classi ontologiche (chiavi).

La struttura del repository è mostrata nella figura 4.1, la quale descrive la root directory, e nella figura 4.2, la quale descrive un livello più profondo della directory. La cartella **json** contiene i parser per la manipolazione delle ontologie e i file JSON generati dal parser. La cartella **fabric** contiene le configurazioni generali relative alla rete Hyperledger Fabric. La cartella **organization** contiene le sottocartelle delle organizzazioni manufacturer e customer. Queste ultime dispongono entrambe del rispettivo client (all'interno della cartella **webapp**) e dei dati relativi allo smart contract (all'interno della cartella **contract**).

L'argomento riguardante le organizzazioni verrà approfondito nel paragrafo 4.2.

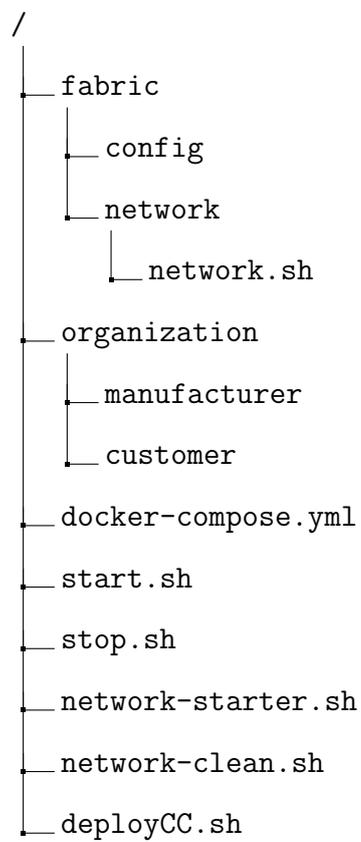


Figure 4.1: Contenuto della root directory

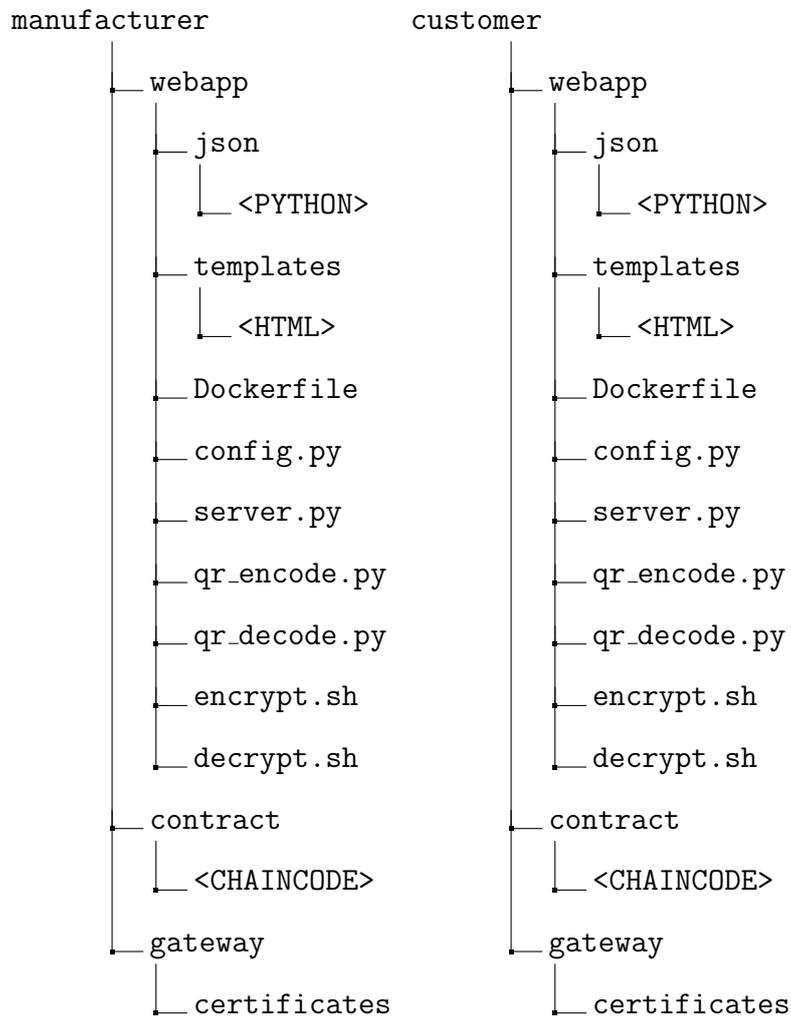


Figure 4.2: Contenuti delle cartelle manufacturer e customer

L'intero sistema è organizzato in **Docker** containers. Questa scelta dipende dal fatto che i vantaggi offerti dall'utilizzo di Docker sono molteplici. Infatti, Docker assicura che le applicazioni e le risorse siano isolate. I container sono configurati una sola volta, per essere eseguiti in qualsiasi sistema (ottima portabilità), sono snelli, perchè non richiedono risorse elevate, e sono veloci da avviare.

Gli script che avviano e arrestano i Docker containers sono, rispettivamente, *start.sh* e *stop.sh*. Il file *docker-compose.yml* contiene la configurazione dei servizi.

E' possibile visualizzare le informazioni relative ai Docker containers tramite il comando "\$ docker ps -a":

```
"CONTAINER" "ID" "IMAGE" "STATUS" "PORTS" "NAMES"
5599961f1bc6 productor_app Up
0.0.0.0: 8000 -> 8000/tcp, ::: 8000 -> 8000/tcp
"manufacturer_webapp"
d96d7a59fbad customer_app Up
0.0.0.0: 8001 -> 8001/tcp, ::: 8001 -> 8001/tcp
"customer_webapp"
```

```
"CONTAINER" "ID" "IMAGE" "STATUS" "PORTS" "NAMES"
6056f9ca163c ipfs Up
0.0.0.0: 4001 -> 4001 /tcp, ::: 4001 -> 4001 /tcp,
0.0.0.0: 5001 -> 5001 /tcp, ::: 5001 -> 5001 /tcp,
4001/udp, 0.0.0.0: 8080 -> 8080 /tcp,
::: 8080 -> 8080/tcp, 8081/tcp
"ipfs"
```

I servizi avviati sono:

- La webapp del produttore di batterie, in ascolto sulla porta 8000.
- La webapp del cliente, in ascolto sulla porta 8001.
- Le API IPFS, raggiungibili alla porta 5001 e il gateway della rete IPFS, raggiungibile alla porta 8080.

L'architettura generale del sistema è raffigurato in figura 4.3 e verrà descritto dettagliatamente nei paragrafi successivi.

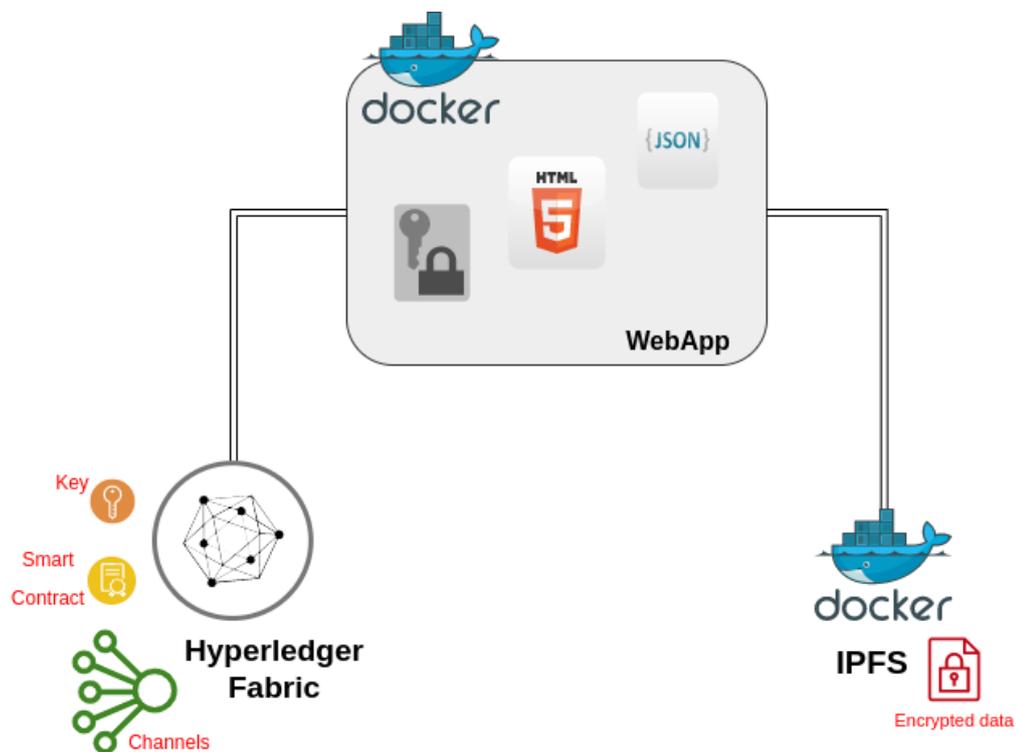


Figure 4.3: Architettura generale del sistema.

4.2 Hyperledger Fabric

Hyperledger Fabric è una piattaforma blockchain open source e permissioned, quindi i partecipanti si conoscono tra loro, a differenza di una rete pubblica (permissionless). Essa ha un'architettura altamente modulare e configurabile, che consente innovazione, versatilità e ottimizzazione per un'ampia gamma di casi d'uso del settore, tra cui anche le supply chain.

Hyperledger Fabric utilizza, di default, l'algoritmo di consensus *Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT)*²¹, che non necessita di un alto consumo di energia, in quanto i nodi della rete non devono effettuare calcoli complessi, come invece avviene in altre blockchain permissionless come Bitcoin.

La rete Hyperledger Fabric è composta da *organizzazioni*, che nella realtà rappresentano entità fisiche (una società o un individuo).

Le organizzazioni sono composte da diversi nodi o *peers* e comunicano tra loro attraverso dei canali (*channels*).

Poiché Fabric è una rete autorizzata, i partecipanti alla blockchain devono dimostrare la propria identità al resto della rete per effettuare le transazioni.

A tal fine le *autorità di certificazione (CA)* generano una chiave pubblica e una privata che possono essere utilizzate per provare l'identità. Ogni peer registrato alla rete utilizza la sua chiave privata come firma digitale, la cui validità viene poi verificata dal *Membership Service Provider (MSP)* attraverso la chiave pubblica.

Inoltre, Hyperledger Fabric è dotato di un nodo chiamato *orderer* che gestisce l'ordine del flusso delle transazioni, assicurandosi che vengano rispettati i diritti amministrativi per effettuare le modifiche nel canale.

Prima che le organizzazioni possano effettuare delle transazioni tra loro, devono

²¹<https://it.bitcoinwiki.org/wiki/PBFT>

definire l'insieme dei contratti che stabiliscono le regole e i termini.

Gli smart contract governano le logiche di transazione che controllano il ciclo di vita di una risorsa (asset). L'insieme degli smart contract viene confezionato all'interno di un *chaincode*. Quest'ultimo viene distribuito nella rete della blockchain, in modo che ogni smart contract possa essere invocato ed eseguito dai componenti della rete. A ogni chaincode è associata una politica di approvazione (*endorsement policy*), stabilita dagli amministratori delle organizzazioni, che indica quali delle organizzazioni devono firmare le transazioni generate, affinché queste possano essere considerate valide. Tutte le transazioni vengono registrate nel libro mastro della blockchain, ma solo quelle validate possono aggiornare lo stato di un asset. Una transazione può essere considerata valida se la maggioranza delle organizzazioni previste dalla *endorsement policy* effettua la firma di convalida.

Nel presente lavoro è stata costruita una rete blockchain composta da due organizzazioni, **Manufacturer** e **Customer**, ed un **Orderer** come illustrato nella figura 4.4. Inoltre, la struttura di ogni blocco della catena è mostrata in figura 4.5.

Le due organizzazioni simulano rispettivamente un produttore di batterie e un cliente che acquista una batteria dal produttore. Esse sono collegate tra loro nella rete mediante un canale chiamato *mychannel*, attraverso il quale possono comunicare. In base alla politica di *endorsement*, entrambe le organizzazioni devono approvare una transazione per poterla rendere valida.

Lo script *network-starter.sh* avvia la rete blockchain, creando i docker containers dei peers e dei rispettivi certificati. Al contrario, lo script *network-clean.sh* disconnette la rete ed elimina i relativi containers.

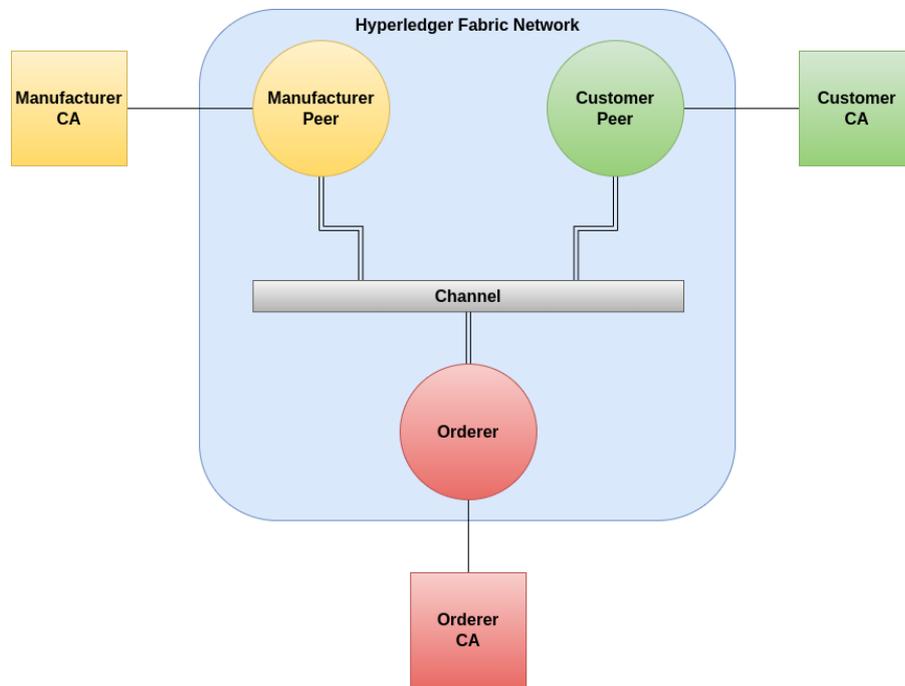


Figure 4.4: Schema della rete Hyperledger Fabric.

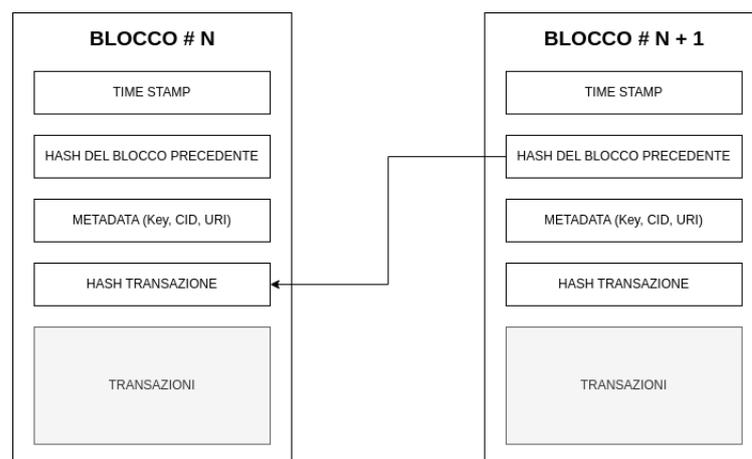


Figure 4.5: Struttura dei blocchi della catena.

Nel presente lavoro il *chaincode* è stato sviluppato in linguaggio javascript (Appendice.6) ed è stato progettato come descritto dal design pattern di figura 4.6.

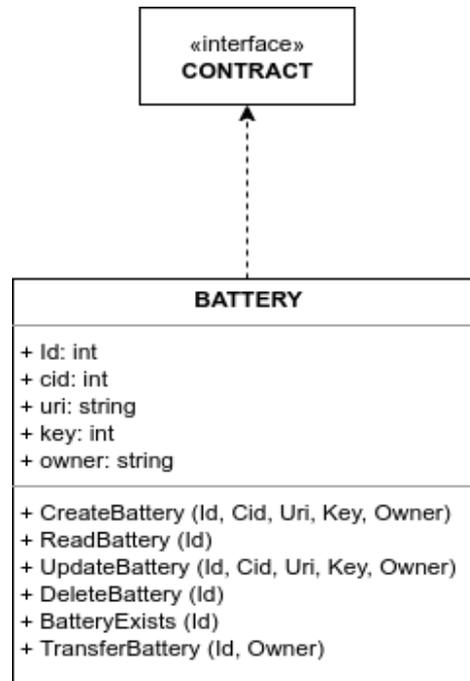


Figure 4.6: Diagramma delle classi che mostra il design pattern dello smart contract.

Gli attributi della batteria saranno approfonditi nel paragrafo 4.4.

Le funzioni previste nel contratto sono:

- *CreateBattery* per la creazione di un nuovo asset batteria
- *ReadBattery* per l'accesso ad uno specifico asset
- *UpdateBattery* per l'aggiornamento dello stato di un asset
- *DeleteBattery* per la cancellazione dell'asset dallo stato attuale (lo storico dell'asset rimane registrato nella blockchain)
- *BatteryExists* per la verifica dell'esistenza di uno specifico asset
- *TransferBattery* per il trasferimento della proprietà dell'asset

In questa simulazione, le due organizzazioni che hanno concordato in anticipo le regole da rispettare durante le transazioni, approvano il chaincode creato e decidono di distribuirlo nella rete, dopo avere eseguito dei passaggi, che di norma caratterizzano il consueto ciclo di vita.

Il chaincode sviluppato, chiamato *mychain* è stato impacchettato in unfile `.tar.gz` (normalmente questa procedura può essere effettuata da una delle organizzazioni della rete).

Successivamente il pacchetto `.tar.gz` del chaincode è stato installato nei peer di entrambe le organizzazioni, poichè entrambe partecipano alla politica di approvazione.

Dopo l'installazione del pacchetto, questo è stato approvato dalle organizzazioni.

Infine, il chaincode è stato inserito nel canale da parte di una delle organizzazioni.

Il risultato delle approvazioni del chaincode è il seguente:

```
{
  "Approvals": {
    "Org1MSP": true ,
    "Org2MSP": true
  }
}
```

Una volta che è stato inserito nel canale della rete, il chaincode è disponibile alle organizzazioni collegate.

4.3 Struttura dei dati del passaporto digitale

La struttura dell'ontologia BattINFO dedotta da quella top level EMMO è illustrata nella figura 4.7.

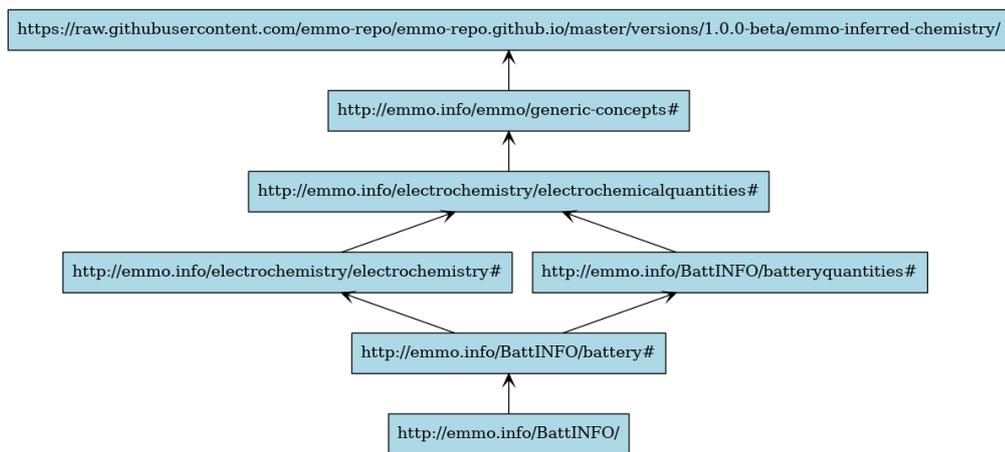


Figure 4.7: Ontologia di BattINFO dedotta dall'ontologia top-level EMMO.

Nella figura 4.8 è possibile vedere la gerarchia semantica delle classi.

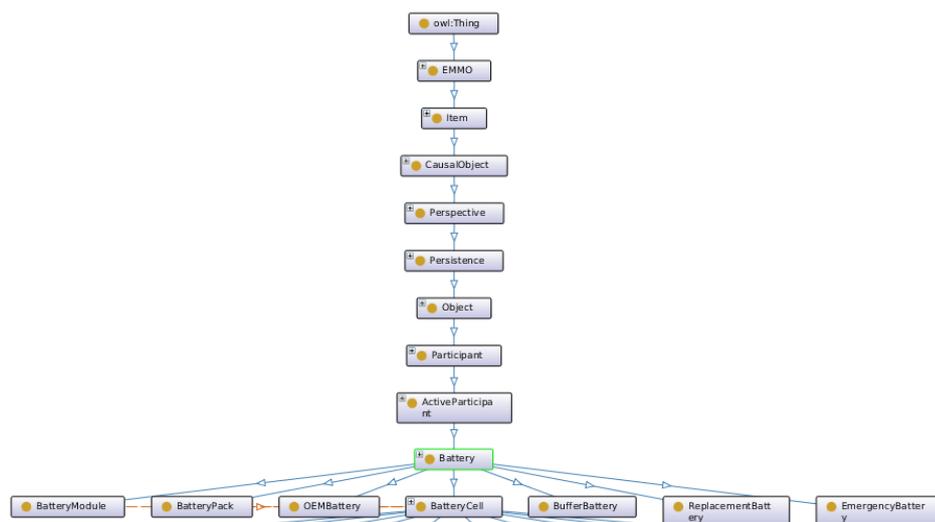


Figure 4.8: Gerarchia delle classi ontologiche di BattINFO.

In questo lavoro, le ontologie sono state prelevate dal repository ufficiale di BattINFO e sono state serializzate in formato JSON con uno script in python (il parser *serialize_ontology.py* Appendice.5).

In base alle categorie della batteria, descritte nei capitoli precedenti, per la costruzione del DBP sono stati creati i seguenti file JSON, che possono essere consultati in appendice:

- *battery_general.json* con le caratteristiche generali della batteria
- *battery_quantities.json* con i parametri e gli stati della batteria
- *battery_chemical.json* con le caratteristiche chimiche della batteria
- *battery_sustainability.json* con le caratteristiche di sostenibilità (questo file non deriva dalle ontologie di BattINFO)

Queste strutture JSON sono utilizzate per il form di inserimento dei dati di una nuova batteria.

4.4 Acquisizione dei dati e workflows

La piattaforma web, realizzata in questo lavoro, permette alle organizzazioni di inserire e visualizzare i dati del passaporto della batteria.

In figura 4.9 è mostrata la pagina di accesso alla piattaforma.

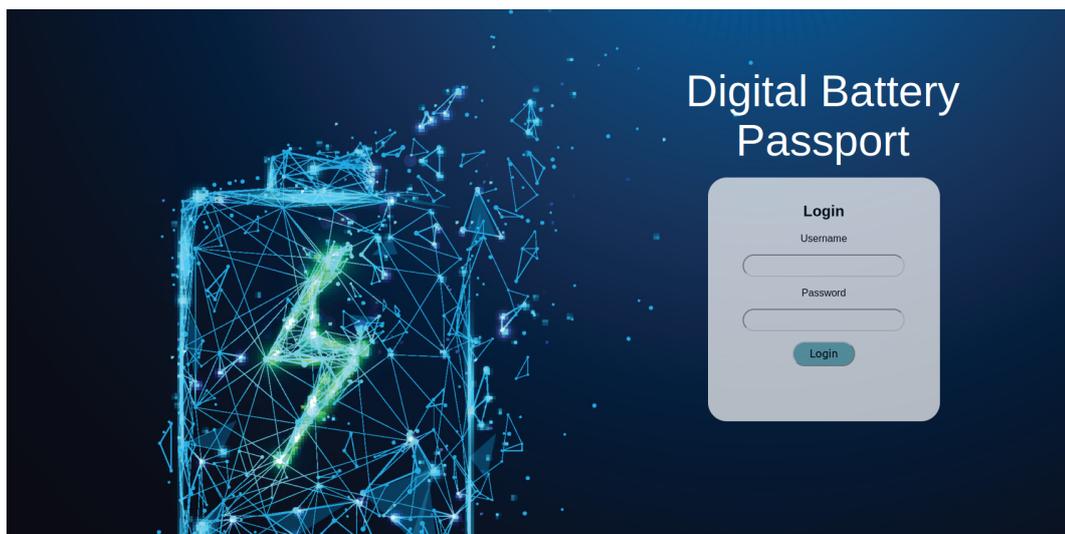


Figure 4.9: Schermata di login della web application.

Per lo storage dei dati è stata utilizzata una rete IPFS, perchè, come già detto nel capitolo precedente, questa è un'ottima soluzione per la memorizzazione decentralizzata e offchain di dati di grandi dimensioni.

Questa rete utilizza un gateway privato e i dati sono raggiungibili all'indirizzo locale nel seguente modo:

```
https://localhost:8080/ipfs/<CID>
```

Dove il "CID" rappresenta l'hash del contenuto del file.

Attraverso l'indirizzo:

```
https://localhost:5001/webui
```

si apre una dashboard, in cui si trovano tutte le informazioni relative alla configurazione della rete IPFS (Fig.4.10).

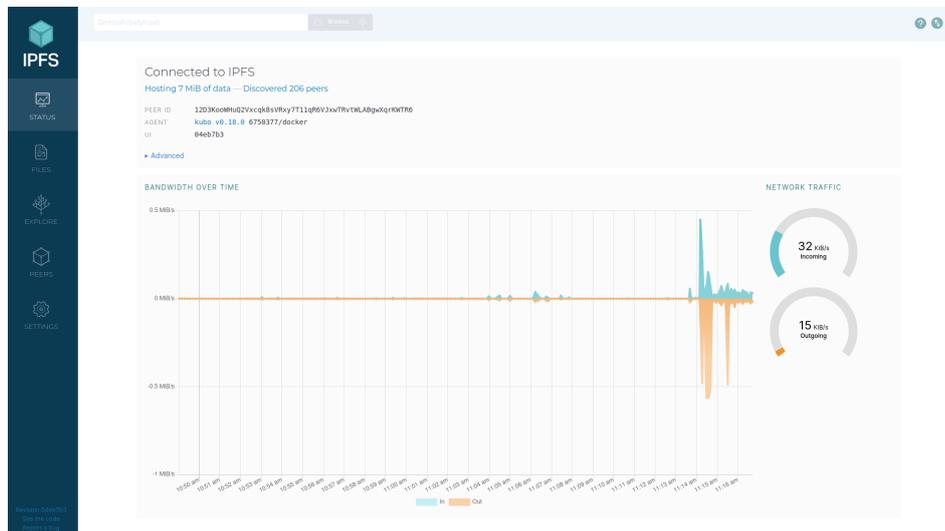


Figure 4.10: IPFS dashboard.

Un problema rilevante è che i dati aggiunti allo storage IPFS non sono cifrati di default. Per questo motivo, in questo lavoro, è stato seguito il metodo proposto dall'articolo [14] ed è stata implementata una crittografia aggiuntiva per rendere i dati sicuri. L'algoritmo di cifratura utilizzato è l'**AES-256-CBC**.

AES-256 (Advanced Encryption Standard) è un algoritmo di cifratura a chiave simmetrica che utilizza una chiave a 256 bit. Inoltre la modalità operativa *CBC* (Cipher Block Chaining) utilizza un vettore di inizializzazione (nonce) per rendere la crittografia casuale e quindi più sicura. Lo script che si occupa di tale cifratura è *encrypt.sh* (Appendice.9), mentre lo script per la decifratura è *decrypt.sh* (Appendice.10).

Lo schema illustrato in figura 4.11 mostra in che modo vengono inseriti i dati del DBP in maniera sicura.

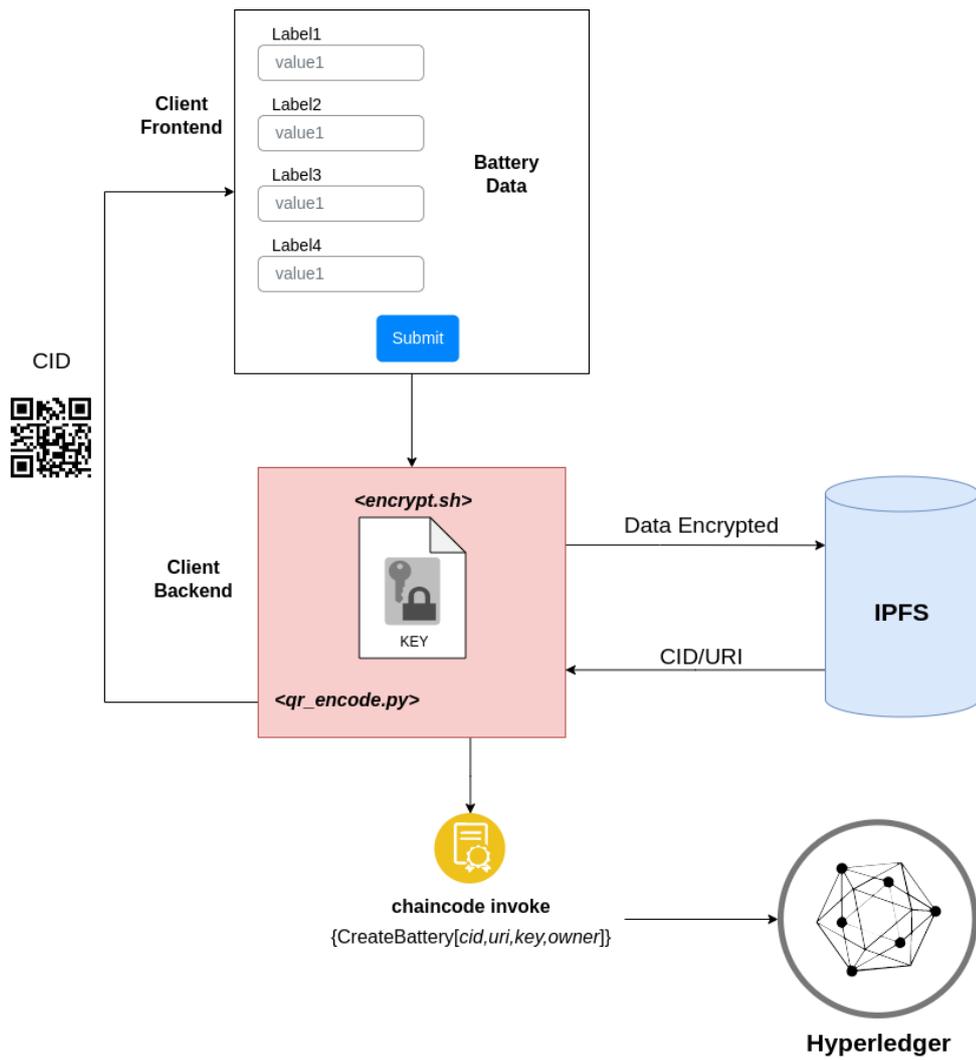


Figure 4.11: Workflow di inserimento dati del DBP.

Il workflow per l'inserimento dei dati da interfaccia web è il seguente:

- L'utente inserisce nei campi dell'apposito form i dati suddivisi per categoria e rispettanti la struttura dei file JSON, che sono stati creati attraverso le ontologie.

Completato l'inserimento, viene effettuato il submit del form.

- Il backend riceve in i dati e li inserisce in un file json. Successivamente, mediante lo script *encrypt.sh*, genera una chiave privata e un nonce, cifrando il contenuto del file json. Infine, inserisce il file cifrato nella rete IPFS e distrugge il file json originariamente creato.
- La rete IPFS genera un CID (l'hash del contenuto del file), restituendolo al sistema:

```
{ "Name": "file.json.enc" ,  
  "Hash": "QmNaxMiqV2S4GbfEj..." ,  
  "Size": "xxx" }
```

- Il backend registra la coppia $\langle \text{chiave}, \text{nonce} \rangle$, il CID e l'URI nella rete blockchain, invocando la funzione del chaincode *CreateBattery* (Appendice.11). Inoltre, il backend genera un QR code con lo script *qr_encode.py*, codificando il CID (Appendice.7).

Infine il backend restituisce all'utente il CID e l'immagine del QR code generato.

La figura 4.12 mostra l'interfaccia di inserimento manuale dei dati della batteria.

Digital Battery Passport

Home Logout

New Battery

General Info	Diagnostic and Maintenance Info	Chemical Info	Sustainability Info
ID Serial <input type="text" value="0598261140399"/> Battery Model <input type="text" value="e-tron GT"/> Manufacturing Date <input type="text" value="16-03-2023"/> EV Manufacturer <input type="text" value="Audi"/> Battery producer <input type="text" value="Audi"/> Country of battery prod <input type="text" value="Belgium"/> Cell Producer <input type="text" value="LG"/> Country Cell Producer <input type="text" value="Poland"/> Cell Type <input type="text" value="PouchCell"/> Chemistry <input type="text" value="NCM 712"/> Weight <input type="text" value="897 g"/> Voltage <input type="text" value="3,651515 V"/> Temperature <input type="text" value="-30°C to +40°C"/>	BatteryEnergy <input type="text" value="235 kWh"/> BatteryQuantity <input type="text" value=""/> ServiceLife <input type="text" value=""/> DRate <input type="text" value="0,263 kWh/kg"/> StorageLife <input type="text" value=""/> ServiceMass <input type="text" value=""/> RatedCapacity <input type="text" value="64,6 Ah"/> ConventionalBatteryProperty <input type="text" value=""/> CycleNumber <input type="text" value=""/> NominalBatteryProperty <input type="text" value=""/> CRate <input type="text" value=""/> ElectrolyteContainment <input type="text" value=""/>	CycleLife <input type="text" value="1,200 cycles"/> SpecificCapacity <input type="text" value=""/> OpenCircuitVoltage <input type="text" value=""/> InstantaneousCurrent <input type="text" value=""/> ExchangeCurrent <input type="text" value=""/> ResidualCurrent <input type="text" value=""/> AlternatingCurrent <input type="text" value=""/> DischargeCurrent <input type="text" value=""/> InternalResistance <input type="text" value=""/> PeakCurrent <input type="text" value=""/> DirectCurrent <input type="text" value=""/> CellVoltage <input type="text" value=""/> CurrentEfficiency <input type="text" value=""/>	<div style="text-align: right; margin-bottom: 5px;">Add Raw Material</div> Co2 Impact <input type="text" value="id"/> Carbon Footprint value <input type="text" value="id"/> Recycling Value <input type="text" value="id"/> Water wasting Impact <input type="text" value="id"/> Renewable energy value <input type="text" value="id"/> Social Impact <input type="text" value="id"/> Traced Material <input type="text" value="Lithium"/> Physical Amount per Battery <input type="text" value="17%"/> Provenance <input type="text" value="Chie"/> Traced Material <input type="text" value="Cobalt"/> Physical Amount per Battery <input type="text" value="24%"/> Provenance <input type="text" value="DRC"/>
<input type="button" value="Submit"/>			

Figure 4.12: Mock-up dell'interfaccia di inserimento dati del DBP.



Figure 4.13: Mock-up del post inserimento dati.

Poichè i dati sensibili sono stati inseriti cifrati nella rete IPFS, per accedervi è necessario avere la chiave di decifratura. Per ottenere la chiave, che è registrata nel libro mastro della blockchain, l'utente deve essere verificato tramite CA.

Con questo metodo, chi possiede il CID del passaporto della batteria, può accedere al file cifrato. Ma solo chi è autorizzato può leggerne il contenuto in chiaro.

Lo schema che descrive l'accesso ai dati è illustrato in figura 4.14.

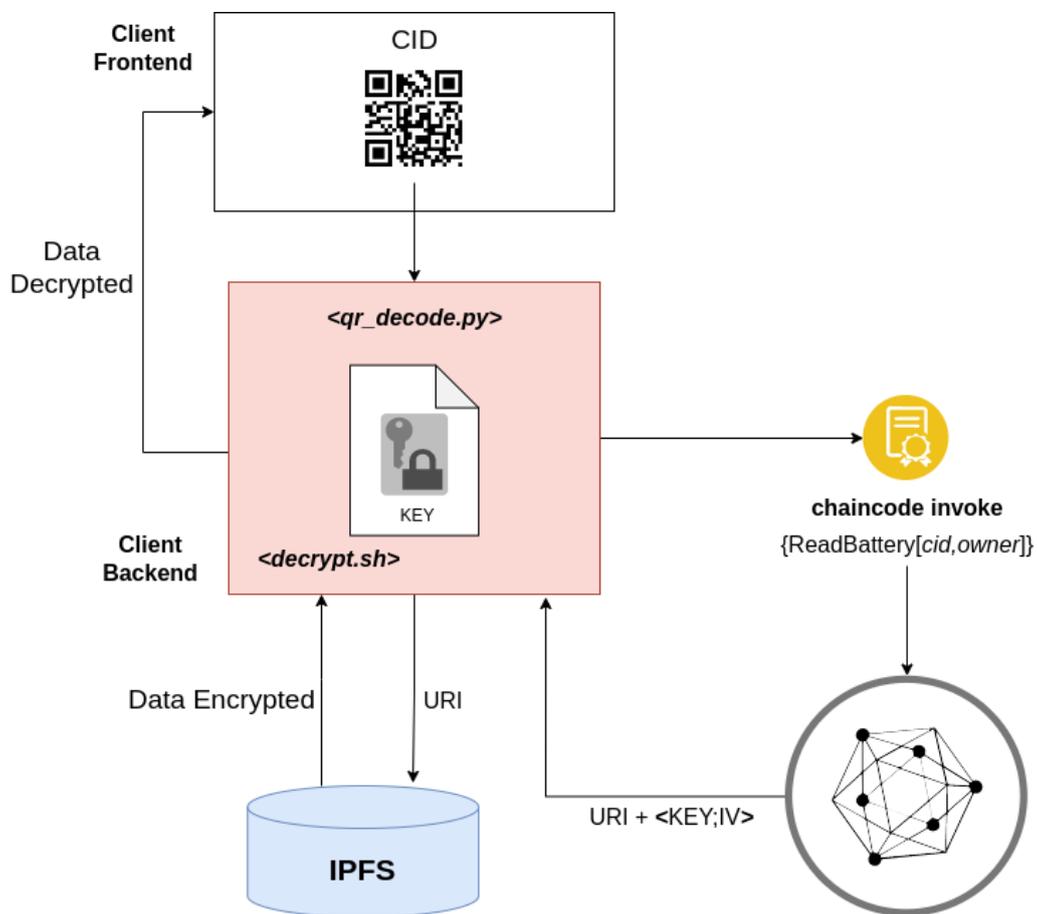


Figure 4.14: Workflow di accesso ai dati del DBP.

Il workflow per l'accesso ai dati da interfaccia web è il seguente:

- L'utente scansiona il codice QR della batteria tramite l'applicazione.
- Il backend acquisisce e decodifica il QR code tramite lo script *qr_decode.py* (Appendice.8), ed estrae il CID del file cifrato contenente i dati della batteria. Successivamente, il backend invoca la funzione *ReadBattery* dello smart contract.
- Se il CID esiste, la funzione del chaincode restituisce l'URI e la coppia $\langle \text{chiave}, \text{nonce} \rangle$ per poter decifrare il file.
- Il backend scarica il file dall'URI IPFS e, con lo script *decrypt.sh*, decifra i dati con la chiave ottenuta.

La figura 4.15 mostra l'interfaccia del DBP, con i dati relativi alla batteria. Sulla destra sono specificate la quantità e la provenienza delle materie prime utilizzate. Gli indicatori di performance di sostenibilità ESG (Environmental, Social and Governance), sono descritti nella tabella 4.1.

Il pulsante "Diagnostics" porta ad una sezione, relativa ai dati dinamici della batteria (come lo stato di carica e lo stato di salute), che potrà essere integrata in futuri sviluppi.

Attraverso il pulsante "Transfer", si può accedere ad una sezione dedicata al trasferimento di proprietà della batteria.

In questo specifico esempio, il trasferimento di proprietà riguarda la vendita di un'auto elettrica equipaggiata da una batteria a litio.

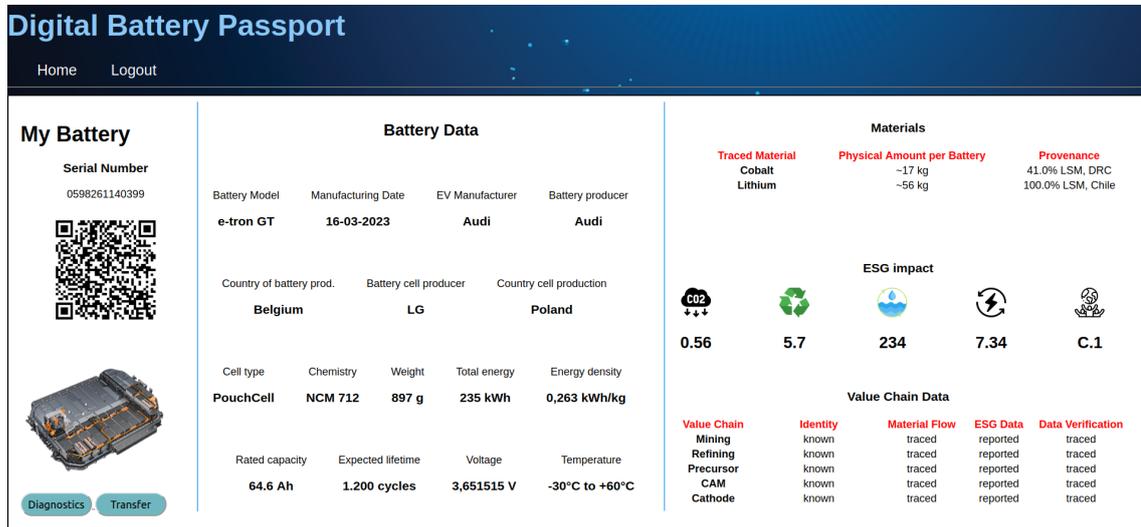


Figure 4.15: Mock-up dell'interfaccia di visualizzazione dati del DBP.

	Indicatore di emissione di CO2 (g/Km)
	Indicatore di riciclabilità
	Indicatore di consumo di acqua ($m^3/veicolo$)
	Indicatore di utilizzo di energia rinnovabile ($kWh/veicolo$)
	Indicatore di impatto sociale

Table 4.1: Tabella indicatori ESG.

Lo scenario della vendita di una batteria, dalla organizzazione *manufacturer* alla organizzazione *customer*, si può riassumere nel seguente workflow:

- Il produttore inserisce, dall'apposito form, i dati del nuovo proprietario.
- Al submit del form, il backend riceve i dati e invoca la funzione del chaincode *BatteryTransfer*.
- Se la verifica dei dati e del certificato va a buon fine, viene avviata la transazione con la proposta, firmata dall'organizzazione *manufacturer*.
- L'organizzazione *customer* firma il responso della transazione.
- La transazione viene conclusa, con l'aggiornamento dell'asset con il nuovo proprietario.

Nella figura 4.16 viene mostrato lo schema della transazione per la vendita della batteria, con il passaggio di proprietà da un'organizzazione all'altra.

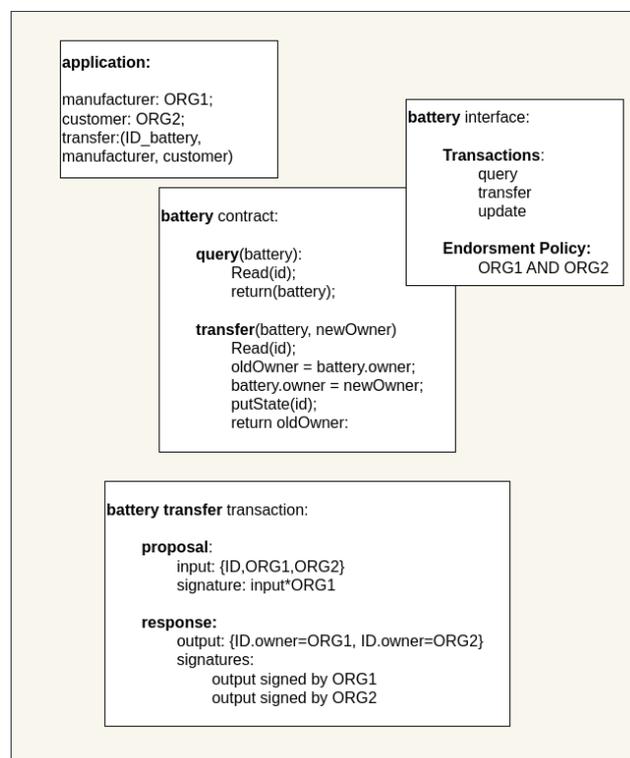


Figure 4.16: Transazione per la vendita della batteria.

Capitolo 5

Conclusioni

Il lavoro descritto in questa tesi ha riguardato la realizzazione di un modello di passaporto digitale per batterie a ioni di litio.

Questo genere di batterie è divenuto indispensabile, sia per i veicoli elettrici che per lo stoccaggio dell'energia rinnovabile intermittente, nell'ambito della transizione verde, che attualmente è al primo posto nella lista delle priorità della Comunità Europea.

A partire dal 2035, tutte le nuove auto in arrivo sul mercato non potranno emettere CO₂; in questo modo si potrà garantire che entro il 2050 il settore dei trasporti possa diventare a emissioni 0.

La recente notizia (14 Feb 2023)¹ annuncia che il Parlamento Europeo ha intenzione di estendere al settore dei trasporti gli obiettivi che contribuiscono a ridurre le emissioni di CO₂: camion, autobus urbani e autobus a lunga percorrenza sono responsabili di oltre il 6% delle emissioni totali di gas serra (GHG) dell'UE e di oltre il 25% delle emissioni di gas serra derivanti dal trasporto su strada.

¹https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_762.

Il contributo offerto da questa tesi si inserisce nello specifico ambito della supply chain delle batterie, le quali saranno la fonte di energia per eccellenza del prossimo futuro. Il sistema implementato è incentrato sul moderno paradigma della decentralizzazione e permette il tracciamento di una batteria, identificata mediante etichetta con un criterio standard e riconosciuto dall'intera Unione Europea. Il metodo di memorizzazione garantisce sicurezza ed integrità dei dati, grazie all'impiego di strumenti e tecnologie come la crittografia e la blockchain. L'accesso ai dati è rapido grazie alla possibilità di scansione di un QR code.

Pur essendo semplice e basilare, questo modello fornisce una suite completa di strumenti e tecnologie per l'integrazione di processi più complessi riguardanti la supply chain delle batterie.

I passi fondamentali del lavoro sono stati:

- Documentazione sulle attuali regole e sulle proposte del Parlamento Europeo.
- Studio delle peculiarità fisiche e chimiche delle LIBs e del loro impiego nell'ambito dei veicoli elettrici.
- Studio dei parametri e degli stati delle batterie.
- Ricerca di metodologie per l'identificazione delle LIBs.
- Sviluppo di un sistema decentralizzato basato sulle tecnologie Blockchain e IPFS, per la raccolta dei dati delle batterie in un DBP.

Al sistema suggerito in questo lavoro, è possibile integrare la raccolta dei dati dinamici riguardanti gli stati della batteria (SoC, SoH). Questi dati, elaborati in automatico da un sistema OBDII, possono confluire in una sezione del DBP dedicata allo storico e quindi essere di grande utilità per le fasi di smantellamento, di monitoraggio e di analisi future.

Appendice

Acronimi

AES	Advanced Encryption Standard
API	Application Programming Interface
BEPA	Batteries European Partnership Association
BMS	Battery Management System
BVCO	Battery Value Chain Ontology
CA	Certification Authority
CBC	Cipher Block Chaining
CID	Content Identifier
CSS	Cascading Style Sheets
DBP	Digital Battery Passport
DOD	Depth Of Discharge
EMMO	European Materials and Modeling Ontology
EOL	End Of Life
ESG	Environmental, Social, Governance
ETL	Extract, Transform, Load
EV	Electric Vehicle
GBA	Global Battery Alliance

GS1	Global Standard 1
GTIN	Global Trade Item Number
HTML	Hypertext Markup Language
IPFS	InterPlanetary File System
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
JSON	JavaScript Object Notation
LIB	Li-ion Battery
MSP	Membership Service Provider
OBD II	On-Board Diagnostic II
OEM	Original Equipment Manufacturer
PBTF	Practical Byzantine Fault Tolerance
PLC	Programmable Logic Controller
QR	Quick Response Code
SLI	Starting, Lighting, and Ignition
SoC	State of Charge
SoH	State of Health
SRIA	Strategic Research and Innovation Agenda
URI	Uniform Resource Identifier

Informazioni utili

Attualmente le auto elettriche più importanti sono equipaggiate con batterie a litio, generalmente a celle prismatiche, le cui caratteristiche in termini di capacità e tensione superano i valori adottati fino a poco tempo fa. Ad esempio, per aumentare la potenza delle nuove batterie, ne è stato raddoppiato il potenziale da 400V a 800V. La tabella illustrata in Appendice.1 fornisce un esempio con le caratteristiche tecniche di una batteria Audi E-tron GT quattro.

Per ricaricare una batteria per EV ci sono sostanzialmente due opzioni:

- Le colonnine di ricarica su strada fornite dai distributori.
- Le colonnine da posteggio, installate generalmente nei giardini delle abitazioni private o dei condomini e collegate all'impianto elettrico o all'impianto fotovoltaico.

I costi di ricarica generalmente variano tra i 40 centesimi per kWh da colonnine fino a 22 kW e i 50 centesimi per kWh da colonnine con potenze superiori ai 22 kW.

Nella tabella Appendice.2, vengono elencate le tariffe di ricarica proposte da Plenitude. Si può ottenere una ricarica più veloce utilizzando una corrente più alta, tenendo presente che in questo caso la batteria tende ad invecchiare più velocemente.

Un notevole problema è che una batteria per EV ha attualmente un costo molto elevato, che incide significativamente sul costo totale del veicolo elettrico. Tuttavia, se gestita bene, essa ha un'aspettativa di vita paragonabile a quella del veicolo stesso.

Battery

Nominal Capacity	93.4 kWh	Useable Capacity	85.0 kWh
Battery Type	Lithium-ion	Cathode Material	NCM622
Number of Cells	396	Pack Configuration	198s2p
Architecture	800 V	Nominal Voltage	725 V

Figure Appendice.1: Caratteristiche di una batteria Audi E-tron GT quattro.

Tipo di ricarica	Potenza in kW (fino a)	Prezzo (€/kWh)
Quick (AC)	22	0,60
Fast (DC)	99	0,85
Fast+ (DC)	149	0,90
Ultrafast (DC)	150+	0,95

Figure Appendice.2: Tariffe di ricarica per le colonnine Pay-per-use Plenitude+Be Charge.

Strutture dati e Codici

```
{
  "ID Serial": "",
  "Battery Model": "",
  "Manufacturing Date": "",
  "EV Manufacturer": "",
  "Battery producer": "",
  "Country of battery prod": "",
  "Cell Producer": "",
  "Country Cell Producer": "",
  "Cell Type": "",
  "Chemistry": "",
  "Weight": "",
  "Voltage": "",
  "Temperature": ""
}
```

Listing Appendice.1: battery_general.json

```
{
  "RatedCapacity": "",
  "BatteryQuantity": "",
  "DRate": "",
  "ServiceMass": "",
  "ServiceLife": "",
  "ElectrolyteContainment": "",
  "NominalBatteryProperty": "",
  "CycleNumber": "",
  "StorageLife": "",
  "BatteryEnergy": "",
  "CRate": "",
  "ConventionalBatteryProperty": ""
}
```

Listing Appendice.2: battery_quantities.json

```
{
  "KineticCurrent": "",
  "FaradaicCurrent": "",
  "MembranePotential": "",
  "DiffusionLimitedCurrent": "",
  "DiffusionCurrent": "",
  "DischargeCurrent": "",
  "ElectrochemicalQuantity": "",
  "NetFaradaicCurrent": "",
  "OhmicOverpotential": "",
  "ElectrochemicalKineticQuantity": "",
  "ElectrochemicalTransportQuantity": "",
  "EndOfDischargeVoltage": "",
  "ConventionalElectrochemicalProperty": "",
  "AnodicOverpotential": "",
  "Overpotential": "",
  "AlternatingCurrent": "",
  "InternalResistance": "",
  "SpecificCapacity": "",
  "ExchangeCurrentDensity": "",
  "ChargeRetention": "",
  "NominalElectrochemicalProperty": "",
  "DoubleLayerCurrent": "",
  "CathodicOverpotential": "",
  "ElectrochemicalStabilityLimit": "",
  "ElectrochemicalThermodynamicQuantity": "",
  "ElectrochemicallyActiveSurfaceArea": "",
  "ElectrodeSurfaceArea": "",
  "MaxPulseDischargeTime": "",
  "MigrationCurrent": "",
  "Polarity": "",
  "ActivationOverpotential": "",
  "AppliedPotential": "",
  "ResidualActiveMass": "",
  "InternalApparentResistance": "",
  "StandardElectrodePotential": "",
  "ElectronNumberOfAnElectrochemicalReaction": "",
  "TemperatureCoefficientOfTheCapacity": "",
  "ChargeTransferCoefficient": "",
  "ChargeCutoffCurrent": "",
  "ElectrochemicalPotential": "",
  "MolarElectrochemicalPotential": "",
  "ElectrodePotential": "",
  "EquilibriumElectrodePotential": "",
  "ElectrolyteVolume": "",
  "CurrentEfficiency": "",
  "ElectrodeRealSurfaceArea": "",
  "DirectCurrent": "",
```

```
"ElectrodeGeometricSurfaceArea": "",
"ConcentrationOverpotential": "",
"CycleLife": "",
"InstantaneousCurrent": "",
"OpenCircuitVoltage": "",
"TemperatureCoefficientOfTheOpenCircuitVoltage": "",
"AreicCapacity": "",
"CurrentDensityLimit": "",
"VolumetricCapacity": "",
"ResidualCapacity": "",
"InitialDischargeVoltage": "",
"AdsorptionCurrent": "",
"ExchangeCurrent": "",
"TheoreticalSpecificCapacity": "",
"ActiveMaterialLoading": "",
"CrystallizationOverpotential": "",
"LimitingMolarConductivity": "",
"Capacity": "",
"FormalElectrodePotential": "",
"ExperimentalCapacity": "",
"ChargeCutoffVoltage": "",
"PeakCurrent": "",
"MaxContinuousDischargeCurrent": "",
"DiffuseLayerPotential": "",
"ResidualCurrent": "",
"CellVoltage": "",
"InternalConductance": "",
"RestingTime": "",
"SquareWaveCurrent": "",
"TheoreticalCapacity": "",
"SurfaceOverpotential": "",
"ElectrochemicalWindow": "",
"LimitingCurrent": "",
"WorkingPotentialRange": "",
"ReactionOverpotential": "",
"CatalyticCurrent": "",
"MaxPulseDischargeCurrent": ""
}
```

Listing Appendice.3: battery_chemical.json

```
{
  "Traced Material": "",
  "Physical Amount per Battery": "",
  "Provenance": "",
  "Co2 Impact": "",
  "Carbon Footprint value": "",
  "Recycling Value": "",
  "Water wasting Impact": "",
  "Renewable energy value": "",
  "Social Impact": ""
}
```

Listing Appendice.4: battery_sustainability.json

```
1  ## Script per importare le ontologie e serializzarle in JSON
2  import json
3  from ontopy import get_ontology
4  import add_json_to_ipfs
5
6  battery = get_ontology('https://raw.githubusercontent.com/BIG-
7  MAP/BattINFO/master/battinfo.ttl')
8  battery.load()
9  battery_quantities = get_ontology('https://raw.
10 githubusercontent.com/BIG-MAP/BattINFO/master/batteryquantities.
11 ttl')
12 battery_quantities.load()
13 battery_chemical = get_ontology('https://raw.githubusercontent.
14 com/BIG-MAP/BattINFO/master/electrochemicalquantities.ttl')
15 battery_chemical.load()
16
17 battery_data = {}
18 quantities_data = {}
19 battery_chemicalquantities_data = {}
20
21 for entity in battery.get_entities():
22     if str(entity).split('.')[0] == 'BattINFO':
23         battery_data.update({str(entity).split('.')[1]: ""})
24 json_battery_data = json.dumps(battery_data, indent=1)
25 with open("battery_data.json", "w") as outfile:
26     outfile.write(str(json_battery_data))
27
28 for entity in battery_quantities.get_entities():
29     if str(entity).split('.')[0] == 'BattINFO':
30         quantities_data.update({str(entity).split('.')[1]: ""})
31 json_quantities_data = json.dumps(quantities_data, indent=1)
32 with open("battery_quantities.json", "w") as outfile:
33     outfile.write(str(json_quantities_data))
34
35 for entity in battery_chemical.get_entities():
36     if str(entity).split('.')[0] == 'electrochemistry':
37         battery_chemicalquantities_data.update({str(entity).
38 split('.')[1]: ""})
39 json_chemicalquantities_data = json.dumps(
40 battery_chemicalquantities_data, indent=1)
41 with open("battery_chemical.json", "w") as outfile:
42     outfile.write(str(json_chemicalquantities_data))
43
```

Listing Appendice.5: serialize_ontologies.py

```
1 'use strict';
2 const { Contract } = require('fabric-contract-api');
3 class Battery extends Contract {
4   async InitLedger(ctx) {
5     const batteries = [
6       {
7         CID: 'QmVL8....',
8         Uri: 'http://127.0.0.1:8080/ipfs/QmVL8....',
9         Key: '77EE81C8A26CBC1F4FF4E08F6....',
10        Owner: 'Audi',
11      },
12    ];
13    for (const battery of batteries) {
14      battery.docType = 'battery';
15      await ctx.stub.putState(battery.CID, Buffer.from(
16        JSON.stringify(asset)));
17      console.info(`battery ${battery.CID} initialized`);
18    }
19    async CreateBattery(ctx, cid, uri, key, owner) {
20      const battery = {
21        CID: cid,
22        Uri: uri,
23        Key: key,
24        Owner: owner,
25      };
26      ctx.stub.putState(cid, Buffer.from(JSON.stringify(
27        battery)));
28      return JSON.stringify(battery);
29    }
30    async ReadBattery(ctx, cid) {
31      const assetJSON = await ctx.stub.getState(id);
32      if (!assetJSON || assetJSON.length === 0) {
33        throw new Error(`The battery ${cid} does not exist
34      `);
35    }
36    return assetJSON.toString();
37  }
```

```
37     async UpdateBattery(ctx, cid, uri, key, owner) {
38         const exists = await this.BatteryExists(ctx, cid);
39         if (!exists) {
40             throw new Error(`The battery ${cid} does not exist
41 `);
42         }
43         const updatedBattery = {
44             CID: cid,
45             Uri: uri,
46             Key: key,
47             Owner: owner,
48         };
49         return ctx.stub.putState(cid, Buffer.from(JSON.
50 stringify(updatedBattery)));
51     }
52     async DeleteBattery(ctx, cid) {
53         const exists = await this.BatteryExists(ctx, cid);
54         if (!exists) {
55             throw new Error(`The battery ${cid} does not exist
56 `);
57         }
58         return ctx.stub.deleteState(cid);
59     }
60     async BatteryExists(ctx, cid) {
61         const assetJSON = await ctx.stub.getState(cid);
62         return assetJSON && assetJSON.length > 0;
63     }
64     async TransferBattery(ctx, cid, newOwner) {
65         const batteryString = await this.ReadBattery(ctx, cid);
66         const battery = JSON.parse(batteryString);
67         battery.Owner = newOwner;
68         return ctx.stub.putState(cid, Buffer.from(JSON.
69 stringify(battery)));
70     }
71     module.exports = BatteryTransfer;
72 }
```

Listing Appendice.6: chaincode.js

```
1  import qrcode
2  from PIL import Image
3
4  def make_qr(string):
5      qr = qrcode.QRCode(
6          version=1,
7          error_correction=qrcode.constants.ERROR_CORRECT_H,
8          box_size=10,
9          border=4
10     )
11     qr.add_data(string)
12     qr.make(fit=True)
13     img = qr.make_image(fill_color="black", back_color="white").
convert('RGB')
14     img.save("static/img/qr_code.png")
15
```

Listing Appendice.7: qr.encode.py

```
1  from PIL import Image
2  import zbarlight
3
4  file_path = 'static/img/qr_code.png'
5  with open(file_path, 'rb') as image_file:
6      image = Image.open(image_file)
7      image.load()
8
9  codes = zbarlight.scan_codes(['qrcode'], image)
10  cid = str(codes[0]).replace('\ ',')[1:]
11
```

Listing Appendice.8: qr.decode.py

```
1  #!/usr/bin/bash
2
3  # Generazione chiave privata e nonce
4  keygen=`openssl enc -aes256 -pbkdf2 -P -k password`
5
6  IFS=$'\n'
7  set $keygen
8  salt=$1
9  key=$2
10 nonce=$3
11
12 IFS='='
13 set $key
14 K=$2
15 set $nonce
16 N=$2
17
18 echo "KEY="$K "IV="$N > keys.txt
19
20 # Cifratura file di input con chiavi generate
21 openssl enc -aes256 -pbkdf2 -K $K -iv $N -in battery_file.json
22 -out battery_file.json.enc
23
24 # Rimozione file di input
25 rm battery_file.json
```

Listing Appendice.9: encrypt.sh

```
1  #!/usr/bin/bash
2
3  KEYS=`cat keys.txt`
4
5  IFS=$' '
6
7  set $KEYS
8  key=$1
9  nonce=$2
10
11  IFS='='
12  set $key
13  K=$2
14  set $nonce
15  N=$2
16
17  # decifrazione dei dati
18  DECRYPTION=$(openssl enc -d -aes256 -pbkdf2 -K $K -iv $N -in
19  battery_file.json.enc)
20  echo $DECRYPTION
```

Listing Appendice.10: decrypt.sh

```
1  #!/usr/bin/bash
2
3  peer chaincode invoke -o localhost:7050 --
4  ordererTLSHostnameOverride orderer.example.com --tls --cafile
5  fabric/network/organizations/ordererOrganizations/example.com/
6  orderers/orderer.example.com/msp/tlscacerts/tlsca.example.com-
7  cert.pem -C mychannel -n mychain --peerAddresses localhost:7051
8  --tlsRootCertFiles fabric/network/organizations/
9  peerOrganizations/org1.example.com/peers/peer0.org1.example.com/
10  tls/ca.crt --peerAddresses localhost:9051 --tlsRootCertFiles
11  fabric/network/organizations/peerOrganizations/org2.example.com/
12  peers/peer0.org.example.com/tls/ca.crt -c '{"function":
13  "CreateBattery", "Args": ["cid", "uri", "key", "owner"]}'
```

Listing Appendice.11: createbattery.sh

Bibliografia

- [1] Chen, X. et al. (2012) *An overview of Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles.*, IPEC, 2012 Conference on Power & Energy, pages 230-235.
<https://doi.org/10.1109/ASSCC.2012.6523269>

- [2] *Horizon Europe Work Programme 2023-2024 - 8. Climate, Energy and Mobility*, European Commission Decision C(2022)7550 of 6 December 2022.
https://horizoneurope.apre.it/wp-content/uploads/sites/3/2022/11/wp-8-climate-energy-and-mobility_horizon-2023-2024_en.pdf

- [3] Crocodile, Rhinoceros and Licorne, with the participation of the Batraw, Respect, ReLiEFFree4Lib and Enicon. *Production of raw materials for batteries from European resources.*, Brussels, 14th of November 2022.
<https://www.rhinoceros-project.eu/news/eu-funded-projects-scaling-up-knowledge-to-secure-raw-materials-supply-for-batteries-production/>

- [4] Berger, K. et al. (2022) *Digital battery passports to enable circular and sustainable value chains: Conceptualization and use cases.*, Journal of Cleaner Production, 353, 131492.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.131492>

- [5] Kwade, A. et al. (2018) *Current status and challenges for automotive battery production technologies.*, Nat Energy 3, 290–300 (2018).
<https://doi.org/10.1038/s41560-018-0130-3>

-
- [6] Lu, L. et al. (2012) *A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles.*, Journal of Power Sources, pages 2806–2814, 2012.
- [7] N. Andrenacci, V. Sglavo, F. Vellucci (2017) *Stato dell'arte dei modelli di invecchiamento per le celle litio-ione. Applicazione al caso di studio delle celle NMC invecchiate in ENEA.* Report RdS/PAR2016/163
https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2015-2017/accumulo-di-energia/rds_par2016_163.pdf
- [8] Shahjalal M., et al. (2013) *A review on second-life of Li-ion batteries: prospects, challenges, and issues.* Journal of Power Sources, Volume 241, 2013, Pages 680-689, ISSN 0378-7753.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.05.040>
- [9] Zorn, M. et al. (2022) *An Approach for Automated Disassembly of Lithium-Ion Battery Packs and High-Quality Recycling Using Computer Vision, Labeling, and Material Characterization.* Recycling. 2022; 7(4)
<https://doi.org/10.3390/recycling7040048>
- [10] Ayerbe E. et al. (2022) *Digitalization of Battery Manufacturing: Current Status, Challenges, and Opportunities.* Adv. Energy Mater. 2022, 12(17), 1–24.
<https://doi.org/10.1002/aenm.202102696>
- [11] Wessel, J. et al. (2021) *Ontology-based Traceability System for Interoperable Data Acquisition in Battery Cell Manufacturing.*, Procedia CIRP, 104, 1215–1220.
<https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2021.11.204>
- [12] Turetskyy, A. et al. (2020) *Toward Data-Driven Applications in Lithium-Ion Battery Cell Manufacturing.*, Energy Technol., 8: 1900136.
<https://doi.org/10.1002/ente.201900136>

- [13] Knez, T. et al. (2022) *Blockchain-Based Transaction Manager for Ontology Databases.*, Informatica, vol. 33, no. 2, pp. 343-364, 2022.
<https://doi.org/10.15388/22-INFOR490>
- [14] Lo, O. et al. (2022) *GLASS: A Citizen-Centric Distributed Data-Sharing Model within an e-Governance Architecture.*, Sensors 2022, 22(6), 2291.
<https://doi.org/10.3390/s22062291>