

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

LCA di accumulatori elettrochimici in diversi contesti
energetici

Relatore

Prof.ssa Anna Stoppato

Laureando

Daniele Salin

Matricola n. 1156866

Anno Accademico 2018/2019

Indice

| | |
|--|-----------|
| Introduzione..... | 1 |
| Capitolo 1 | |
| Vantaggi dell’accumulo elettrico..... | 3 |
| 1.1 Generalità..... | 3 |
| 1.2 Peack shaving e time-shift e integrazione con le FRNP..... | 4 |
| 1.3 Regolazione primaria, secondaria e terziaria..... | 5 |
| 1.4 Supporto di tensione..... | 8 |
| 1.5 Black start e affidabilità del servizio..... | 8 |
| 1.6 Gestione delle congestioni e differimento capitale | 9 |
| 1.7 Home energy management..... | 10 |
| Capitolo 2 | |
| Accumulatori elettrochimici considerati e loro caratteristiche..... | 13 |
| 2.1 Batterie agli ioni di litio..... | 14 |
| 2.1.1 Generalità sul litio..... | 14 |
| 2.1.2 Estrazione..... | 14 |
| 2.1.3 Caratteristiche delle celle..... | 17 |
| 2.1.4 Tecnologie esistenti e tecnologie qui considerate..... | 20 |
| 2.1.5 Riciclo..... | 22 |
| 2.2 Batterie a flusso di vanadio..... | 27 |
| 2.2.1 Storia..... | 27 |
| 2.2.2 Principio di funzionamento..... | 28 |
| 2.2.3 Caratteristiche peculiari..... | 31 |
| 2.2.4 Analisi dei costi..... | 32 |
| 2.2.5 Stato dell’arte..... | 34 |
| Capitolo 3 | |
| Introduzione alla LCA e a SimaPro..... | 37 |
| 3.1 Definizione degli obiettivi e del campo d’applicazione..... | 39 |
| 3.2 Analisi d’inventario..... | 40 |

| | |
|---|----|
| 3.3 Analisi degli impatti..... | 40 |
| 3.3.1 Classificazione..... | 40 |
| 3.3.2 Caratterizzazione..... | 41 |
| 3.3.3 Normalizzazione..... | 41 |
| 3.3.4 Ponderazione..... | 42 |
| 3.4 Interpretazione e miglioramento..... | 42 |
| 3.5 Metodo ReCiPe 2016 | 43 |
| 3.6 IL codice di calcolo SimaPro | 45 |
| 3.6.1 Modellazione del ciclo di vita di un prodotto | 46 |
| 3.6.2 Visualizzazione dei risultati | 47 |

Capitolo 4

| | |
|--|-----------|
| Modellazione delle batterie in SimaPro..... | 49 |
| 4.1 Life cycle inventories delle batterie VRFB | 49 |
| 4.1.1 Membrana al Nafion | 49 |
| 4.1.2 Elettrodo | 51 |
| 4.1.3 Piastra bipolare | 52 |
| 4.1.4 Struttura dell'elettrodo | 53 |
| 4.1.5 Elettrolita | 54 |
| 4.1.6 Serbatoio per l'elettrolita | 59 |
| 4.1.7 Collettore di corrente | 60 |
| 4.1.8 Telaio della cella | 60 |
| 4.1.9 Guarnizioni | 61 |
| 4.1.10 Cavi elettrici | 64 |
| 4.1.11 Pompe centrifughe | 66 |
| 4.1.12 Tubazioni..... | 67 |
| 4.1.13 Scambiatore di calore | 68 |
| 4.1.14 PCS..... | 69 |
| 4.1.15 Assemblaggi e vita utile | 69 |
| 4.2 Modellazione delle batterie agli ioni di litio | 69 |
| 4.2.1 Elettrodi | 71 |

| | |
|--|----|
| 4.2.2 Separatore | 79 |
| 4.2.3 Substrati degli elettrodi | 79 |
| 4.2.4 Elettrolita LFP..... | 80 |
| 4.2.5 Pacchetto contenitivo | 81 |
| 4.2.6 Sistema di controllo | 81 |
| 4.3 Adeguamento alla potenza di riferimento, vita utile e assemblaggio | 82 |
| 4.4 Scenari di fine vita 86 | |
| 4.4.1 VRFB..... | 87 |
| 4.4.2 LFP..... | 92 |
| 4.4.3 NCM..... | 97 |

Capitolo 5

| | |
|---|-----------|
| Descrizione impianti presi in considerazione e loro modellazione in SimaPro..... | 99 |
| 5.1 El Hierro | 99 |
| 5.2 Ventotene | 101 |
| 5.3 Ustica | 102 |
| 5.4 Pantelleria | 102 |
| 5.5 Torre Valdaliga Nord | 104 |
| 5.6 Mix energetico nazionale 2018 | 104 |

Capitolo 6

| | |
|---|------------|
| LCIA e confronti..... | 107 |
| 6.1 LCIA singole batterie..... | 108 |
| 6.1.1 VRFB..... | 108 |
| 6.1.2 LFP | 112 |
| 6.1.3 NCM | 116 |
| 6.2 Confronto tra tecnologie | 119 |
| 6.2.1 Assemblaggio | 119 |
| 6.2.2 Smaltimento | 120 |
| 6.2.3 Smaltimento con riuso | 121 |
| 6.2.4 Ciclo di vita | 122 |
| 6.3 Integrazione degli accumulatori negli impianti di produzione di energia | 124 |

| | |
|-----------------------------------|------------|
| 6.3.1 El Hierro | 124 |
| 6.3.2 Ventotene | 126 |
| 6.3.3 Ustica | 128 |
| 6.3.4 Pantelleria | 130 |
| 6.3.5 Torre Valdaliga Nord | 131 |
| 6.3.6 Mix nazionale 2018 | 132 |
| Capitolo 7 | |
| Conclusioni | 135 |
| Appendice A | |
| LCIA singole batterie..... | 139 |
| Bibliografia..... | 149 |

Introduzione

I Sistemi d'Accumulo (SdA) permettono di immagazzinare energia elettrica convertendola in un'altra forma e possono essere utilizzati per alimentare applicazioni sia connesse sia non connesse alla rete.

In letteratura sono presenti quasi esclusivamente ricerche, saggi e studi riguardanti l'aspetto tecnico-economico delle varie forme di sistemi d'accumulo. Si trovano raramente invece studi approfonditi sui vantaggi ambientali che questi tipi di tecnologia possono apportare nel breve, medio e lungo periodo a partire dalla loro installazione.

Nell'esigua percentuale di studi o articoli che prendono in considerazione il tema dell'impatto ambientale, si legge spesso della sola riduzione di emissioni di anidride carbonica durante il ciclo di vita dell'impianto grazie all'installazione del dispositivo d'accumulo rispetto alla situazione precedente. Questo tipo di studi riporta una notizia veritiera ma parziale. Ad esempio: l'Enel ha dichiarato [10] che nel 2017 è riuscita a ridurre le emissioni di CO₂ sotto il valore di 400g per ogni kWh equivalente di energia elettrica prodotta. Sarebbe alquanto semplicistico affermare che un impianto che produce 100 kWh annui tramite motori diesel con un accumulatore possa ridurre le sue emissioni fino a 40 chili di anidride carbonica all'anno. Per una comprensione più chiara e precisa dell'impatto ambientale totale che hanno i sistemi d'accumulo è necessario prendere in considerazione sia la fase in cui vengono prodotti sia la fase di dismissione e smaltimento, oltre al loro regolare ciclo di vita.

E' risaputo, per chi ha delle conoscenze in questo settore, che gli accumulatori hanno emissioni quasi nulle nel periodo di vita utile dal momento che non sono alimentati da motori ma anzi, fungono da serbatoio di stoccaggio per ottimizzare il funzionamento di macchinari già esistenti.

E' logico dunque porsi la domanda: *“L'integrazione dei sistemi d'accumulo nelle reti elettriche comporta un vantaggio in termini di impatto ambientale in senso assoluto, considerando l'intero loro ciclo di vita dall'estrazione delle materie prime per la loro creazione allo smaltimento o riciclo dei loro componenti, rispetto alle tradizionali centrali di produzione senza accumulo?”*

Lo scopo di questo elaborato di tesi è eseguire l'analisi LCA (Life cycle Assessment) del completo ciclo di vita di accumulatori elettrochimici industriali di varia tipologia, per confrontare poi l'impatto ambientale ottenuto con quello di un tradizionale sistema di produzione di energia sprovvisto di accumulatori. Lo studio terrà conto della taglia e della destinazione d'uso degli impianti di accumulo: ci sarà una distinzione tra impianti in isola e impianti connessi alla rete elettrica nazionale.

Capitolo1

Introduzione e vantaggi dell'accumulo elettrico

1.1 Generalità

Secondo la norma CEI 0-21 un accumulatore è “un insieme di dispositivi, apparecchiature e logiche di gestione e di controllo, funzionale ad assorbire e rilasciare energia elettrica, previsto per funzionare in maniera continuativa in parallelo con la rete con obbligo di connessione di terzi o in grado di comportare un'alterazione dei profili di scambio con la rete elettrica (immissione e/o prelievo). Il sistema di accumulo può essere integrato o meno con un impianto di produzione (se presente). Non rientrano i sistemi utilizzati in condizioni di emergenza che, pertanto, entrano in funzione solo in corrispondenza dell'interruzione dell'alimentazione dalla rete elettrica per cause indipendenti dalla volontà del soggetto che ne ha la disponibilità”.

Per essere definito tale un sistema d'accumulo deve quindi presentare 3 punti chiave:

- Funzionare in parallelo con la rete;
- Essere connesso a enti terzi;
- Creare un'alterazione dei profili di scambio con la rete, tramite prelievo e/o immissione.

I sistemi d'accumulo (SdA) possono essere installati di conseguenza su ogni tipologia di impianto di produzione di energia, anche da fonte rinnovabile.

Grazie al costante aumento dell'energia immessa in rete dalle fonti rinnovabili è ormai pensiero comune che il sistema elettrico si stia evolvendo da una visione tradizionale, con struttura radiale e produzione centralizzata, ad una grande smart grid con generatori distribuiti in prossimità dei carichi. In quest'ottica i sistemi d'accumulo svolgono un ruolo strategico di supporto alla generazione e allo sviluppo di questa nuova tipologia di rete: le fonti rinnovabili spesso non sono programmabili (FRNP) ed è dunque necessario disaccoppiare temporalmente la produzione con l'utilizzo effettivo dell'energia. Nelle reti elettriche tradizionali infatti la generazione di energia deve essere istantaneamente uguale alla richiesta dell'utenza, mentre con l'immagazzinamento è possibile generare energia nei momenti più convenienti, stoccarla ed utilizzarla all'occorrenza.

Fino agli anni '80, i sistemi di stoccaggio di energia venivano utilizzati solo per modulare nel tempo i picchi di richiesta di energia elettrica. L'energia prodotta da centrali termoelettriche a carico parziale veniva immagazzinata e rilasciata nei momenti di maggior richiesta, sostituendo in tal modo l'entrata in funzione di centrali adatte a coprire le punte di richiesta di energia. Vi era quindi una ottimizzazione della generazione di energia elettrica al variare del carico. Questo ha comportato e continua a comportare un vantaggio economico sia nella generazione che nell'evitata installazione di impianti atti a coprire le punte del carico come turbine a gas o centrali a combustione interna.

Oltre il 95% della potenza globale di accumulo è rappresentato da impianti di pompaggio idroelettrici: essi hanno infatti molteplici aspetti positivi come un'alta densità energetica, una facile e rapida fase di entrata in servizio e una notevole maturità tecnologica. La residua percentuale rimanente è composta principalmente da accumulatori elettrochimici e da impianti di accumulo ad aria compressa.

I vantaggi che gli accumulatori sono in grado di apportare al sistema elettrico sono noti a tutti i tecnici del settore ma spesso non vi è un vantaggio economico nella loro installazione. Nell'ultimo decennio si è messo in discussione questo aspetto e la tendenza sta cambiando, sia per una maggior consapevolezza dei vantaggi sia in ottica di gestione della rete e ambientale, sia per lo sviluppo tecnologico galoppante. Manca tuttavia una spinta decisa sotto forma di incentivi da parte delle istituzioni.

I benefici tecnici, economici e ambientali derivanti dai sistemi di accumulo interessano sia la rete nazionale sia le realtà che, per cause di forza maggiore, non possono essere collegate con essa. Questi aspetti sono di seguito riportati nello specifico.

1.2 Peack shaving e time-shift e integrazione con le FRNP

Il time shifting consiste nell'acquistare ed immagazzinare energia nelle ore in cui il prezzo è basso per rivenderla nelle ore in cui i prezzi sono ai massimi. Questa operazione è sempre profittevole qualora il rendimento energetico, detto round-trip, del sistema d'accumulo supera il rapporto tra il prezzo d'acquisto e quello di vendita dell'energia. Dunque, se si vogliono avere impianti profittevoli sul lato economico è necessario che questi abbiano un'efficienza del ciclo di carica/scarica almeno maggiore del 65-70%. Questo valore è relativamente facile da ottenere e addirittura migliorare per molte tipologie di impianti: elettrochimici, elettromagnetici, accumulo potenziale idrico, accumulo cinetico nei volani ed accumulo di gas compressi (tecnologia CAES).

Esistono degli algoritmi che si occupano di ottimizzare il beneficio economico derivante da questo tipo di attività: tengono conto della volatilità dei prezzi, degli oneri di manutenzione, dell'efficienza dell'accumulo e del ciclo di carica-scarica. Il rapporto del prezzo notte-giorno è storicamente stato attorno a 3:1, anche se negli ultimi anni il rapporto si è spostato sul 2:1 a causa degli strascichi sui consumi dovuti alla crisi economica e la massiccia entrata nel mercato di impianti fotovoltaici.

Il time-shift comporta anche dei benefici tecnici soprattutto per gli impianti termoelettrici. In particolare:

- Peack-shaving, cioè il livellamento dei picchi di domanda nelle fasce orarie diurne. Questo porta ad una diminuzione del numero di macchine più costose ed inefficienti che devono entrare in funzione per poche ore a coprire il fabbisogno della rete. Al vantaggio economico dovuto alla profittabilità della rivendita dell'energia si ha anche il mancato costo aggiuntivo delle macchine più costose. Il peack shaving può essere un vantaggio anche in reti di ampiezza minore, come possono essere le piccole realtà locali non collegate alla rete nazionale: il dimensionamento di sistemi di trasmissione, in presenza di un accumulo, può essere fatto sui valori medi di potenza richiesta e non sui valori massimi.
- Incremento della domanda notturna. Nelle ore notturne mediamente cala drasticamente la richiesta dell'utenza e gli impianti si ritrovano ad operare al minimo tecnico. Con l'accumulo invece questi impianti sono incentivati a lavorare ad alti carichi in queste ore ritrovandosi a sfruttare i prezzi bassi dell'energia senza portare le macchine in condizioni di estremo off-design, allungando di fatto la vita utile degli impianti.

Se si pensa a sistemi di generazione basati sulle Fonti Rinnovabili Non Programmabili (FRNP) salta subito all'occhio come il concetto del time-shift possa risolvere in gran parte la loro discontinuità di

produzione dovuta alla loro natura intermittente intrinseca. L'accumulo può dunque aumentare il valore della generazione da fonte rinnovabile perché va a disaccoppiare il momento di produzione con quello di vendita, o autoconsumo. In sostanza si va a rendere quasi programmabile l'energia prodotta dalle FRNP perché si aumenta lo spazio temporale a cui ci si riferisce, aumentando le probabilità che queste producano quanto atteso, a vantaggio della modulazione degli impianti dispacciabili che sarebbero chiamati in causa in mancanza di uno stoccaggio. Si vanno così ad evitare diversi cicli di start-up e shut-down di impianti termoelettrici, assieme alle perdite di efficienza dovute a rampe di carico meno frequenti e meno marcate. Queste perdite si tramutano in un vantaggio sia economico, dovuto ad una mancata spesa ed una vita utile prolungata che ad un vantaggio ambientale, dovuto ad una mancata emissione di prodotti della combustione.

1.3 Regolazione primaria, secondaria e terziaria

Una rete elettrica opera a 50 o 60 Hz a seconda delle convenzioni nazionali. Per mantenere sempre costante questa frequenza nel tempo, indipendentemente dalle variazioni di carico che avvengono durante la giornata i fornitori di energia elettrica devono operare un continuo e minuzioso controllo, detto regolazione frequenza-potenza. Si effettuano delle previsioni a lungo termine sull'ipotetico fabbisogno energetico per poter dimensionare adeguatamente gli organi di produzione e di controllo.

Le fluttuazioni però sono assai imprevedibili nel breve termine, tanto da potersi ritenere del tutto casuali. Si effettua a tal proposito un continuo monitoraggio della frequenza di rete per poter fornire una regolazione sia in salita che in discesa che segua la richiesta distante per istante.

I sistemi d'accumulo riescono a fornire prestazioni di regolazione frequenza-potenza superiori a quelle dei tradizionali impianti termoelettrici. In particolare nel sistema elettrico italiano che ha visto negli ultimi 10 anni un forte incremento della penetrazione di FRNP, i sistemi d'accumulo possono costituire l'anello di congiunzione tra il sistema elettrico esistente e le fonti rinnovabili aleatorie.

Nel caso avvenga una perturbazione nella rete, dapprima interviene la regolazione primaria in una frazione di secondo e successivamente si ha l'attivazione delle macchine e dei sistemi di controllo per ripristinare la frequenza nominale di rete, ripristinando anche i margini di riserva della regolazione primaria. La regolazione terziaria, a sua volta, permette di ripristinare anche i margini della regolazione secondaria.

Con regolazione primaria si intende la capacità di ciascun gruppo di regolazione di variare in maniera autonoma la potenza erogata al variare della frequenza di rete.

In caso di squilibrio tra generazione e carico si verifica una variazione della frequenza di rete a cui reagiscono i regolatori di velocità dei generatori adibiti a fornire il servizio di regolazione primaria.

Tale servizio deve essere obbligatoriamente fornito da tutte le unità di produzione con potenza effettiva non inferiore a 10 MW, ad eccezione di quelle alimentate da fonte rinnovabile non programmabile, mettendo a disposizione una banda di regolazione non inferiore all'1.5% della potenza effettiva. La regolazione ha tempi di intervento brevi (alcuni secondi) ed ha carattere locale.

In termini di prestazione, la variazione di potenza richiesta dalle unità adibite, deve essere fornita per almeno metà, entro 15 secondi dall'inizio della variazione di frequenza e completamente entro 30

secondi, dopodiché la nuova potenza generata deve essere mantenuta per almeno 15 minuti dall'inizio dello squilibrio.

I sistemi di accumulo, spesso caratterizzati da tempi di risposta rapidi, possono fornire prestazioni di regolazione primaria molto utili. Un sistema di accumulo caratterizzato da una efficienza elevata e da tempi brevi di carica/scarica (ad esempio volani, capacitori e alcuni accumulatori elettrochimici) può fornire una banda di regolazione pari alla somma delle potenze massime di carica e di scarica. Oltre a ciò, dato che la modulazione degli impianti termoelettrici imposta dalla regolazione primaria è accompagnata da una riduzione dell'efficienza dell'impianto, con conseguente incremento di emissioni e consumo di combustibile, i sistemi di accumulo possono ridurre la necessità di modulazione degli impianti termoelettrici, in particolare gli impianti di base.

Inoltre, l'appoggio alla penetrazione delle fonti rinnovabili non programmabili nel sistema elettrico è ulteriormente avvalorato. Infatti, il significativo sviluppo di tale fonti di energia intermittente porta, a parità di domanda, ad una riduzione del numero di impianti termoelettrici in servizio, e quindi ad una riduzione del margine di riserva di regolazione primaria disponibile, che invece si renderebbe necessario in quantità maggiore, vista la natura variabile di tale fonti. I sistemi di accumulo in tale contesto possono aumentare i margini di riserva di regolazione primaria favorendo l'integrazione delle fonti rinnovabili non programmabili nel sistema elettrico.

Tuttavia, attualmente nel panorama italiano il servizio di regolazione primaria non è remunerato; è evidente che i sistemi di accumulo che potenzialmente potrebbero svolgerlo dovrebbero trovare un sostegno economico da altri servizi compatibili con la regolazione primaria (ad esempio la regolazione secondaria).

Con regolazione secondaria si intende la capacità di ciascun gruppo di regolazione di variare sotto il controllo del regolatore di rete la potenza erogata al variare della frequenza. Il regolatore di rete è un dispositivo automatico centralizzato che agisce sui regolatori di velocità delle unità di generazione ed è calibrato sugli errori di frequenza e di potenza scambiata con i sistemi interconnessi.

In particolare, per poter capire in quale zona si è verificato lo squilibrio e quindi attivare la potenza di regolazione secondaria solo di quella zona, si applica il cosiddetto "metodo della caratteristica della rete". Ciascuna zona di regolazione è dotata di un regolatore secondario centrale, che, agendo opportunamente sui gruppi di regolazione secondaria della sua zona, ha come obiettivo quello di annullare a regime il proprio segnale di errore G_i :

$$G_i = P_i + K_{ri} * f$$

con:

G_i = errore globale di regolazione della zona i -esima; P_i = errore di potenza di scambio della zona i -esima rispetto al valore programmato (valori positivi significano che la differenza tra esportazioni e importazioni è maggiore di quanto programmato);

K_{ri} = energia regolante di zona, in MW/Hz; f = valore dell'errore di frequenza $f-f_n$.

La regolazione secondaria ha lo scopo di:

- riportare la frequenza di rete al suo valore nominale, in modo da annullare l'errore di frequenza e quindi scaricare la potenza di regolazione primaria che era intervenuta in seguito allo squilibrio, così da ricostituire tutta la riserva primaria iniziale; riportare gli scambi di

potenza tra le varie zone di regolazione ai loro valori contrattuali (regolazione frequenza-potenza).

- riportare gli scambi di potenza tra le varie zone di regolazione ai loro valori contrattuali (regolazione frequenza-potenza).

Al termine dell'intervento della regolazione primaria è compito solo della zona nella quale si è originato tale squilibrio di intervenire con la sua regolazione secondaria per annullare l'errore di frequenza e scaricare i regolatori primari dell'intera rete.

Le unità di produzione abilitate alla fornitura della regolazione secondaria devono rendere disponibile un margine di riserva pari al maggiore tra ± 10 MW e $\pm 6\%$ della potenza massima delle unità termoelettriche, nonché pari al $\pm 15\%$ della potenza massima per le unità idroelettriche. L'intera banda di regolazione deve essere erogata da ciascuna unità abilitata entro il tempo massimo di 200 secondi e fornita con continuità per almeno 2 ore. Generalmente la quantità di riserve secondarie determinate dal Gestore di Rete superano i requisiti minimi sopra indicati.

E' evidente che i sistemi di accumulo possono essere utilizzati per la fornitura del servizio di regolazione secondaria. A tale proposito valgono tutte le considerazioni relative alla regolazione primaria.

In aggiunta, se la regolazione primaria è un servizio obbligatorio e non remunerato, la regolazione secondaria è oggetto di contrattazione sul Mercato per il Servizio di Dispacciamento (MSD), motivo ulteriore che avvalora la potenziale penetrazione dei sistemi di accumulo nel sistema elettrico.

La regolazione terziaria è qualsiasi variazione, automatica o manuale, dei punti di funzionamento dei gruppi di produzione, al fine di:

- garantire la disponibilità della riserva di regolazione secondaria necessaria per esercire il sistema in sicurezza nelle attuali condizioni di carico;
- ripartire in maniera ottimale, in considerazione degli aspetti economici, la potenza regolante secondaria sui differenti gruppi.

Queste variazioni possono essere effettuate mediante messa in produzione o fuori servizio di gruppi (ad esempio turbine a gas, centrali idroelettriche o centrali di pompaggio), aumentando o diminuendo la potenza erogata dai gruppi già in servizio, modificando la ripartizione della potenza sui gruppi che partecipano alla regolazione secondaria o modificando i programmi di scambio tra aree.

Il Gestore della Rete impartisce ai singoli produttori (anche non responsabili nella regolazione secondaria) ordini di esercizio relativi alla variazione della potenza prodotta da unità già in servizio o spenta garantendo l'operabilità di riserve "pronte", in grado di erogare entro 15 minuti la potenza richiesta e di riserve "di sostituzione", aventi lo scopo di reintegrare la riserva "pronta" senza limitazioni di durata.

In tale contesto, i sistemi di accumulo possono essere impiegati come riserva "pronta", con i vantaggi sopradescritti. In particolare, essendo i margini di riserva terziaria superiori di quelli di riserva primaria e secondaria, il loro impatto sul funzionamento a carico parziale delle unità termoelettriche

adibite al servizio di regolazione è maggiore, con benefici conseguenti superiori rispetto ai casi di regolazione primaria e secondaria [9].

1.4 Supporto di tensione

E' noto che la tensione deve essere mantenuta costante nei vari nodi della rete elettrica per fornire un servizio migliore possibile all'utenza. Data l'impossibilità tecnica e la sconvenienza economica del trasmettere la potenza reattiva per lunghe distanze, i sistemi più frequentemente utilizzati a questo scopo sono generatori appositi, che forniscono questa riserva reattiva sia in regolazione primaria che secondaria. Si comprende come sia difficile remunerare il costo di installazione e operatività di queste macchine se a queste è affidato il solo compito di fornire potenza reattiva. I disturbi che vanno a modificare il valore della tensione ai nodi possono essere:

- Correnti di inserzione di trasformatori e condensatori;
- Variazione dei carichi;
- Correnti di spunto dei motori;
- Guasti alla linea dell'utente;
- Guasti su linee interne;
- Carichi non lineari.

I sistemi d'accumulo in questo contesto riescono a fornire un servizio di miglioramento della forma d'onda della tensione. Una diffusione capillare di SdA nei pressi dei centri di carico costituisce senza ombra di dubbio una modalità particolarmente efficace di supporto alla tensione.

Le unità designate a questo tipo di compito dovranno agire per un tempo di circa 30 minuti una volta chiamate in causa, tempo entro il quale si presume di aver risolto lo squilibrio e ripristinata la stabilità di rete.

1.5 Black start e affidabilità del servizio

Qualora avvenisse un guasto generalizzato in una rete elettrica che porti all'interruzione diffusa del servizio, la procedura classica di ripristino delle condizioni nominali di servizio è demandata a centrali di ripartenza autonoma, in grado di avviarsi autonomamente e in breve tempo. Gli impianti adibiti a questa funzione sono centrali idroelettriche, forti dell'ingente accumulo di cui sono generalmente dotate, oppure impianti turbogas, agili ad avviarsi e in grado di sostenere ripide rampe di carico.

I sistemi d'accumulo possono fornire la potenza di *Black Start* richiesta in tempi estremamente brevi data la loro natura. Un impianto di questo tipo è installato nella seconda città più popolosa dell'Alaska, Fairbanks.

Nei casi di interruzione momentanea del servizio di cui sopra, i SdA possono supportare in maniera efficace anche i carichi dell'utenza nel periodo di disservizio.

Il dimensionamento per un SdA che soddisfi l'utenza è relativamente semplice: la taglia va collegata alle necessità dell'utenza. Per quanto riguarda la durata della fase di scarica è necessario tenere in

considerazione la percentuale effettiva di energia dell'esercizio. Se il carico è interessato da regolari disconnessioni dalla rete una potenziale durata può essere nell'ordine di alcune ore, mentre se l'obiettivo è l'appoggio al trasferimento a condizioni di esercizio ordinarie allora la fase di scarica può essere nell'ordine di alcuni minuti. Nel caso di lunghe disconnessioni dalla rete elettrica che oltrepassano la capacità del sistema di accumulo può essere prevista l'entrata in funzione di generatori addizionali, normalmente diesel.

Altra caratteristica molto interessante nel contesto dell'affidabilità dei sistemi di accumulo è la capacità di alcune tecnologie (accumulatori elettrochimici e volani in primo luogo) di essere mobili e quindi di poter supportare carichi ubicati in luoghi di difficile accesso per i convenzionali elementi di trasmissione e distribuzione. Tale qualità, integrata eventualmente con la generazione elettrica da fonti rinnovabili non programmabili, è preziosa e unica nel proprio genere e può provvedere condizioni di esercizio straordinarie per siti con accesso proibitivo.

1.6 Gestione delle congestioni e differimento capitale

Le congestioni di rete avvengono quando l'energia elettrica richiesta dai carichi non può essere fornita, del tutto o in parte, dall'impianto di trasmissione perché questo risulta sottodimensionato al passaggio di tale energia. Questa situazione è piuttosto rara nel periodo immediatamente successivo all'installazione di un sistema di trasmissione ma non è raro che si verifichi in un tempo più lungo, a causa dell'inserimento di nuovi utenti che finiscono per richiedere più energia di quanta la rete ne può trasmettere. Il risultato di questo sforzo per la trasmissione di energia è l'aumento del costo della fornitura a causa della difficoltà e dell'adeguamento della rete stessa. Questo può causare una suddivisione del territorio coperto dalla medesima rete in zone a prezzo diverso, solitamente più elevato nelle zone meno connesse dove è possibile che si verifichi una congestione.

Lo stoccaggio di una certa quantità di energia in punti strategici può servire dunque a mantenere la trasmissione della rete ad un valore ottimale di efficienza, dove le punte di richiesta vengono soddisfatte da questi serbatoi d'accumulo. Per essere efficaci questi organi devono essere installati a valle della rete che presenta questo tipo di criticità. Quando la criticità è invece data da una eccessiva produzione rispetto alla richiesta dell'utenza in quel momento, risulta conveniente posizionare gli SdA a monte della rete per evitare la congestione prima che possa verificarsi.

Il differimento di investimenti nelle linee di trasmissione e distribuzione elettrica comporta il ritardo, e in alcuni casi il risparmio completo, di investimenti volti a migliorare elementi del sistema di trasmissione e/o distribuzione, utilizzando relativamente piccoli investimenti in sistemi di accumulo di energia.

Ad esempio, si possono evitare o dilazionare per alcuni anni gli investimenti atti ad incrementare la capacità di elementi della rete elettrica che vengono a trovarsi in situazioni congestionanti per periodi limitati nell'arco dell'anno; grazie ad un investimento relativamente piccolo in un sistema di accumulo a valle del nodo della rete interessato da sovraccarichi, si rinvia la necessità di ingenti flussi di cassa. La considerazione chiave è che una piccola quantità di energia accumulata può essere usata per fornire abbastanza capacità incrementale per rinviare la necessità di un grande investimento in elementi di trasmissione elettrica. In questo modo si riduce il costo complessivo dei contribuenti, si migliora l'utilizzo delle risorse, consente l'utilizzo del capitale per altri progetti e si riduce il rischio finanziario connesso agli investimenti proposti.

In particolare, per la maggior parte dei nodi all'interno di un sistema di trasmissione, i carichi più elevati si verificano in pochi giorni l'anno, per poche ore l'anno. Spesso, il più alto carico annuale si verifica in un giorno specifico, con una punta leggermente più elevata rispetto a qualsiasi altro giorno. Una conseguenza importante è che il sistema di accumulo utilizzato è in grado di fornire benefici significativi con limitata o nessuna necessità di scaricare l'energia stoccata. In aggiunta, se l'impiego dei sistemi di accumulo riduce il carico sulle apparecchiature disponibili, le quali si stanno avvicinando alla propria vita utile, il risultato potrebbe essere quello di prolungare la durata delle attrezzature esistenti ed il conseguente differimento di nuovi investimenti per la relativa sostituzione. Questo può essere particolarmente interessante per elementi di trasmissione che comprendono trasformatori e linee di trasmissione in cavo.

1.7 Home energy management

Con Home Energy Management si intende la gestione intelligente dei carichi domestici volta a diminuire la quantità di energia elettrica necessaria allo svolgimento delle attività, o per lo meno ridurne il suo costo finale.

La gestione ottimale deriva da uno uso razionale dell'energia basata sul *time of use*. Il beneficio economico derivante dal *time shift* precedentemente discusso può essere facilmente tradotto per un'applicazione a livello di utenza. Però, mentre i prezzi dell'energia elettrica a livello di utenza sono basati sulla tariffa di vendita al dettaglio del cliente centrata su specifiche fasce orarie, il prezzo inerente al *time shift* deriva dalla contrattazione fra i vari partecipanti del mercato elettrico.

I sistemi di accumulo possono ridurre notevolmente il costo derivante dall'uso dell'energia elettrica a fronte di un investimento non proibitivo, sebbene attualmente i costi per tale tecnologie non siano ancora appetibili.

Intuibilmente, i sistemi di accumulo dell'utenza vengono caricati durante fasce orarie corrispondenti a periodi dove il costo dell'energia elettrica è basso, mentre la fase di scarica è correlata ai periodi di maggior domanda caratterizzati da un costo maggiore.

Si consideri l'esempio sottostante. La figura mostra il carico quasi costante di 1 MW di una struttura industriale per tre fasce orarie distinte. Viene previsto l'installazione di un sistema di accumulo di pari capacità. Durante la mattina (7.00-12.00) e la sera (17.00-23.00), il carico richiesto dell'utente finale e la domanda netta dell'impianto sono 1 MW. Di notte, quando il prezzo per l'energia è basso, la domanda netta della struttura raddoppia dato che all'ordinaria richiesta di energia dell'impianto va a sommarsi quella dell'impianto di stoccaggio di energia. Durante la fascia oraria di punta (12.00-17.00) caratterizzata da un costo maggiore dell'energia elettrica, il sistema di accumulo provvede al fabbisogno dell'impianto evitando i relativi costi.

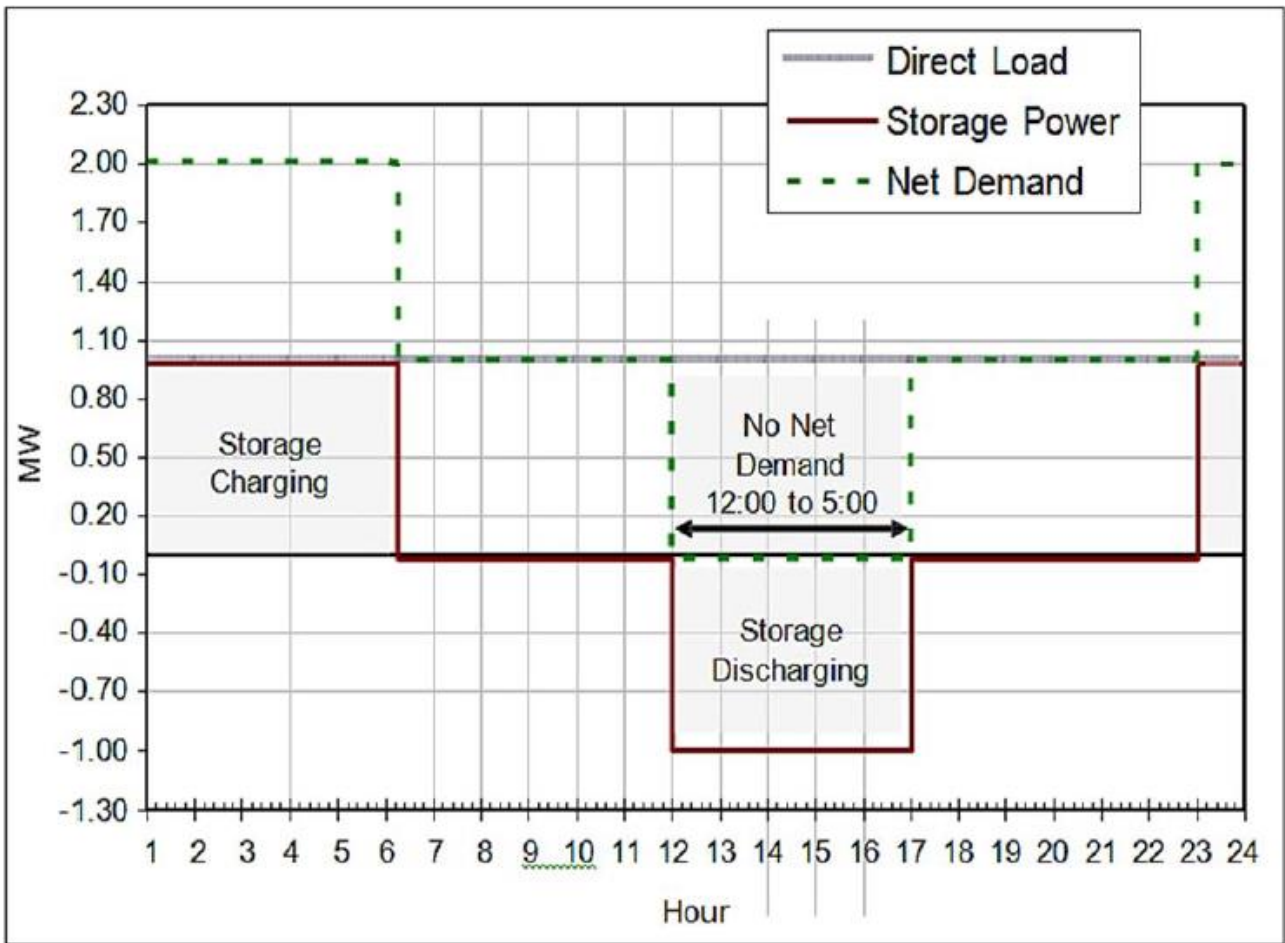


Fig. 1.1 – Esempio di home energy management

Capitolo 2

Accumulatori elettrochimici considerati e loro caratteristiche

In questo elaborato si andranno a studiare diverse tipologie di accumulatori elettrochimici per diverse ragioni:

- sono la seconda tecnologia per quanto riguarda l'accumulo elettrico, dopo l'accumulo idrico;
- sono la tecnologia al centro dell'attenzione oggi per quanto riguarda l'inquinamento dovuto al suo smaltimento, nonostante se ne parli molto ultimamente solo per i veicoli elettrici invece che a tutto tondo;
- si stanno compiendo passi da gigante nello sviluppo di nuove tecnologie per migliorare la capacità d'accumulo;
- la questione dell'inquinamento comincia ad essere sentita dalla popolazione e sempre più persone e aziende si stanno dotando di oggetti o strumenti elettrici. L'adozione di una tecnologia per la massa comporta un fattore di scala nella produzione, rendendo sempre più economico il prodotto finale a parità di caratteristiche.

Andando con ordine, si comincia questo studio ribadendo cos'è una batteria.

Una batteria è un dispositivo che converte l'energia chimica contenuta all'interno dei suoi materiali attivi direttamente in energia elettrica tramite una reazione di ossidoriduzione (redox). Tale relazione determina infatti un trasferimento di elettroni che viene sfruttato per alimentare un carico esterno.

Negli altri tipi di reazione redox (non elettrochimiche), come la corrosione o la combustione, il trasferimento di elettroni avviene direttamente, cortocircuitando la cella e producendo nient'altro che calore. Nel processo di conversione che si sviluppa all'interno delle batterie l'energia passa dalla forma chimica alla forma elettrica. Non sono quindi soggette alle limitazioni del ciclo di Carnot, imposte dal secondo principio della termodinamica, come lo sono le macchine termiche. Si hanno in sostanza efficienze di conversione più elevate.

Anche se il termine "batteria" è quello più comunemente usato, nell'elettrochimica l'unità fondamentale da prendere come riferimento è detta "cella". Una batteria è più propriamente un insieme di celle collegate tra loro in serie o in parallelo (o entrambi i modi) a seconda del voltaggio e dalla capacità che si desiderano ottenere.

Le celle si classificano in:

- Primarie: sistemi elettrochimici monouso che non possono essere ricaricati in modo facile ed efficiente dopo l'utilizzo;
- Secondarie: dopo la scarica possono essere ricaricate facendovi passare corrente in direzione opposta alla corrente di scarica. Si tratta in pratica di sistemi in grado di immagazzinare energia elettrica e da ciò deriva la definizione di accumulatori;
- Di riserva: sono batterie primarie nelle quali uno dei componenti chiave viene tenuto separato dagli altri prima dell'attivazione;

- A combustibile: sono celle galvaniche simili alle batterie se non per il fatto che i materiali attivi non sono parte integrante del dispositivo ma vengono iniettati nella cella da una fonte esterna (serbatoio).

I componenti costitutivi di una cella sono sostanzialmente 3:

- Anodo (polo negativo): è l'elettrodo riducente, che rilascia elettroni nel circuito esterno ossidandosi;
- Catodo (polo positivo): è l'elettrodo ossidante, che riceve elettroni dal circuito esterno riducendosi;
- Elettrolita: è il conduttore ionico che costituisce il mezzo per il trasferimento di carica (sotto forma di ioni appunto) tra anodo e catodo. E' il responsabile della chiusura del circuito.

Altri componenti fondamentali per fini strutturali e di sicurezza sono il separatore, le griglie conduttrici, collettori, etichette, venting devices, nonspill design, involucri, contenitori.

Se la cella è secondaria, la corrispondenza tra anodo-catodo ed elettrodo negativo-positivo vale solo durante il processo di scarica. La scarica avviene quando la cella è collegata al carico gli elettroni fluiscono all'anodo attraverso il circuito esterno fino al catodo. Il circuito elettrico viene completato nell'elettrolita dal flusso di anioni e cationi diretti rispettivamente verso anodo e catodo. Durante il processo di carica invece si applica una tensione dall'esterno per fare circolare una corrente opposta a quella di scarica. L'ossidazione ha luogo sull'elettrodo positivo e la riduzione sull'elettrodo negativo: anodo e catodo si trovano sostanzialmente invertiti rispetto alla condizione di scarica.

Si riportano di seguito i parametri teorici che caratterizzano una cella elettrochimica.

- Voltaggio teorico: il potenziale standard della cella è determinato dal tipo di materiali attivi in essa contenuti. Si ricava dai potenziali standard degli elettrodi;

$$\text{Potenziale std. della cella} = \text{Potenziale di ossidazione} + \text{Potenziale di riduzione}$$

- Capacità teorica: si esprime come densità gravimetrica dell'accumulo di elettricità su entrambi i materiali elettrodici e pertanto si valuta in Ah/g;
- Energia specifica: è il valore massimo teorico di energia che può essere erogata dal sistema elettrochimico in considerazione, espresso per unità di massa o di volume. Nella pratica si ottiene solo una frazione dell'energia teorica perché nel peso della batteria sono compresi componenti che ne aumentano peso e volume come dispositivi di sicurezza e involucro;

2.1 Batterie agli ioni di litio

2.1.1 Generalità sul litio

Il litio (simbolo chimico Li) è un metallo alcalino (gruppo IA), incluso nella tavola periodica con numero atomico 3. Nella sua forma pura, è un metallo soffice color argento, che si ossida rapidamente a contatto con aria o acqua.

A temperatura ambiente, il litio è il metallo più leggero presente sulla crosta terrestre e come gli altri metalli alcalini, è altamente infiammabile e leggermente esplosivo se esposto all'aria e soprattutto all'acqua, con la quale reagisce in maniera violenta (produzione di idrogeno). È altresì corrosivo e considerato anche leggermente tossico. Le principali caratteristiche chimico-fisiche vengono riportate in tabella:

| | |
|-----------------------------------|--|
| Densità | 535 kg/m ³ |
| Struttura cristallina | Cubica |
| Isotopi (presenza in natura in %) | ⁶ Li (7.4%) e ⁷ Li (92.6%) |
| Stato di ossidazione | 1 (base forte) |
| Peso atomico | 6.941 g/mol |
| Punto di fusione | 453.69 °K (180.54 °C) |
| Punto di ebollizione | 1615 °K (1342 °C) |
| Calore specifico a 25°C | 3582 J/(Kg°K) |
| Conducibilità termica | 84.7 W/(m°K) |
| Conducibilità elettrica | 10.8 x 10 ⁻⁶ S/m |

Tab 2.1 – Caratteristiche chimico-fisiche del litio

A causa della sua elevata reattività il litio non si trova mai in natura nella sua forma pura. Si trova in molti minerali in piccole tracce, sia in salamoie che in argille un po' in tutto il mondo. Non è infatti un materiale raro: è il 27esimo elemento più abbondante al mondo. Esistono oltre 200 minerali contenenti litio ma soltanto 25 che contengono almeno il 2% di ossido di litio LiO₂ e che possono essere utilizzati come fonte di approvvigionamento, per un totale di oltre 13 milioni di tonnellate di litio estraibile ed utilizzabile a livello commerciale [5]. I minerali sfruttabili a tali fini sono riportati nella tabella seguente.

| Minerale | Formula empirica | Contenuto teorico di Li % | Contenuto tipico di Li % |
|-------------|---|---------------------------|--------------------------|
| Spodumene | LiAl(Si ₂ O ₆) | 8.03 | 1.5 - 7 |
| Petalite | LiAl(Si ₂ O ₁₀) | 4.50 | 3.0 - 4.5 |
| Amblygonite | (Li,Na)Al(PO ₄)(F,OH) | 10.1 | 8.0 - 9.0 |
| Lepidolite | K(Li,Al) ₃ (AlSi ₄ O ₁₀)(F,OH) ₂ | 7.50 | 4.0 - 5.0 |

Tab 2.2 – Minerali contenenti litio commercialmente interessanti

2.1.2 Estrazione

Le principali fonti di approvvigionamento sono i minerali e le salamoie, dall'inglese "brines". I maggiori depositi a livello mondiale sono nel North Carolina (USA), Bernic Lake (Canada), Bunbury (Australia) e Bikita (Zimbabwe). Tracce di minerale estraibile sono state rilevate anche in Europa, in

particolare nella penisola scandinava, in quella iberica, Francia e Irlanda ma non sono sufficienti per essere sfruttate a livello industriale [5].

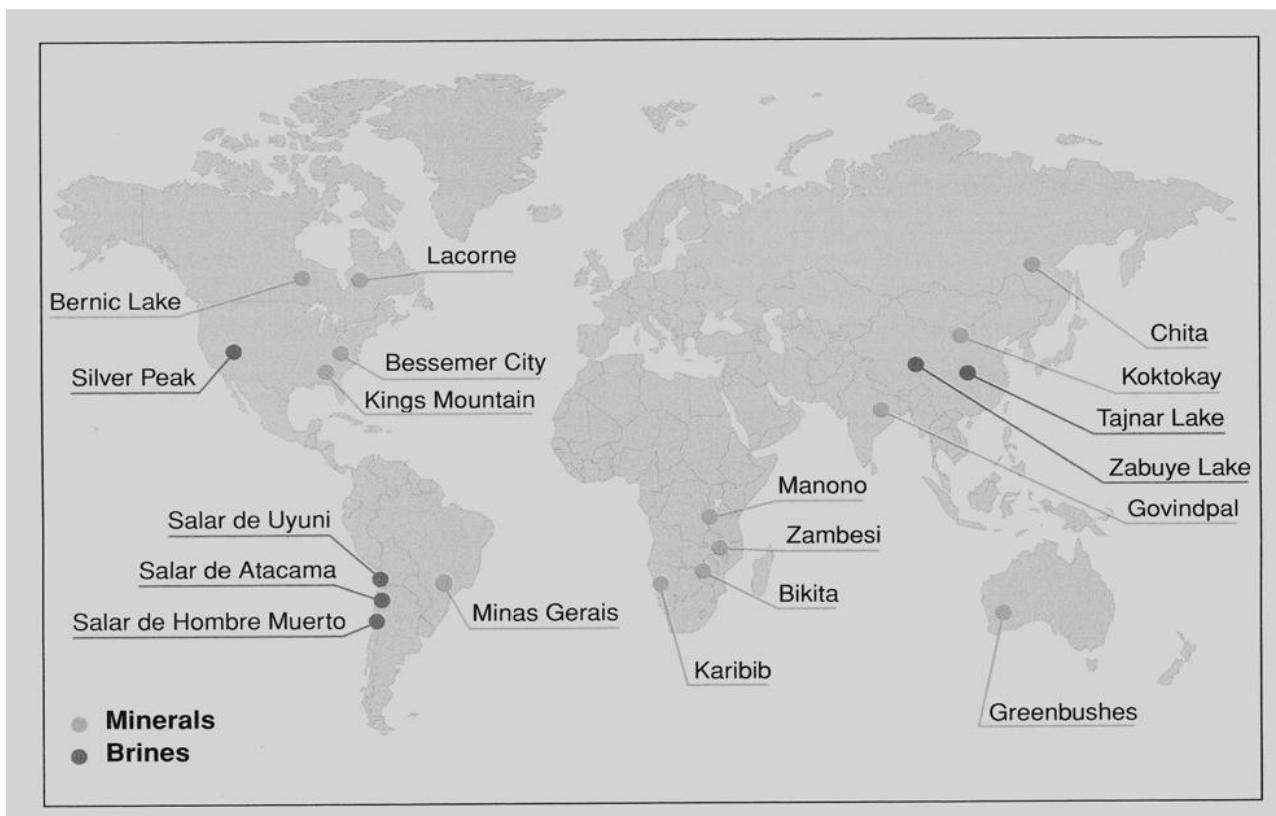


Fig 2.1 – Principali siti di estrazione del litio

Le miniere sono generalmente a cielo aperto ed il processo di estrazione è estremamente energivoro, per questo negli ultimi 50 anni il processo di estrazione si è concentrato sullo sfruttamento delle salamoie. Quelle rilevanti a livello industriale sono concentrate in poche aree de pianeta con condizioni geologiche e meteorologiche particolari, specialmente nei laghi salati. I giacimenti più importanti sono i seguenti:

| Deposito | Contenuto di litio (% in peso) |
|--|--------------------------------|
| Salar de Atacama (Chile) | 0.16 |
| Salar de Uyuni (Bolivia) | 0.032 |
| Salar del Hombre Muerto (Argentina) | 0.052 |
| Salar del Rincon (Argentina) | 0.033 |
| Silver Peak (Nevada, USA) | 0.020 |
| Great Salt Lake (Utah, USA) | 0.002 |
| Zabuye Lake (Tibet, China) | 0.068 |
| Dong Tajnar Hu (East Lake, Qinghai, China) | 0.086 |
| Acqua marina | 0.000017 |

Il processo di estrazione del litio dalle salamoie comprende sostanzialmente due fasi. Prima si effettua il pompaggio della salamoia in superficie e poi avviene il suo convogliamento in vasche di evaporazione. Qui la sostanza viene stoccata fino a 12-18 mesi per ottenere un grado di purezza necessario ad essere sfruttato nelle industrie. Le previsioni sulla richiesta di litio assumono un ruolo fondamentale in questa industria: le lunghe tempistiche dell'evaporazione vanno ad influenzare i successivi 3-5 anni di produzione industriale ed è necessario prevedere in anticipo le variazioni della domanda per evitare carenze o sovrapproduzione rispetto ad essa.

I giacimenti di salamoie più importanti si trovano in Sudamerica (in particolare Bolivia e Cile, nei laghi salati in quota sulle Ande dove si trova il 50% delle riserve mondiali), Stati Uniti e Australia.

2.1.3 Caratteristiche delle celle

Per superare le batterie cosiddette tradizionali (ad esempio quelle al piombo acido) come livello di prestazione è necessario ricercare materiali in grado di caratterizzare le celle con voltaggio teorico, capacità teorica e energia specifica maggiori e possibilmente un livello di sicurezza migliore. I metalli alcalini, soprattutto il litio, hanno non solo un'elevata capacità specifica ma anche un elevato potenziale standard. I metalli alcalini sono i migliori materiali anodici perché combinano un'alta capacità specifica con un alto potenziale di ossidazione. Su tutti spicca il litio: Li metallico 3,86 Ah/g e 3,01 V. per questo è molto utilizzato negli ultimi decenni sia nelle batterie primarie che in quelle ricaricabili [4].

I vantaggi tecnici teorici dell'utilizzo di litio per le celle si può riassumere in:

- Alto voltaggio: fino a 4 V, utile per ridurre il numero di celle per ogni batteria;
- Elevata energia specifica: >200 Wh/kg e >400 Wh/L;
- Buona densità di potenza: in base al tipo di cella si può erogare energia ad elevata corrente;
- Profili di scarica piatti: V e R costanti per un ampio intervallo di scarica;
- Funzionamento in ampio range di temperatura: -40/70°C;
- Lunghi tempi di conservazione: scarica in 1 anno con conservazione a 70°.

Il litio presenta anche degli aspetti intrinseci da tenere in considerazione:

- Elevata reattività con l'acqua, anche in tracce;
- Alta reattività con elettroliti non acquosi: l'anodo di litio tende a passivarsi, proteggendosi da reazioni secondarie indesiderate ma dando un plating non uniforme durante la carica;
- Surriscaldamento;
- Cortocircuito dendritico: con Li metallico si possono forare strutture che possono bucare il separatore e raggiungere il catodo.

Per motivi di sicurezza si è optato per la sostituzione del litio metallico con altri composti contenenti litio:

- Leghe di tipo Litio-semimetallo: come il LiAl, meno reattive ma molto fragili e con vincoli geometrici strutturali (impossibilità di costruire geometrie diverse da quella piatta);

- Composti di intercalazione del litio: come LiC_6 , $\text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$, Li_xCoO_2 , nei quali gli ioni di litio emigrano tra i due elettrodi durante i processi di carica e scarica.
- Uso di elettroliti di tipo organico, polimerico oppure allo stato solido per evitare quelli acquosi.

Questa elevata reattività deve essere bypassata se si vuole utilizzare il litio in maniera sicura nelle batterie; si è così concentrata la ricerca su composti di intercalazione del litio, che sono materiali aventi una matrice che consente l'inserzione e l'estrazione degli ioni di Li^+ in modo reversibile e senza modifiche strutturali dell'ospite.

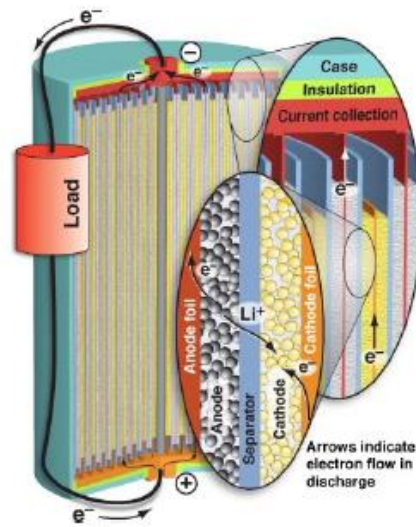


Fig 2.2 – Principio di funzionamento di una cella al litio

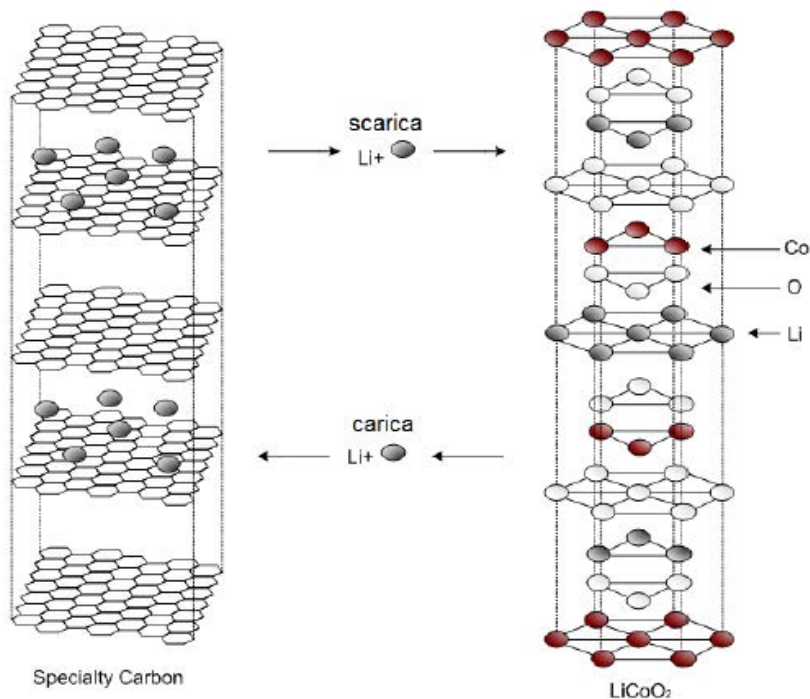


Fig 2.3 – Struttura molecolare del litio e fase di carica-scarica

Il processo tramite il quale questo tipo di celle funziona si chiama “Rocking-Chair” e prevede 3 azioni principali:

- Diffusione o migrazione dello ione Li^+ nell’elettrolita;
- Desolvatazione e inserzione negli interstizi della struttura;
- Diffusione degli ioni verso l’interno della struttura ospitante.

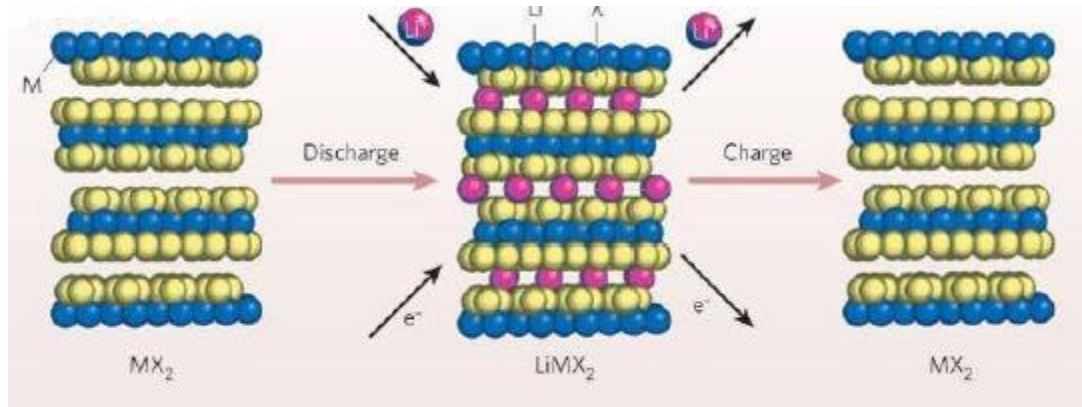
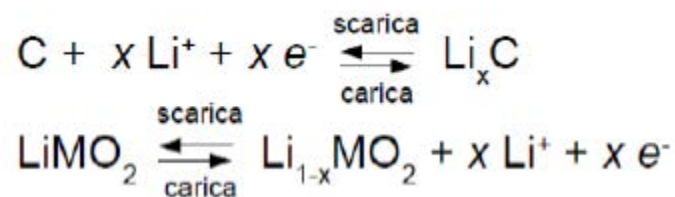


Fig 2.4 – Processo di Rocking-Chair



Tramite l’intercalazione degli ioni positivi del litio si riescono a raggiungere proprietà non molto diverse da quelle del litio metallico:

- Densità di energia di 150 Wh/kg e 400 Wh/L;
- Voltaggio compreso tra 2,5 e 4 V;
- Vita media di oltre 10000 cicli;
- Funzionamento in un ampio intervallo di temperatura;
- Lunghi tempi di conservazione.

È possibile realizzare entrambi gli elettrodi con materiale di intercalazione e si possono inserire entrambi in una cella, oppure è possibile utilizzare solamente il catodo ad intercalazione e l’anodo metallico ma occorre tenere presente che non è possibile utilizzare in quest’ultimo caso un elettrolita acquoso. Ricapitolando, per l’anodo è possibile utilizzare litio sia metallico che sotto forma di leghe oppure complessi di intercalazione con Carbonio o composti di metalli di transizione.

| Material | Voltage range vs. lithium, V | Theoretical specific capacity, Ah/g | Comments |
|--|------------------------------|-------------------------------------|--|
| Li metal | 0.0 | 3.86 | Lithium foils readily available |
| LiAl | 0.3 | 0.8 | Generally brittle foils, difficult to handle |
| Li _{0.5} C ₆ (coke) | 0.0–1.3 | 0.185 | Used for lithium-ion cells |
| LiC ₆ (MCMB (b), or graphite) | 0.0–0.1 | 0.372 (a) | |
| LiWO ₂ | 0.3–1.4 | 0.12 | Possible use for lithium-ion cells |
| LiMoO ₂ | 0.8–1.4 | 0.199 | |
| LiTiS ₂ | 1.5–2.7 | 0.266 | |

(a) Based on weight of carbon only.

(b) Mesocarbon microbeads.

Per quanto riguarda il catodo, a causa delle deboli interazioni con il litio, si può utilizzare una vasta gamma di materiali che va dai composti di intercalazione ai polimeri conduttivi, dagli elettroliti inorganici attivi a catodi allo stato solido come CuCl₂.

| Material | Average voltage vs. lithium,* V | Lithium/mole | Practical specific energy, † Wh/kg | Comments |
|----------------------------------|---------------------------------|--------------|------------------------------------|--|
| MoS ₂ | 1.7 | 0.8 | 230 | Naturally occurring |
| MnO ₂ | 3.0 | 0.7 | 650 | Inexpensive |
| TiS ₂ | 2.1 | 1 | 550 | Costly |
| NbSe ₃ | 1.9 | 3 | 450 | Costly |
| LiCoO ₂ | 3.7 | 0.5 | 500 | Good for lithium-ion system |
| LiNiO ₂ | 3.5 | 0.5 | 480 | Good for lithium-ion system |
| LiMn ₂ O ₄ | 3.8 | 0.8 | 450 | Good for lithium-ion system, safe |
| VO _x | 2.3 | 2.5 | 300 | Good for SPE system |
| V ₂ O ₅ | 2.8 | 1.2 | 490 | Good for SPE system |
| SO ₂ | 3.1 | 0.33 | 220 | Good for pulse power applications, safety issues |
| CuCl ₂ | 3.3 | 1 | 660 | Good for pulse power applications, safety issues |
| Polyacetylene | 3.2 | 1 | 340 | For polymer electrodes |
| Polypyrrole | 3.2 | 1 | 280 | For polymer electrodes |

* At low rates.

† Based on cathode material only and average voltage and lithium/mole as shown.

2.1.4 Tecnologie esistenti e tecnologie qui considerate

Ad oggi sono state scoperte molteplici tecnologie per sfruttare gli ioni di litio all'interno di batterie per ottenere caratteristiche diverse e adatte di volta in volta ai diversi campi di applicazione. Le batterie al litio più diffuse sono le seguenti [32]:

- Ossido di litio-cobalto (LiCoO_2), dette anche LiCo;
- Ossido di litio-manganese (LiMn_2O_4), dette anche LMO;
- Ossido di litio nickel manganese e cobalto (LiNiMnCoO_2), dette anche NMC;
- Fosfato di litio e ferro (LiFePO_4), dette anche LFP;
- Ossido di litio nickel cobalto e alluminio (LiNiCoAlO_2), dette anche NCA;
- Titanato di litio ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$), dette anche LTO.

Si stanno sviluppando anche nuove tecnologie promettenti ma che non sono ancora state industrializzate. Esistono quindi prototipi di batterie:

- Litio allo stato solido;
- Solfato di litio;
- Litio-aria.

Nonostante questa ampia gamma di tecnologie e studi effettuati nei laboratori di tutto il mondo, è ad oggi difficile reperire informazioni dettagliate circa la composizione delle batterie esaminate in quanto spesso sono in atto collaborazioni università-aziende e i dati sono trattati come segreto industriale.

Dopo un'attenta ricerca in letteratura si sono scelte le uniche tipologie di batterie agli ioni di litio che soddisfano i requisiti di questo studio di impatto ambientale: tecnologia adatta all'accumulo stazionario e dati sufficientemente precisi sulla composizione, per garantire risultati affidabili. Vengono di seguito analizzate le batterie al Litio-Ferro-Fosfato (LFP) e quelle all'ossido di Litio-Nichel-Manganese-Cobalto (NMC o NCM).

Litio-Ferro-Fosfato (LiFePO_4)

La tecnologia che ha portato alla scoperta di queste batterie, chiamate anche semplicemente LFP, è stata resa nota nel 1996 dall'università del Texas e basa il funzionamento della pila sul materiale catodico LiFePO_4 . Le celle sono caratterizzate da una bassa resistenza interna e di conseguenza sono adatte ad applicazioni dove è richiesta una elevata corrente di scarica (fino a 25C). Sono inoltre intrinsecamente molto sicure perché molto stabili chimicamente e offrono una elevata resistenza agli stress termici. Possono sopportare oltre 2000 cicli anche sotto grossi carichi a causa della stabilità di tensione.

Non mancano anche dei punti deboli: il potenziale medio è modesto come anche la conducibilità elettrica e ionica. Recentemente si sono parzialmente corretti questi difetti ricorrendo all'uso del carbonio sul catodo e al drogaggio dei semiconduttori. Presenta inoltre un tasso di autoscarica piuttosto elevato e una energia specifica che si attesta a 90-120 Wh/kg.

A causa della bassa energia specifica ma tenendo in considerazione sicurezza ed elevata corrente di scarica, si dimostrano adatte per l'utilizzo come SdA stazionario.

Litio-Nichel-Manganese-Cobalto ($\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$)

Questi accumulatori sono apparsi nel mercato nel 2008 grazie ad un progetto di ricerca ad opera di *Imara Corporation* e *Nissan Motor*. Il catodo è realizzato di tre materiali, nichel manganese e cobalto

appunto, con percentuali variabili in base all'applicazione. La densità energetica si attesta attorno 140-200 Wh/kg corrispondente ad un potenziale di cella di 3.7 V, resistono ad oltre 2000 cicli anch'esse ma necessitano di un adeguato circuito di protezione per ridurre i rischi di combustione della cella. Queste batterie possono lavorare in un range di temperatura che varia da -20°C a +40°C, quindi hanno bisogno di un sistema di raffreddamento non eccessivamente grande.

Ad oggi sono principalmente utilizzate nel campo dell'autotrazione ma sono presenti numerose applicazioni in campo stazionario: su tutti spicca il più grande sistema di accumulo elettrochimico al mondo collegato alla rete per la regolazione della frequenza (24 MW/9MWh), in Korea del Sud costituito proprio da batterie NMC [33].

2.1.5 Riciclo

Si stima che l'utilizzo attuale di litio sia attorno alle 25mila tonnellate l'anno e va a coprire principalmente la produzione di batterie agli ioni di litio, da quelle di dispositivi portatili come smartphone a quelle industriali. Il 60% della produzione mondiale di batterie invece nel 2012 è concentrata in Asia, con il Giappone in testa.

Le problematiche del litio per quanto riguarda la sua reattività sono note. Il litio però non si trova in grande percentuale nelle batterie Li-Ion. La sua pericolosità deriva dall'elettrolita, che solitamente è una miscela tra un solvente organico e un sale di litio: in caso di esposizione anche di breve periodo può provocare effetti negativi sulla pelle o all'apparato digestivo se ingerito.

In letteratura si trova uno studio dell'università di Padova eseguito mediante il software eco-indicator che evidenzia come le batterie al litio siano meno impattanti sull'ambiente rispetto ad altre tipologie di batterie oggi utilizzate. Lo studio è effettuato su batterie destinate all'autotrazione, infatti uno dei parametri che considera è il peso e le perdite energetiche dovute ad esso. Fatto 100 l'impatto globale delle batterie tradizionali al piombo acido misurato in DALY (Disability Adjusted Life Year, ovvero attesa di vita media corretta per disabilità), è riportato nel grafico seguente l'impatto globale per ogni tipologia considerata, suddiviso in perdite di energia dovute all'efficienza della batteria, perdite dovute al peso e l'impatto di produzione e riciclaggio [6].

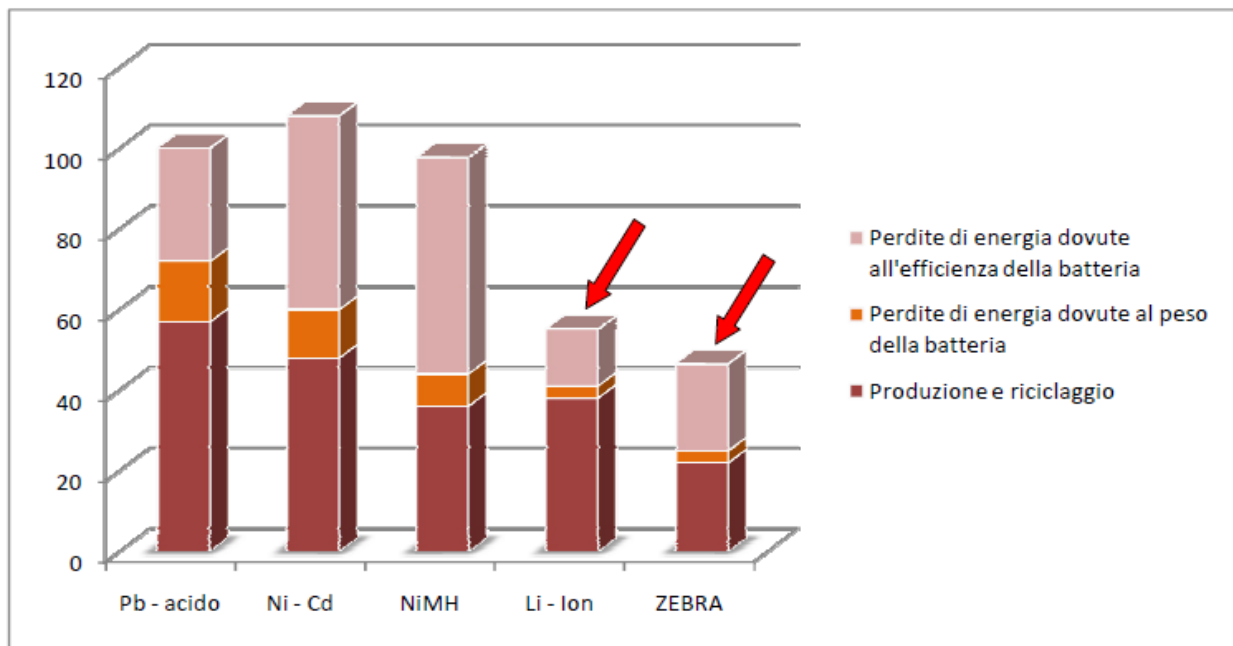


Fig 2..5 – Suddivisione degli impatti per diverse tipologie di batteria

Volendo rapportare lo studio sulle batterie per autotrazione al caso in questione di batterie stazionarie per l'accumulo industriale, si può considerare solamente l'impatto dovuto a produzione e riciclaggio: si nota come sia comunque inferiore a quello delle batterie al piombo acido e al nichel-cadmio, circa pari a quello delle batterie al nichel metal idrato e superiore a quello della tecnologia recente ZEBRA.

Le batterie hanno generalmente una composizione chimica complessa, che spesso si modifica nel tempo per rispondere alle esigenze del mercato: in particolare le nuove batterie hanno una notevole complessità ma un minore valore economico rispetto al passato. Le tecnologie attualmente esistenti per un riciclo quasi totale che punti ad essere conveniente anche sotto l'aspetto economico sono quattro, come si vede nella figura sottostante, ma quelle ampiamente diffuse sono soltanto due [8].

Alcune delle batterie al litio in commercio contengono cobalto; essendo questo materiale una terra rara è importante poterlo recuperare per far fronte a eventuali difficoltà di approvvigionamento. Per il suo recupero è possibile utilizzare un solo metodo oggi giorno che sia economicamente conveniente.

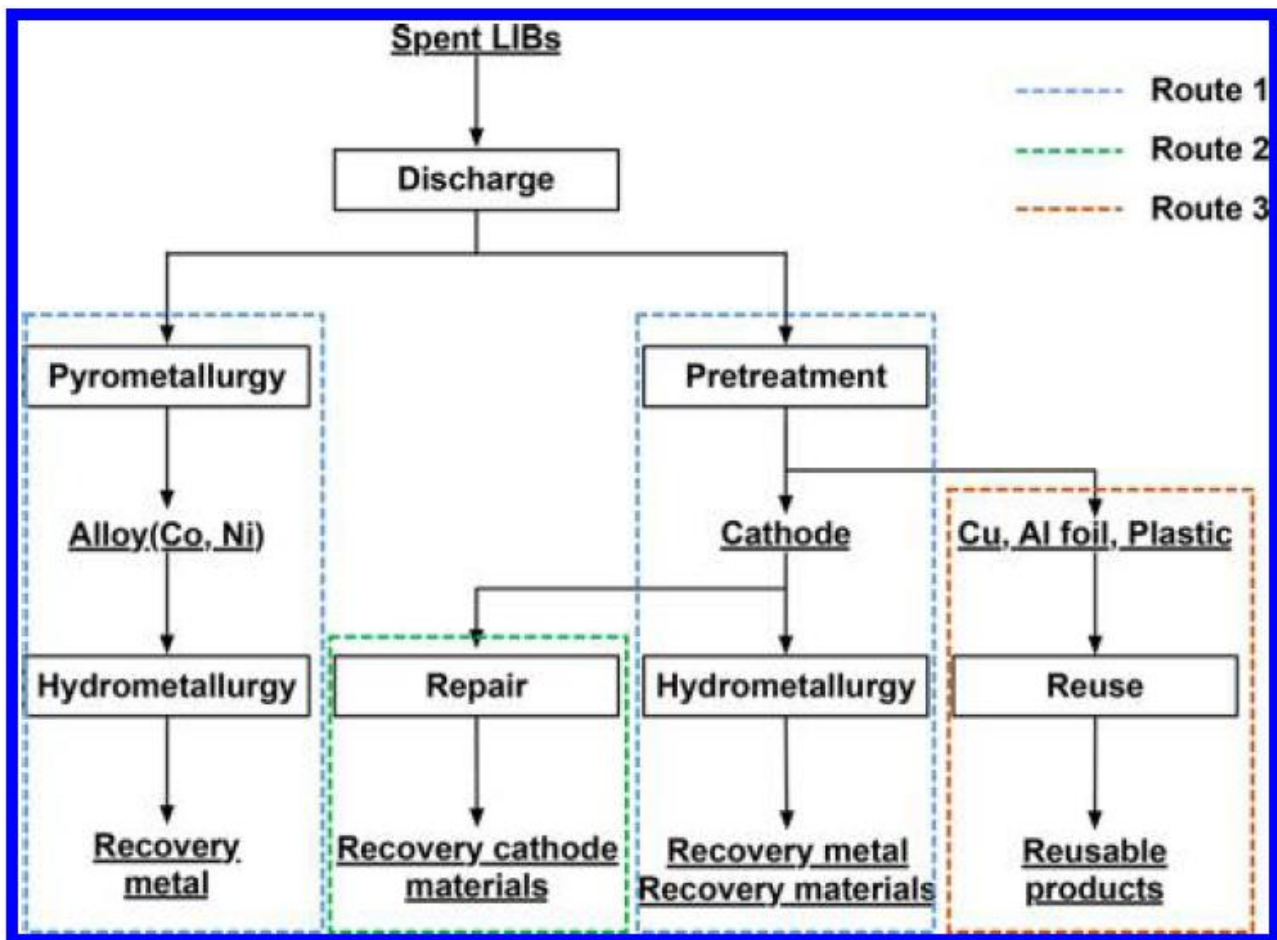


Fig 2.6 – Principali processi di riciclo delle batterie al litio

Il processo pirometallurgico nasce per trattare le batterie NiMH e quelle Li-Ion per il recupero di litio e cobalto e nichel da dispositivi elettronici e veicoli ibridi. È un processo altamente energivoro a causa delle elevate temperature e le elevate correnti in gioco, suddiviso nelle seguenti fasi:

- Fusione: la batteria entra in un forno dove si bruciano materie plastiche, si fa evaporare l'elettrolita e si fondono i metalli;
- Raffinazione e purificazione: è un processo idro metallurgico dove la lega è introdotta in acido solforico. Dopo alcune fasi si ottiene NiSO_4 e CoCl_2 ;
- Il solfato di nichel viene usato per estrarre cristalli di Ni(OH)_2 idrossido di nichel che dopo la purificazione è utilizzato in nuove batterie;
- Il cloruro di cobalto è ossidato in un forno per ottenere ossido di cobalto, che dopo aver reagito con l'ossido di litio forma il LiCoO_2 litio cobalto ossido ed è pronto per l'utilizzo in nuove batterie.

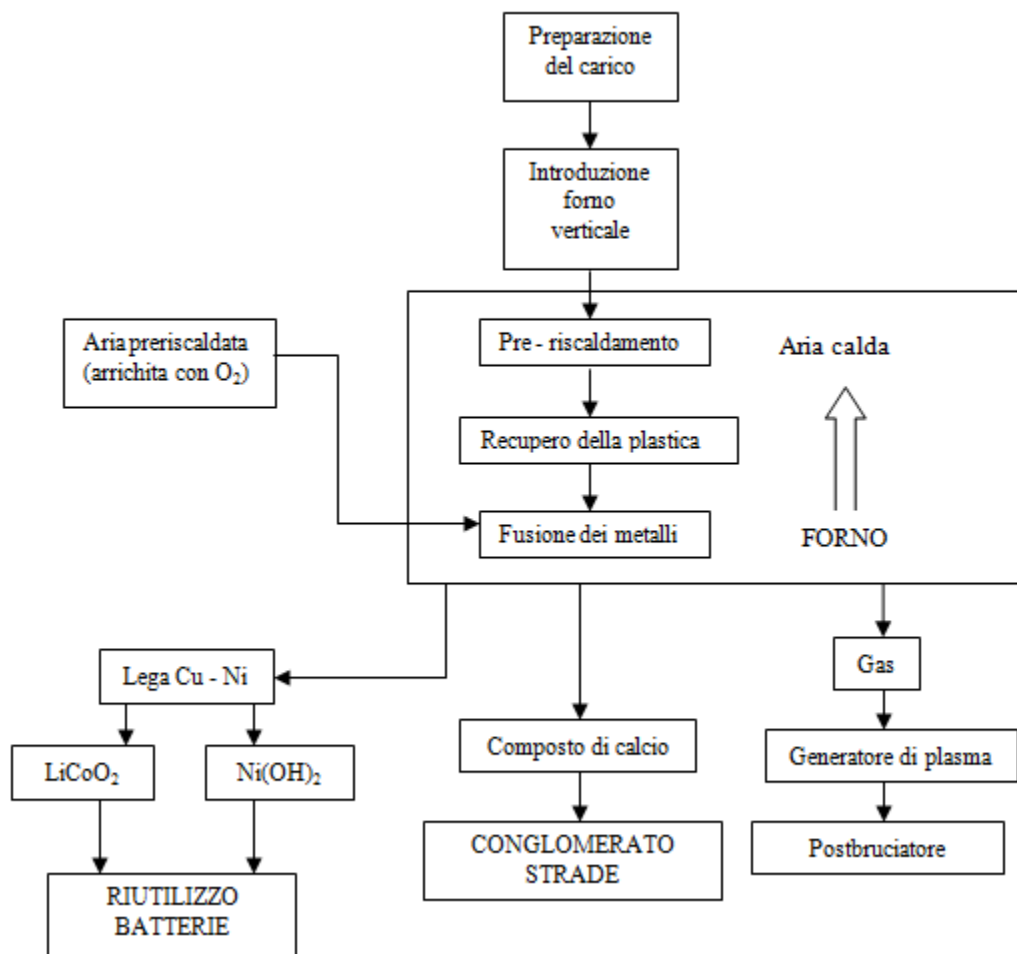


Fig 2.7 – schema di processo pirometallurgico

Il processo idrometallurgico ha lo scopo principale di recuperare il litio. Dopo la scarica completa delle batterie, queste vengono raffreddate a temperature criogeniche per ridurre la reattività delle sostanze, smontate e inviate alle vasche con le sostanze liscivianti. Il parametro fondamentale dell'intero processo è il pH assieme alla quantità di sodio. Alla fine del processo si riesce ad ottenere idrossido di litio, che può essere riutilizzato direttamente o sotto forma di carbonato di litio. Di seguito si riportano tutte le fasi del processo idrometallurgico [7].

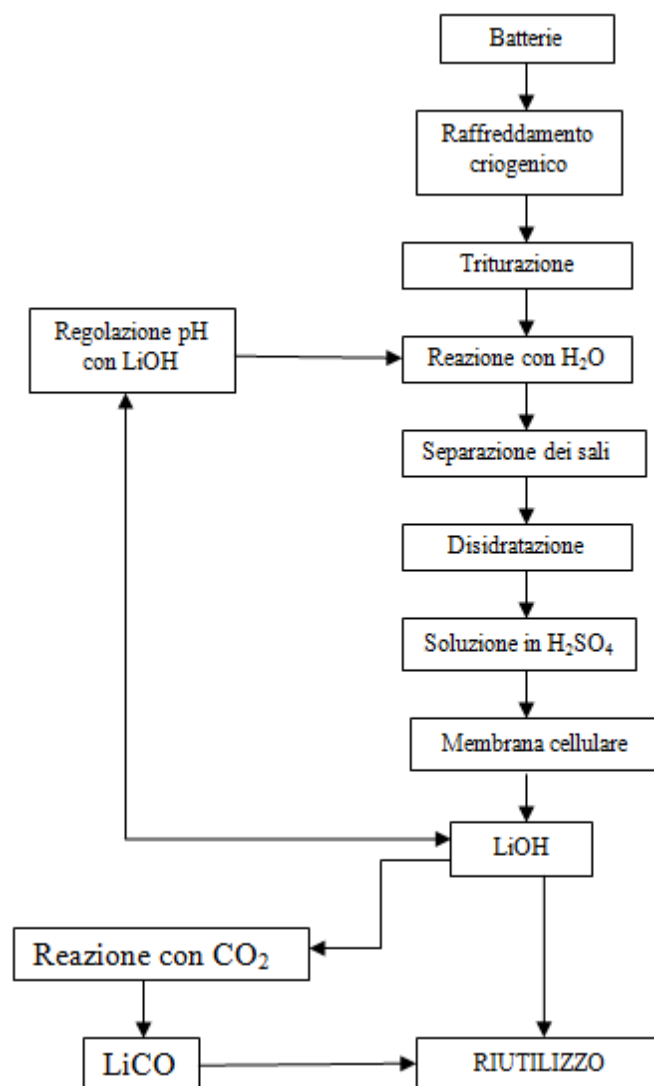


Fig 2.8 – Schema di processo idrometallurgico

Come si è già detto non sempre è conveniente riciclare le batterie di piccola taglia perché il contenuto in litio è inferiore al 2% in peso, e questo non è spesso economicamente sostenibile rispetto all'approvvigionamento di nuove materie prime. Per le batterie stazionarie di taglie elevate invece questo processo di riciclo comincia ad essere competitivo data a grande quantità di litio, in termini assoluti, ricavabile dalle singole batterie. Il processo più utilizzato nella pratica è un mix tra quello idrometallurgico, per l'estrazione del litio e il contenimento e quello pirometallurgico, indispensabile per l'estrazione del cobalto [8].

Se dal punto di vista del consumo energetico si fatica a trovare conveniente il riciclo di queste batterie, studi dimostrano come dal punto di vista dell'inquinamento ambientale il riciclo dei materiali da vecchie batterie comporta sempre un beneficio in termini di riduzione delle emissioni.

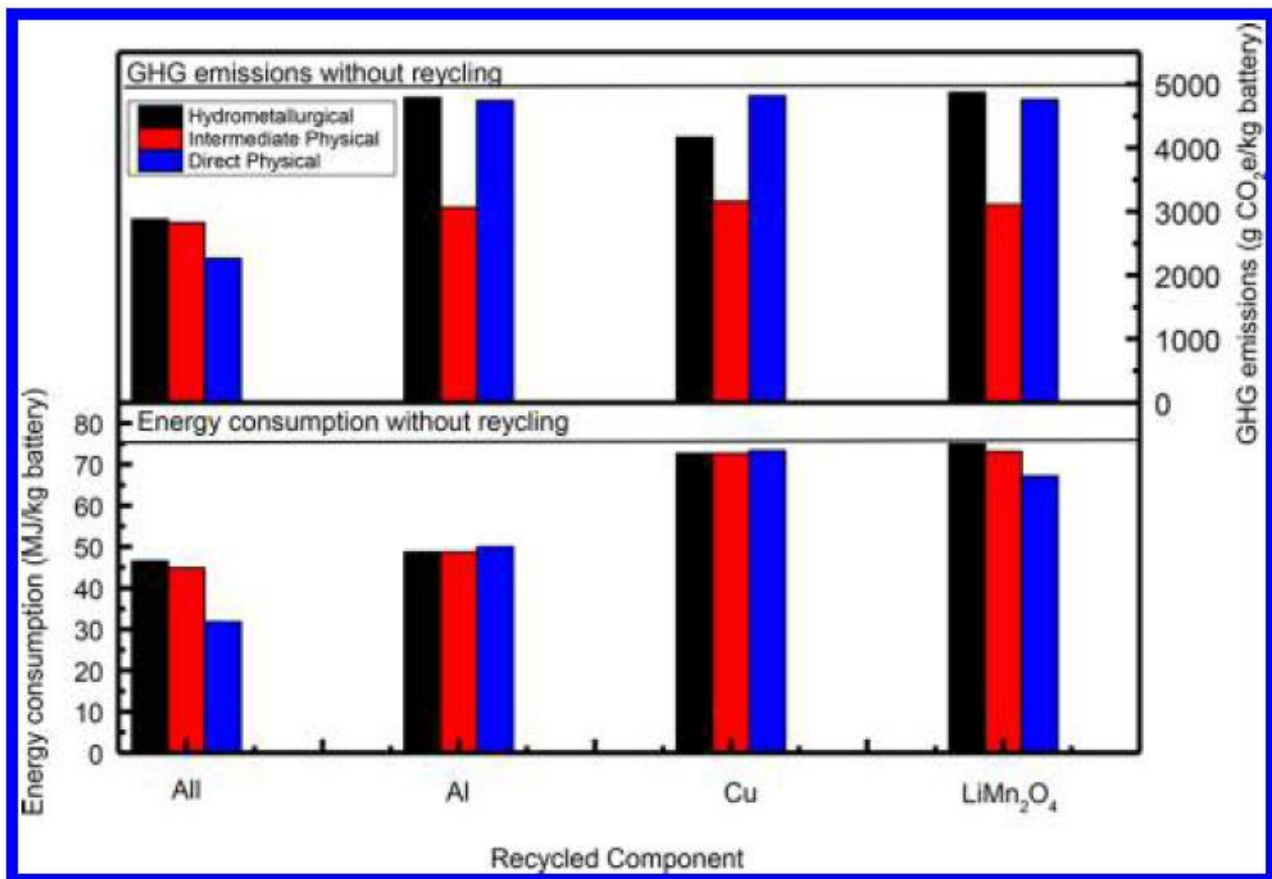


Fig 2.9 – Energia consumata dai vari processi di recupero del litio

2.2 VRFB

2.2.1 Storia

Le origini delle batterie a flusso risalgono alla fine del XIX secolo, ma solo dalla metà del '900 sono state riprese in mano e hanno cominciato ad avere uno sviluppo interessante e continuativo grazie all'evoluzione del panorama energetico internazionale: a causa della crescente penetrazione delle FRNP si presenta la necessità di avere sistemi di accumulo stazionario efficienti e duraturi per garantire un servizio stabile, sicuro ed affidabile.

La prima batteria a flusso della storia aveva come reagenti zinco e cloro ed era atta all'alimentazione di un dirigibile. L'utilizzo del vanadio come reagente fu proposto nel 1933 da Pissort che ne depositò il brevetto e seguito con interesse dai ricercatori della NASA dagli anni '70 per eventuali applicazioni in ambito spaziale [11]. L'antenato vero e proprio delle moderne batterie al vanadio in soluzione acida è il prototipo ottenuto da Maria Skyllas-Kazakos et al. nel 1984 presso l'Università del Nuovo Galles del Sud [12].

L'entusiasmo dato dalla nuova scoperta tecnologica e dalle continue ricerche negli anni '70 e '80 si affievolì ben presto a causa della scarsa competitività rispetto alle altre tecnologie nascenti, una su tutte le batterie agli ioni di litio, perché le applicazioni principali erano di tipo mobile e a causa del peso e del costo le batterie a flusso non risultavano idonee. Recentemente invece si è presentata la necessità di accumulatori elettrochimici come strumento di stabilizzazione del sistema elettrico e

dunque questa tipologia di batterie è stata riportata in auge. La ricerca in questo ambito si è intensificata e ha portato alla scoperta di nuove coppie redox per l'ottimizzazione delle prestazioni. In commercio attualmente si trovano, oltre al tipo vanadio-vanadio, anche batterie zinco-bromo, ferro-cromo, vanadio-bromo e vanadio ossigeno [13].

Uno dei vantaggi indiscussi della variante vanadio-vanadio rispetto alle altre coppie di reagenti consiste nella scelta di diversi stati di ossidazione appartenenti alla stessa specie chimica: si va ad evitare la contaminazione delle soluzioni che rende il processo irreversibile e si va dunque ad aumentare sensibilmente la vita utile della cella.

2.2.2 Principio di funzionamento

Le batterie a flusso sono sistemi elettrochimici nei quali grazie a reazioni di ossidoriduzione avviene la conversione di energia chimica, posseduta dagli elettroliti, in energia elettrica o viceversa.

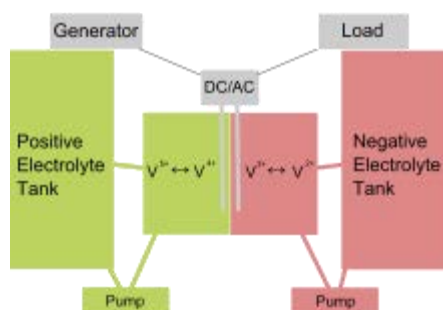


Fig 2.10 - Schema d'impianto semplificato di una batteria a flusso

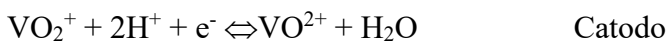
Come si nota dall'immagine le soluzioni elettrolitiche sono conservate in appositi serbatoi e fluiscono nella batteria per mezzo degli elettrodi. Le reazioni ed il trasferimento di carica avvengono sulla superficie porosa degli elettrodi. Il flusso di elettroni che si ottiene fluisce attraverso un circuito elettrico esterno. Le soluzioni devono essere mantenute sempre separate, per questo è di fondamentale importanza la membrana a scambio ionico che viene interposta fra di esse: questa consente il trasferimento di ioni tra le semicelle ma impedisce il passaggio di elettroni, costretti al passaggio attraverso il circuito esterno generando la corrente utile.

In questo elaborato si prenderà in considerazione soltanto la batteria al vanadio come rappresentante per le batterie a flusso (VRFB: Vanadium Redox Flow Battery). Per questo tipo di cella gli elettroliti sono sostanzialmente due soluzioni di ioni di vanadio in acqua e acido solforico. Queste soluzioni sono pompate dai serbatoi alle rispettive semicelle dove avvengono l'ossidazione e la riduzione: gli elettroni scambiati sono trasportati tramite la matrice porosa dall'elettrodo in carbonio fino ai collettori di corrente attraverso piatti in grafite. Per separare gli elettrodi viene solitamente utilizzata una membrana polimerica a scambio cationico a base di Nafion, permeabile ai protoni ma non alle altre specie chimiche.



Fig 2.11 - Differenti stati di ossidazione del vanadio in soluzione. Da sinistra: V^{2+} , V^{3+} , V^{4+} , V^{5+} . [14]

Le reazioni principali che coinvolgono i quattro stati di ossidazione del vanadio sono ben distinguibili anche dal colore che presentano in soluzione. Le equazioni seguenti riportano da sinistra verso destra la fase di scarica della batteria all'anodo.



La reazione complessiva e ne deriva è la seguente:



Il coinvolgimento dei soli protoni nella reazione complessiva comporta che oltre allo stato di ossidazione del vanadio vari anche il pH delle soluzioni in gioco. Queste reazioni utili non sono le uniche a coinvolgere la carica durante l'esercizio della batteria: sono note diverse reazioni secondarie che vanno a ridurre l'efficienza globale del sistema. Queste reazioni parassite, come l'evoluzione di idrogeno e ossigeno, sono sempre presenti ma diventano significative soltanto per le elevate correnti dunque è possibile trascurarle.

Il potenziale standard di batteria all'equilibrio è dato dalla differenza tra il potenziale standard di reazione di riduzione e quello di ossidazione:

$$E_C^{0'} = 1,004 \text{ V}$$

$$E_A^{0'} = -0,255 \text{ V}$$

$$E^{0'}_{\text{cella}} = E_C^{0'} - E_A^{0'} = 1,259 \text{ V}$$

Generalmente le applicazioni prevedono più stack collegati in serie per fornire un voltaggio superiore a quello del singolo stack, adeguato alle necessità del carico in questione. Vengono utilizzati dei collettori bipolari per gli stack, per motivi di compattezza ed efficienza. E' possibile poi modificare a piacere i collegamenti tra stack per ottenere i valori di corrente e tensione desiderati.

Lo stato di carica (SOC: State Of Charge) per una VRFB con le stesse quantità di ioni vanadio nei due serbatoi si può esprimere come:

$$SOC = \frac{c_{V^{2+}}}{c_{V^{2+}} + c_{V^{3+}}} = \frac{c_{V^{5+}}}{c_{V^{5+}} + c_{V^{4+}}}$$

Dove le c_i rappresentano le concentrazioni di ioni vanadio negli elettroliti.

In linea teorica è possibile determinare lo stato di carica durante il funzionamento della batteria attraverso la misura della sola tensione a circuito aperto (OCV: Open Circuit Voltage). Si ricava infatti per mezzo dell'equazione di Nernst il legame tra SOC e OCV:

$$OCV = E^{0'}_{\text{cella}} + \frac{RT}{F} \ln\left(\frac{c_{V^{2+}} * c_{V^{5+}} * (c_{H^+}^C)^2}{c_{V^{3+}} * c_{V^{4+}}}\right) + \frac{RT}{F} \ln\left(\frac{c_{H^+}^C}{c_{H^+}^A}\right)$$

Dove R è la costante dei gas, T la temperatura, F la costante di Faraday, c_i le concentrazioni degli ioni nelle soluzioni.

La relazione tra SOC e OCV può essere rappresentata nel diagramma seguente:

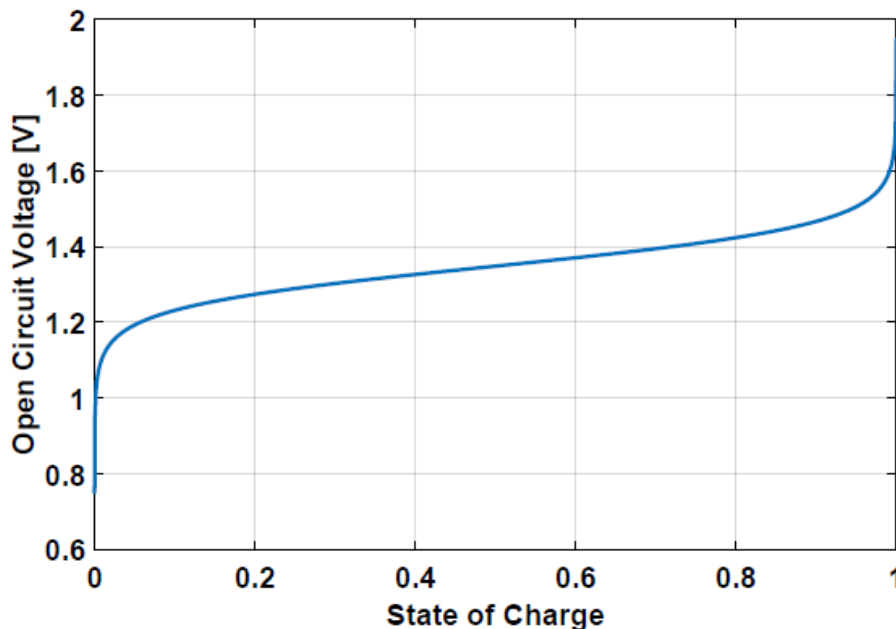


Fig 2.12 - Ricostruzione della relazione SOC-OCV

Dal grafico si evince come in caso di soluzioni molto cariche o molto scariche a piccole variazioni di carica corrispondono elevati gradienti del potenziale di circuito aperto, che rappresenta le prestazioni del sistema.

È opportuno menzionare che le relazioni sopra descritte sono di carattere generale. E' possibile correggerle tenendo conto di alcuni aspetti come lo sbilanciamento della batteria ma sono approfondimenti che esulano dall'obiettivo di questo elaborato.

Infine il rendimento della batteria si può esprimere per mezzo di tre parametri:

- Efficienza di carica, che esprime quanto bene gli elettroni sono trasferiti dal sistema. Generalmente è limitata dal *crossover* (attraversamento della membrana da parte delle specie attive a causa dell'elevato gradiente di concentrazione) e dalle reazioni parassite. Questa efficienza risulta maggiore se la batteria è ciclata ad alte densità di corrente perché esso limita il tempo a disposizione di questi ioni di attraversare la membrana.

$$\eta_c = \frac{\text{Capacità di carica}}{\text{Capacità di scarica}} * 100$$

- Efficienza di tensione, che descrive le perdite ohmiche e per crossover. Ha valore decrescente al crescere della densità di corrente perché con essa aumentano le perdite ohmiche.

$$\eta_v = \frac{\text{Tensione media in scarica}}{\text{Tensione media in carica}} * 100$$

- Efficienza energetica, che descrive il rendimento complessivo della batteria.

$$\eta_E = \eta_c * \eta_v$$

È pertanto chiaro come per ottimizzare le prestazioni globali di una VRFB è necessario ponderare e calcolare attentamente ogni tipo di intervento su entrambi i parametri in gioco.

2.2.3 Caratteristiche peculiari

Le batterie a flusso hanno portato molto entusiasmo nell'ambito degli accumulatori sin dalla loro scoperta, per le loro peculiari caratteristiche che le distinguevano dalle tipologie già esistenti. Nell'ambito dell'accumulo stazionario in particolare i tratti distintivi di questa tecnologia sono:

- Indipendenza fra potenza erogata ed energia stoccata. La prima è proporzionale alla superficie della cella elettrochimica, all'area specifica attiva degli elettrodi e alla composizione e geometria degli stack, mentre la seconda dipende dalla concentrazione dei reagenti nelle soluzioni e dal volume degli elettroliti. Questo è un notevole vantaggio sia per la scalabilità dell'impianto, indipendentemente dal caso di ripotenziamento o di rivalutazione, sia per un fattore progettuale che permette di evitare un eccessivo sovradimensionamento degli stack. Stoccare energia soltanto nelle specie attive significa anche semplicità di approvvigionamento nelle situazioni di mancanza di energia elettrica dalla rete, come nelle applicazioni off-grid o anche un semplice black-out prolungato: è sufficiente sostituire meccanicamente le soluzioni e la batteria è pronta istantaneamente.
- Vita utile estremamente lunga, potenzialmente infinita. Le reazioni di ossidoriduzione avvengono sulla superficie degli elettrodi porosi: essi non sono coinvolti nello scambio di materia ma forniscono solo i siti attivi su cui far avvenire lo scambio di carica. Pertanto a fronte di un esercizio corretto la degradazione delle batterie è pressoché nulla. Queste batterie possono subire anche cariche e scariche complete a frequenze molto alte e per un alto numero di cicli: almeno 13000 [43], ma possono arrivare senza particolari problemi fino a 20000 [44]. Gli elettroliti invece hanno una vita utile elevata a causa delle caratteristiche intrinseche del vanadio: la scelta di avere lo stesso elemento in entrambe le reazioni minimizza la possibilità di avere conseguenze relative all'inevitabile contaminazione da una semicella all'altra. Nonostante la bontà delle membrane è impossibile eliminare del tutto il crossover da parte degli ioni attivi. Nel caso di batterie con reagenti questo crossover determinerebbe anche una degradazione inevitabile e irreversibile. Nelle VRFB l'unica conseguenza del crossover è una

progressiva riduzione della capacità della batteria. A differenza delle altre batterie a flusso, la tecnologia vanadio-vanadio presa in considerazione permette di ripristinare la capacità iniziale periodicamente rimescolando e ribilanciando le soluzioni. Ne consegue una manutenzione relativamente semplice ed economica.

- Cinetica delle reazioni intrinsecamente veloce e sostanziale assenza di inerzie nell'impianto, che permettono di ottenere in ogni situazione un tempo di risposta molto ridotto. Una qualità utile nel caso della regolazione in frequenza perché permette alle VRFB di essere molto più veloce in questo servizio rispetto ai più comuni generatori nell'assestare le richieste di potenza nell'ordine dei millisecondi. Queste batterie presentano anche tempi di scarica molto flessibili andando a minimizzare il problema dell'auto-scarica grazie alla conservazione dell'elettrolita in serbatoi esterni e separati dal resto della batteria.

L'efficienza globale di una VRFB si attesta a valori che vanno dall'80 al 90% per impianti di taglia medio-grande. Anche l'affidabilità è elevata a causa delle caratteristiche intrinseche della batteria [15].

Le potenzialità di questa tecnologia non riescono però a mascherare alcuni aspetti critici, riassumibili in:

- Densità energetica piuttosto scarsa, con valori compresi tra 10 e 75 Wh kg⁻¹ [16], e la densità di potenza presenta valori di picco inferiori a 800 MW cm⁻¹ [17]. Sono valori relativamente bassi se paragonati con le batterie tradizionali. Al momento i fattori che determinano queste caratteristiche non eccezionali sono tre: il ridotto potenziale di cella, il limitato numero di elettroni trasferiti dalla reazione di ossidoriduzione e la solubilità del vanadio nelle soluzioni, che limita la concentrazione massima dei reagenti. La solubilità del vanadio costringe il sistema a lavorare in un range di temperatura piuttosto ristretto, dai 10 ai 35°C, per evitare la formazione di precipitato nei diversi stati di ossidazione. Questi aspetti portarono dapprima ad una limitazione dell'interesse per queste batterie perché all'epoca della scoperta le applicazioni principali erano di tipo mobile, ma con la necessità attuale di implementare impianti stazionari di accumulo nelle reti di distribuzione di energia elettrica questa problematica non è più limitante in senso assoluto.
- Elevato costo di elettroliti e membrane, che insieme rappresentano le maggiori voci di costo dell'intera batteria [18], più dettagliatamente descritti nel capitolo 3.2.4.
- Attenta progettazione della distribuzione delle soluzioni dai serbatoi alle celle elettrochimiche per minimizzare il fenomeno delle short currents. Gli ioni presenti negli elettroliti li rendono conduttivi e la differenza di potenziale tra le diverse celle di uno stack può indurre alla formazione di correnti parassite da una cella all'altra, facilitati dalla presenza dei canali di alimentazione: è necessario progettare un adeguato sistema di controllo che va ad alternare le celle interessate nell'esercizio della batteria per ridurre questa differenza di potenziale oppure creare tramite soluzioni progettuali una resistenza adeguata per evitare il passaggio di queste correnti che rappresentano una perdita a tutti gli effetti.

2.2.4 Analisi dei costi

Le batterie a flusso si trovano già da diversi anni in commercio, ciononostante i costi generalmente sono ancora lontani dall'essere competitivi e accettabili a livello assoluto per l'adozione di massa di questa tecnologia nei sistemi d'accumulo. Gli obiettivi proponevano una progressiva riduzione del

costo capitale a 250 \$ kWh⁻¹ entro il 2015 per arrivare a 100 \$ kWh⁻¹ nel 2030 [19], ma le prospettive non sono rosee dal momento che al 2015 i costi si attestavano a poco meno di 400 \$ per ogni chilowattora [16], senza considerare i costi di esercizio e manutenzione.

Nella tabella seguente si riportano le principali voci di costo e il relativo impatto sul totale, riferito ad una batteria di medie dimensioni che corrisponde ad una quantità di V₂O₅ pari a 6 kg kWh⁻¹ ed una superficie di 1,75 m²kWh⁻¹.

| Componente di costo per la VRFB | Quota sul totale % |
|--|--------------------|
| V ₂ O ₅ soluto | 28 |
| Produzione degli elettroliti | 10 |
| Stoccaggio | 7 |
| Costo totale dello stoccaggio | 45 |
| Elettrodi di carbonio | 7 |
| Collettori di corrente bipolari | 2 |
| Membrana a scambio ionico | 2 |
| Struttura e costi associati | 19 |
| Serbatoi per gli elettroliti (x2) | 8 |
| Pompe (x2) | 7 |
| Sistemi di controllo | 10 |
| Costo totale della cella elettrochimica | 55 |
| Costo di capitale totale | 100 |

Tabella 2.4 – Scomposizione dei costi interni di una VRFB

Si nota come i costi di capitale si possano suddividere in tre componenti principali: costi per lo stoccaggio di energia, costi del sistema di conversione della potenza, costi per il bilanciamento dell'impianto.

La cella elettrochimica costituisce sostanzialmente il sistema di conversione dell'energia, che comprende anche i sistemi per il bilanciamento mentre lo stoccaggio è demandato agli elettroliti.

I costi di conversione e di bilanciamento sono proporzionali alla potenza installata, mentre lo stoccaggio dipende dall'energia che si desidera immagazzinare: va quindi effettuata un'attenta analisi che tiene conto dell'omogeneità dei tempi di carica e scarica.

Si ha ampio margine per la riduzione dei costi sulla parte delle tecnologie di produzione e nei materiali: la vita utile degli elettroliti è piuttosto lunga, molto superiore a quella degli altri componenti dunque è possibile riciclare e riutilizzare questo materiale anche diverse volte. E' anche nota la flessibilità dei tempi di carica e scarica che combinati alla vita utile (oltre 13000 cicli per 10 anni [19]) hanno un impatto positivo sui costi del ciclo di vita che va a comprendere sia l'installazione che la manutenzione e la dismissione.

Infine è necessario confrontare i costi totali con la finalità di utilizzo della batteria: si è visto come le batterie a flusso possono essere competitive in termini di prestazioni nella regolazione in frequenza e nel livellamento del carico. In quest'ottica i margini di miglioramento di questa tecnologia sono interessanti e le prospettive di miglioramento elevate.

2.2.5 Stato dell'arte

Il cuore pulsante delle batterie a flusso è la *Membrane Electrodes Assembly*, abbreviata in MEA, ossia l'insieme degli elettrodi e della membrana polimerica tra essi interposta.

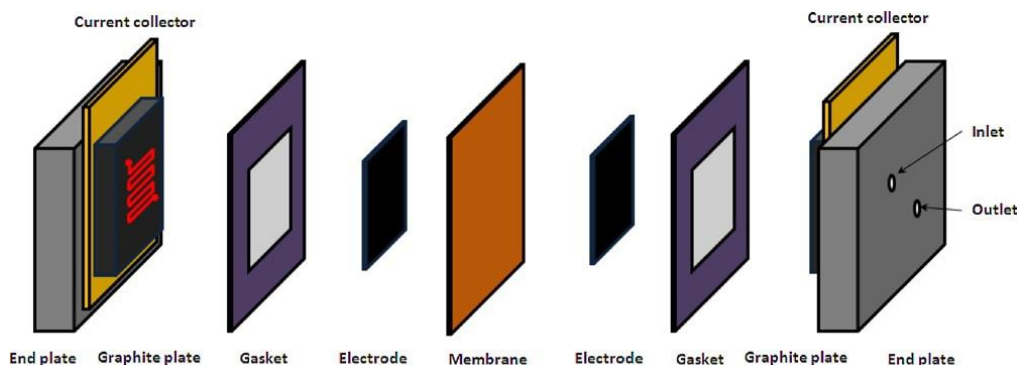


Fig 2.13 – Esplosivo dei componenti della cella elettrochimica per una batteria a flusso

Dalla figura si può comprendere facilmente quali siano i componenti principali di una cella. A diretto contatto con la membrana, che separa le due semicelle, si trovano gli elettrodi carboniosi. Il flusso attraverso essi è distribuito attraverso schemi ricavati nella matrice in grafite stampata che trasmette inoltre il flusso di elettroni ai collettori di corrente, a loro volta collegati allo strumento di analisi. Una guarnizione di materiale plastico contorna l'elettrodo a garanzia di una protezione meccanica nelle fasi di montaggio.

La membrana è dunque un componente critico per diversi aspetti: il costo, dal momento che non gode di economie di scala in questo periodo storico, la sua durabilità, che va a limitare la vita utile di tutto il sistema essendo di materiale che si degrada nel tempo, e infine le prestazioni, che devono combinare diversi aspetti come bassa resistenza, elevata stabilità chimica e meccanica in ambiente ossidante e ridotta permeabilità agli ioni vanadio. Tradizionalmente le membrane utilizzate sono di tipo polimerico perfluorinato a scambio cationico come il Nafion, non esente da elevato costo e permeabilità non trascurabile. La ricerca in questo ambito è mirata a materiali più selettivi e più economici.

La potenza generata dalla batteria è principalmente determinata dagli elettrodi, che sono sede sia della reazione sia della facilitazione di trasporto di elettroni e reagenti nelle varie fasi. È importante scegliere con cura le loro configurazioni per ottimizzare le qualità e minimizzare le perdite cinetiche, ohmiche e di trasporto di materia.

I materiali carboniosi sono tra i pochi a presentare alta conduttività per area superficiale, ampio range di condizioni per la reazione degli elettroliti e basso costo, con una buona stabilità in un ambiente fortemente ossidante e acido. Nonostante questo presentano alcune inefficienze per gli ioni vanadio [20] e si rende necessario trattare la loro superficie termicamente e per mezzo di reazioni di ossidazione. Recentemente si sono applicati grafene e materiali a base di nanotubi di carbonio (CNT Carbon Nano Tubes) come elettrodi alle VRFB con risultati positivi.

L'energia totale della batteria, al contrario delle reazioni che avvengono nella cella elettrochimica, è immagazzinata nei serbatoi per mezzo di soluzioni elettrolitiche attive, altro elemento critico per le batterie a flusso. Nel caso qui considerato di una VRFB le soluzioni sono ottenute sciogliendo Sali di

vanadio in una soluzione di acqua e acido solforico: il costo è elevato e la solubilità del vanadio è scarsa. Generalmente si usa solfato di vanadio $VOSO_4$, ma spesso per motivazioni economiche si utilizza il pentossido di vanadio V_2O_5 noto anche come anidride vanadica. E' importante ricordare che l'anidride vanadica è estremamente tossica se respirata e dannosa per l'ambiente, il che richiede maggiori precauzioni nelle fasi di lavorazione.

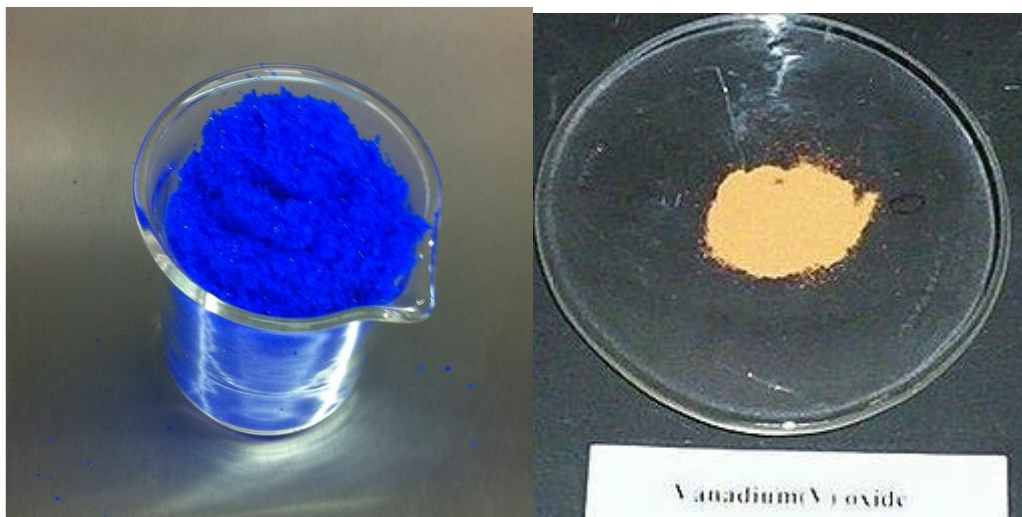


Fig 2.14 – Da sinistra, sali di solfato di vanadio e Anidride vanadica.

Il pentossido di vanadio, preso come riferimento per questo elaborato, forma una sospensione nell'acido solforico, che deve essere ridotta elettrochimicamente per ottenere una soluzione di $VOSO_4$ e V^{3+} in cui gli ioni di vanadio hanno valenza +3.5. Anche questa soluzione deve essere caricata in una *VRFB* ma in questo caso si ottengono in un unico passaggio le soluzioni scariche di V^{3+} all'anodo e V^{4+} al catodo [21]. La sostanziale differenza fra i due metodi di preparazione è la concentrazione finale dei protoni nei compartimenti catodico ed anodico, in quanto essi sono coinvolti nelle reazioni di ossidoriduzione, ma le soluzioni ottenute a partire da $VOSO_4$ ne consumano una maggiore quantità. Di conseguenza a cavallo della membrana si mantiene in entrambi i casi la stessa differenza fra le concentrazioni di protoni, ma non lo stesso rapporto; ciò influenza il potenziale di circuito aperto della batteria.

Il vantaggio sostanziale delle soluzioni vanadio-vanadio consiste nella robustezza alla contaminazione con gli ioni dell'altra semicella, anche se non sono esenti dalla degradazione data dalle reazioni secondarie che possono essere corrette periodicamente mediante trattamenti chimici o elettrochimici.

Il limite principale all'accrescimento della densità energetica è al momento la solubilità dei reagenti. Non è sufficiente aumentare la concentrazione degli elettroliti oltre un certo valore perché valori elevati di concentrazione dell'acid porterebbero ad un aumento della viscosità degli elettroliti e con essa i consumi degli ausiliari, oltre ad uno sbilanciamento in termini di massa tra soluzione catodica e anodica all'interno delle semicelle.

La ricerca di additivi a base di fluoro e cloro per migliorare l'attività elettrochimica degli elettroliti è agli albori e presenta un notevole margine di miglioramento.

I rimanenti elementi del sistema non presentano particolari criticità se non la scelta di materiali adeguati a lavorare in ambiente acido e all'ottimizzazione dei volumi occupati. L'installazione di batterie a flusso, in particolare le VRFB, non presenta impatto ambientale: non sono presenti organi in movimento oltre alle pompe dunque rumore nullo, temperature operative inferiori a 40°C e l'intero impianto può essere suddiviso in moduli di dimensioni ridotte [22].

Capitolo 3

Metodologia LCA e introduzione a SimaPro

La metodologia Life Cycle Assessment è uno strumento ampiamente utilizzato nel mondo industriale dalle policy alle strategie aziendali di mercato per valutare gli impatti ambientali legati al ciclo di vita, intero o parziale, di un prodotto o di un servizio.

A livello internazionale la metodologia LCA è regolamentata dalle norme ISO della serie 14040's in base alle quali uno studio di valutazione del ciclo di vita prevede: la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione dell'analisi (ISO 14041), la compilazione di un inventario degli input e degli output di un determinato sistema (ISO 14041), la valutazione del potenziale impatto ambientale correlato a tali input e output (ISO 14042) e infine l'interpretazione dei risultati (ISO 14043). A livello europeo l'importanza strategica dell'adozione della metodologia LCA come strumento di base e scientificamente adatto all'identificazione di aspetti ambientali significativi è espressa chiaramente all'interno del Libro Verde COM 2001/68/CE e della COM 2003/302/CE sulla Politica Integrata dei Prodotti, ed è suggerita, almeno in maniera indiretta, anche all'interno dei Regolamenti Europei: EMAS (Reg. 1221/2009) ed Ecolabel (Reg. 61/2010). L'LCA del resto rappresenta un supporto fondamentale allo sviluppo di schemi di Etichettatura Ambientale: nella definizione dei criteri ambientali di riferimento per un dato gruppo di prodotti (etichette ecologiche di tipo I: Ecolabel), o come principale strumento atto ad ottenere una Dichiarazione Ambientale di Prodotto: DAP (etichetta ecologica di tipo III).

Potenzialmente quindi le sue applicazioni sono innumerevoli:

- Sviluppo e Miglioramento di prodotti/processi;
- Marketing Ambientale;
- Pianificazione strategica;
- Attuazione di una Politica Pubblica.

Si può utilizzare sia l'approccio detto "dalla culla alla tomba" per valutare gli impatti del singolo prodotto per tutta la sua vita oppure l'approccio "dalla culla alla culla", nel quale si assume che le materie prime impiegate vengano riusate in altri prodotti una volta terminata la vita utile del prodotto originale. In questo studio saranno considerate entrambe le casistiche, ma entrando nell'analisi degli impatti finale sarà preso in considerazione solo l'approccio "dalla culla alla culla". Nel passato si era soliti a fermarsi in questa analisi al solo ciclo produttivo del bene, mentre ora con questa nuova modalità è possibile analizzare anche l'estrazione delle materie prime, il trasporto, la vita operativa, l'assemblaggio, lo smaltimento e l'eventuale riuso del prodotto o parte di esso per altre applicazioni. Nella fase del fine vita è comune che si generino impatti negativi, ovvero dei vantaggi ambientali dovuti al recupero dei materiali e la conseguente non emissione di inquinanti che ci sarebbe stata qualora tali materiali non fossero stati già resi disponibili. Questi vantaggi variano da prodotto a prodotto in funzione dell'impatto della fase di produzione.

Questa metodologia si rende particolarmente adatta nel confrontare, a parità di destinazione d'uso, diverse tipologie di prodotto o servizio, come può essere l'utilizzo di diverse batterie per una stessa applicazione. Infatti gli impatti generati da diversi prodotti possono differire notevolmente non solo

in fase di estrazione dei materiali e produzione, ma anche nella durata del ciclo di vita e del recupero, o dispersione in ambiente.

LCA è un acronimo che significa appunto “valutazione del ciclo di vita”. Il suo obiettivo è identificare e quantificare gli impatti generati da un prodotto o da un servizio nel suo intero ciclo di vita e può essere utilizzata per vari scopi:

- Confrontare alternative di prodotti o servizi analoghi, al fine di identificare quello che impatta meno sull’ambiente;
- Individuare nelle varie fasi del ciclo di vita di un prodotto o servizio quale di queste è caratterizzata dal maggiore impatto sull’ambiente per intervenire su di essa e ridurre l’impatto globale.

Dal 1993 la SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) ha sviluppato delle linee guida (Code of Practise) e ha dato alla LCA la seguente definizione: *procedimento oggettivo di valutazione dei carichi energetici e ambientali relativi ad un processo o ad un’attività, effettuato attraverso l’identificazione dell’energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell’ambiente. La valutazione dell’intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l’estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l’uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale.*

La procedura LCA è composta da 4 fasi, secondo la norma UNI 14040:

1. Definizione degli scopi e degli obiettivi (Goal and Scope Definition): è la fase preliminare nonché quella più importante per la buona riuscita dell’analisi. Comprende la definizione delle finalità dello studio, delle unità di misura, dell’unità funzionale, i confini del sistema studiato, il fabbisogno di dati con l’affidabilità desiderata, le assunzioni e tutti i limiti del caso.
2. Analisi di inventario (Life Cycle Inventory Analysis, LCI): è la parte che comprende lo studio dell’intero ciclo di vita del processo o attività in questione. Lo scopo è quello di ricostruire la via attraverso la quale il fluire dell’energia o dei materiali permette il funzionamento del sistema produttivo tramite tutti i processi di trasformazione e trasporto. Si redige dunque un modello analogico del sistema da studiare.
3. Analisi degli impatti (Life Cycle Impact Assessment, LCIA): è lo studio vero e proprio dell’impatto ambientale provocato dal processo o attività in esame. Lo scopo è quello di evidenziare che modificazioni avvengono a causa del rilascio in ambiente dei prodotti di scarto individuati nella fase precedente e la loro entità. Si passa dal dato oggettivo calcolato nella fase di inventario al giudizio di pericolosità ambientale.
4. Interpretazione e miglioramento (Life Cycle Interpretation): è la fase conclusiva dell’analisi anche se è una fase trasversale e contemporanea a tutte le precedenti. Ha lo scopo infatti di valutare fase per fase l’attendibilità dei dati raccolti e confrontarla con quella assunta nella fase iniziale. Nel caso sia impossibile fare coincidere le cose è necessario modificare le assunzioni iniziali, a riprova della loro fondamentale importanza.

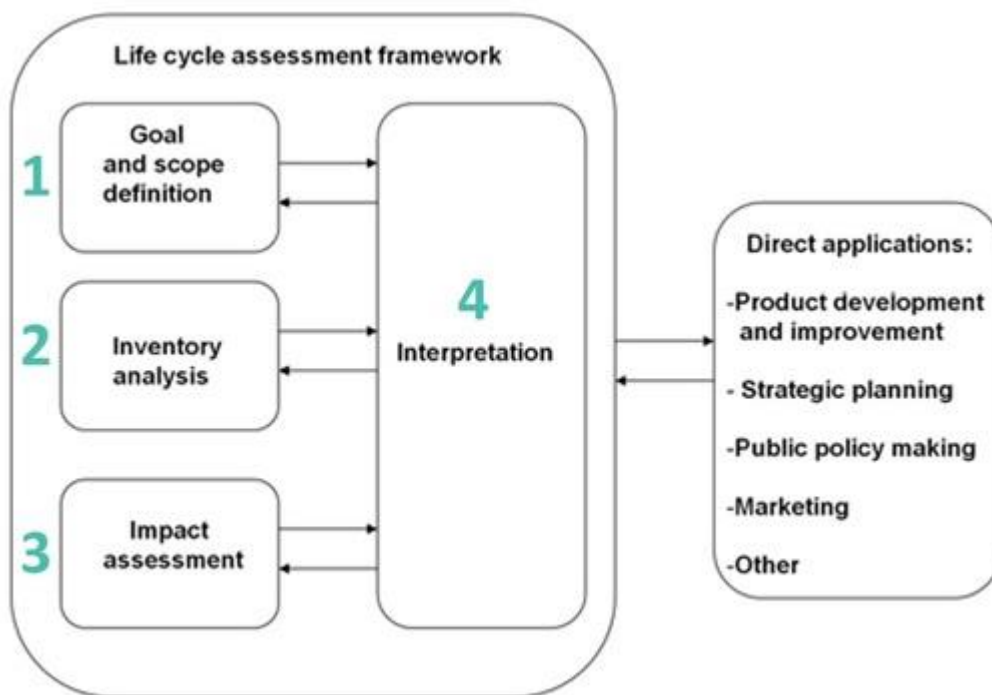


Fig 3.1 - Fasi e applicazioni della LCA secondo le norme ISO

3.1 Definizione degli obiettivi e del campo di applicazione

E' la prima fase di questo tipo di analisi e prevede la definizione delle finalità dello studio: l'oggetto, i destinatari, le applicazioni e nondimeno le motivazioni per cui si compie l'analisi. Ne consegue la definizione dell'Unità Funzionale, dei confini geografici e temporali, dei dati e delle assunzioni necessarie per il chiaro ed inequivocabile svolgimento dei calcoli.

Si definisce "sistema" un qualsiasi insieme di dispositivi e/o operazioni, delimitato da eventuali confini fisici, che realizzano una o più precise funzioni. Questo in genere ha anche interazioni caratterizzate da input e output con il sistema ambiente. Queste interazioni sono spesso collegate tra di loro in modo difficile da definire univocamente e producono flussi di materiali, energia e prodotti. E' necessario modellizzare queste interazioni per mezzo di un albero di processo che racchiuda tutti i processi rilevanti, comprensivi della totalità di input e output per ognuno di essi.

In linea generale il ciclo di vita di un prodotto si può disaggregare nelle seguenti fasi, ognuna coi suoi input e output:

- Acquisizione delle materie prime;
- Produzione;
- Trasporto/distribuzione;
- Uso/riuso/manutenzione;
- Gestione dei rifiuti.

Si individua poi l'unità funzionale (una certa quantità di prodotto, una certa quantità di servizi, l'energia consumata/prodotta, ecc.) che serva da riferimento per tutti i flussi in entrata e uscita rispetto al sistema e per gli effetti sull'ambiente. L'importanza dell'unità funzionale è chiara se si pensa che

questa deve essere tale da permettere il confronto dei cicli di vita di prodotti o servizi eterogenei, spesso legati a processi diversi ma che si vogliono confrontare ai fini dell'impatto ambientale.

3.2 Analisi di inventario

E' la seconda fase di una LCA e comprende la raccolta dei dati provenienti dai procedimenti di calcolo che consentono di quantificare i flussi in entrata e in uscita dal sistema. Questa fase è caratterizzata dalla costruzione di un modello della realtà in grado di rappresentare nella maniera più fedele ed esaustiva possibile tutte le interazioni e gli scambi tra il sistema preso in considerazione e l'ambiente esterno. E' in questa fase in sostanza che si va a determinare la precisione dei dati raccolti/assunti e di conseguenza l'aderenza alla realtà dei risultati che si otterranno. I dati infatti possono essere primari, ovvero misurati in maniera diretta alla fonte, oppure secondari, cioè presi da database o ottenuti mediante calcoli da

Per praticità i dati vengono raccolti ed organizzati in maniera disaggregata in base alle diverse fasi prese in considerazione; si può però giungere ad una rappresentazione di tipo aggregato dividendo i parametri di ogni fase in categorie.

3.3 Analisi degli impatti

E' la fase della LCA che, partendo dalle informazioni ottenute dall'analisi di inventario, si dedica alle valutazioni di tipo ambientale vere e proprie. La norma definisce questa fase Life Cycle Impact Assessment (LCIA) come la fase finalizzata a capire e valutare l'importanza e la significatività dei potenziali impatti ambientali legati al sistema in modo da riassumerli e quantificarli. Si distingue tra *elementi obbligatori* come classificazione e caratterizzazione, e *elementi opzionali* come normalizzazione, grouping, ranking e weighting.

3.3.1 Classificazione

In questa fase i flussi di materiale ed energia esaminati nell'analisi di inventario vengono raggruppati nelle categorie ambientali fissate precedentemente, come Global Warming Potential (GWP), Ozone Depletion Potential (ODP), eutrofizzazione, tossicità per l'uomo e tossicità per l'ambiente, consumo di suolo.

Queste sono solo alcune delle categorie d'impatto che si possono considerare. E' possibile inoltre considerare la diversa scala con la quale queste categorie manifestano i loro effetti nei confronti dell'ambiente:

- Impatti globali: interessano tutto il pianeta;
- Impatti regionali: interessano una vasta area geografica attorno al luogo di interesse, nell'ordine di qualche migliaia di chilometri;
- Impatti locali: interessano esclusivamente l'area circostante al punto d'impatto.

3.3.2 Caratterizzazione

In questa fase si si quantificano le porzioni precedentemente assegnate: grazie all'utilizzo di fattori di equivalenza (EQ) si aggregano i diversi contributi di materiali e processi in un determinato ambiente e rapportati alla sostanza di riferimento.

Gli EQ vanno a moltiplicare i flussi registrati nell'analisi di inventario e si sommano tra loro: il potenziale danno ambientale è dato dal potenziale d'impatto risultante da questa somma.

Spesso i differenti impatti non sono direttamente confrontabili tra di loro a causa della tipologia degli indicatori sulla base dei quali sono calcolati: esistono indicatori detti *midpoints* e *endpoints*.

La metodologia ECM 92 è un tipico esempio di metodo che usa *midpoints* [3]: gli indicatori di categoria d'impatto sono scelti relativamente vicini ai risultati dell'inventario. Ad esempio, le categorie d'impatto del Riscaldamento Globale e dell'Assottigliamento dello Strato di Ozono sono basate su fattori di equivalenza dell'IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change: il GWP (Global Warming Potential) e l'ODP (Ozone Depletion Potential). La categoria d'impatto dell'Acidificazione è basata sul numero di protoni H⁺ che possono essere rilasciati per chilogrammo di sostanza emessa. Queste categorie d'impatto hanno unità piuttosto astratte. Per esempio, l'unità del Riscaldamento globale è "kg di CO₂ equivalente" e l'unità dell'Acidificazione è kg di SO₂ equivalente.

L'Eco-indicator 99 invece è un tipico metodo che utilizza *endpoints* [3]. L'indicatore per il Cambiamento Climatico è espresso come Disability Adjusted Life Years (DALY), in italiano "Attesa di Vita Corretta per Disabilità", espressa come il numero di anni persi a causa della malattia, per disabilità o per morte prematura. L'indicatore di categoria d'impatto per l'Acidificazione è espressa come percentuale di biodiversità diminuita in un'area durante un certo periodo. Questi indicatori sono certo più difficili da calcolare: in questo modello devono essere fatte molte ipotesi, sono perciò più incerti. Tuttavia il loro significato è più facile da capire e valutare.

3.3.3 Normalizzazione

E' una fase opzionale secondo la normativa, la scelta di eseguirla o meno sta a chi compie o commissiona l'analisi. Consiste nella normalizzazione dei valori ottenuti nelle fasi precedenti: vengono divisi cioè per un valore di riferimento, scelto in base alla sensibilità dell'analista e alla scala geografica e temporale a cui si vuole riferire il risultato attraverso la normalizzazione è dunque possibile stabilire l'entità relativa dei problemi ambientali considerati, rendendo facile anche un paragone tra essi.

La normalizzazione più comune avviene su base annua ed eventualmente si effettua la divisione per numero di abitanti dell'area considerata. Serve a due scopi:

- Semplificazione dei calcoli: le categorie di impatto che contribuiscono solo in minima parte rispetto ad altre categorie possono essere trascurate dalle considerazioni finali;
- Chiarezza dell'ordine di grandezza di un parametro: i risultati normalizzati riferiti ad un certo ambito regionale possono essere paragonati al totale impatto di quell'indicatore in quell'ambito per capirne l'importanza assoluta rispetto ad altri prodotti/servizi tipici della zona.

3.3.4 Ponderazione

E' anche questa considerata una fase opzionale secondo la normativa. La procedura di "pesatura" è una delle più controverse e difficili di tutta la LCA. Infatti ogni indicatore delle diverse categorie d'impatto viene moltiplicato da fattori di ponderazione che riflettono l'importanza relativa tra le diverse categorie. Un'imprecisione in questa fase comprometterebbe tutta la fase di interpretazione dei risultati, nonostante il corretto procedimento nelle precedenti fasi.

3.4 Interpretazione e miglioramento

Questa fase prevede l'interpretazione dei risultati delle fasi di inventario e della valutazione degli impatti. E' consigliabile anche la redazione di conclusioni e raccomandazioni per il miglioramento della precisione del sistema considerato. Vengono infine evidenziate le opportunità per minimizzare l'impatto associato al sistema/prodotto/servizio considerato, anche tenendo conto di altri criteri decisionali per la valutazione globale.

In questo passaggio vengono richiamate tutte le assunzioni fatte nella fase iniziale di definizione dell'obiettivo e dell'ambito dell'analisi: è solo sulla base di questi presupposti che è possibile trarre delle conclusioni e fornire le adeguate raccomandazioni.

Per l'interpretazione viene utilizzato un approccio iterativo: si fanno ipotesi e si introducono dati modificando i risultati delle fasi precedenti.

E' fortemente consigliato effettuare un'analisi di sensibilità per individuare quale tra le assunzioni fatte nel corso dell'analisi ha impatto maggiore. Si riesce a capire così che ogni ipotesi fatta ha delle ripercussioni sull'intero processo di analisi degli impatti ma che solo alcune di queste, generalmente, hanno la capacità di modificare in maniera sostanziale il risultato finale.

E' doveroso ricordare come in ogni singolo aspetto della LCA non si tenga conto (o per lo meno non si dovrebbe) dell'aspetto economico dei processi. Questo tipo di analisi infatti è nato per calcolare in maniera oggettiva solo gli aspetti riguardanti gli impatti ambientali del prodotto/servizio preso in considerazione.

E' altresì scontato che in qualche modo l'aspetto economico vada a influenzare l'analisi o per lo meno gli input iniziali: ad esempio la scelta a priori di certe materie prime invece di altre o la produzione mediante un tipo di processo invece che un altro.

In questo elaborato invece si escluderà per quanto possibile ogni aspetto economico in tutte le fasi.

3.5 Metodo ReCiPe 2016

La valutazione LCA è uno strumento metodologico utilizzato per analizzare quantitativamente il ciclo di vita di prodotti o attività. Le norme ISO 14040 e 14044 ne forniscono un quadro generico.

Dopo la determinazione di obiettivo e ambito di studio, si raccolgono i dati e viene calcolato un risultato sulla base dell'analisi di inventario. Questo risultato di inventario è in genere un elenco molto

lungo di emissioni, risorse consumate e, a volte, altri elementi. L'interpretazione di questa lista è difficile e nel corso degli anni si sono sviluppate diverse metodologie di analisi e interpretazione dei danni ambientali causati da qualunque ciclo di vita. Una procedura LCIA come il metodo ReCiPe è progettata per chiarire questa interpretazione.

L'obiettivo principale del metodo ReCiPe è quello di trasformare la lunga lista dei risultati del Life Cycle Inventory in un numero limitato di indicatori. Questi punteggi indicano la gravità relativa di una categoria di impatto ambientale. In ReCiPe si determinano gli indicatori in due livelli:

- 18 indicatori di midpoint;
- 3 indicatori di endpoint.

ReCiPe utilizza un meccanismo ambientale come base per la modellazione. Un meccanismo ambientale può essere visto come una serie di effetti che insieme possono creare un certo livello di danni, ad esempio, alla salute umana o agli ecosistemi. Ad esempio, per il cambiamento climatico si sa che un certo numero di sostanze aumenta il forzante radiativo, questo significa che il calore non viene irradiato dalla terra allo spazio. Di conseguenza, più energia viene intrappolata sulla terra più la temperatura aumenta. Di conseguenza ci si possono aspettare cambiamenti negli habitat per gli organismi viventi, e come risultato qualche specie potrebbe estinguersi.

Da questo esempio è chiaro che quanto più a lungo si ottiene questo meccanismo ambientale tanto più alte saranno le incertezze. Il forzante radiativo è un parametro fisico che può essere misurato in maniera relativamente facile in laboratorio. L'aumento della temperatura risultante è meno facile da determinare, in quanto vi sono molti feedback positivi e negativi paralleli.

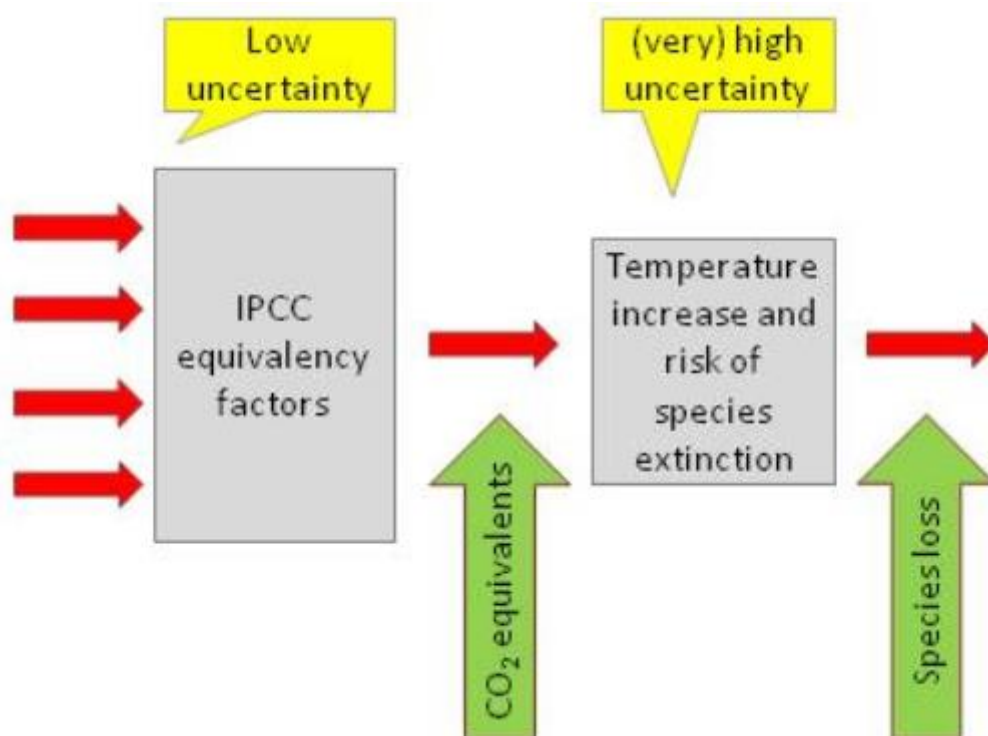


Fig 3.2 – Esempio di modello armonizzato midpoint-endpoint per la salute umana.

In ReCiPe si calcolano effettivamente diciotto indicatori di questo tipo, ma anche tre indicatori di endpoint molto più incerti. La motivazione a calcolare gli indicatori di endpoint è che il gran numero di indicatori di midpoint è molto difficile da interpretare, in parte perché ce ne sono troppi, in parte perché hanno un significato molto astratto. Ad esempio, come si può confrontare il forzante radiativo con i numeri di saturazione di base che esprimono l'acidificazione? Gli indicatori a livello di endpoint hanno lo scopo di facilitare un'interpretazione più semplice, in quanto ce ne sono solo tre e hanno un significato più comprensibile. L'idea è che ogni utente possa scegliere a quale livello vuole avere il risultato:

- Diciotto punti medi relativamente robusti ma non facili da interpretare
- Tre endpoint facili da capire ma più incerti:
 - Danno alla salute umana;
 - Danni alla diversità degli ecosistemi;
 - Danni alla disponibilità delle risorse.

L'utente può quindi scegliere tra l'incertezza degli indicatori e l'incertezza sulla corretta interpretazione degli indicatori [29].

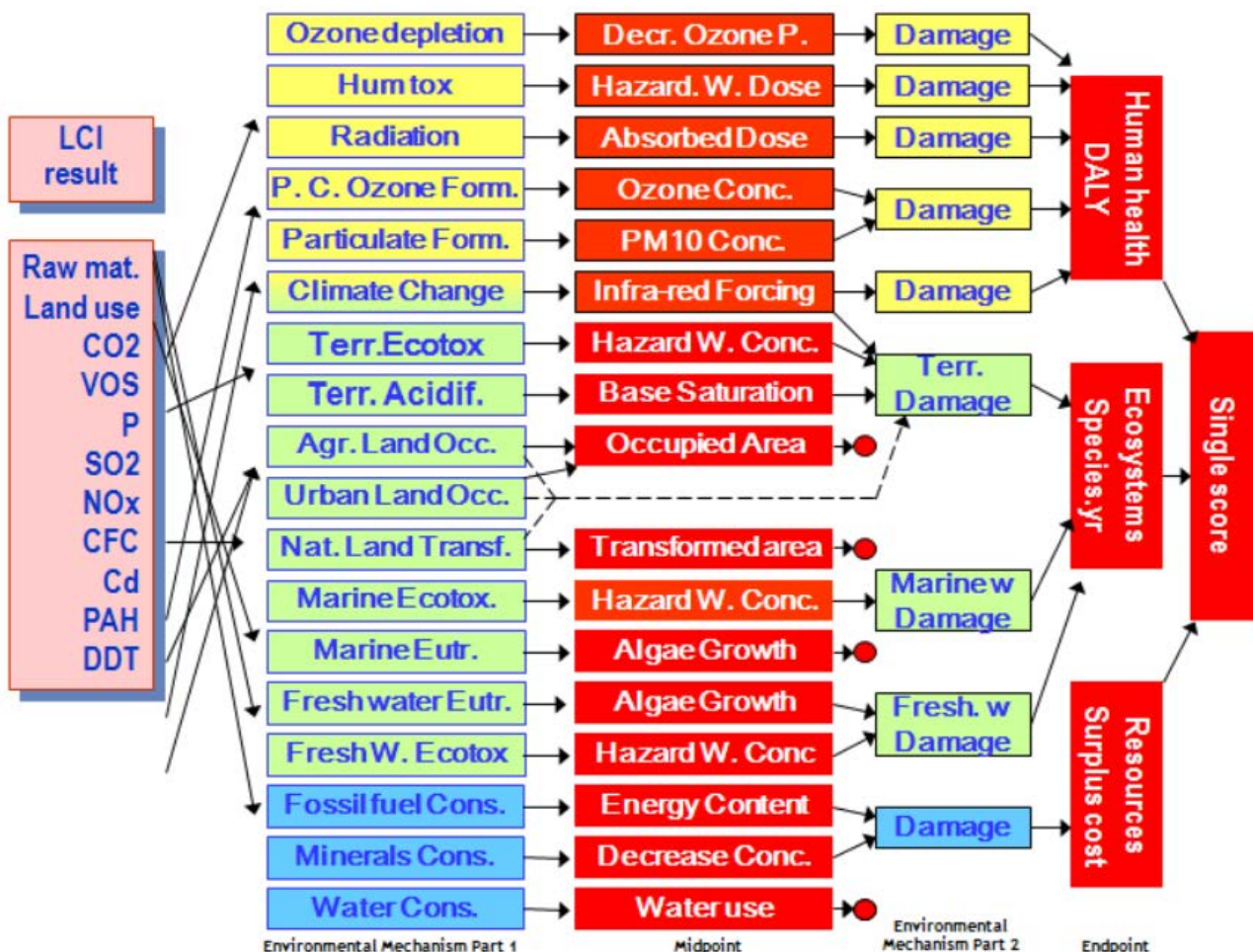


Fig 3.3 – Relazione tra parametri LCI, indicatori midpoint e indicatori endpoint.

A causa del grado di incertezza presente nel modello, in questo metodo si è deciso di raggruppare le diverse fonti di incertezza e le diverse scelte arbitrarie fatte in tre scenari om prospettive culturali, basate su tipologie simili di assunzioni come il tempo o lo sviluppo tecnologico che ci si aspetta. Queste prospettive, cui corrispondono altrettante visioni del metodo ReCiPe, sono:

- Prospettiva individualista (I), di breve termine (20 anni) ed ottimista che la tecnologia possa progredire per contribuire ad una riduzione degli impatti attuali;
- Prospettiva gerarchica (H), che prende come riferimento principi politici di perseguimento degli obiettivi e scadenze di accordi internazionali ed è pari a 100 anni;
- Prospettiva ugualitaria (E), di lungo termine (500 anni) e si basa sul principio della precauzione.

In questo elaborato le analisi saranno condotte mediante prospettiva di endpoint gerarchica (H), perché per quanto riguarda le batterie al litio si può considerare la tecnologia matura mentre le batterie a flusso sono all'inizio del loro sviluppo; considerando un periodo di tempo intermedio si suppone che queste due tecnologie possano raggiungere una stessa maturità tecnologica al fine di essere confrontate senza bias tecnologici.

3.6 Il codice di calcolo SimaPro

Gli studi sulla valutazione degli impatti ambientali di oggetti o processi recentemente stanno avendo un forte aumento di interesse a causa delle note problematiche dell'inquinamento e relative ripercussioni su ambiente e clima. Essendo un tipo di analisi molto lunga e complessa è spesso impossibile eseguirla a mano sia per questioni di tempo che di risorse: negli ultimi decenni si sono sviluppati diversi software in grado di eseguire un'analisi LCA completa e dettagliata come OpenLCA, SimaPro, GaBi, Umberto, eBalance e altri meno conosciuti, per velocizzare e ottimizzare il tutto. Il più famoso e utilizzato [31] al mondo è Simapro (System for Integrated environmental Assessment of Products): in questo studio verrà impiegato questo software nella versione 8.5.2, la più aggiornata al momento dell'inizio di questo lavoro disponibile presso l'Università di Padova. Questo pacchetto è nato negli anni '90 dalla compagnia olandese Prè Sustainability, leader internazionale nello sviluppo sostenibile e della valutazione degli impatti ambientali.

Il software sviluppato è uno strumento pratico e professionale per la raccolta, l'analisi e il monitoraggio di dati sulle performance ambientali di beni o servizi. Può essere utilizzato sia per scopi di innovazione, sia di marketing sia per fine ludico. La sua architettura gli conferisce le seguenti proprietà:

- Interfaccia intuitiva, che facilita la modellazione di un completo ciclo di vita in conformità con le norme della serie ISO 14040 sul LCA;
- È flessibile, ovvero consente di introdurre nuovi materiali o processi o anche modificare quelli già esistenti nei suoi database;
- Molteplicità di database riconosciuti a livello internazionale e sviluppate da enti certificati e affidabili;
- Consente un'ampia e personalizzabile modellazione dello scenario di fine vita, per spaziare su diversi livelli di dettaglio e complessità;

- Permette l'analisi di sensibilità, la valutazione singola e il confronto di scenari alternativi, oltre a consentire l'inserimento di relazioni non lineari tra i parametri in gioco;
- Permette anche l'analisi dell'incertezza secondo il metodo di Monte Carlo;
- Comoda ma completa visualizzazione sia grafica che numerica dei risultati, oltre a presentare la possibilità di raggruppamento e filtraggio secondo vari parametri;
- Permette l'interazione con Excel per importare ed esportare facilmente dati e risultati.

3.6.1 Modellazione del ciclo di vita di un prodotto

Per costruire il modello del processo che si vuole creare si va nell'apposita sezione "inventario", dove si trovano due tipologie di blocchi concettuali: i *processi* e le *fasi del prodotto*. Ogni elemento o lavorazione può essere inserito a mano o preso da una delle banche dati presenti all'interno del software.

I processi possono essere visti come modelli delle singole operazioni unitarie che portano alla formazione del prodotto. Un processo può essere di due tipi:

- "unit", che modella un'operazione unitaria nel ciclo di vita che si va a considerare;
- "system", che modella in un unico blocco sia l'operazione in questione che quelle a monte del ciclo di vita. Questa tipologia è stata introdotta per semplificare lo studio di quei processi che comprendono flussi molto lunghi e articolati di energia, prodotti e lavorazioni, in modo da velocizzare il calcolo da parte della macchina. La maggior parte delle operazioni in questo studio sarà di tipo system.

In questo software si parte definendo sempre il processo più a monte in maniera da costituire un ciclo a cascata. Il tutto va a costruire una rete tra i processi che rispecchia il diagramma di flusso del sistema in esame.

Per quanto riguarda le fasi del prodotto esse si dividono in 5:

- Assemblaggio, che rappresenta un elenco dei componenti già modellati nella fase dei processi e delle lavorazioni da inserire per ottenere una unità completa del bene da analizzare. È consentito quantificare le unità funzionali di misura sia nella fase precedente che in questa fase, lasciando totale libertà all'utilizzatore.
- Ciclo di vita costituisce il blocco completo di tutti i processi da prendere in considerazione per l'analisi totale del bene o servizio in questione. È l'insieme di assemblaggio, fasi di impatto durante la vita del prodotto e processi di smaltimento che fanno parte dello scenario di fine vita.
- Scenario di fine vita, in cui si va prima a creare il processo di smaltimento di un prodotto e poi lo si implementa nello scenario di smaltimento. È la fase più delicata perché le assunzioni che si effettuano qui si ripercuotono in tutto il ciclo di vita. Il software offre un'ampia possibilità di personalizzare questa fase a piacimento.
- Disassemblaggio, che comprende le lavorazioni e i trattamenti necessari allo smantellamento fisico del prodotto in loco, prima della sua fase di smaltimento.

- Riuso, che va spesso a diminuire gli impatti globali di tutto il ciclo di vita perché tiene conto del riutilizzo di alcuni componenti o materie prime in altri prodotti. E' possibile implementare il riuso di un elemento anche per più cicli di vita supplementari.

3.6.2 Visualizzazione dei risultati

Una volta finita l'analisi di inventario è possibile andare a simulare l'impatto di ogni singolo processo, prodotto, fase di vita e anche confrontare più prodotto contemporaneamente. SimaPro utilizza il calcolo matriciale per ottimizzare i calcoli al fine di essere più veloce possibile nei calcoli e nella presentazione grafica dei risultati. A tal proposito, i risultati sono disponibili in 3 forme:

- La rete, che forma un insieme di collegamenti tra i vari processi coinvolti nel prodotto analizzato. Ogni processo è formato da un blocco e da esso si diramano tante linee quanti sono i suoi collegamenti con altri processi. E' un modo comodo e veloce per verificare l'esattezza concettuale dell'immissione dei dati. Per processi particolarmente complessi esso risulta molto grande ed è necessario ricorrere ad una soglia di esclusione per poter non visualizzare i processi minori. In questo elaborato non verranno inseriti grafici di questo tipo perché la percentuale della soglia di esclusione dovrebbe essere elevata per permettere la leggibilità del grafico, e questo andrebbe a cozzare con la volontà di essere più precisi possibile nella creazione dei processi.
- L'inventario permette la visualizzazione dei risultati in forma tabulare come finestra di dialogo sotto l'etichetta "inventario". Le sostanze sono organizzate in compartimenti che possono essere visualizzati anche singolarmente. È possibile anche impostare dei criteri di esclusione o vedere i risultati sia in termini assoluti che percentuali.
- La terza forma consta nella Valutazione dell'impatto, che sarà la forma preponderante utilizzata in questo elaborato. I risultati sono presentati in sotto etichette specifiche per ciascun elemento sia in forma tabulare che grafica, rendendo l'interpretazione agevole e immediata. È possibile anche qui impostare un valore di esclusione per avere un ristretto gruppo di elementi significativi che contribuisce all'impatto.

Capitolo 4

Modellazione delle batterie in Simapro

Si procede ora all'analisi di inventario di tutti i componenti costituenti le batterie.

4.1 Lyfe cycle inventories delle batterie VRFB

Come visto nel capitolo 3.2, concettualmente una batteria a flusso a base di vanadio (VRFB) può essere suddivisa in due sottosistemi: uno comprendente la parte di potenza e l'altro la parte di stoccaggio di energia. I componenti che non fanno parte di questi due sottosistemi si possono raggruppare come "periferia" del sistema.

L'accumulatore realmente esistente da cui si prende spunto per la modellazione di una VRFB in questo elaborato è quello analizzato da Minke et al. nel 2016 [23], con una potenza di 1 MW e una energia complessiva disponibile di 8,3 MWh. La dimensione di questo modello necessita l'adozione del calcolo su base massica della composizione della batteria. Un sistema di queste dimensioni è composto dunque da circa 200 m³ di elettrolita e 300 m³ di serbatoio, considerando un volume vuoto del 50% per far fronte ad eventuali imprevisti e necessità di manutenzione. Per la potenza nominale sono richiesti due stack (pile) per un totale di 155 celle. Ogni stack è composto da una membrana, due piastre bipolari (bipolar plate), due elettrodi di feltro di carbonio (carbon felt electrodes), due collettori di corrente (current collectors) e due membrane (gaskets) ad essi associate. Il circuito per l'elettrolita richiede due pompe centrifughe per il ricircolo e tubi per circa 30 metri che collegano il serbatoio (tank) alle celle, dove avviene la reazione chimica vera e propria più altri 5 metri per i collegamenti degli stack. Basandosi sulla geometria del modello analizzato si prendono in considerazione anche dei cavi elettrici per una lunghezza di circa 14 metri per stack. Infine le componenti considerate periferiche comprendono uno scambiatore di calore e un sistema di controllo della batteria (BMS). Nella composizione originale era presente un inverter che non è stato qui preso in considerazione in modo da confrontare questa tecnologia con le altre solo dal punto di vista della batteria e dei componenti elettronici strettamente necessari al corretto funzionamento delle celle. La parte riguardante il trattamento dell'energia elettrica in ingresso/uscita non è stata considerata all'interno dei confini del sistema.

Oltre ai componenti della batteria sono comprese anche le fasi di assemblaggio e trasporto.

4.1.1 Membrana al Nafion

Esistono diverse tipologie di membrane per effettuare in maniera efficiente lo scambio ionico in una cella per batterie a flusso. Tuttavia in questo elaborato si prende come riferimento la membrana al Nafion a causa della sua larga diffusione a livello mondiale, dovuta principalmente al costo ridotto rispetto a rispetto ad altre tipologie con minore permeabilità all'acqua e agli ioni vanadio. Il Nafion deriva dalla lavorazione del PTFE e ha delle eccellenti proprietà di conduzione ionica e stabilità chimica. Il processo completo di sintesi del Nafion esula dallo scopo di questo testo ed è riportato in [24]; qui è riportata la lista di elementi e lavorazioni che impattano l'ambiente inserita in Simapro.

| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | | Quantità fisica | Unità di mi | |
|---|--|--------------------|-----------------|-------------|
| Nafion Membrane, for VRFB | | 1 | kg | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | | Quantità fisica | Unità di mi | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di mi |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di mi | |
| Tetrafluoroethylene (GLO) market for APOS, S | | 1,3 | kg | |
| Sulfur trioxide (GLO) market for APOS, S | | 0,5 | kg | |
| Hexafluoroethane (GLO) market for APOS, S | | 3,2 | kg | |
| Sodium nitrate (GLO) market for APOS, S | | 3 | kg | |
| Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state (GLO) market for | | 0,6 | kg | |
| Soda ash, dense (GLO) market for APOS, S | | 0,11 | kg | |
| Chemical factory, organics (GLO) market for APOS, S | | 4,0E-10 | p | |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (GLO) market for APOS, | | 0,5 | tkm | |
| Transport, freight train (Europe without Switzerland) market for APOS, S | | 5 | tkm | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di mi | |
| Heat, central or small-scale, natural gas (Europe without Switzerland) ma | | 39,31 | MJ | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output | | | | |
| Emissioni nell'aria | | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di mi |
| Carbon dioxide, fossil | | | 8,88E-2 | kg |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Emissioni in acqua | | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di mi |
| Sodium chloride | | | 2,36 | kg |
| Sodium hydroxide | | | 1,87 | kg |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Emissioni nel terreno | | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di mi |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Flussi dei rifiuti finali | | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di mi |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Emissioni non materiali | | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di mi |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Temi sociali | | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di mi |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Temi economici | | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di mi |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Rifiuto ed emissioni al trattamento | | Quantità fisica | Unità di mi | |
| Waste plastic, consumer electronics (RoW) market for waste plastic, consu | | 0,11 | kg | |
| Spent solvent mixture (Europe without Switzerland) market for spent solv | | 2,81 | kg | |
| Bilge oil (Europe without Switzerland) market for bilge oil APOS, S | | 0,38 | kg | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.1 – Membrana al Nafion, input e output

4.1.2 Elettrodo (PAN based electrode)

L'elettrodo è la parte fondamentale per il passaggio delle cariche sia nel processo di carica che in quello di scarica. In questo caso si seleziona un elettrodo composto di un feltro a base di carbonio fatto da polianilonitrile (PAN). Questo materiale è ottenuto dalla lavorazione dell'acrilonitrile con ammoniaca e propene in un processo chiamato "Sohio process". Infine il materiale è stabilizzato termicamente e carbonizzato. Approssimativamente è necessario 1 kg di carbonio per produrre due elettrodi a base di PAN [24].

| Prodotti | | | | | |
|---|--------------------|-----------------|-----------------|---------------|-------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | Quantità fisica | Unità di misur | Quantità fisica | % Allocazione | |
| Elettrodo per VRFB | 1 | kg | Mass | 100 % | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input | | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD | |
| Ammonia, liquid {RER} market for APOS, S | 0,91 | kg | Non definito | | |
| Sulfuric acid {GLO} market for APOS, S | 3,75E-2 | kg | Non definito | | |
| Propylene {GLO} market for APOS, S | 2,24 | kg | Non definito | | |
| Methyl methacrylate (MMA)/RER | 1,0E-1 | kg | Non definito | | |
| De-ionised water, reverse osmosis, production mix, at plant, from groundwater RER S | 4,25 | kg | Non definito | | |
| Explosives factory {GLO} market for APOS, S | 7,86E-10 | p | Non definito | | |
| Printed wiring board, for power supply unit, desktop computer, Pb free {GLO} market for AI | 1,46E-2 | kg | Non definito | | |
| EUR-flat pallet {GLO} market for APOS, S | 2,8E-3 | p | Non definito | | |
| Explosives factory {GLO} market for APOS, S | 2,8E-9 | p | Non definito | | |
| Water, deionised, from tap water, at user {Europe without Switzerland} market for water, deic | 120 | kg | Non definito | | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD | |
| Heat, district or industrial, natural gas {GLO} market group for APOS, S | 4,17 | MJ | Non definito | | |
| Heat, central or small-scale, other than natural gas {GLO} market group for APOS, S | 2,08 | MJ | Non definito | | |
| Steam, in chemical industry {GLO} market for APOS, S | 0,12 | kg | Non definito | | |
| Heat, district or industrial, natural gas {GLO} market group for APOS, S | 4 | MJ | Non definito | | |
| Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} market group for APOS, S | 2,4 | kWh | Non definito | | |
| Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | 0,33 | tkm | Non definito | | |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | 1,97 | tkm | Non definito | | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Output | | | | | |
| Emissioni nell'aria | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD |
| Ammonia | | 6,42E-3 | kg | Non definito | |
| Ammonium, ion | | 2,57E-2 | kg | Non definito | |
| Propene | | 6,19E-5 | kg | Non definito | |
| Carbon dioxide, fossil | | 0,89 | kg | Non definito | |
| Water | | 23,5 | kg | Non definito | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Emissioni in acqua | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD |
| DOC, Dissolved Organic Carbon | | 2,02E-2 | kg | Non definito | |
| COD, Chemical Oxygen Demand | | 7,33E-2 | kg | Non definito | |
| BOD5, Biological Oxygen Demand | | 7,33E-2 | kg | Non definito | |
| Sulfate | | 6,97E-2 | kg | Non definito | |
| Propene | | 2,48E-2 | kg | Non definito | |
| TOC, Total Organic Carbon | | 2,2E-2 | kg | Non definito | |
| Water | | 4,0E-2 | kg | Non definito | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |

Tab 4.2– Produzione del materiale base per l'elettrodo, input e output

| Prodotti | | | | | |
|--|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | | Quantità fisica | Unità di misura | Quantità fisica | % Allocazione |
| Elettrodo PAN based, 1 kg | | 1 | kg | Mass | 100 % |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input | | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD |
| Elettrodo per VRFB | | 2 | kg | Non definito | |
| Heat, central or small-scale, natural gas {Europe without Switzerland} market for heat, centra | | 7,96E-2 | MJ | Non definito | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD |
| Heat, district or industrial, natural gas {GLO} market group for APOS, S | | 0,87 | MJ | Non definito | |
| Heat, central or small-scale, natural gas {Europe without Switzerland} market for heat, centra | | 5,25 | MJ | Non definito | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Output | | | | | |
| Emissioni nell'aria | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD |
| Carbon dioxide, fossil | | 1,31 | kg | Non definito | |
| Nitrogen, total | | 0,67 | kg | Non definito | |
| Water | | 0,66 | kg | Non definito | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |

Tab 4.3 – Produzione dell'elettrodo a base di PAN.

4.1.3 Piastra bipolare (bipolar plate)

La piastra deve essere costituita da materiali con notevoli proprietà fisiche e chimiche per ricoprire al meglio i molteplici ruoli di ottimizzazione del funzionamento delle celle per le VRFB. In questo caso la piastra è costituita da un materiale composito di grafite sintetica e polipropilene come legante. I processi di produzione sono descritti nello specifico nella [24] e di seguito si riporta la modellazione specifica nel caso in questione. Nella parte degli output si considera 0.025 kg di materiale plastico di scarto per ogni chilo di piastra prodotta.

| Prodotti | | | | | |
|--|--------------------|-----------------|-----------------|---------------|-------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | Quantità fisica | Unità di misur | Quantità fisica | % Allocazione | |
| Bipolar Plate, 1kg | 1 | kg | Mass | 100 % | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input | | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD | |
| Graphite, battery grade {GLO} market for APOS, S | 0,88 | kg | Non definito | | |
| Polypropylene, granulate {GLO} market for APOS, S | 0,14 | kg | Non definito | | |
| Packaging box factory {GLO} market for APOS, S | 2,8E-9 | p | Non definito | | |
| Particleboard, uncoated {GLO} market for APOS, S | 4,3E-5 | m3 | Non definito | | |
| Core board {GLO} market for APOS, S | 1,46E-2 | kg | Non definito | | |
| EUR-flat pallet {GLO} market for APOS, S | 2,88E-3 | p | Non definito | | |
| Solid bleached board {GLO} market for APOS, S | 1,96E-3 | kg | Non definito | | |
| Water, deionised, from tap water, at user {Europe without Switzerland} market for water, deic | 87,4 | kg | Non definito | | |
| Lubricating oil {GLO} market for APOS, S | 2,2E-4 | kg | Non definito | | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD | |
| Steam, in chemical industry {GLO} market for APOS, S | 0,12 | kg | Non definito | | |
| Heat, central or small-scale, natural gas {Europe without Switzerland} market for heat, centra | 1,2 | MJ | Non definito | | |
| Heat, central or small-scale, other than natural gas {GLO} market group for APOS, S | 0,42 | MJ | Non definito | | |
| Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} market group for APOS, S | 1,32 | kWh | Non definito | | |
| Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | 0,1 | tkm | Non definito | | |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | 0,21 | tkm | Non definito | | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |

Tab 4.4 – produzione della piastra bipolare, input e output

4.1.4 Struttura della pila (stack frame)

Il telaio in cui è alloggiata la batteria consiste in due profili a T, dimensionati in base alla grandezza della batteria stessa. Altezza e peso dei profili sono presi da normativa tecnica.

| Prodotti | | | | | |
|--|--------------------|-----------------|-----------------|---------------|-------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | Quantità fisica | Unità di misur | Quantità fisica | % Allocazione | |
| Stack Frame, 1kg | 1 | kg | Mass | 100 % | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input | | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD | |
| Steel, low-alloyed {GLO} market for APOS, S | 1 | kg | Non definito | | |
| Steel, low-alloyed {RER} steel production, converter, low-alloyed APOS, S | 1 | kg | Non definito | | |
| Welding, arc, steel {GLO} market for APOS, S | 3,26E-2 | m | Non definito | | |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | 0,1 | tkm | Non definito | | |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | 0,2 | tkm | Non definito | | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |

Tab 4.5 – Produzione del frame della pila, input e output

4.1.5 Elettrolita

La composizione dell'elettrolita è derivata dai dati tecnici del costruttore Gfe GmbH [25]. La concentrazione del vanadio nell'elettrolita in questione è 1,6 mol/l e quella del solfato è 2 mol/l. La stabilizzazione del composto è eseguita mediante acido solforico 0,05 mol/l. Le frazioni molari dei 4 componenti (vanadio, acido fosforico, acido solforico e acqua) sono calcolate prendendo in considerazione la massa molare in relazione alla densità dell'elettrolita. Quest'ultima risulta pari a 1,35 kg l⁻¹.

| Prodotti | | | | | |
|--|--------------------|-----------------|-----------------|---------------|-------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | Quantità fisica | Unità di misura | Quantità fisica | % Allocazione | |
| Elettrolita VRFB, 1L | 1,35 | kg | Mass | 100 % | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input | | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD |
| Sulfuric acid {GLO} market for APOS, S | | 0,196 | kg | Non definito | |
| Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state {GLO} market for API | | 4,9E-3 | kg | Non definito | |
| V2O5 vanadium pentoxide | | 0,286 | kg | Non definito | |
| Water, deionised, from tap water, at user {Europe without Switzerland} market for water, deic | | 0,863 | kg | Non definito | |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | 0,121 | tkm | Non definito | |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | 0,02 | tkm | Non definito | |
| Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO} market for APOS, U | | 3,813 | tkm | Non definito | |
| Transport, freight, inland waterways, barge {GLO} market for APOS, U | | 0,173 | tkm | Non definito | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |

Tab 4.6 – Produzione dell'elettrolita

I dati relativi all'estrazione del vanadio e alla sua lavorazione non si trovano né in letteratura né nel database Ecoinvent utilizzato in questo studio. Essendo necessaria una LCI dettagliata di queste materiale e della sua lavorazione per questa tipologia di batterie è necessario modellare da zero entrambi i processi.

Il vanadio è un metallo raro e non si trova quasi mai allo stato puro; generalmente deve essere estratto da minerali a base di titanomagnetite che ne contengono delle tracce. La maggior concentrazione di questi materiali nel nostro pianeta si ha in Sud Africa, dove si è sviluppata l'industria di estrazione e lavorazione per questo materiale. Mediamente la titanomagnetite che si estrae in Sudafrica contiene 1,7% di pentossido di vanadio. Tutti gli step produttivi per la produzione del pentossido di vanadio sono riportati qui sotto.

| Prodotti | | | | | |
|---|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | | Quantità fisica | Unità di misura | Quantità fisica | % Allocazione |
| V2O5 vanadium pentoxide | | 1 | kg | Mass | 100 % |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input | | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD |
| V2O5 in slag, electric arc furnace steel | | 1,35 | kg | Non definito | |
| Ammonium sulfate, as N {RoW} ammonium sulfate production APOS, S | | 0,31 | kg | Non definito | |
| Sulfuric acid {GLO} market for APOS, S | | 0,46 | kg | Non definito | |
| Sodium sulfate, anhydrite {RER} market for APOS, S | | 0,5 | kg | Non definito | |
| Soda ash, dense {GLO} market for APOS, S | | 0,37 | kg | Non definito | |
| De-ionised water, reverse osmosis, production mix, at plant, from groundwater RER S | | 3,16 | kg | Non definito | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | SD^2 o 2*SD |
| Electricity, medium voltage {ZA} market for APOS, S | | 0,2 | MJ | Non definito | |
| Heat, central or small-scale, natural gas {RoW} market for heat, central or small-scale, natura | | 0,93 | MJ | Non definito | |
| Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | 7,71E-2 | tkm | Non definito | |
| Transport, freight train {GLO} market group for APOS, S | | 0,3 | tkm | Non definito | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Output | | | | | |
| Emissioni nell'aria | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| Sulfur dioxide | | 0,23 | kg | Non definito | |
| Oxygen | | 5,64E-2 | kg | Non definito | |
| Carbon dioxide, fossil | | 0,16 | kg | Non definito | |
| Water | | 8,45E-2 | kg | Non definito | |
| Sodium sulfate | | 1 | kg | Non definito | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Emissioni in acqua | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Emissioni nel terreno | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Flussi dei rifiuti finali | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Emissioni non materiali | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Temi sociali | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Temi economici | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Rifiuto ed emissioni al trattamento | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| Scrap steel {RoW} market for scrap steel APOS, S | | 6,5E-2 | kg | Non definito | |
| Spent solvent mixture {RoW} clinker production APOS, S | | 6,32E-2 | kg | Non definito | |
| Dummy_Disposal, slags & ash waste, unspecified reuse /kg/RNA | | 0,47 | kg | Non definito | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |

Tab 4.7 – Produzione del pentossido di vanadio

| Prodotti | | | | | |
|---|--|--------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | | Quantità fisica | Unità di misur | Quantità fisica | |
| Steel, low-alloyed | | 1,2 | kg | Mass | |
| V2O5 in slag, electric arc furnace steel | | 6,13E-2 | kg | Mass | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input | | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Water, unspecified natural origin, GLO | | | 5,22E-3 | m3 | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| V2O5 bearing cast iron | | | 1,32 | kg | Non definito |
| Blast furnace slag {GLO} market for Cut-off, S | | | 9,28E-2 | kg | Non definito |
| Quicklime, in pieces, loose {CH} market for quicklime, in pieces, loose APOS, S | | | 5,5E-2 | kg | Non definito |
| Hard coal {ZA} market for APOS, S | | | 1,4E-2 | kg | Non definito |
| Oxygen, liquid, at plant/RNA | | | 5,07E-2 | kg | Non definito |
| Refractory, basic, packed {GLO} market for APOS, S | | | 1,35E-2 | kg | Non definito |
| Aluminium, wrought alloy {GLO} market for APOS, S | | | 1,48E-5 | kg | Non definito |
| Argon, liquid {GLO} market for APOS, S | | | 3,29E-3 | kg | Non definito |
| Cast iron {GLO} market for APOS, S | | | 5,15E-5 | kg | Non definito |
| Ethylene glycol diethyl ether {GLO} market for APOS, S | | | 3,32E-8 | kg | Non definito |
| Ferchromium, high-carbon, 68% Cr {GLO} market for APOS, S | | | 1,1E-4 | kg | Non definito |
| Ferromanganese, high-coal, 74.5% Mn {GLO} market for APOS, S | | | 4,45E-5 | kg | Non definito |
| Silicon, metallurgical grade {GLO} market for APOS, S | | | 3,7E-3 | kg | Non definito |
| Molybdenum trioxide {GLO} market for APOS, S | | | 1,41E-5 | kg | Non definito |
| Nickel, 99.5% {GLO} market for APOS, S | | | 3,32E-5 | kg | Non definito |
| Anode, graphite, for lithium-ion battery {GLO} market for APOS, S | | | 3,0E-3 | kg | Non definito |
| Diesel, burned in agricultural machinery {GLO} market for diesel, burned in agricultural mach | | | 3,46E-3 | MJ | Non definito |
| Liquefied petroleum gas {RoW} market for APOS, S | | | 2,73E-3 | kg | Non definito |
| Natural gas, high pressure {RoW} market for APOS, S | | | 2,5E-2 | m3 | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Electricity, medium voltage {ZA} market for APOS, S | | | 0,54 | kWh | Non definito |
| Electricity, at eGrid, AKGD, 2010/kWh/RNA | | | 3,46E-2 | kWh | Non definito |
| Heat, district or industrial, natural gas {GLO} market group for APOS, S | | | 1,23 | MJ | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |

Tab 4.8 – Produzione dell'acciaio basso legato, input

| Output | | | | |
|---|--------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Emissioni nell'aria | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Water | | 2,92 | kg | Non definito |
| Particulates, > 10 um | | 5,86E-5 | kg | Non definito |
| Particulates, < 2.5 um | | 1,7E-4 | kg | Non definito |
| Particulates, > 0.2 um, and < 2.5 um | | 1,7E-4 | kg | Non definito |
| Mercury | | 2,24E-6 | kg | Non definito |
| Lead | | 1,81E-6 | kg | Non definito |
| Chromium | | 1,25E-6 | kg | Non definito |
| Nickel | | 7,0E-7 | kg | Non definito |
| Zinc | | 2,29E-5 | kg | Non definito |
| Cadmium | | 3,65E-8 | kg | Non definito |
| Copper | | 2,31E-7 | kg | Non definito |
| Hydrogen chloride | | 5,2E-6 | kg | Non definito |
| Hydrogen fluoride | | 2,35E-6 | kg | Non definito |
| Sulfur dioxide | | 7,7E-5 | kg | Non definito |
| Nitrogen oxides | | 1,8E-4 | kg | Non definito |
| Carbon monoxide, fossil | | 2,32E-3 | kg | Non definito |
| Hydrocarbons, aromatic | | 7,7E-5 | kg | Non definito |
| Benzene | | 2,29E-6 | kg | Non definito |
| Benzene, hexachloro- | | 2,0E-8 | kg | Non definito |
| PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons | | 3,37E-8 | kg | Non definito |
| Polychlorinated biphenyls | | 2,33E-8 | kg | Non definito |
| Dioxins (unspec.) | | 4,54E-12 | kg | Non definito |
| Chloride | | 1,82E-6 | kg | Non definito |
| Chromium | | 1,9E-9 | kg | Non definito |
| Argon-40 | | 3,29E-3 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Emissioni in acqua | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Water, ZA | | 2,3E-3 | m3 | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Emissioni nel terreno | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Flussi dei rifiuti finali | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Emissioni non materiali | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Temi sociali | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Temi economici | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Rifiuto ed emissioni al trattamento | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Scrap (iron) (wfr)/RER | | 5,15E-5 | kg | Non definito |
| Slag, unalloyed electric arc furnace steel {GLO} market for APOS, S | | 4,98E-2 | kg | Non definito |
| Inert waste {RoW} clinker production APOS, S | | 5,0E-3 | kg | Non definito |
| Spent solvent mixture {RoW} clinker production APOS, S | | 3,32E-8 | kg | Non definito |
| Dust, unalloyed electric arc furnace steel {GLO} market for APOS, S | | 9,6E-3 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.9 – Produzione dell'acciaio basso legato, output

| Prodotti | | | | |
|--|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | | Quantità fisica | Unità di misura | Quantità fisica |
| V205 bearing cast iron | | 1,32 | kg | Mass |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Water, unspecified natural origin, GLO | | 5,22E-3 | m3 | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| pre-reduced V205 bearing magnetite | | 1,46 | kg | Non definito |
| Quicklime, in pieces, loose {RoW} market for quicklime, in pieces, loose APOS, S | | 5,5E-2 | kg | Non definito |
| Hard coal {ZA} market for APOS, S | | 1,4E-2 | kg | Non definito |
| Oxygen, liquid, at plant/RNA | | 5,07E-2 | kg | Non definito |
| Refractory, basic, packed {GLO} market for APOS, S | | 1,35E-2 | kg | Non definito |
| Anode, graphite, for lithium-ion battery {GLO} market for APOS, S | | 3,0E-3 | kg | Non definito |
| Electricity, medium voltage {ZA} market for APOS, S | | 0,42 | kWh | Non definito |
| Natural gas, high pressure {RoW} market for APOS, S | | 2,5E-2 | m3 | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output | | | | |
| Emissioni nell'aria | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Benzene | | 2,31E-6 | kg | Non definito |
| Cadmium | | 3,65E-8 | kg | Non definito |
| Carbon monoxide, fossil | | 2,32E-3 | kg | Non definito |
| Chromium | | 1,25E-6 | kg | Non definito |
| Copper | | 2,31E-7 | kg | Non definito |
| Dioxins (unspec.) | | 4,54E-12 | kg | Non definito |
| Hydrocarbons, aromatic | | 7,7E-5 | kg | Non definito |
| Hydrogen chloride | | 5,2E-6 | kg | Non definito |
| Hydrogen fluoride | | 2,3E-6 | kg | Non definito |
| Lead | | 1,81E-6 | kg | Non definito |
| Mercury | | 2,24E-6 | kg | Non definito |
| Nickel | | 7,01E-7 | kg | Non definito |
| Nitrogen oxides | | 1,8E-4 | kg | Non definito |
| Polycyclic organic matter, as 15-PAH | | 3,73E-8 | kg | Non definito |
| Particulates, < 2.5 um | | 1,7E-4 | kg | Non definito |
| Particulates, > 10 um | | 5,86E-5 | kg | Non definito |
| Particulates, > 2.5 um, and < 10um | | 1,7E-4 | kg | Non definito |
| Sulfur dioxide | | 7,7E-5 | kg | Non definito |
| Water | | 2,02 | kg | Non definito |
| Zinc | | 2,29E-5 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Emissioni in acqua | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Water, Europe without Switzerland | | 3,2E-3 | m3 | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.10 – Produzione dei cuscinetti appositi per VRFB

4.1.6 Serbatoio dell'elettrolita

L'elettrolita sopra modellato è contenuto in serbatoi plastici. Il materiale dei serbatoi deve essere resistente alla corrosione in ambiente fortemente acido. La fibra di vetro mista a PVC mostra proprietà che si addicono a queste caratteristiche. I 6 tank scelti per quest'applicazione hanno un volume di 50 m³ l'uno per un volume totale di 300 m³. In particolare i tank hanno forma cilindrica e la fibra di vetro è necessaria a rinforzare le componenti plastiche.

| Prodotti | | | | |
|--|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | | Quantità fisica | Unità di misura | Quantità fisica |
| Electrolyte tank, glass fiber 1 kg | | 1 | kg | Mass |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up {GLO} market for APOS, S | | 0,41 | kg | Non definito |
| Glass fibre {GLO} market for APOS, S | | 0,62 | kg | Non definito |
| Polyvinyl chloride resin, at plant/RNA | | 2,19E-2 | kg | Non definito |
| Extrusion, plastic film {GLO} market for APOS, S | | 2,19E-2 | kg | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | 0,21 | tkm | Non definito |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | 0,11 | tkm | Non definito |
| Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO} market for APOS, S | | 1 | tkm | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output | | | | |
| Emissioni nell'aria | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Hydrocarbons, aromatic | | 6,25E-5 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Emissioni in acqua | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Emissioni nel terreno | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Flussi dei rifiuti finali | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Emissioni non materiali | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Temi sociali | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Temi economici | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Rifiuto ed emissioni al trattamento | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Waste mineral wool, for final disposal {Europe without Switzerland} market for waste mineral | | 5,14E-2 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.11 – Produzione del contenitore per l'elettrolita

4.1.7 Collettore di corrente

Ora si arriva alla modellazione delle parti periferiche della batteria. Vengono utilizzate piastre di rame spesse 20 mm in entrambi i poli della pila. Essendo costituite per la quasi totalità di rame per l'appunto, si ipotizza che per ogni chilo di rame venga prodotto un chilo di collettore.

| Prodotti | | | | |
|--|--------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | Quantità fisica | Unità di misur | Quantità fisica | |
| Current collector, for VRFB | 1 | kg | Mass | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Copper {GLO} market for APOS, S | | 1 | kg | Non definito |
| Sheet rolling, copper {GLO} market for APOS, S | | 1 | kg | Non definito |
| Metal working factory {RER} construction APOS, S | | 4,0E-10 | p | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | 0,1 | tkm | Non definito |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | 0,2 | tkm | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.12 – Produzione del collettore di corrente

4.1.8 Telaio della cella

Ogni cella è ricoperta da un telaio a base di plastica. In questo caso specifico il telaio è composto di PVC modellato per estrusione.

| Prodotti | | | | |
|--|--------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | Quantità fisica | Unità di misur | Quantità fisica | |
| Cell frame, PVC, for VRFB | 1 | kg | Mass | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Polyvinylchloride resin (E-PVC), emulsion polymerisation, production mix, at plant RER | | 1 | kg | Non definito |
| Extrusion, plastic pipes {GLO} market for APOS, S | | 1 | kg | Non definito |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | 0,2 | tkm | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | 0,1 | tkm | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.13 – Produzione del telaio della cella

4.1.9 Guarnizioni

Le guarnizioni sono un componente fondamentale per evitare o minimizzare le perdite di elettrolita: devono essere resistenti alla corrosione, durature e performanti. Sono di seguito prese in considerazione tre tipologie di guarnizioni: FKM, EPDM e quelle a base di siliconi. I dati specifici di produzione sono riportati in [24], mentre di seguito si riportano i dati inseriti in Simapro.

| Prodotti | | | | |
|---|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | | Quantità fisica | Unità di misura | Quantità fisica |
| Gasket, EPDM based, for VRFB | | 1 | kg | Mass |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Water, cooling, unspecified natural origin, Europe without Switzerland | | 4,5E-2 | m3 | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Polyethylene high density granulate (PE-HD), production mix, at plant RER | | 0,25 | kg | Non definito |
| Polycarbonate granulate (PC)/EU-25 | | 6,28E-2 | kg | Non definito |
| Lime, hydrated, packed {GLO} market for APOS, S | | 8,83E-2 | kg | Non definito |
| Lubricating oil {GLO} market for APOS, S | | 0,16 | kg | Non definito |
| Zinc concentrate {GLO} market for APOS, S | | 1,91E-2 | kg | Non definito |
| Carbon black {GLO} market for APOS, S | | 0,37 | kg | Non definito |
| Nitrogen fertiliser, as N {GLO} market for APOS, S | | 2,26E-3 | kg | Non definito |
| Chemical factory, organics {GLO} market for APOS, S | | 4,0E-10 | p | Non definito |
| Extrusion, plastic pipes {GLO} market for APOS, S | | 1 | kg | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | 0,1 | tkm | Non definito |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | 0,57 | tkm | Non definito |
| Chemical, organic {GLO} market for APOS, S | | 5,82E-2 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} market group for APOS, S | | 0,72 | kWh | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output | | | | |
| Emissioni nell'aria | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Water | | 17,44 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Emissioni in acqua | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Water, Europe without Switzerland | | 2,76E-2 | m3 | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.14 – Produzione membrana EPDM

| Prodotti | | | | |
|---|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | | Quantità fisica | Unità di misura | Quantità fisica |
| Gasket, FKM based, for VRFB | | 1 | kg | Mass |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Hexafluoroethane {GLO} market for APOS, S | | 0,33 | kg | Non definito |
| Tetrafluoroethane {GLO} market for APOS, S | | 0,33 | kg | Non definito |
| Polyvinylfluoride {GLO} market for APOS, S | | 0,33 | kg | Non definito |
| Extrusion, plastic pipes {GLO} market for APOS, S | | 1 | kg | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | 0,1 | tkm | Non definito |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | 0,2 | tkm | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

4.15 – Produzione Membrana FKM, input

| Prodotti | | | | |
|---|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | | Quantità fisica | Unità di misur | Quantità fisica |
| Gasket, silicone based, for VRFB | | 1 | kg | Mass |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Water, well, in ground, Europe without Switzerland | | 0,00027 | m3 | Non definito |
| Water, cooling, unspecified natural origin, Europe without Switze | | 0,24 | m3 | Non definito |
| Water, well, in ground, Europe without Switzerland | | 2,69E-3 | m3 | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Zinc {GLO} market for APOS, S | | 9,86E-6 | kg | Non definito |
| Copper {GLO} market for APOS, S | | 1,26E-3 | kg | Non definito |
| Cyclohexanol {GLO} market for APOS, U | | 8,63E-6 | kg | Non definito |
| Ethylene, average {GLO} market for APOS, S | | 0,17 | kg | Non definito |
| Fluosilicic acid, without water, in 22% solution state {GLO} market for APOS, S | | 4,59E-3 | kg | Non definito |
| Quicklime, milled, packed {GLO} market for APOS, S | | 2,78E-2 | kg | Non definito |
| Methylchloride {GLO} market for APOS, S | | 0,15 | kg | Non definito |
| Isopropanol {GLO} market for APOS, S | | 4,5E-4 | kg | Non definito |
| Polyethylene high density granulate (PE-HD), production mix, at plant RER | | 1,23E-3 | kg | Non definito |
| Silicon tetrachloride {GLO} market for APOS, S | | 1,17E-3 | kg | Non definito |
| Silicon, solar grade {RoW} Silicon production, electronics grade APOS, S | | 8,57E-2 | kg | Non definito |
| Sodium chlorate, powder {GLO} market for APOS, S | | 0,17 | kg | Non definito |
| Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO} market for APOS, S | | 2,45E-3 | kg | Non definito |
| Sulfuric acid {GLO} market for APOS, S | | 9,44E-3 | kg | Non definito |
| Tin {GLO} market for APOS, S | | 7,4E-5 | kg | Non definito |
| Titanium dioxide {RER} market for APOS, S | | 1,23E-5 | kg | Non definito |
| Toluene, liquid {GLO} market for APOS, S | | 1,23E-6 | kg | Non definito |
| Silicone factory {GLO} market for APOS, S | | 1,0E-11 | p | Non definito |
| Extrusion, plastic pipes {GLO} market for APOS, S | | 1 | kg | Non definito |
| Chemical, organic {GLO} market for APOS, S | | 3,83E-2 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Heat, central or small-scale, natural gas {Europe without Switzerland} market for heat, centra | | 10,61 | MJ | Non definito |
| Heat, district or industrial, other than natural gas {Europe without Switzerland} market for he | | 0,36 | MJ | Non definito |
| Electricity, high voltage {Europe without Switzerland} market group for APOS, S | | 0,34 | kWh | Non definito |
| Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} market group for APOS, S | | 0,56 | kWh | Non definito |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | 0,4 | tkm | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | 0,13 | tkm | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output | | | | |
| Emissioni nell'aria | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Hydrocarbons, chlorinated | | 2,26E-5 | kg | Non definito |
| Hydrogen chloride | | 3,71E-5 | kg | Non definito |
| Water | | 93,27 | kg | Non definito |
| Particulates, > 2.5 um, and < 10um | | 7,0E-5 | kg | Non definito |
| Silicon | | 8,61E-5 | kg | Non definito |
| Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified | | 3,7E-4 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

| Emissioni in acqua | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
|--|--------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Chloride | | 0,04 | kg | Non definito |
| TOC, Total Organic Carbon | | 7,1E-4 | kg | Non definito |
| Chromium | | 7,87E-7 | kg | Non definito |
| Fluoride | | 3,71E-5 | kg | Non definito |
| Sulfate | | 1,9E-4 | kg | Non definito |
| Phosphate | | 4,3E-6 | kg | Non definito |
| Nickel | | 7,98E-7 | kg | Non definito |
| Mercury | | 1,86E-9 | kg | Non definito |
| BOD5, Biological Oxygen Demand | | 7,85E-5 | kg | Non definito |
| AOX, Adsorbable Organic Halogen as Cl | | 1,08E-5 | kg | Non definito |
| COD, Chemical Oxygen Demand | | 8,8E-4 | kg | Non definito |
| Zinc | | 1,86E-6 | kg | Non definito |
| Copper | | 6,85E-7 | kg | Non definito |
| DOC, Dissolved Organic Carbon | | 7,1E-4 | kg | Non definito |
| Cadmium | | 9,47E-7 | kg | Non definito |
| Phosphorus | | 4,65E-7 | kg | Non definito |
| Sodium | | 2,7E-2 | kg | Non definito |
| Iron | | 5,9E-6 | kg | Non definito |
| Nitrogen | | 2,9E-4 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Emissioni nel terreno | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Flussi dei rifiuti finali | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Emissioni non materiali | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Temi sociali | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Temi economici | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Rifiuto ed emissioni al trattamento | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Hazardous waste, for incineration {Europe without Switzerland} market for hazardous waste, | | 3,66E-2 | kg | Non definito |
| Municipal solid waste {RoW} market for Cut-off, U | | 2,55E-2 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.16 – Produzione membrana al silicone

4.1.10 Cavi elettrici

I cavi elettrici sono generalmente costituiti da fili in rame ricoperti da uno strato isolante in PVC. La sezione necessaria per la taglia di batterie in questione è assunta pari a 400 mm² con un isolamento spesso 4 mm.

| Prodotti | | | | |
|--|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | | Quantità fisica | Unità di misura | Quantità fisica |
| Copper cable, 1kg for VRFB | | 1 | kg | Mass |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Tap water {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | 1,45 | kg | Non definito |
| Copper {GLO} market for APOS, S | | 0,94 | kg | Non definito |
| Polyvinylchloride, bulk polymerised {GLO} market for APOS, S | | 6,26E-2 | kg | Non definito |
| Wire drawing, copper {GLO} market for APOS, S | | 0,94 | kg | Non definito |
| Extrusion, plastic pipes {GLO} market for APOS, S | | 6,26E-2 | kg | Non definito |
| Rolling mill {RER} production APOS, S | | 1,77E-12 | p | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | 0,1 | tkm | Non definito |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | 0,2 | tkm | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output | | | | |
| Emissioni nell'aria | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Water | | 8,86E-2 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Emissioni in acqua | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Waste water/m3 | | 1,36E-3 | m3 | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Emissioni nel terreno | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Flussi dei rifiuti finali | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Emissioni non materiali | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Temi sociali | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Temi economici | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Rifiuto ed emissioni al trattamento | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Hazardous waste, for incineration {Europe without Switzerland} market for hazardous waste, | | 3,17E-4 | kg | Non definito |
| Waste plastic, mixture {Europe without Switzerland} market for waste plastic, mixture APOS | | 3,37E-4 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.17 – Produzione cavi di rame

4.1.11 Pompe centrifughe

È necessaria una pompa centrifuga per far circolare l'elettrolita nella singola cella; avendo due celle a disposizione si rende necessaria la presenza di due pompe. Si è assunto un flusso volumetrico di $200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ per il dimensionamento delle giranti. Il peso complessivo stimato è 145 kg per pompa.

| Prodotti | | | | |
|--|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | | Quantità fisica | Unità di misur | Quantità fisica |
| Pump, for VRFB | | 1 | kg | Mass |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Aluminium, wrought alloy {GLO} market for APOS, S | | 8,25E-3 | kg | Non definito |
| Cast iron {GLO} market for APOS, S | | 0,49 | kg | Non definito |
| Copper {GLO} market for APOS, S | | 0,1 | kg | Non definito |
| Polyvinylchloride resin (E-PVC), emulsion polymerisation, production mix, at plant RER | | 1,58E-3 | kg | Non definito |
| Polyvinylchloride resin (S-PVC), suspension polymerisation, production mix, at plant RER | | 1,08E-2 | kg | Non definito |
| Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {GLO} market for APOS, S | | 0,38 | kg | Non definito |
| Synthetic rubber {GLO} market for APOS, S | | 2,89E-3 | kg | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | 0,1 | tkm | Non definito |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | 0,2 | tkm | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output | | | | |
| Emissioni nell'aria | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Emissioni in acqua | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Emissioni nel terreno | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Flussi dei rifiuti finali | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Emissioni non materiali | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Temi sociali | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Temi economici | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Rifiuto ed emissioni al trattamento | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Waste plastic, mixture {GLO} market for Conseq, S | | 2,89E-3 | kg | Non definito |
| Waste polyvinylchloride product {Europe without Switzerland} market for waste polyvinylchl | | 1,24E-2 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.18 – Produzione pompe di ricircolo

4.1.12 Tubazioni

Le tubature sono assunte in acciaio al cromo con del Teflon come sigillante. La lunghezza complessiva si attesta a 30 metri per il circuito di ogni cella, per un totale di 60 metri. Il diametro dei tubi è preso pari a 60,3 mm con una quantità di Teflon stimata non essendoci un database che contenga i dati di questo materiale.

| Prodotti | | | | |
|--|--------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | Quantità fisica | Unità di misur | Quantità fisica | |
| Pipes, for VRFB | 1 | kg | Mass | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, S | | 0,87 | kg | Non definito |
| Tetrafluoroethylene film, on glass {RER} production APOS, S | | 0,13 | kg | Non definito |
| Drawing of pipe, steel {GLO} market for APOS, S | | 0,87 | kg | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | 0,1 | tkm | Non definito |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | 0,2 | tkm | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.19 – Produzione delle tubazioni d'acciaio al cromo

4.1.13 Scambiatore di calore

| Prodotti | | | | |
|---|--------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | Quantità fisica | Unità di misur | Quantità fisica | |
| Heat exchanger, for VRFB | 1 | kg | Mass | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, S | | 1 | kg | Non definito |
| Hot rolling, steel {GLO} market for APOS, S | | 1 | kg | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | 0,1 | tkm | Non definito |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | 1 | tkm | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} market group for APOS, S | | 0,27 | MJ | Non definito |
| Heat, district or industrial, natural gas {GLO} market group for APOS, S | | 0,54 | MJ | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.20 – Produzione dello scambiatore di calore

Si è assunto uno scambiatore di calore a piastre in grado di scambiare la maggior quantità di calore possibile in caso di guasto, pari cioè ad 1 MW. Si è usato uno studio presente in letteratura e si sono scalati i risultati per modellare i dati necessari a descrivere il processo di produzione di uno scambiatore di calore adeguato [26].

4.1.14 Processo di controllo di sistema (PCS)

Il sistema di controllo si rende necessario per far funzionare correttamente la batteria in tutte le possibili situazioni operative in cui si può trovare. È composto da elementi basilari come cavi di cablaggio, componenti elettroniche, una unità centrale e i pannelli di controllo. In letteratura non sono disponibili né dati riguardanti la produzione né dati riguardanti il funzionamento specifico di tale sistema in quanto costituisce segreto industriale. Per questo elaborato si considera un sistema costituito da un'interfaccia di controllo della pila e da un sistema di gestione della stessa (BMS Battery Manage System). Per semplicità si assume che siano necessarie tre interfacce di monitoraggio: una per ogni stack e una per il controllo finale dell'intera batteria. E' importante notare che questa semplificazione può essere un aspetto cruciale per l'analisi dell'intero ciclo di vita della batteria perché è noto come le componenti elettroniche storicamente possono avere elevati impatti in gran parte categorie analizzate.

| Prodotti | | | | | |
|---|--|--------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | | Quantità fisica | Unità di misur | Quantità fisica | |
| Process control system, for VRFB | | 1 | kg | Mass | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input | | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Stack monitoring interface | | | 0,91 | kg | Non definito |
| BMS, for Li-ion LFP | | | 0,09 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |

Tab 4.21 – Produzione del sistema di controllo

Si è assunto uno scambiatore di calore a piastre in grado di scambiare la maggior quantità di calore possibile in caso di guasto, pari cioè ad 1 MW. Si è usato uno studio presente in letteratura e si sono scalati i risultati per modellare i dati necessari a descrivere il processo di produzione di uno scambiatore di calore adeguato [26].

4.1.15 Assemblaggi e vita utile

Una volta modellati tutti i singoli componenti e relativi processi di produzione è necessario creare degli assemblaggi per modellare i macro componenti della batteria. La VRFB di riferimento si può considerare suddivisa in quattro macro componenti:

- *Stack*, composto da piastra bipolare, elettrodi e struttura portante della pila;
- *Periferia*, composta da collettore di corrente, guarnizioni, inverter, cavi di cablaggio, pompe centrifughe, tubazioni, scambiatore di calore, sistema di controllo e supporto delle celle;
- *Elettrolita*;
- *Serbatoio di elettrolita*.

La vita utile di un accumulatore elettrochimico dipende a quale tipologia di applicazione è collegato. Un'applicazione che richiede cicli di carica e scarica rapidi e molto ravvicinati tra loro porterà ad un esaurimento precoce delle celle e aumenterà la probabilità di incappare in guasti di varia natura. Per questo motivo in questo settore è più consono ragionare in termini di cicli di carica-scarica completi equivalenti, dopo aver fissato dei parametri come la profondità di scarica (Deep of Discharge, DoD) e l'intervallo tra un ciclo completo e un altro. È possibile calcolare quanti cicli si prevedono in un anno, in base all'applicazione, per poter rapportare il tutto ad un periodo di tempo più facilmente comprensibile, a patto di avere delle condizioni di funzionamento relativamente stabili e periodiche. Per un'applicazione generica è dunque preferibile fare riferimento al singolo ciclo come unità di misura piuttosto che agli anni previsti di funzionamento.

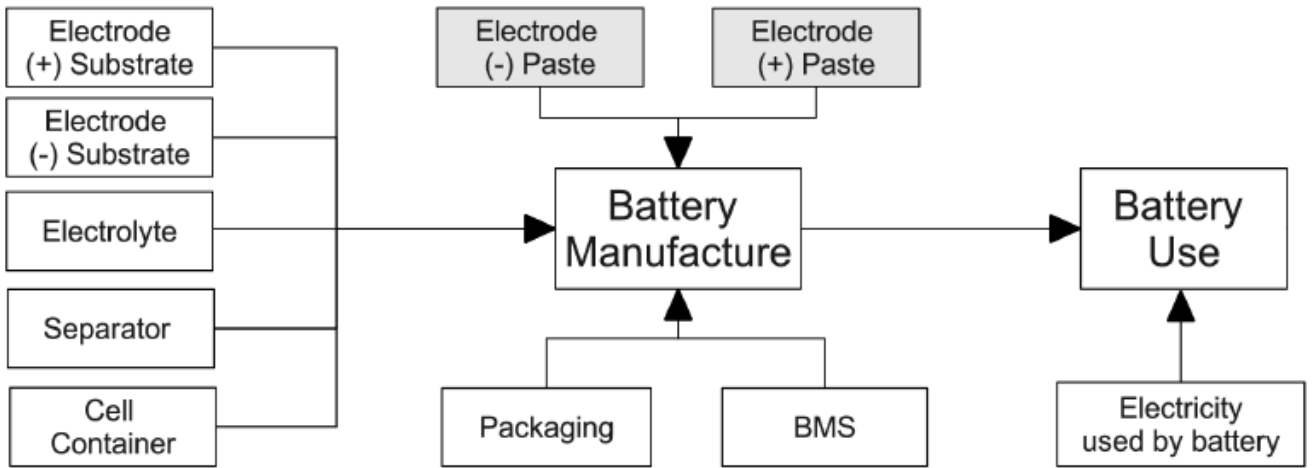
4.2 Modellazione delle batterie agli ioni di litio

Come visto nel capitolo 3.1 esistono diverse tipologie di batterie al litio, ognuna con delle caratteristiche peculiari. In questo elaborato si prendono in considerazione solo le Litio-Ferro-Fosfato (LFP) e le Litio-Nichel-Cobalto-Manganese (NCM) per i seguenti motivi:

- Sono tecnologie utilizzate sia per autotrazione sia per accumulo stazionario;
- Sono tecnologie mature anche se relativamente recenti;
- In letteratura è difficile reperire informazioni dettagliate dai costruttori di batterie perché tali informazioni rappresentano segreto industriale. Si sono analizzati diversi studi e si sono scelti i dati più completi e si sono riadattati alle potenze in gioco per gli accumulatori stazionari.

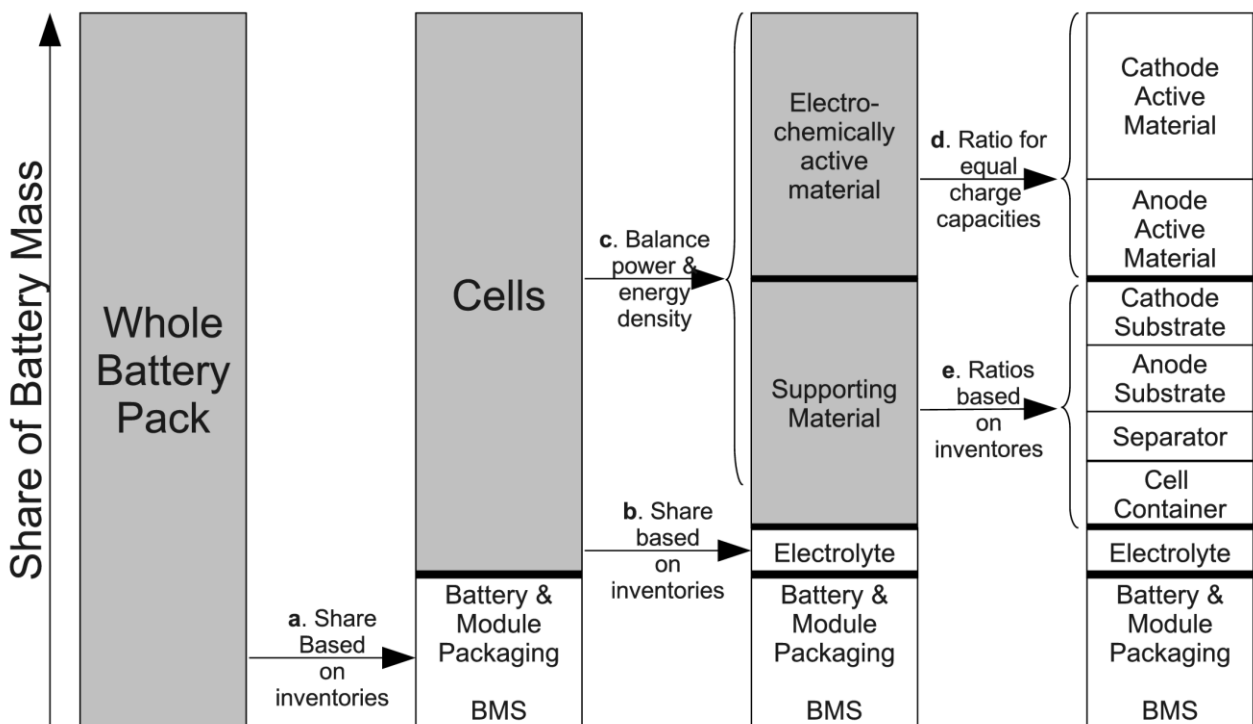
In particolare viene utilizzato lo studio [30] per la modellazione specifica dei singoli componenti, essendo essa estremamente dettagliata e significativa per entrambi i tipi di tecnologia presentati. Questo studio è riferito a componenti per batterie specifiche per l'autotrazione: dopo la modellazione dei componenti si rende necessario aggiustare le percentuali di massa dei singoli componenti per adattarli ad una struttura di maggior potenza, energia e dimensioni quale un SdA stazionario.

Si riporta di seguito lo schema concettuale che si è seguito per la prima modellazione delle batterie al litio, la loro composizione in massa nello studio originale e infine vengono descritti tutti i singoli componenti e il loro inserimento nel software.



Tab 4.22 – Schema concettuale di composizione di una batteria agli litio-ioni

Le cui composizioni in massa e percentuale sono le seguenti:



Tab 4.23 – scomposizione su base massica della batteria al litio considerata

| Parameter | Amount | |
|--|----------------------|----------------------|
| | NCM | LFP |
| Functional Unit Output | | |
| Li-Ion battery, assembled (kg) | | |
| Material Requirements | | |
| Positive electrode paste for Li-ion battery (kg) | 2.3×10^{-1} | 2.5×10^{-1} |
| Negative electrode paste for Li-ion battery (kg) | 9.4×10^{-2} | 8.0×10^{-2} |
| Positive electrode substrate for Li-ion battery (kg) | 3.6×10^{-2} | 3.6×10^{-2} |
| Negative electrode substrate for Li-ion battery (kg) | 8.3×10^{-2} | 8.3×10^{-2} |
| Electrolyte for Li-ion battery (kg) | 1.2×10^{-1} | 1.2×10^{-1} |
| Separator (kg) | 3.3×10^{-2} | 3.3×10^{-2} |
| Cell container, tab and terminals (kg) | 2.0×10^{-1} | 2.0×10^{-1} |
| Module and Battery Packaging (kg) | 1.7×10^{-1} | 1.7×10^{-1} |
| Battery management system (BMS) (kg) | 3.0×10^{-2} | 2.0×10^{-2} |
| Water, decarbonated | 380 | 380 |
| Processing and Energy requirements | | |
| Electricity, medium voltage, UCTE, at grid (MJ) | 27 | 27 |
| Heat, light fuel oil, at industrial furnace 1MW | 2.9 | 2.9 |
| Heat, natural gas, industrial furnace low-NOx > 100 kW | 22 | 22 |
| Transport Requirements | | |
| Freight rail transport (tkm) | 2.3×10^{-1} | 2.3×10^{-1} |
| Lorry >16t (tkm) | 5.1×10^{-2} | 5.1×10^{-2} |
| Infrastructure | | |
| Facility, precious metal refinery (SE) (unit) | 1.9×10^{-8} | 1.9×10^{-8} |
| Emissions | | |
| Waste heat (MJ) | 52 | 52 |

Fig 4.1 – Batteria Li-ion tipo e produzione dei subcomponenti.

4.2.1 Elettrodi

L'elettrodo positivo è ricoperto di materiali elettrochimicamente attivi, un aggregante e del carbonio per massimizzare la conduttività (fino al 10% rispetto altri materiali). I materiali attivi sono rispettivamente il ferrofosfato di litio (LiFePO_4) e l'idrossido di litio nichel cobalto e manganese ($\text{LiNi}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.4}\text{O}_2$) per le LFP e le NCM. E' importante notare che entrambi i materiali sono in uno stato ossidato. I materiali leganti più utilizzati sono il polivinilidene fluoruro (PVDF) e il politetrafluoroetilene (PTFE). Per quanto riguarda il carbonio si usano percentuali inferiori al 6%. Come solvente si utilizza generalmente l'N-metilpirrolidone (NMP) per mantenere l'aspetto di miscela allo stato liquido. Tale solvente evapora dopo l'applicazione dell'elettrodo sul substrato su cui viene installato.

Si assume la stessa composizione in massa per gli elettrodi di entrambe le tecnologie di batteria analizzate con le seguenti percentuali.

| Prodotti | | | | |
|--|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | | Quantità fisica | Unità di misur | Quantità fisica |
| Elettrodo positivo, per LiFePO4 | | 1 | kg | Mass |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Lithium Iron Phospate LiFePO4 | | 0,87 | kg | Non definito |
| Carbon black {GLO} market for APOS, S | | 0,05 | kg | Non definito |
| Tetrafluoroethylene {GLO} market for APOS, S | | 0,08 | kg | Non definito |
| N-methyl-2-pyrrolidone {GLO} market for APOS, S | | 0,28 | kg | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | 0,7 | tkm | Non definito |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | 3,8 | tkm | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output | | | | |
| Emissioni nell'aria | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| N-methylaniline | | 0,28 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.24 – Produzione elettrodo positivo LFP

| Prodotti | | | | |
|--|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | | Quantità fisica | Unità di misur | Quantità fisica |
| Elettrodo positivo, per NCM | | 1 | kg | Mass |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Carbon black {GLO} market for APOS, S | | 0,05 | kg | Non definito |
| Tetrafluoroethylene {GLO} market for APOS, S | | 0,08 | kg | Non definito |
| N-methyl-2-pyrrolidone {GLO} market for APOS, S | | 0,28 | kg | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | 0,7 | tkm | Non definito |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | 3,8 | tkm | Non definito |
| Lithium nickel cobalt manganese oxide LiNiCoMnO2 | | 0 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output | | | | |
| Emissioni nell'aria | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| N-methylaniline | | 0,28 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.25 – Produzione elettrodo positivo NCM

Come si può notare cambia il materiale richiesto ma la massa necessaria è stata assunta uguale.

Nello specifico, per le LFP è necessario modellare la produzione di litio-ferro-fosfato.

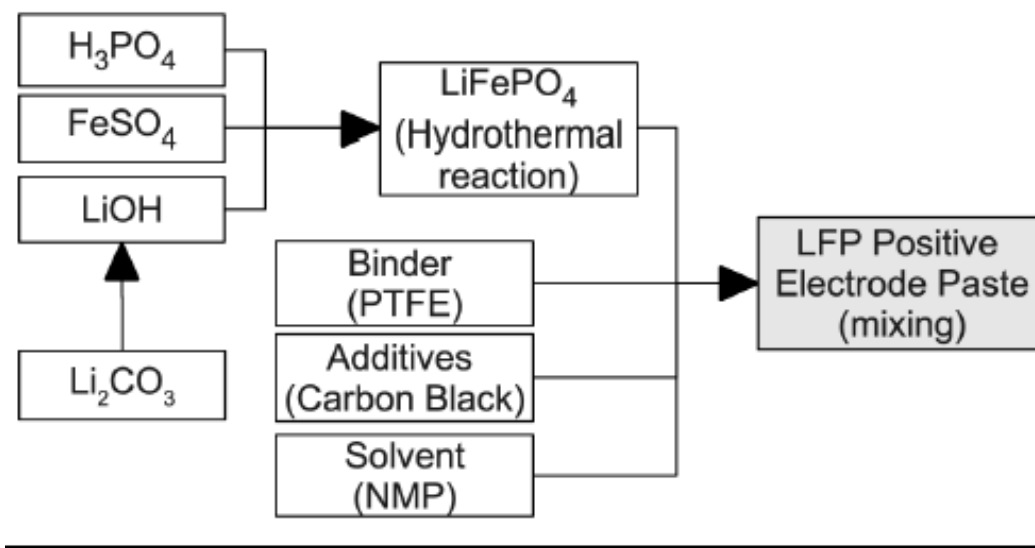
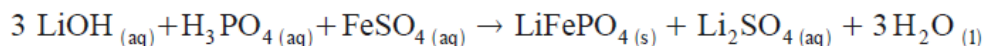


Fig 4.2 – Schema concettuale di produzione dell'elettrolita al litio per LFP

Esistono molte strade per la sua produzione, qui verrà riportata la più comune che corrisponde alla reazione chimica seguente assumendo un rendimento del 95%:



Essendo principalmente nello stato acquoso, i prodotti di scarto e le emissioni generali sono assunte come rilasciate in idrosfera. Il calore necessario è stato calcolato come calore ideale di processo q_{tot} comprendente anche le perdite generiche durante la reazione. Per mancanza di dati non si mettono a inventario le richieste di materiali specifici non presenti nel database EcoInvent.

| Prodotti | | | | |
|---|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | | Quantità fisica | Unità di misura | Quantità fisica |
| Lithium Iron Phosphate LiFePO4 | | 1 | kg | Mass |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Lithium hydroxide {GLO} market for APOS, S | | 0,46 | kg | Non definito |
| Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state {GLO} market for AP | | 0,65 | kg | Non definito |
| Iron sulfate {GLO} market for APOS, S | | 1 | kg | Non definito |
| De-ionised water, reverse osmosis, production mix, at plant, from groundwater RER S | | 46 | kg | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | 0,21 | tkm | Non definito |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | 1,3 | tkm | Non definito |
| Chemical factory, organics {GLO} market for APOS, S | | 4,0E-10 | p | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Heat, from steam, in chemical industry {RER} market for heat, from steam, in chemical indus | | 15 | MJ | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output | | | | |
| Emissioni nell'aria | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Heat, waste | | 1,5 | MJ | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Emissioni in acqua | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Lithium | | 0,1 | kg | Non definito |
| Iron | | 1,9E-2 | kg | Non definito |
| Phosphate | | 3,2E-2 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.26 – Produzione del litio-ferro-fosfato

Per le NCM invece si modella in Simapro l'ossido di litio nichel cobalto e manganese.

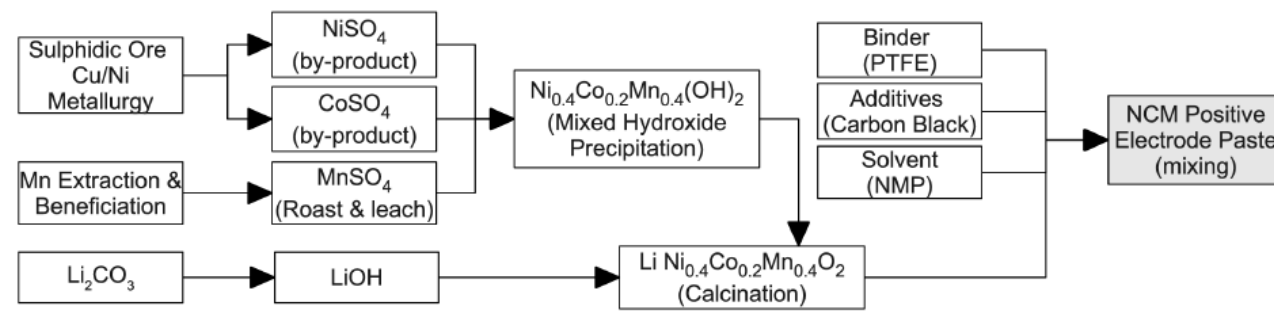
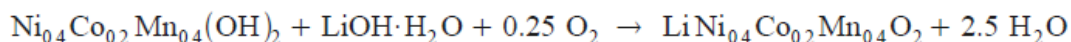


Fig 4.3 – schema concettuale di produzione dell'elettrolita per batterie NCM

Questo viene prodotto dall'idrossido di litio seguendo il protocollo di Liu et al.[34]. La reazione generale di questa reazione è la seguente:

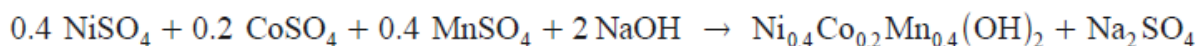


Dove si escludono eventuali perdite di materiale. Per stimare l'energia richiesta si è assunto l'utilizzo di una fornace industriale con temperatura massima di 850°C [35]. Non sono presenti dati riguardanti le emissioni.

| Prodotti | | | | |
|---|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | | Quantità fisica | Unità di misur | Quantità fisica |
| Lithium nickel cobalt manganese oxide LiNiCoMnO2 | | 1 | kg | Mass |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Lithium hydroxide {GLO} market for APOS, S | | 0,25 | kg | Non definito |
| Nickel cobalt manganese hydroxide NiCoMn(OH)2 | | 0,95 | kg | Non definito |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | 0,72 | tkm | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | 0,12 | tkm | Non definito |
| Chemical factory, organics {GLO} market for APOS, S | | 4,6E-10 | p | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Heat, from steam, in chemical industry {RER} market for heat, from steam, in chemical indus | | 0,55 | MJ | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output | | | | |
| Emissioni nell'aria | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Heat, waste | | 5,5 | MJ | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.27 – Produzione dello scambiatore di calore

Il dato riguardante il $\text{Ni}_{0,4}\text{Co}_{0,2}\text{Mn}_{0,4}(\text{OH})_2$ non è presente nel database, dunque si procede alla sua modellazione. Il processo di produzione di questo composto consiste nella preipitazione degli idrossidi metallici da una soluzione acquosa contenente Sali metallici tramite la reazione con una base forte [36]. I prodotti precipitati sono poi filtrati ed essiccati con aria a 120°C La reazione chimica generale che porta alla formazione di questo composto è la seguente:



Ed è inserita nel software coi i seguenti parametri.

| Prodotti | | | | |
|---|--------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | Quantità fisica | Unità di misur | Quantità fisica | |
| Nickel cobalt manganese hydroxide NiCoMn(OH) ₂ | 1 | kg | Mass | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Nickel sulfate {GLO} market for APOS, S | | 0,68 | kg | Non definito |
| Cobalt sulphate CoSO ₄ | | 0,34 | kg | Non definito |
| Manganese sulfate {GLO} market for APOS, S | | 0,66 | kg | Non definito |
| Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO} market for APOS, S | | 0,88 | kg | Non definito |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | 1,5 | tkm | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | 0,26 | tkm | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.28 – Produzione dell'idrossido di manganese

Anche in questo caso il CoSO₄ non è presente nel database. Si procede alla sua implementazione col seguente valore [38]:

| Prodotti | | | | |
|---|--------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | Quantità fisica | Unità di misur | Quantità fisica | |
| Cobalt sulphate CoSO ₄ | 1 | kg | Mass | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Chemical, inorganic {GLO} market for chemicals, inorganic APOS, S | | 0,032 | kg | Non definito |
| Chemical, organic {GLO} market for APOS, S | | 0,01 | kg | Non definito |
| Hydrogen cyanide E | | 0,0015 | kg | Non definito |
| Lime {GLO} market for APOS, S | | 0,019 | kg | Non definito |
| Cement, Portland {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | 1,4 | kg | Non definito |
| Silica sand {GLO} market for APOS, S | | 17 | kg | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | 0,94 | tkm | Non definito |
| Aluminium hydroxide factory {GLO} market for APOS, S | | 3,4E-10 | p | Non definito |
| Mine infrastructure, underground, non-ferrous metal {GLO} market for APOS, S | | 2,1E-9 | p | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Diesel, burned in agricultural machinery {GLO} market for diesel, burned in agricultural mact | | 4,6 | MJ | Non definito |
| Electricity, medium voltage {UCTE} market group for APOS, S | | 6,4 | MJ | Non definito |
| Heat, district or industrial, natural gas {Europe without Switzerland} heat production, natural | | 0 | MJ | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.29 – Produzione del solfato di cobalto, input

| Output | | | | |
|---|--------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Emissioni nell'aria | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Carbon disulfide | | 3,0E-3 | kg | Non definito |
| Particulates, < 2.5 um | | 7,5E-4 | kg | Non definito |
| Particulates, > 10 um | | 7,7E-3 | kg | Non definito |
| Particulates, > 2.5 um, and < 10um | | 6,7E-3 | kg | Non definito |
| Heat, waste | | 6,4 | MJ | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Emissioni in acqua | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Aluminium | | 7,2E-6 | kg | Non definito |
| Arsenic | | 2,5E-7 | kg | Non definito |
| Cadmium | | 2,6E-8 | kg | Non definito |
| Calcium | | 5,7E-2 | kg | Non definito |
| Chromium | | 4,6E-8 | kg | Non definito |
| Cobalt | | 6,5E-8 | kg | Non definito |
| COD, Chemical Oxygen Demand | | 8,7E-4 | kg | Non definito |
| Copper | | 6,7E-7 | kg | Non definito |
| Cyanide | | 1,6E-4 | kg | Non definito |
| Iron | | 2,4E-5 | kg | Non definito |
| Lead | | 2,3E-7 | kg | Non definito |
| Manganese | | 2,1E-6 | kg | Non definito |
| Mercury | | 3,2E-9 | kg | Non definito |
| Nickel | | 2,0E-6 | kg | Non definito |
| Nitrogen | | 1,9E-3 | kg | Non definito |
| Solved substances, inorganic | | 4,3E-4 | kg | Non definito |
| Sulfur | | 2,0E-6 | kg | Non definito |
| Zinc | | 6,4E-6 | kg | Non definito |
| Water (river water from technosphere, turbined) | | 0,014 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Emissioni nel terreno | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Cobalt | | 0,5 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Flussi dei rifiuti finali | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Emissioni non materiali | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Temi sociali | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Temi economici | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Rifiuto ed emissioni al trattamento | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Nickel smelter slag {CH} treatment of, residual material landfill APOS, S | | 13 | kg | Non definito |
| Sulfidic tailing, off-site {GLO} treatment of Conseq, U | | 25 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.30 – Produzione del solfato di cobalto, output

L'elettrodo negativo invece è principalmente costruito da carbonio, sotto forma di grafite o nanotubi. La rappresentazione schematica del processo di produzione è la seguente.

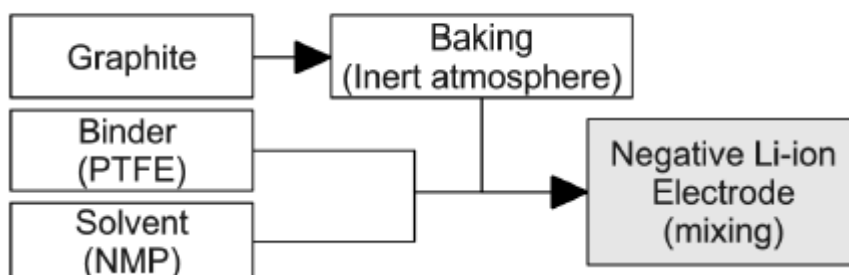


Fig 4.4 – schema di produzione dell'elettrodo negativo, sia per LFP che NCM

In produzione evitar la presenza di ossigeno il carbonio subisce un trattamento termico che lo porta fino a 1100°C in ambiente inerte. Per un elettrodo per NCM oltre la grafite è presente un legante come il PTFE (circa 5%) ed un solvente, che evapora dopo l'applicazione al substrato. L'energia richiesta per la produzione di questo elettrodo negativo è principalmente dovuta al trattamento termico della grafite. Si assume che il processo avvenga nello stesso impianto di assemblaggio della batteria finale.

| Prodotti | | | | |
|---|--------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | Quantità fisica | Unità di misura | Quantità fisica | |
| Elettrodo negativo, Li-ion battery | 1 | kg | Mass | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Graphite | | 0,95 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| N-methyl-2-pyrrolidone {GLO} market for APOS, S | | 0,28 | kg | Non definito |
| Tetrafluoroethylene {GLO} market for APOS, S | | 0,05 | kg | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | 0,1 | tkm | Non definito |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | 0,2 | tkm | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Heat, from steam, in chemical industry {RER} market for heat, from steam, in chemical indus | | 5 | MJ | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output | | | | |
| Emissioni nell'aria | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Heat, waste | | 5 | MJ | Non definito |
| N-methylaniline | | 0,28 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.31 – Produzione dell'elettrodo negativo

4.2.2 Separatore

Il ruolo fondamentale del separatore è evitare che i due elettrodi entrino in contatto tra di loro, lasciando gli elettroni liberi di scorrere nell'elettrolita. Il separatore di molte tipologie di batterie al litio è molto simile: è sostanzialmente formato da materiale polimerico poroso. In questo caso dunque il separatore per entrambe le batterie considerate è lo stesso, formato in ugual percentuale da polipropilene (PP) e polietilene (PE).

| Prodotti | | | | |
|--|--------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | Quantità fisica | Unità di misur | Quantità fisica | |
| Separator, Li-ion battery | 1 | kg | Mass | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Polyethylene, LDPE, granulate, at plant/RER | | 0,5 | kg | Non definito |
| Polypropylene, PP, granulate, at plant/RER | | 0,5 | kg | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | 0,1 | tkm | Non definito |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | 0,2 | tkm | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Plastic processing factory {GLO} market for APOS, S | | 7,4E-10 | p | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.32 – Produzione del separatore

4.2.3 Substrati degli elettrodi

Lo strato metallico superficiale degli elettrodi misura circa 15-20 μm . Questo strato ha bisogno di un adeguato supporto come un collettore di corrente: per l'elettrodo positivo si utilizza l'alluminio mentre per quello negativo si preferisce il rame. Si riportano di seguito i dati relativi ad entrambi i substrati.

| Prodotti | | | | |
|--|--------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | Quantità fisica | Unità di misur | Quantità fisica | |
| Substrate per elettrodo positivo Li-ion battery | 1 | kg | Mass | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Aluminium | | 1 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Sheet rolling, aluminium {GLO} market for APOS, S | | 1 | kg | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | 0,1 | tkm | Non definito |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | 0,2 | tkm | Non definito |
| Non-ferrous metal smelter {GLO} market for APOS, S | | 4,6E-10 | p | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.33 – Produzione del substrato per l'elettrodo positivo

| Prodotti | | | | | |
|--|--|--------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | | Quantità fisica | Unità di misur | Quantità fisica | |
| Substrate per elettrodo negativo Li-ion battery | | 1 | kg | Mass | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input | | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Copper | | | 1 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Sheet rolling, copper {RER} processing APOS, S | | | 1 | kg | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | | 0,1 | tkm | Non definito |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | | 0,2 | tkm | Non definito |
| Non-ferrous metal smelter {GLO} market for APOS, S | | | 4,6E-10 | p | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |

Tab 4.34 – Produzione del substrato per l'elettrodo negativo

4.2.4 Elettrolita LFP

Gli elettroliti liquidi sono generalmente composti da una soluzione 1 molare di sali di litio in una miscela di solventi alchil carbonati. Il sale scelto dall'industria per queste batterie è l'esafluorofosfato di litio (LiPF₆), atto a generare acido idrofluorico (HF) fino a degradarsi nella reazione.

Nel database non sono presenti gli input specifici per LiPF₆ e gli alchil carbonati, dunque sono stati presi dei generici proxy organici e inorganici. L'elettrolita qui modellato è considerato comune in entrambe le batterie analizzate.

| Prodotti | | | | | |
|--|--|--------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | | Quantità fisica | Unità di misur | Quantità fisica | |
| Elettrolita per LiPF ₆ , 1M, Li-ion battery | | 1 | kg | Mass | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input | | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Lithium hexafluorophosphate {GLO} market for APOS, S | | | 0,12 | kg | Non definito |
| Solvent, organic {GLO} market for APOS, S | | | 0,88 | kg | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | | 0,1 | tkm | Non definito |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | | 0,6 | tkm | Non definito |
| Chemical factory, organics {GLO} market for APOS, S | | | 4,0E-10 | p | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | | |

Tab 4.35 – Produzione dell'elettrolita per LFP

4.2.5 Pacchetto contenitivo

Generalmente i contenitori delle celle per le batterie Li-ion sono costituiti di alluminio o acciaio inox. Non essendo disponibili dati precisi si è assunto quanto segue:

| Prodotti | | | | |
|--|--------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | Quantità fisica | Unità di misura | Quantità fisica | |
| Cell container, for Li-ion | 1 | kg | Mass | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Sheet rolling, aluminium {GLO} market for APOS, S | | 1 | kg | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | 0,1 | tkm | Non definito |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | 0,2 | tkm | Non definito |
| Metal working factory {GLO} market for APOS, S | | 4,6E-10 | p | Non definito |
| Aluminium, primary, ingot {IAI Area, EU27 & EFTA} market for APOS, S | | 1 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.35 – Produzione del pacchetto contenitivo per batterie al litio

4.2.6 Sistema di controllo (BMS)

È di fondamentale importanza nelle batterie al litio avere un sistema di controllo per prevenire i fenomeni di sovraccarica e scarica troppo profonda. Il sistema di controllo (Battery Manage System) corrisponde a circa il 4% in massa [40] dell'intera batteria ed è costituito principalmente da cavi, schede elettroniche e contenitori di metallo.

| Prodotti | | | | |
|--|--------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | Quantità fisica | Unità di misura | Quantità fisica | |
| BMS, for Li-ion LFP | 1 | kg | Mass | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Polypropylene, granulate {GLO} market for APOS, S | | 0,18 | kg | Non definito |
| Injection moulding {GLO} market for APOS, S | | 0,18 | kg | Non definito |
| Liquid crystal display, unmounted {GLO} market for APOS, S | | 0,68 | kg | Non definito |
| Electronics, for control units {GLO} market for APOS, S | | 0,32 | kg | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | 0,1 | tkm | Non definito |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | 0,5 | tkm | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.36 – Produzione del battery management system, LFP

| Prodotti | | | | |
|--|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti | | Quantità fisica | Unità di misura | Quantità fisica |
| BMS, for Li-ion NCM | | 1 | kg | Mass |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da natura (risorse) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Integrated circuit, logic type {GLO} market for APOS, S | | 0,01 | kg | Non definito |
| Copper {RoW} production, primary APOS, S | | 0,5 | kg | Non definito |
| Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, S | | 0,4 | kg | Non definito |
| Wire drawing, copper {GLO} market for APOS, S | | 0,5 | kg | Non definito |
| Sheet rolling, steel {GLO} market for APOS, S | | 0,4 | kg | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | | 0,1 | tkm | Non definito |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | | 0,2 | tkm | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.37 – Produzione del BMW per NCM

4.3 Adeguamento alla potenza di riferimento, vita utile e assemblaggio

Come affermato in precedenza la modellazione è stata effettuata per l'unità funzionale di 1 chilogrammo per ogni componente, sia per semplicità di inserimento dati sia di ricerca in letteratura. I sistemi d'accumulo invece sono catalogati in base alla loro capacità di accumulo di energia. Il parametro che lega queste due unità di misura è la densità energetica [Wh/kg]. Dovendo adeguare le batterie fin qui descritte alle dimensioni consone ad un accumulatore stazionario, si ipotizza una densità energetica ragionevole per ogni tecnologia e se ne va a calcolare il peso di ogni componente. Come già accennato nel paragrafo [], si hanno densità dell'ordine di:

- 90-120 Wh/kg per le LFP;
- 140-200 Wh/kg per le NCM;
- 10-75 Wh/kg per le VRFB.

La tecnologia impiegata per la realizzazione delle celle al litio si può considerare matura da qualche anno, mentre le batterie a flusso sono più arretrate nello sviluppo, nonostante esistano applicazioni dalla fine degli anni '70.

E' ragionevole pertanto supporre un'elevata densità energetica per le prime, pari al limite tecnologico, e una più modesta nel range di pertinenza per le seconde. Per le VRFB si è dovuta adattare la capacità iniziale di 8 MWh con quella per il confronto di 1 MWh: la quantità di elettrolita e di relativo serbatoio hanno una proporzionalità diretta, mentre per le altre componenti si è assunto di considerarne un quarto invece di un ottavo a causa della ridotta scalabilità delle parti periferiche. Si è così optato per:

- 120 Wh/kg per le LFP;
- 200 Wh/kg per le NCM;
- 24,3 Wh/kg per le VRFB.

Mediante una proporzione, si ottiene il peso complessivo dei 3 SdA considerati a parità di capacità d'accumulo, scelta pari a 1 MWh.

| LFP | | | NCM | | |
|-------------------------------|--------|------|-------------------------------|--------|------|
| Battery mass composition | % | [kg] | Battery mass composition | % | [kg] |
| Positive electrode | 24,80 | 2067 | Positive electrode | 23,20 | 1160 |
| Negative electrode | 8,00 | 667 | Negative electrode | 9,40 | 470 |
| Separator | 3,30 | 275 | Separator | 3,30 | 165 |
| Substrate, positive electrode | 3,60 | 300 | Substrate, positive electrode | 3,60 | 180 |
| Substrate, negative electrode | 8,30 | 692 | Substrate, negative electrode | 8,30 | 415 |
| Electrolyte | 12,00 | 1000 | Electrolyte | 12,00 | 600 |
| Cell container | 20,00 | 1667 | Cell container | 20,20 | 1010 |
| Module and battery packaging | 17,00 | 1417 | Module and battery packaging | 17,00 | 850 |
| BMS | 3,00 | 250 | BMS | 3,00 | 150 |
| | 100,00 | 8333 | | 100,00 | 5000 |

| VRFB | | |
|--------------------------|--------|-------|
| Battery mass composition | % | [kg] |
| Membrane | 0,09 | 38 |
| Electrode | 0,25 | 105 |
| Bipolar plate | 3,34 | 1373 |
| Current collector | 1,20 | 493 |
| Cell frame | 0,19 | 77 |
| Gaskets | 0,26 | 107 |
| Stack frame | 0,76 | 313 |
| Electrolyte | 82,72 | 34028 |
| Tank | 9,90 | 4074 |
| Pumps | 0,35 | 145 |
| Pipes | 0,20 | 83 |
| Cables | 0,11 | 44 |
| PCS | 0,01 | 3 |
| Heat exchanger | 0,62 | 256 |
| | 100,00 | 41136 |

Per tenere conto del rendimento della batteria si fa riferimento al “Rapporto pubblico anno 2016 Storage Lab” [46] in cui sono state analizzate diverse tipologie di batterie al litio per accumulo stazionario da 1 MWh, le quali mostrano un andamento decrescente in maniera non lineare, come si mostra di seguito.

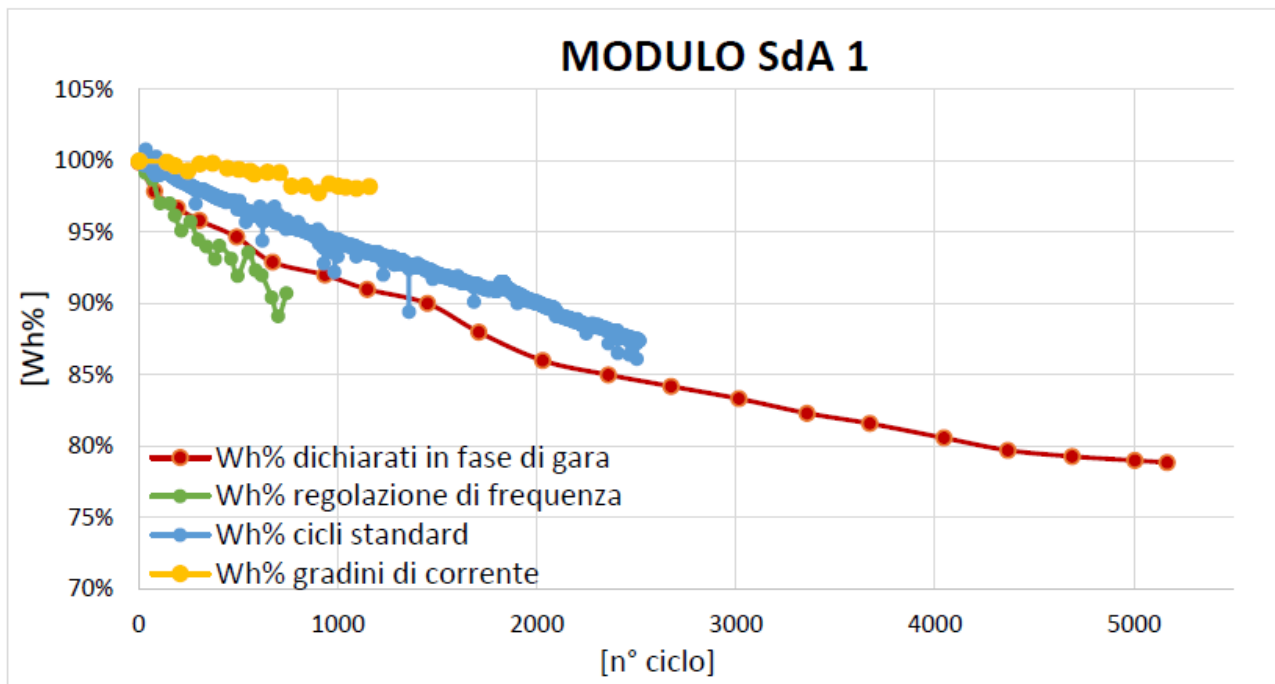


Fig 4.5 – Esempio di esperimento effettuato da Terna

Altre tipologie di batterie sempre al litio mostrano un andamento simile ma con un plateau più marcato, dunque si assume che:

- Il rendimento finale al ciclo numero 3000 sia 85%, si prende un valore medio di efficienza del 90%;
- Il rendimento finale al ciclo numero 5000 sia 80%, si prende un valore medio di efficienza del 85%;
- Per le VRFB l'efficienza è assunta dell'85% costante, dal momento che se la temperatura dell'elettrolita viene monitorata e mantenuta al di sotto dei 35°C non si verifica nessun tipo di alterazione chimica e di conseguenza nessun degradamento dal punto di vista prestazionale.

Infine è necessario modellare l'assemblaggio di tutti i componenti appena visti. Questa operazione consente di unire tutti i componenti, consentendo di aggiungere l'energia necessaria e i mezzi di trasporto impiegati. Non essendoci dati precisi in letteratura si assume, come spesso è stato assunto nel documento [23], 10 km per tonnellata e 0.01 kWh per chilogrammo di materiale. Si ottengono così i seguenti assemblaggi, a cui faranno riferimento tutte le analisi riportate nei capitoli successivi.

| Nome | Stato | Commento | | | | |
|---|-----------------|----------------|---------------|-------------|-----|-----|
| Assemblaggio Li-ion LFP 1MWh | Terminato | | | | | |
| Materiali/assemblaggi | Quantità fisica | Unità di misur | Distribuzione | SD^2 o 2*SD | Min | Max |
| Elettrodo positivo, per LiFePO4 | 2066 | kg | Non definito | | | |
| Elettrodo negativo, Li-ion battery | 666 | kg | Non definito | | | |
| Separator, Li-ion battery | 275 | kg | Non definito | | | |
| Substrate per elettrodo negativo Li-ion battery | 691 | kg | Non definito | | | |
| Substrate per elettrodo positivo Li-ion battery | 300 | kg | Non definito | | | |
| Elettrolita per LiPF6, 1M, Li-ion battery | 1000 | kg | Non definito | | | |
| Cell container, for Li-ion | 1666 | kg | Non definito | | | |
| packing, module and battery, for Li-ion battery | 1416 | kg | Non definito | | | |
| BMS, for Li-ion LFP | 250 | kg | Non definito | | | |
| Assemblaggio Li-ion copper | 8333 | p | Non definito | | | |
| Assemblaggio Li-ion iron components | 8333 | p | Non definito | | | |
| Assemblaggio Li-ion Plastic mix | 8333 | p | Non definito | | | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | | |
| Processi | Quantità fisica | Unità di misur | Distribuzione | | | |
| Electricity, medium voltage {UCTE} market group for APOS, S | 225000 | MJ | Non definito | | | |
| Heat, district or industrial, other than natural gas {Europe without Switzerland} heat production, li | 24166 | MJ | Non definito | | | |
| Heat, district or industrial, natural gas {Europe without Switzerland} heat production, natural gas, | 183333 | MJ | Non definito | | | |
| Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | 83330 | tkm | Non definito | | | |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | 83330 | tkm | Non definito | | | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | | |

Tab 4.38 – Assemblaggio batterie al ferro-fosfato

| Nome | Stato | Commento | | | | |
|---|-----------------|----------------|---------------|-------------|-----|-----|
| Assemblaggio Li-ion NCM 1MWh | Nessuno | | | | | |
| Materiali/assemblaggi | Quantità fisica | Unità di misur | Distribuzione | SD^2 o 2*SD | Min | Max |
| Elettrodo positivo, per NCM | 1160 | kg | Non definito | | | |
| Elettrodo negativo, Li-ion battery | 470 | kg | Non definito | | | |
| Substrate per elettrodo positivo Li-ion battery | 180 | kg | Non definito | | | |
| Substrate per elettrodo negativo Li-ion battery | 415 | kg | Non definito | | | |
| Elettrolita per LiPF6, 1M, Li-ion battery | 600 | kg | Non definito | | | |
| Separator, Li-ion battery | 165 | kg | Non definito | | | |
| Cell container, for Li-ion | 1010 | kg | Non definito | | | |
| packing, module and battery, for Li-ion battery | 850 | kg | Non definito | | | |
| BMS, for Li-ion NCM | 150 | kg | Non definito | | | |
| Assemblaggio Li-ion copper | 5000 | p | Non definito | | | |
| Assemblaggio Li-ion iron components | 5000 | p | Non definito | | | |
| Assemblaggio Li-ion Plastic mix | 5000 | p | Non definito | | | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | | |
| Processi | Quantità fisica | Unità di misur | Distribuzione | | | |
| Electricity, medium voltage {UCTE} market group for APOS, S | 135000 | MJ | Non definito | | | |
| Heat, district or industrial, other than natural gas {Europe without Switzerland} heat production, li | 14500 | MJ | Non definito | | | |
| Heat, district or industrial, natural gas {Europe without Switzerland} heat production, natural gas, | 110000 | MJ | Non definito | | | |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | 50000 | tkm | Non definito | | | |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | 50000 | tkm | Non definito | | | |
| (Inserisci linea qui) | | | | | | |

Tab 4.39 – Assemblaggio batterie al nickel-cobalto-manganese

| | | |
|------------------------|-----------|----------|
| Nome | Stato | Commento |
| Assemblaggio VRFB 1MWh | Terminato | |

| Materiali/assemblaggi | Quantità fisica | Unità di misuri | Distribuzione | SD ² o 2*SD | Min | Max |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|---------------|------------------------|-----|-----|
| Nafion Membrane, for VRFB | 38 | kg | Non definito | | | |
| Elettrodo PAN based, 1 kg | 105 | kg | Non definito | | | |
| Bipolar Plate, 1kg | 1373 | kg | Non definito | | | |
| Current collector, for VRFB | 493 | kg | Non definito | | | |
| Cell frame, PVC, for VRFB | 77 | kg | Non definito | | | |
| Gasket, FKM based, for VRFB | 107 | kg | Non definito | | | |
| Stack Frame, 1kg | 313 | kg | Non definito | | | |
| Elettrolita VRFB, 1L | 34028 | kg | Non definito | | | |
| Electrolyte tank, glass fiber 1 kg | 4074 | kg | Non definito | | | |
| Pump, for VRFB | 145 | kg | Non definito | | | |
| Pipes, for VRFB | 83 | kg | Non definito | | | |
| Copper cable, 1kg for VRFB | 44 | kg | Non definito | | | |
| Process control system, for VRFB | 3 | kg | Non definito | | | |
| Heat exchanger, for VRFB | 256 | kg | Non definito | | | |
| Assemblaggio VRFB elettrolita | 34028 | p | Non definito | | | |
| Assemblaggio VRFB Stack | 1 | p | Non definito | | | |
| Assemblaggio VRFB tank | 4074 | p | Non definito | | | |
| Assemblaggio VRFB Periphery | 1 | p | Non definito | | | |

(Inserisci linea qui)

| Processi | Quantità fisica | Unità di misuri | Distribuzione |
|---|-----------------|-----------------|---------------|
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | 420000 | tkm | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | 420000 | tkm | Non definito |
| Electricity, medium voltage {IT} electricity voltage transformation from high to medium voltage | 4200 | kWh | Non definito |

(Inserisci linea qui)

Tab 4.40 – Assemblaggio batterie a flusso di vanadio

4.4 Scenari di fine vita

Una fase di fondamentale importanza per l'intero ciclo di vita di un bene o servizio è costituita dall'impatto nella parte terminale della sua vita o tempo di utilizzo. In questo caso le batterie dopo il loro tempo di vita utile devono essere smaltite. Questo è un argomento molto delicato perché dalle ipotesi che si faranno dipenderà una fetta importante dell'impatto globale della batteria in questione. In questo elaborato si terranno in considerazione due ipotesi, per effettuare un raffronto e comprendere utilità e efficacia di processi come smaltimento, nelle sue diverse forme, e riciclo, che comprende sia lo smaltimento che la re immissione nel mercato delle materie prime ricavate.

Da letteratura [45] sono noti i range di percentuale di riciclo dei materiali che compongono le batterie al litio per veicoli completamente elettrici. E' noto altresì che le percentuali di riciclo delle batterie stazionarie sono più elevate, essendo queste di dimensioni maggiori e sottoposte a normative più severe sia in fase di funzionamento che di fine vita. L'obiettivo da perseguire è il totale recupero di ogni elemento o materiale che si va a trattare, al fine di ottenere un'economia circolare che va a minimizzare l'impatto dell'uomo e dei suoi rifiuti sull'ambiente terracqueo. Spesso però ci si scontra con tecnologie non ancora mature o vincoli economici troppo stringenti. Si stima dunque un valore medio di riciclo per le varie componenti riportato di seguito.

| Material | Percent Recoverd |
|-------------|------------------|
| cobalt | 80 |
| nickel | 80 |
| iron | 75 |
| copper | 90 |
| carbon | 85 |
| lithium | 85 |
| manganese | 75 |
| separator | 87 |
| aluminum | 85 |
| steel | 95 |
| electrolyte | 80 |
| wire board | 90 |
| plastics | 77 |

Tab 4.41 – Percentuali di riciclo medie europee

Data l’analogia del campo d’applicazione e del contesto normativo si ritiene che questi valori siano validi non solo per le batterie agli ioni di litio ma anche per le batterie a flusso, prese in considerazione in questo studio. La percentuale di materiale rimanente viene considerata come smaltita in maniera tradizionale, ovvero in base al tipo di materiale può andare in contro a stoccaggio in discarica, incenerimento, termovalorizzazione o dispersione in ambiente.

Tutti gli studi effettuati sull’elettrolita a base di pentossido di vanadio sono ad oggi concordi nell’affermare che esso non si degradi in maniera significativa nel corso della vita utile della batteria, quindi si assume un’efficienza di riciclo del 80% e si tiene conto di energia elettrica e calore necessari alla purificazione chimica per rimuovere le impurità.

Il serbatoio contenente l’elettrolita viene considerato a parte essendo formato principalmente da PVC e fibra di vetro come rafforzante. Il PVC viene recuperato solo parzialmente per via degli alti costi di trattamento. Dal punto di vista tecnico è il terzo materiale plastico più riciclato al mondo ma non sempre i costi ne consentono il recupero. Solitamente questo materiale è impiegato per opere la cui vita utile è molto lunga, come i 20 anni stimati delle VRFB. In Italia, più precisamente in provincia di Ferrara [27] è presente un’azienda leader in Europa per il riciclo di questo materiale e si assume dunque che l’efficienza sia quasi unitaria. Nonostante questo, parte del materiale è destinato ad essere termovalorizzato assieme ad una percentuale di fibra di vetro.

Per modellare la parte dello smaltimento e riutilizzo dei componenti è necessario, per semplicità, creare un processo di smaltimento per ogni macro componente, a sua volta diviso in più output con un proprio processo di smaltimento. Si va dunque a creare nell’apposita sezione lo “scenario di fine vita”, all’interno della quale, riferendosi ad un determinato assemblaggio, si vanno a considerare i relativi scenari di smaltimento ed eventuali riusi. Di seguito sono riportati tutti i modelli analizzati e suddivisi per tipologia di SdA.

4.4.1 VRFB

Un SdA stazionario a flusso si può pensare come se fosse suddiviso in 4 macro componenti:

- Elettrolita;
- Tank (contenitore);
- Periferia della batteria, composta da tutti gli elementi che non partecipano attivamente al meccanismo di scambio di energia (collettori, membrane, tubi, cavi)
- Stack frame, composto da piastra bipolare, elettrodi e struttura portante della pila.

Le percentuali di composizione qui sotto riportate sono state calcolate raggruppando le percentuali singole degli elementi componenti la batteria nei 4 macro componenti. Vengono riportate le schermate di SimaPro che mostrano i trattamenti subiti per ogni macro area individuata.

| Prodotti | | | | |
|---|---|-----------------|-----------------|-----------------|
| Specifica del rifiuto | Tipo di materiale / rifiuto predefinito | Quantità | Unità di misura | Quantità fisica |
| Elettrolita VRFB | Tutti i tipi di rifiuto | 1,35 | kg | Mass |
| Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati (Inserisci linea qui) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Input | | | | |
| Input noti da natura (risorse) (Inserisci linea qui) | Sottocompartimento | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Elettrolita VRFB, 1L (Inserisci linea qui) | | 1,35 | kg | Non definito |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} market group for APOS, S | | 0,01 | kWh | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S (Inserisci linea qui) | | 0,6 | tkm | Non definito |

Tab 4.42 – Processi per il riciclo dell'elettrolita

| Prodotti | | | | |
|--|-----------------------------|-----------------|---------------|----------|
| Specifica del rifiuto | Quantità fisica | Unità di misur | Categoria | Commento |
| Tank di elettrolita VRFB | 1 | kg | Recycling | |
| Input | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| Electrolyte tank, glass fiber 1 kg (Inserisci linea qui) | 1 | kg | Non definito | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} market group for APOS, S (Inserisci linea qui) | 0,1 | kWh | Non definito | |
| Output | | | | |
| I tipi di materiale e/o rifiuto sono separati dallo stream rifiuto | Tipo di Materiale / Rifiuto | | Percentuale | |
| tank di elettrolita VRFB (Inserisci linea qui) | Plastics | | 100 % | |
| Flussi di rifiuto rimasti dopo la separazione | Percentuale | Commento | | |
| tank di elettrolita VRFB (Inserisci linea qui) | 100 % | | | |

Tab 4.43 – Processi per il riciclo del tank

| Prodotti | | | | |
|---|---|-----------------|-----------------|---------------|
| Specifica del rifiuto | Quantità fisica | Unità di misura | Categoria | Commento |
| Riciclo VRFB stack | 1 | kg | Recycling | |
| Input | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Stack Frame, 1kg | | 1 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} market group for APOS, S | | 0,01 | kWh | Non definito |
| Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, S | | 0,1 | MJ | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output | | | | |
| I tipi di materiale e/o rifiuto sono separati dallo stream rifiuto | Tipo di Materiale / Rifiuto | | Percentuale | |
| Waste incineration of plastics (rigid PVC), EU-27 | Plastics | | 8,31 % | |
| Waste plastic, mixture {Europe without Switzerland} market for v | Plastics | | 55,57 % | |
| Steel and iron (waste treatment) {GLO} recycling of steel and iron | Iron scrap, unsorted {GLO} market for Conseq, S | | 12,9 % | |
| Copper scrap, sorted, pressed {RER} treatment of copper scrap b | Copper {RoW} treatment of scrap by electrolytic refining Cut- | | 19,84 % | |
| Used industrial electronic device {CH} treatment of, manual disr | Tutti i tipi di rifiuto | | 3,64 % | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Flussi di rifiuto rimasti dopo la separazione | Percentuale | Commento | | |
| Waste incineration of plastics (rigid PVC), EU-27 | 8,31 % | | | |
| Waste plastic, mixture {Europe without Switzerland} treatment o | 55,57 % | | | |
| Copper scrap, sorted, pressed {RER} treatment of copper scrap b | 36,12 % | | | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.44 – Processi per il riciclo dello stack

| Prodotti | | | | |
|---|-----------------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Specifica del rifiuto | Quantità fisica | Unità di misura | Categoria | Commento |
| Riciclo VRFB periphery | 1 | kg | Recycling | |
| Input | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Current collector, for VRFB | | 0,251 | kg | Non definito |
| Cell frame, PVC, for VRFB | | 0,039 | kg | Non definito |
| Gasket, FKM based, for VRFB | | 0,054 | kg | Non definito |
| Inverter, for electric passenger car {GLO} market for APOS, S | | 0,383 | kg | Non definito |
| Copper cable, 1kg for VRFB | | 0,022 | kg | Non definito |
| Pump, for VRFB | | 0,074 | kg | Non definito |
| Pipes, for VRFB | | 0,042 | kg | Non definito |
| Heat exchanger, for VRFB | | 0,13 | kg | Non definito |
| Process control system, for VRFB | | 0,001 | kg | Non definito |
| Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, S | | 0,1 | MJ | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} market group for APOS, S | | 0,01 | kWh | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output | | | | |
| I tipi di materiale e/o rifiuto sono separati dallo stream rifiuto | Tipo di Materiale / Rifiuto | | Percentuale | |
| Plastic mix | Plastics | | 7,14 % | |
| Iron scrap recycling periphery VRFB | Ferro metals | | 64,71 % | |
| Rame | Coppers | | 28,15 % | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Flussi di rifiuto rimasti dopo la separazione | Percentuale | Commento | | |
| Waste plastic, industrial electronics {GLO} market for APOS, S | 7,14 % | | | |
| Waste bulk iron, excluding reinforcement {Europe without Switze | 64,71 % | | | |
| Copper cake {GLO} market for APOS, S | 28,15 % | | | |

Tab 4.45 – Processi per il riciclo della parte periferica della batteria a flusso

Smaltimento

Per quanto riguarda lo smaltimento ci si riferisce all'assemblaggio completo della batteria ed è necessario suddividere in percentuale relativa le 4 macro componenti, dopo averne individuato gli scenari di smaltimento. L'operazione è mostrata in seguito

| Nome | Stato | |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| Smaltimento VRFB 1MWh | Terminato | |
| Riferimento ad assemblaggio | Quantità fisica | Unità di misura |
| Assemblaggio VRFB 1MWh | 1 | p |

| Processi | |
|--------------------------|-------------|
| (Inserisci linea qui) | |
| Scenari di smaltimento | Percentuale |
| Elettrolita VRFB | 85,1 % |
| Tank di elettrolita VRFB | 10,1 % |
| Riciclo VRFB stack | 2,3 % |
| Riciclo VRFB periphery | 2,5 % |
| (Inserisci linea qui) | |

Tab 4.46 – Processo di smaltimento

Smaltimento + riuso

Una parte fondamentale dell'intero ciclo di vita è il *riutilizzo* delle materie prime ottenute dalla separazione e dal riciclo: questa fase va ad incidere positivamente sull'impatto ambientale dell'oggetto analizzato in quanto il riuso di materiali derivanti da riciclo permette di evitare emissioni e impatti derivanti dalla stessa quantità di materiale prima estratto da minerale e poi raffinato per ottenere un semilavorato utilizzabile dall'industria. È opportuno tenere conto in questa analisi anche del fatto che non si va ad incidere sulla quantità di tale materiale ancora disponibile in natura.

Per considerare ora il riutilizzo delle materie prime dopo il trattamento dei rifiuti è necessario mantenere una percentuale complessiva del 100% tra scenari di smaltimento e di riuso in SimaPro 8. A tal proposito si è scomposta la batteria in base ai materiali che la compongono, invece che alle aree individuate in precedenza, e si è applicata la percentuale media di riciclo ad ogni materiale individuato. %. Per semplicità di modellazione si pone il contributo dato dal disassemblaggio pari a zero perché coi dati che si sono raccolti in letteratura questa parte è già incorporata nella fase che considera il riciclo o smaltimento.

Il risultato è il seguente:

| | | |
|------------------------------|-----------------|-----------------|
| Nome | Stato | |
| Smaltimento+ riuso VRFB 1MWh | Terminato | |
| Riferimento ad assemblaggio | Quantità fisica | Unità di misura |
| Assemblaggio VRFB 1MWh | 1 | p |

| | |
|-----------------------------|-------------|
| Processi | |
| (Inserisci linea qui) | |
| Scenari di smaltimento | Percentuale |
| Elettrolita VRFB | 15,01 % |
| Tank di elettrolita VRFB | 1 % |
| Riciclo VRFB periphery | 0,63 % |
| Riciclo VRFB stack | 0,58 % |
| (Inserisci linea qui) | |
| Disassemblaggi | Percentuale |
| (Inserisci linea qui) | |
| Riusi | Percentuale |
| Riuso VRFB 1MWh acciaio | 1,42 % |
| Riuso VRFB 1MWh Elettrolita | 70 % |
| Riuso VRFB 1MWh plastica | 1,66 % |
| Riuso VRFB 1MWh rame | 0,6 % |
| Riuso VRFB 1MWh tank | 9,1 % |
| (Inserisci linea qui) | |

Tab 4.47 – Processo di smaltimento con riutilizzo delle materie prime

Le percentuali dell'assemblaggio considerate per il riuso sono pari a quelle del materiale in questione nella totalità della batteria.

| | | | |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|----------|
| Nome | Stato | | Commento |
| Riuso VRFB 1MWh acciaio | Nessuno | | |
| Riferimento ad assemblaggio | Quantità fisica | Unità di misura | |
| Assemblaggio VRFB 1MWh | 0,015 | p | |

| | | | |
|--|-----------------|-----------------|---------------|
| Processi | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} market group for APOS, S | 440 | kWh | Non definito |
| Heat, central or small-scale, natural gas {Europe without Switzerland} market for heat, central or s | 36 | MJ | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | 400 | tkm | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | |

| | | | |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|----------|
| Nome | Stato | | Commento |
| Riuso VRFB 1MWh Elettrolita | Nessuno | | |
| Riferimento ad assemblaggio | Quantità fisica | Unità di misura | |
| Assemblaggio VRFB 1MWh | 0,85 | p | |

| | | | |
|---|-----------------|-----------------|---------------|
| Processi | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} market group for APOS, S | 34028 | kWh | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | 340280 | tkm | Non definito |
| VRFB assembly, 1MWh | 0 | kg | Non definito |
| Elettrolita filtrato per riuso | 34028 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | |

Tab 4.48 – Modellazione del riutilizzo dell'acciaio

| Nome | Stato | Commento | |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|--|
| Riuso VRFB 1MWh plastica | Nessuno | | |
| Riferimento ad assemblaggio | Quantità fisica | Unità di misura | |
| Assemblaggio VRFB 1MWh | 0,002 | p | |

| Processi | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
|---|-----------------|-----------------|---------------|
| Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} market group for APOS, S | 440 | kWh | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | 880 | tkm | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | |

Tab 4.49 – Modellazione del riutilizzo della plastica

| Nome | Stato | Commento | |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|--|
| Riuso VRFB 1MWh rame | Nessuno | | |
| Riferimento ad assemblaggio | Quantità fisica | Unità di misura | |
| Assemblaggio VRFB 1MWh | 0,006 | p | |

| Processi | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
|--|-----------------|-----------------|---------------|
| Heat, central or small-scale, natural gas {Europe without Switzerland} market for heat, central or s | 17,7 | MJ | Non definito |
| Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} market group for APOS, S | 1,77 | kWh | Non definito |
| Copper scrap, sorted, pressed {GLO} market for Cut-off, S | 35,4 | kg | Non definito |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | 264 | tkm | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | |

Tab 4.50 – Modellazione del riutilizzo del rame

| Nome | Stato | Commento | |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|--|
| Riuso VRFB 1MWh tank | Nessuno | | |
| Riferimento ad assemblaggio | Quantità fisica | Unità di misura | |
| Assemblaggio VRFB 1MWh | 0,1 | p | |

| Processi | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
|---|-----------------|-----------------|---------------|
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | 4400 | tkm | Non definito |
| Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} market group for APOS, S | 40 | kWh | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | |

Tab 4.51 – Modellazione del riutilizzo della fibra di vetro del contenitore

4.4.2 LFP

Lo stesso procedimento viene eseguito anche per le batterie al ferro-fosfato. Si mostra dapprima il modello implementato in SimaPro per lo smaltimento delle materie prime componenti la batteria a ferro-fosfato. Le percentuali sono state calcolate scomponendo ogni componente in materie prime principali e poi ripartendo il tutto nella globalità dell'assemblaggio.

| | | |
|------------------------------|-----------------|-----------------|
| Nome | Stato | |
| Smaltimento LFP 1MWh | Terminato | |
| Riferimento ad assemblaggio | Quantità fisica | Unità di misura |
| Assemblaggio Li-ion LFP 1MWh | 1 | p |

Processi

(Inserisci linea qui)

| Scenari di smaltimento | Percentuale |
|-----------------------------|-------------|
| Waste plastic, LFP | 4,3 % |
| Iron scrap recycling NCM | 26 % |
| Hydrometallurgical way, LFP | 33,2 % |
| Pyrometallurgical way, LFP | 33,2 % |
| Rame | 0,5 % |
| waste electronic | 2,8 % |
| (Inserisci linea qui) | |

Tab 4.52 – Modellazione smaltimento della batteria LFP

Si riportano di seguito, per ogni chilogrammo di materia prima, l'insieme di processi e risorse necessarie al loro smaltimento.

| Prodotti | | | | |
|---|-----------------------------|-----------------|---------------|-------------|
| Specifica del rifiuto | Quantità fisica | Unità di misura | Categoria | Commento |
| Waste plastic, LFP | 1 | kg | Incineration | |
| Input | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| Elettrodo negativo, Li-ion battery | 0,44 | kg | Non definito | |
| Elettrodo positivo, per LiFePO4 | 0,14 | kg | Non definito | |
| Separator, Li-ion battery | 0,05 | kg | Non definito | |
| packing, module and battery, for Li-ion battery | 0,32 | kg | Non definito | |
| BMS Li-ion | 0,05 | kg | Non definito | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} market group for APOS, S | 0,01 | kWh | Non definito | |
| Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, S | 0,1 | MJ | Non definito | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output | | | | |
| I tipi di materiale e/o rifiuto sono separati dallo stream rifiuto | Tipo di Materiale / Rifiuto | | | Percentuale |
| Waste plastic treatment, LFP | Plastics | | | 90 % |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Flussi di rifiuto rimasti dopo la separazione | Percentuale | Commento | | |
| Waste plastic, consumer electronics {RoW} market for waste pla: | 90 % | | | |
| Dummy_Disposal, unspecified ashes, to unspecified landfill/kg/F | 10 % | | | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.53 – Riciclo della plastica

| Prodotti | | | | |
|---|-----------------|-----------------------------|-----------------|---------------|
| Specifica del rifiuto | Quantità fisica | Unità di misura | Categoria | Commento |
| Iron scrap recycling NCM | 1 | kg | Recycling | |
| Input | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Substrate per elettrodo positivo Li-ion battery | | 0,102 | kg | Non definito |
| Substrate per elettrodo negativo Li-ion battery | | 0,236 | kg | Non definito |
| Cell container, for Li-ion | | 0,574 | kg | Non definito |
| BMS Li-ion | | 0,085 | kg | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione |
| Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} market group for APOS, S | | 0,01 | kWh | Non definito |
| Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, S | | 0,1 | MJ | Non definito |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output | | | | |
| I tipi di materiale e/o rifiuto sono separati dallo stream rifiuto | | Tipo di Materiale / Rifiuto | | Percentuale |
| iron scrap recycling Li-ion | | Tutti i tipi di rifiuto | | 90 % |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Flussi di rifiuto rimasti dopo la separazione | | Percentuale | Commento | |
| Scrap steel {Europe without Switzerland} market for scrap steel | | 100 % | | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.54 – Riciclo dell'acciaio

| Prodotti | | | | |
|--|-----------------------------|-----------------|---------------|-------------|
| Specifica del rifiuto | Quantità fisica | Unità di misura | Categoria | Commento |
| Hydrometallurgical way, LFP | 1 | kg | Recycling | |
| Input | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| Elettrodo negativo, Li-ion battery | 0,178 | kg | Non definito | |
| Elettrodo positivo, per LiFePO4 | 0,554 | kg | Non definito | |
| Elettrolita per LiPF6, 1M, Li-ion battery | 0,268 | kg | Non definito | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | 0,1 | tkm | Non definito | |
| Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} market group for APOS, S | 0,01 | kWh | Non definito | |
| Heat, central or small-scale, natural gas {Europe without Switzerland} market for heat, centra | 0,1 | MJ | Non definito | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output | | | | |
| I tipi di materiale e/o rifiuto sono separati dallo stream rifiuto | Tipo di Materiale / Rifiuto | | | Percentuale |
| Used LTO cells, hydromet., LFP | Tutti i tipi di rifiuto | | | 90 % |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Flussi di rifiuto rimasti dopo la separazione | Percentuale | Commento | | |
| Non-Fe-Co-metals, from Li-ion battery, hydrometallurgical proc | 100 % | | | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.55 – Riciclo metalli preziosi, processo idrometallurgico

| Prodotti | | | | |
|--|-----------------------------|-----------------|---------------|-------------|
| Specifica del rifiuto | Quantità fisica | Unità di misura | Categoria | Commento |
| Pyrometallurgical way, LFP | 1 | kg | Recycling | |
| Input | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| Elettrodo negativo, Li-ion battery | 0,178 | kg | Non definito | |
| Elettrodo positivo, per LiFePO4 | 0,554 | kg | Non definito | |
| Elettrolita per LiPF6, 1M, Li-ion battery | 0,268 | kg | Non definito | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | 0,1 | tkm | Non definito | |
| Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} market group for APOS, S | 0,01 | kWh | Non definito | |
| Heat, central or small-scale, natural gas {Europe without Switzerland} market for heat, centra | 0,1 | MJ | Non definito | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output | | | | |
| I tipi di materiale e/o rifiuto sono separati dallo stream rifiuto | Tipo di Materiale / Rifiuto | | | Percentuale |
| Used LTO cells, pyromet., LFP | Tutti i tipi di rifiuto | | | 90 % |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Flussi di rifiuto rimasti dopo la separazione | Percentuale | Commento | | |
| Non-Fe-Co-metals, from used Li-ion battery, pyrometallurgical p | 100 % | | | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.56 – Riciclo metalli preziosi, processo pirometallurgico

| Prodotti | | | | |
|---|---|-----------------|---------------|----------|
| Specifica del rifiuto | Quantità fisica | Unità di misura | Categoria | Commento |
| Rame | 1 | kg | Recycling | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| Copper cable, 1kg for VRFB | 0,0825 | kg | Non definito | |
| Current collector, for VRFB | 0,9175 | kg | Non definito | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} market group for APOS, S | 0,01 | kWh | Non definito | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output | | | | |
| I tipi di materiale e/o rifiuto sono separati dallo stream rifiuto | Tipo di Materiale / Rifiuto | Percentuale | | |
| copper scrap | Copper {RoW} treatment of scrap by electrolytic refining Cut- | 45 % | | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Flussi di rifiuto rimasti dopo la separazione | Percentuale | Commento | | |
| Scrap copper {Europe without Switzerland} market for scrap cop | 100 % | | | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.57 – Riciclo del rame

| Prodotti | | | | |
|---|-----------------------------|-----------------|---------------|----------|
| Specifica del rifiuto | Quantità fisica | Unità di misura | Categoria | Commento |
| Waste electronic | 1 | kg | Recycling | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input | | | | |
| Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili) | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | 0,1 | tkm | Non definito | |
| BMS Li-ion | 1,1 | kg | Non definito | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Input noti da tecnosfera (elettricità/calore) | Quantità fisica | Unità di misura | Distribuzione | |
| Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} market group for APOS, S | 0,01 | kWh | Non definito | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Output | | | | |
| I tipi di materiale e/o rifiuto sono separati dallo stream rifiuto | Tipo di Materiale / Rifiuto | Percentuale | | |
| waste electric and electronic, Li-ion | Tutti i tipi di rifiuto | 90 % | | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |
| Flussi di rifiuto rimasti dopo la separazione | Percentuale | Commento | | |
| Waste electric and electronic equipment {GLO} treatment of, shi | 100 % | | | |
| (Inserisci linea qui) | | | | |

Tab 4.58 – Riciclo dell'elettronica di controllo

| | | |
|------------------------------|-----------------|-----------------|
| Nome | Stato | |
| Smaltimento+riuso LFP 1MWh | Terminato | |
| Riferimento ad assemblaggio | Quantità fisica | Unità di misura |
| Assemblaggio Li-ion LFP 1MWh | 1 | p |

| | |
|---|-------------|
| Processi | |
| (Inserisci linea qui) | |
| Scenari di smaltimento | Percentuale |
| Waste plastic, LFP | 1,2 % |
| Iron scrap recycling NCM | 6,5 % |
| Hydrometallurgical way, LFP | 6,7 % |
| Pyrometallurgical way, LFP | 6,7 % |
| Rame | 0,05 % |
| waste electronic | 2,8 % |
| (Inserisci linea qui) | |
| Disassemblaggi | Percentuale |
| (Inserisci linea qui) | |
| Riusi | Percentuale |
| Riuso LFP 1MWh rame | 0,45 % |
| Riuso LFP 1MWh iron components | 19,5 % |
| Riuso LFP 1MWh plastic mix | 3,1 % |
| Riuso LFP 1MWh metalli preziosi, hydrom | 26,5 % |
| Riuso LFP 1MWh metalli preziosi, pyrom | 26,5 % |
| (Inserisci linea qui) | |

Tab 4.59 – Modellazione del riciclo con riutilizzo della batterie LFP completa

4.4.3 NCM

Di seguito sono riportate le tabelle che descrivono il processo di smaltimento e smaltimento con riuso delle batterie con tecnologia NCM al litio. Verranno mostrate solo le tabelle finali perché molte lavorazioni sono comuni con le LFP mostrate precedentemente a cui va solamente cambiata la percentuale finale. Si ricorda che le percentuali di riciclo e riuso delle materie prime sono state prese da [45] e riportate al capitolo 4.4.

| | | |
|------------------------------|-----------------|-----------------|
| Nome | Stato | |
| Smaltimento NCM 1MWh | Nessuno | |
| Riferimento ad assemblaggio | Quantità fisica | Unità di misura |
| Assemblaggio Li-ion NCM 1MWh | 1 | p |

Processi

(Inserisci linea qui)

| Scenari di smaltimento | Percentuale |
|-----------------------------|-------------|
| Waste plastic, LFP | 4,4 % |
| Iron scrap recycling NCM | 26 % |
| Hydrometallurgical way, LFP | 66,3 % |
| Pyrometallurgical way, LFP | 0 % |
| Rame | 0,5 % |
| waste electronic | 2,8 % |
| (Inserisci linea qui) | |

Tab 4.60 – Processi per lo smaltimento della batteria NCM completa

| | | |
|------------------------------|-----------------|-----------------|
| Nome | Stato | |
| Smaltimento+riuso NCM 1MWh | Terminato | |
| Riferimento ad assemblaggio | Quantità fisica | Unità di misura |
| Assemblaggio Li-ion NCM 1MWh | 1 | p |

Processi

(Inserisci linea qui)

| Scenari di smaltimento | Percentuale |
|---|-------------|
| Waste plastic, LFP | 1,25 % |
| Iron scrap recycling NCM | 6,5 % |
| Hydrometallurgical way, LFP | 13,32 % |
| Pyrometallurgical way, LFP | 0 % |
| Rame | 0,05 % |
| waste electronic | 2,8 % |
| (Inserisci linea qui) | |
| Disassemblaggi | Percentuale |
| (Inserisci linea qui) | |
| Riusi | Percentuale |
| Riuso NCM 1MWh iron components | 19,5 % |
| Riuso NCM 1MWh metalli preziosi, hydrom | 53 % |
| Riuso NCM 1MWh plastic mix | 3,15 % |
| Riuso NCM 1MWh rame | 0,43 % |
| (Inserisci linea qui) | |

Tab 4.61 – Modellazione del riciclo con riutilizzo della batterie NCM completa

Capitolo 5

Descrizione impianti presi in considerazione e loro modellazione in SimaPro

Gli impianti stand-alone, detti anche impianti in isola, sono impianti sostanzialmente autonomi che producono energia per alimentare solo le utenze a cui sono direttamente collegati. Non essendo collegati alla rete elettrica nazionale sono spesso abbinati a degli accumulatori atti ad immagazzinare l'energia in surplus prodotta nei momenti favorevoli della giornata, come le ore di forte vento nel caso di un impianto eolico, le ore centrali del giorno nel caso di un impianto fotovoltaico o semplicemente per l'accumulo dell'energia in surplus fornita da generatori tradizionali al funzionamento in condizioni nominali.

In questo elaborato si sono considerati possibili impianti stand-alone su realtà comunitarie piccole come possono essere considerate le isole minori d'Italia, con un numero di abitanti che varia da 1500 a 20000. La taglia degli accumulatori sui quali eseguire una LCA è dimensionata in base a consumi medi annui di tali realtà. Nel caso in cui non sia stato possibile reperire informazioni precise sulla potenza installata sia di produzione che per l'accumulo si è provveduto a stimarla mediante calcoli basati su medie annue dei consumi in letteratura.

I casi considerati sono 4: l'isola spagnola di El Hierro e le italiane Ventotene, Ustica e Pantelleria. Le prime due sono realtà già esistenti e i dati che saranno riportati nel seguito sono quelli di progetto mentre per le altre due isole si tratta di casi studio, anche se già presentati alle autorità competenti per una effettiva approvazione dei progetti.

Per fornire un'analisi di sensibilità basilare e comprendere l'andamento di prestazioni e impatti nei diversi casi d'installazione degli accumulatori, si considerano per impianto 3 livelli di cicli completi di carica-scarica equivalenti: 3000, 5000, 13000 cicli.

5.1 El Hierro

L'isola di El Hierro è la più piccola e la più sud-occidentale di tutto l'arcipelago delle Isole Canarie, che si trova nell'Oceano Atlantico, al largo delle coste africane. Ha come capitale Valverde e come il resto dell'arcipelago, l'isola è prevalentemente montuosa. Si estende su una superficie di 224 km² e vanta una popolazione di 10750 abitanti, stima aggiornata al 2008. Il punto più alto dell'isola è il Malpaso, posto a 1501 metri sul livello del mare.

Il fabbisogno energetico annuo dell'isola è di 48 GWh al 2015 ed è soddisfatto interamente da un sistema idro-eolico composto di due bacini d'acqua posti rispettivamente a 50 m slm e 690 m slm alimentati da 5 turbine eoliche da 2,3 MW l'una, che sfruttano gli alisei che soffiano gran parte del tempo. Le turbine in totale hanno una potenza di 11,5 MW di picco e vanno a pompare acqua nell'impianto idroelettrico da 10 MW: questo sovradimensionamento delle turbine è stato necessario per fare in modo di alimentare contemporaneamente sia i bacini che i dissalatori dell'isola [1].

Tuttavia spesso l'intensità del vento non è costante e questo crea problemi nella gestione della frequenza della rete elettrica isolana, così l'Enel ha previsto l'installazione di un accumulatore al litio

(1MW/3MWh) per ridurre il più possibile l'entrata in funzione della centrale alimentata a diesel, già molto limitata. La stima effettuata dall'ente di regolazione prevede il risparmio integrale delle ore di funzionamento della centrale, che in condizioni standard contribuisce al 5% medio del fabbisogno complessivo dell'isola.



Fig 5.1 – Installazione di un aerogeneratore nell'isola di El Hierro

Ipotizzando dunque la riduzione a zero delle ore di funzionamento della centrale diesel grazie all'introduzione della batteria, come fatto da Enel nel progetto preliminare, si può considerare ai fini della simulazione software un risparmio netto di combustibile. Questa quantità è stimata partendo dai valori del Potere Calorifico Inferiore (P.C.I.=9.88 kWh/l), dall'energia che si evita di produrre e dall'efficienza media attesa della centrale, che sarebbe il punto di funzionamento più frequente al momento della chiamata in opera.

Il tutto calcolato mediante la seguente

$$E = PCI * x * \eta$$

Dove

E = energia [kWh];

x = quantità risparmiata [l]

PCI = potere calorifico inferiore [kWh/l];

η = rendimento medio atteso della centrale, assunto pari a 0.4.

Si ha che in base ai cicli di funzionamento dell'accumulatore, ipotizzando il 5% del fabbisogno coperto dal diesel, si va ad evitare il consumo di gasolio per:

| Cicli | Energia risparmiata [MWh] |
|-------|---------------------------|
| 3000 | 150 |
| 5000 | 250 |
| 13000 | 650 |

Che corrisponde ad un risparmio di 253 litri (211 kg) di combustibile per ogni MWh prodotto in centrale.

5.2 Ventotene

Ventotene è un'isola di origini vulcaniche del Mar Tirreno e fa parte dell'arcipelago pontino, al largo della costa al confine tra Lazio e Campania. Il comune omonimo comprende circa 150 abitanti fissi nella stagione invernale, che aumentano anche di 10 volte durante la stagione estiva.

La richiesta di energia è molto variabile non solo nell'arco dell'anno, a causa del forte aumento di abitanti, ma anche nell'arco della giornata. La centrale termoelettrica presente nell'isola è sovradimensionata per far fronte ai picchi di richiesta estivi: conta 4 generatori diesel da 480 kW. E' spesso esercita a bassi carichi e dunque a basse efficienze.

Il caso studio [2] ha analizzato la possibilità di implementare la produzione di energia elettrica tramite le FER. I risultati sono stati di modesta entità: a causa della scarsa ventosità del sito non risulta conveniente dal punto di vista energetico ed economico installare dei generatori eolici. L'unica possibilità economicamente conveniente è l'installazione di generatori PV per una potenza complessiva di 90 kW, anche se limitata dal minimo tecnico dei generatori diesel. Nel complesso si ottiene una lieve riduzione del LCOE (1,2%), una penetrazione delle FER del 8% e un potenziale risparmio di gasolio fino al 20%.

Passando dal caso studio alla situazione attuale è stato installato un sistema di accumulo da ENEL, che prevede una batteria agli ioni di litio da 300 kW/ 600 kWh funzionante h24 atta sia a fare da serbatoio di accumulo, sia a migliorare la qualità del servizio in tensione e frequenza e infine a minimizzare i costi di manutenzione dei generatori per la riduzione delle ore di funzionamento. Si è così arrivati a risparmiare mediamente il 15% del carburante nei generatori diesel, un tempo di funzionamento minore e a capacità nominale, ottenendo un notevole incremento di rendimento e una riduzione delle ore di funzionamento del 55%.

Non avendo accesso ai dati tecnici della centrale è impossibile sapere la quantità di gasolio effettiva, ma si può ricavare da una stima. Per la modellazione innanzitutto si riduce del 20% come detto in precedenza il consumo di combustibile, mantenendo inalterata la fonte rinnovabile di energia. Si è poi creata una voce "Gasolio risparmiato" nella sezione dell'energy saving che tiene conto, per ogni MWh di energia, del gasolio risparmiato appunto dalla differenza di rendimento tra centrale esercita a pieno regime ($\eta = 0.5$) come avviene in presenza di un accumulatore e centrale esercita al minimo tecnico ($\eta = 0.35$), situazione abituale a causa del grande sovradimensionamento e dei bassi carichi medi. In tutto questo si conta anche l'integrazione nel sistema elettrico dell'impianto fotovoltaico.

| Cicli | Energia Diesel [MWh] | Energia PV [MWh] |
|-------|----------------------|------------------|
| 3000 | 1656 | 144 |
| 5000 | 2760 | 240 |
| 13000 | 7176 | 624 |

Per ogni MWh prodotto da fonte fossile si ha un risparmio nella fase di carica della batteria dovuto dalla differenza di efficienza della centrale pari a:

| η | Combustibile [l/MWh] | Combustibile [kg/MWh] |
|--------------|----------------------|-----------------------|
| 0,50 | 202,4 | 169,0 |
| 0,35 | 289,2 | 241,5 |
| $\Delta\eta$ | 86,8 | 72,4 |

5.3 Ustica

L'isola di Ustica si trova nel Mar Tirreno a circa 70 km a nord-ovest di Palermo, di cui ne fa parte amministrativamente rientrando nella sua area metropolitana. Occupa una superficie di circa 8,65 km² per un totale di circa 1320 abitanti, aggiornati al 2018.

Il caso studio [2] analizza la possibilità di implementare il sistema di generazione, locale basato su generatori diesel per una potenza complessiva di 4,6 MW, con delle fonti rinnovabili. Il sistema che nel complesso permette sia una riduzione del LCOE (Levelized Cost Of Energy) che una importante penetrazione delle FER comprende un generatore PV da 500 kW, due macchine eoliche da 250 kW ciascuna e un sistema d'accumulo pari a 1 MWh. I risultati dello studio indicano come tale configurazione porti a incrementare la penetrazione delle FER fino al 43%, ridurre il surplus energetico della produzione da FER dal 35% al 22%, ridurre il combustibile utilizzato del 29,5% e ridurre il LCOE del 4,2%. A questi numeri vanno aggiunti i vantaggi difficilmente quantificabili dati da una maggior stabilità di tensione e frequenza del sistema elettrico dell'isola.

Passando alla modellazione in Simapro, si va a calcolare dapprima l'energia ripartita al 57% da fonte fossile e al 43% da fonte rinnovabile come da progetto [2] e successivamente si va a verificare l'impatto che ha l'integrazione di un accumulatore da 1 MWh nel sistema così costituito. Il risparmio di combustibile in questo caso viene posto pari al 29.5% come affermato dallo studio.

| Cicli | Energia Diesel [MWh] | Energia PV [MWh] |
|-------|----------------------|------------------|
| 3000 | 1710 | 1290 |
| 5000 | 2850 | 2150 |
| 13000 | 7410 | 5590 |

Tenendo conto che l'impianto a fonte fossile in questione è un generatore diesel vengono utilizzati gli stessi parametri della centrale già utilizzati in precedenza (rendimento al design point pari al 50%, rendimento al minimo tecnico pari al 35%, PCI=9.88 kWh/l) e lo stesso valore per la voce "Gasolio risparmiato", ovvero 86,8 l/MWh che corrispondono a 72,4 kg/MWh.

5.4 Pantelleria

Pantelleria è un'isola di origine vulcanica del Canale di Sicilia che dista circa 110 km dalla costa siciliana e 70 km da quella africana e si estende su una superficie di 84 km². Ha una popolazione residente di circa 7.800 abitanti che nei periodi estivi possono arrivare a 20.000.

Il fabbisogno energetico dell'isola si aggira attorno a 88 GWh annui al 2015, soddisfatto principalmente da 6 gruppi diesel e 2 turbine a gas per una potenza installata pari a 22 MW. Il combustibile fossile è trasportato via mare, con gli svantaggi del caso quale la difficoltà di approvvigionamento quando il mare è molto mosso e il rincaro dovuto al trasporto extra.

Nel 2015 si è testato il funzionamento di ISWEC (Inertial Sea Wave Energy Converter), il primo dispositivo italiano per la produzione di energia elettrica dal moto ondoso del mare, a 800 metri dalla costa di Pantelleria. I test in mare sia meccanici che elettrici sono in buono accordo coi test eseguiti in laboratorio e al software. Si presume dunque una prossima installazione a titolo definitivo che porterà ad una riduzione del costo dell'energia elettrica e all'abbattimento delle emissioni di CO₂.

In attesa di ulteriori sviluppi del dispositivo ISWEC, lo studio Pantelleria Zero [41] ha espresso la possibilità di rendere l'isola Carbon Free attraverso un drastico cambio di fonti di alimentazione: lo smantellamento degli impianti a fonte fossile a vantaggio di impianti eolici e fotovoltaici, un sistema d'accumulo per la gestione dell'energia e la completa sostituzione del parco auto a fonte fossile con uno alimentato ad idrogeno. E' un progetto forte, forse utopico, ma dimostra che nel caso si trovassero i fondi necessari sarebbe possibile, senza grandi sforzi ed in pochi anni, passare da un sistema di produzione di energia da fonte fossile ad uno a fonte completamente rinnovabile, almeno in piccola scala.

Per la modellazione in Simapro si ipotizza la totale dismissione delle centrali diesel e il solo mantenimento dei gruppi a gas per compensare le ore sfavorevoli delle FER e per permettere un'adeguata regolazione della frequenza di rete. Il rendimento di una centrale a gas in ciclo semplice è preso pari a 0.4 al design point e a 0.25 al minimo tecnico, per un consumo per MWh elettrico prodotto pari a:

| η | CH4 richiesto [kg] | CH4 richiesto [m ³] |
|--------|--------------------|---------------------------------|
| 0,4 | 180 | 118,08 |
| 0,25 | 288 | 188,928 |

Il che equivale ad un risparmio, in presenza di un accumulatore, pari a 108 kg (70.8 m³) di metano per ogni MWh accumulato nella fase di carica della batteria, considerando un PCI di 13,88 kWh/kg.

L'accumulatore preso in considerazione è da 2MW/5MWh, ipotizzato da un confronto con l'isola spagnola El Hierro e considerando la variabile stagionale che fa raddoppiare la popolazione nel periodo estivo rispetto a quello invernale: il dimensionamento maggiore dell'accumulo è stato pensato per soddisfare l'isola anche nell'alta stagione turistica.

Ricapitolando, il fabbisogno energetico è così ripartito: 5% da turbine a gas, 52% da impianti fotovoltaici e il restante 43% da impianto eolici. Per un totale, tenendo conto del diverso ciclaggio degli accumulatori, di:

| Cicli | Gas [MWh] | PV [MWh] | Eolico [MWh] |
|-------|-----------|----------|--------------|
| 3000 | 150 | 1560 | 1290 |
| 5000 | 250 | 2600 | 2150 |
| 13000 | 650 | 6760 | 5590 |

L'inserimento della batteria porta ad evitare completamente il funzionamento della centrale diesel e migliora il rendimento dell'impianto a gas a ciclo semplice.

5.5 Torre Valdaliga Nord

La società Enel Produzione S.p.a. ha presentato una relazione ambientale [42] nella quale spiega che l'introduzione di sistemi d'accumulo elettrochimico nella centrale di Torre Valdaliga Nord, sita nel comune di Civitavecchia, nella Città Metropolitana di Roma Capitale, non comporta un impatto ambientale negativo significativo.

Tale centrale è autorizzata all'esercizio dal DM prot. 114 del 05/04/2013 ed è costituita da 3 sezioni termoelettriche da 660 MWe alimentate a carbone che ne consumano circa 4,5 milioni di tonnellate l'anno. L'intervento va ad inserire un ESS da 20 MW per ogni sezione da 660 MWe, ritenuta la taglia ottimale ai fini sia di dispacciamento che di regolazione primaria, secondaria, terziaria prestata e per la riduzione dell'errore in fase di fornitura. Non viene specificata l'energia accumulata per ogni ESS e viene dunque ipotizzata in 40 MWh dal rapporto potenza-energia 1:2 che si rivela spesso ottimale nei sistemi di accumulo stazionario di questa tipologia. Ne consegue che il pacco batterie prevede una capacità d'accumulo di 120 MWh.

Nel software Simapro si modella questo caso come un raffronto tra la produzione standard di energia elettrica da combustione del carbone ad efficienza intermedia e produzione a rendimento nominale, in presenza di un accumulatore. Diventa difficile stimare i benefici di un SdA in una centrale così grande rispetto alla unità di misura scelta (1MWh), per di più connessa alla rete nazionale dunque ci si basa su stime: si ipotizza un miglioramento dell'efficienza dell'intero impianto del 2%, valore verosimile tendendo conto sia del miglioramento delle rampe di carico, sia della gestione dei picchi di potenza richiesta. L'accumulatore dunque entra in gioco per la regolazione dell'impianto per la seguente energia prodotta:

| Cicli | Energia da carbone [MWh] |
|-------|--------------------------|
| 3000 | 360000 |
| 5000 | 600000 |
| 13000 | 1560000 |

Per calcolare l'impatto dell'inserimento di un accumulatore in questo impianto si stima dunque un risparmio globale del 2% di combustibile all'anno.

5.6 Mix energetico italiano 2018

Finora di è pensato di integrare il sistema di accumulazione in un'applicazione ben specifica, sia on-grid che off-grid, avendo quindi dati certi come riferimento o comunque dati facilmente ricavabili dai fabbisogni energetici o dai progetti eseguiti o in corso di analisi per quelle realtà puntuali. Per una visione più generalizzata dell'impatto che può avere un accumulatore elettrochimico nel parco energetico italiano è opportuno fare alcune considerazioni.

Dal momento in cui si va a chiamare in funzione un accumulatore stand-alone o connesso ad una rete piccola l'unico sistema che ne trae beneficio è quello in cui l'accumulatore è integrato. Nel momento in cui si va a chiamare al funzionamento un accumulatore connesso alla rete è l'intera rete elettrica nazionale a risentirne. Quando un accumulatore entra in fase di scarica immette energia in rete: questa energia, nel caso non fosse presente tale accumulatore, dovrebbe essere fornita da un altro impianto.

L'impianto in questione viene definito "marginale", ovvero rappresenta, nel parco elettrico in cui è inserito, la tecnologia al costo minimo necessaria per produrre un'unità in più di energia elettrica. Dato che tra tutti i costi solo alcuni variano con la produzione (detti appunto costi variabili), come ad esempio il costo per i combustibili (le materie prime), ne deriva che il costo marginale dipende solo dall'incremento di tali costi. Un impianto con bassi costi marginali cerca di produrre il più possibile anche se il prezzo di mercato è basso perché l'incremento dei costi totali tende ad essere inferiore a quello dei ricavi (ovvero il costo marginale è comunque inferiore al prezzo) portando a un margine di profitto crescente con il quale poter poi coprire gli altri costi (i costi fissi). Nel caso contrario il costo marginale potrebbe avvicinarsi molto al prezzo rendendo inutile un incremento della produzione perché il livello del margine di profitto si manterrebbe costante. Le centrali con bassi costi marginali tendono quindi ad avere elevati livelli di continuità di produzione.

Si è quindi andato ad analizzare lo storico degli impianti marginali degli ultimi 12 anni dal 2006 al 2018, presenti negli storici sul sito del GSE, e il risultato ottenuto è il grafico a pagina seguente.

Salta subito all'occhio come la parte preponderante nel mix energetico italiano sia data dagli impianti a ciclo combinato. In termini assoluti si ha che la seconda tecnologia marginale in Italia sia l'idroelettrico, suddiviso in pompaggio, fluente e modulare. Come terza fonte marginale è l'energia che si compra dall'estero, con andamento calante negli ultimi anni seguita a ruota dagli impianti a carbone e oliocarbone. A sorpresa, negli ultimi anni c'è qualche ora in cui la tecnologia marginale è data dalle FER. E' presente anche la voce "Altro/incerto" perché individuare la tecnologia che fa il prezzo non è facile per tutte le ore dell'anno, soprattutto nell'ultimo decennio in cui l'introduzione delle FER sta modificando sensibilmente i flussi di energia in gioco. A tal proposito si nota un incremento dell'incertezza a partire dal 2012-2013.

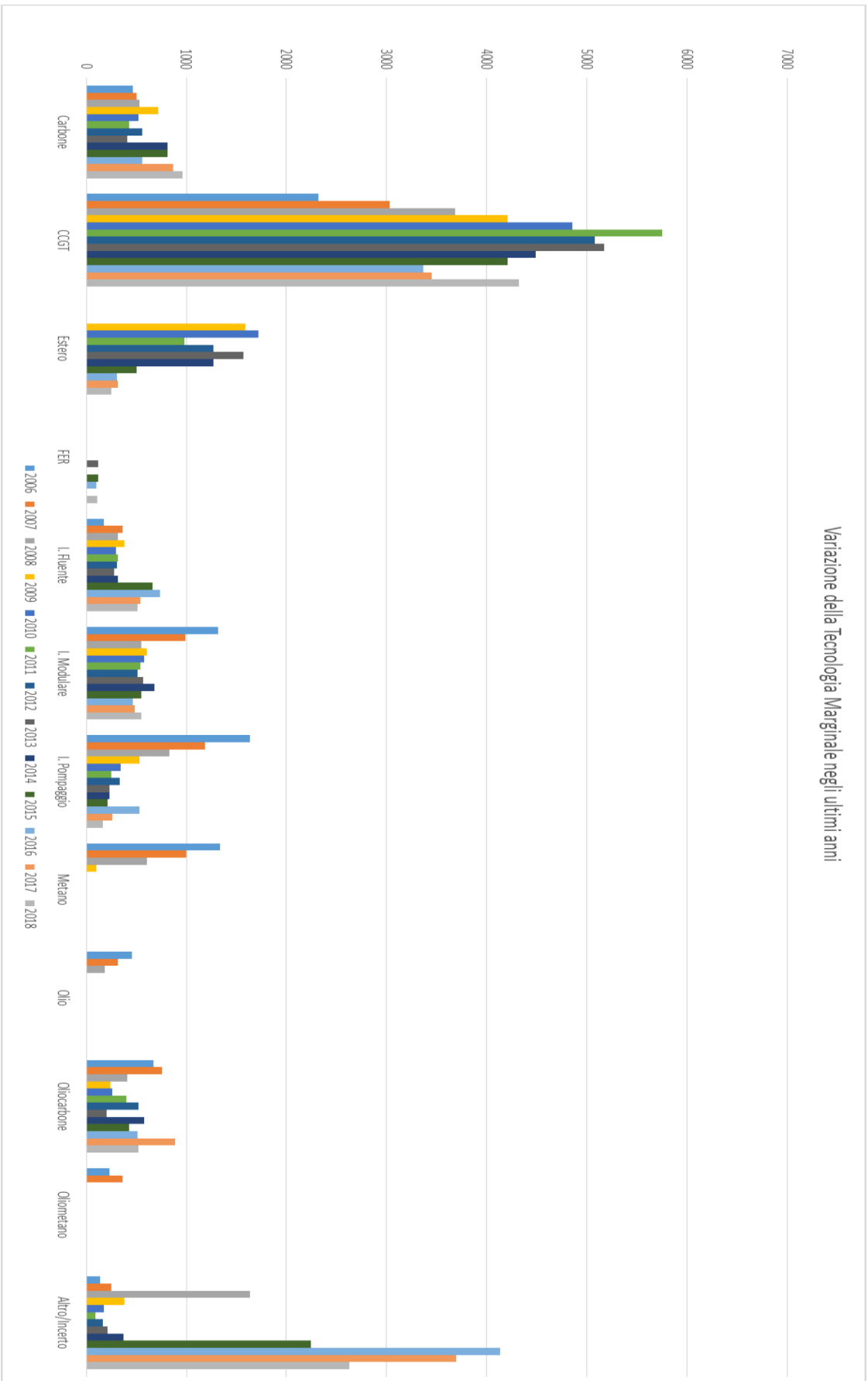
Vedendo l'ampia gamma di tecnologie in gioco è possibile trascurare quelle che contribuiscono a fare il prezzo per meno di 150 ore all'anno. A causa dell'elevata variabilità dell'approvvigionamento energetico degli ultimi anni e il necessario continuo adeguamento di rete e impianti da parte del gestore di rete si è pensato di considerare come anno di riferimento solo il 2018, perché si ritiene poco sensato andare a mediare i valori con anni in cui il mix energetico fosse diverso da quello attuale.

Si ottiene che, per 1 MWh elettrico prodotto, le fonti sopraccitate contribuiscono nelle seguenti percentuali alla produzione:

| Impianto | % contribuzione |
|-------------|-----------------|
| Carbone | 13,6 |
| CCGT | 61,6 |
| Idrico | 17,4 |
| Oliocarbone | 7,4 |

Si è notata una problematica nel corso dell'ultimo decennio dovuta all'enorme sviluppo che stanno avendo le FER: in alcune ore all'anno la tecnologia marginale è costituita proprio dalle FER e, anzi, in condizioni atmosferiche particolari combinate ai bassi carichi della rete per

Variazione della Tecnologia Marginale negli ultimi anni



Capitolo 6

LCIA e confronti

Finora si è parlato esclusivamente dell'analisi di inventario, ovvero della modellazione delle singole fasi del ciclo di vita delle 3 tecnologie di accumulatori. In questo capitolo verranno mostrati, confrontati e analizzati gli impatti ambientali veri e propri che si hanno in ogni fase.

A questo proposito si va a studiare l'impatto delle 3 tipologie di SdA tramite la metodologia ReCiPe 2016, già descritta nel capitolo [3.5]. Questo è solo uno dei molti metodi che possono essere implementati nell'analisi degli impatti, ma grazie alla sua ampia gamma di indicatori e parametri presenti al suo interno è considerato sufficiente per un'analisi a tutto tondo.

Verrà dapprima condotta l'analisi degli impatti sulle singole tecnologie di accumulatore prese in considerazione, per capire quali possono essere i processi più inquinanti e le sostanze maggiormente emesse in ambiente nelle fasi del ciclo di vita. Verrà valutata anche la proporzione di convenienza della fase di riuso dei materiali dopo il riciclo rispetto a al semplice trattamento con smaltimento dei rifiuti. Una volta mostrate le caratteristiche per singola tecnologia verrà fatto un rapido confronto tra le tre batterie. Segue infine l'analisi degli impatti e l'interpretazione dei risultati delle batterie integrate negli impianti di produzione di energia considerati.

Per questioni di spazio, spesso si riporteranno di seguito gli impatti che rientrano nelle 3 macro categorie della valutazione dei danni della metodologia ReCiPe, tranne casi peculiari dove è necessario un approfondimento. Si ricordano ora le categorie di valutazione:

- Salute umana (human health), misurata in DALY (Disability adjusted life year), che comprende
 - Riscaldamento globale;
 - Distruzione dell'ozono stratosferico;
 - Radiazioni ionizzanti;
 - Formazione dell'ozono;
 - Formazione di particolato fine;
 - Tossicità cancerogena per l'uomo;
 - Tossicità non cancerogena per l'uomo;
 - Consumo d'acqua.
- Salute dell'ecosistema (ecosystem), misurata in specie vitali che si estinguono all'anno, che comprende
 - Riscaldamento globale, per l'ecosistema terrestre;
 - Riscaldamento globale, per le acque dolci;
 - Formazione di ozono, per l'ecosistema terrestre;
 - Acidificazione terrestre;
 - Eutrofizzazione delle acque dolci;
 - Eutrofizzazione marina;
 - Ecotossicità terrestre;
 - Ecotossicità delle acque dolci;
 - Ecotossicità marina;
 - Sfruttamento del suolo;

- Consumo d'acqua, per l'ecosistema terrestre;
- Consumo d'acqua, per l'ecosistema delle acque dolci.
- Risorse (resources), valore misurato in USD(2013), che comprende
 - Scarsità delle risorse minerali;
 - Scarsità delle risorse fossili.

I grafici degli impatti dovuti alla caratterizzazione e le tabelle che ne esprimono le sostanze più significative in termini assoluti per ogni categoria sono demandati all'appendice [A].

6.1 LCIA singole batterie

Dopo la complessa analisi di inventario si passa a visualizzare in forma grafica i risultati dello studio degli impatti mediante metodologia ReCiPe 2016, con approccio endpoint. Si riportano e si commentano di seguito i grafici relativi alle fasi di assemblaggio, smaltimento mediante riciclo e smaltimento con riuso dei materiali ricavate dal riciclo per ogni tecnologia di accumulatore.

6.1.1 VRFB

La fase di assemblaggio mostra le seguenti proporzioni tra gli impatti dei vari processi:

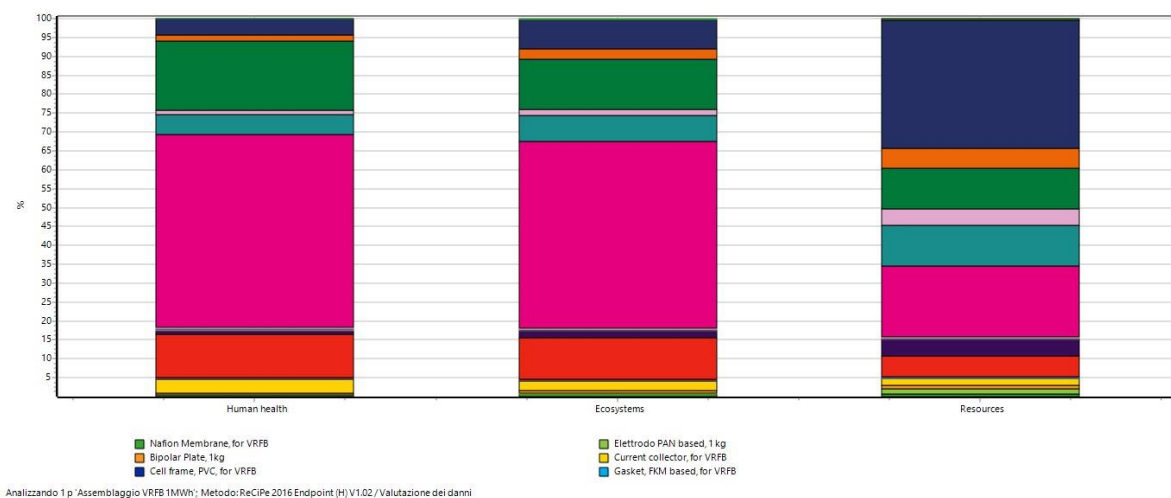


Fig 6.1 – Valutazione dei danni nella fase di assemblaggio

Dove i colori sono così assegnati, dal basso verso l'alto:

- Verde per la membrana al Nafion;
- Arancione per la piastra bipolare;
- Verde chiaro per l'elettrodo a base di PAN;
- Giallo per il collettore di corrente;
- Azzurro per la guarnizione FKM;
- Blu per il telaio della cella;

- Rosso bordeaux per lo stack frame;
- Rosso mattone per l'elettrolita;
- Viola per il contenitore dell'elettrolita;
- Grigio per le pompe;
- Rosa per le tubazioni;
- Fuxia per l'assemblaggio dell'elettrolita;
- Blu acqua per l'assemblaggio dello stack;
- Lilla per l'assemblaggio del tank;
- Verde per l'assemblaggio della periferia;
- Arancione per il trasporto su rotaia;
- Blu per il trasporto su gomma;
- Verde per l'elettricità assorbita in media tensione.

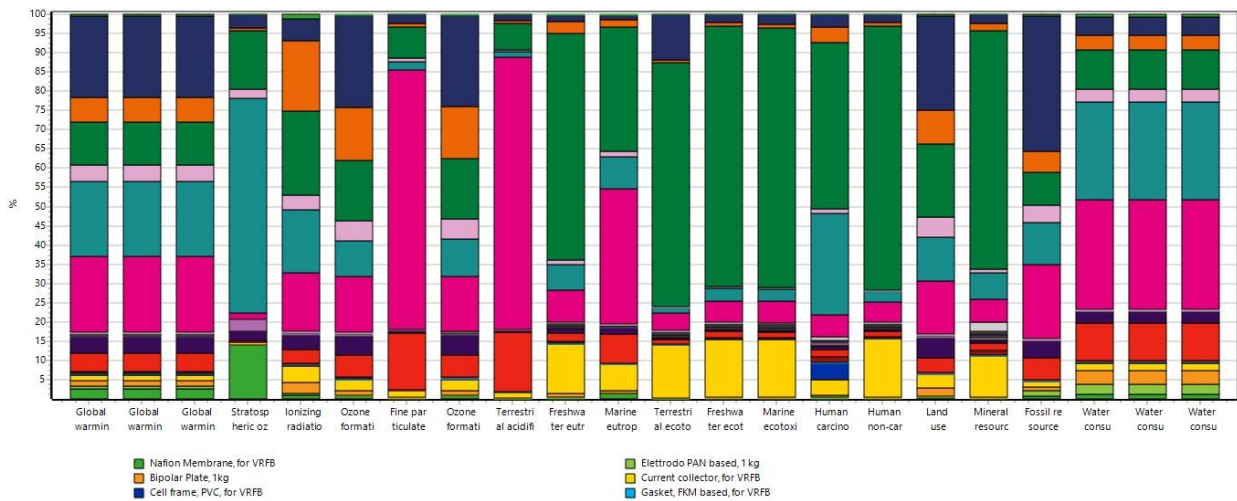
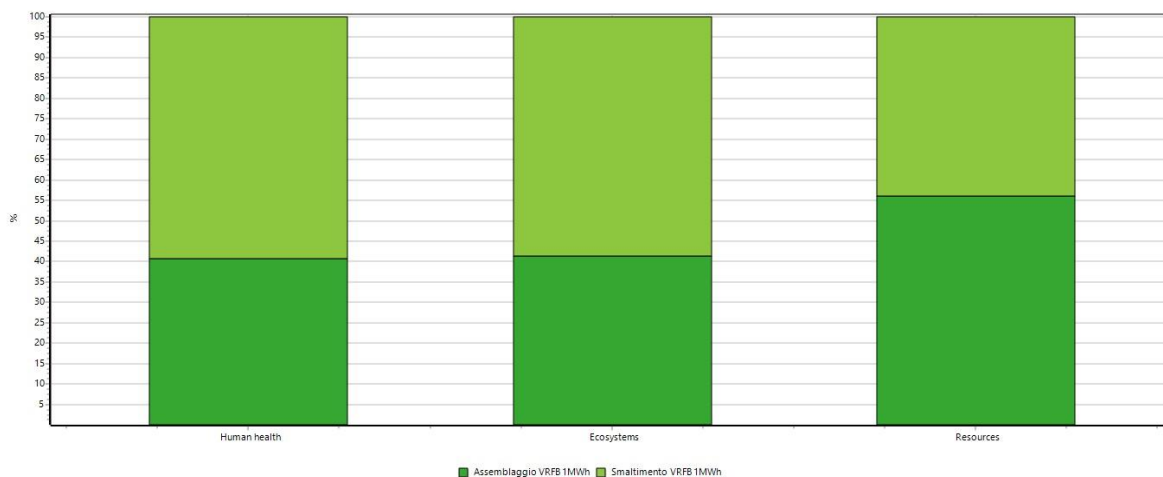


Fig 6.2 – Caratterizzazione degli impatti nella fase di assemblaggio

La valutazione dei danni, raggruppata nelle 3 macro categorie, per produzione e smaltimento delle batterie a flusso di vanadio dà la seguente proporzione:

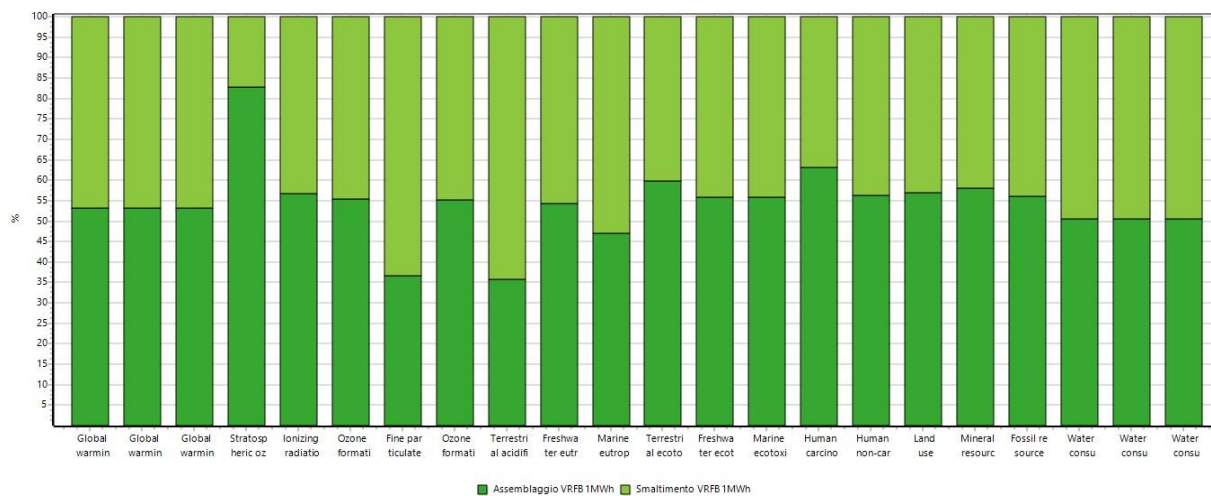


Analizzando 1 p 'VRFB'; Metodo:ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.02 / Valutazione dei danni

Fig 6.3 – Valutazione dei danni nella fase di assemblaggio e smaltimento

In questo caso si è considerato il solo smaltimento senza riutilizzo dei materiali ricavati dal riciclo e si ha che per la salute umana e dell'ecosistema è più impattante la fase di smaltimento, rispettivamente 59% e 58%, mentre per il valore delle risorse impiegate la fase di produzione impatta per il 56% circa del totale.

La caratterizzazione che ne consegue è la seguente:



Analizzando 1 p 'VRFB'; Metodo:ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.02 / Caratterizzazione

Fig 6.4 – Caratterizzazione degli impatti nella fase di assemblaggio e smaltimento

Considerando ora lo scenario “smaltimento+riuso” si ottiene:

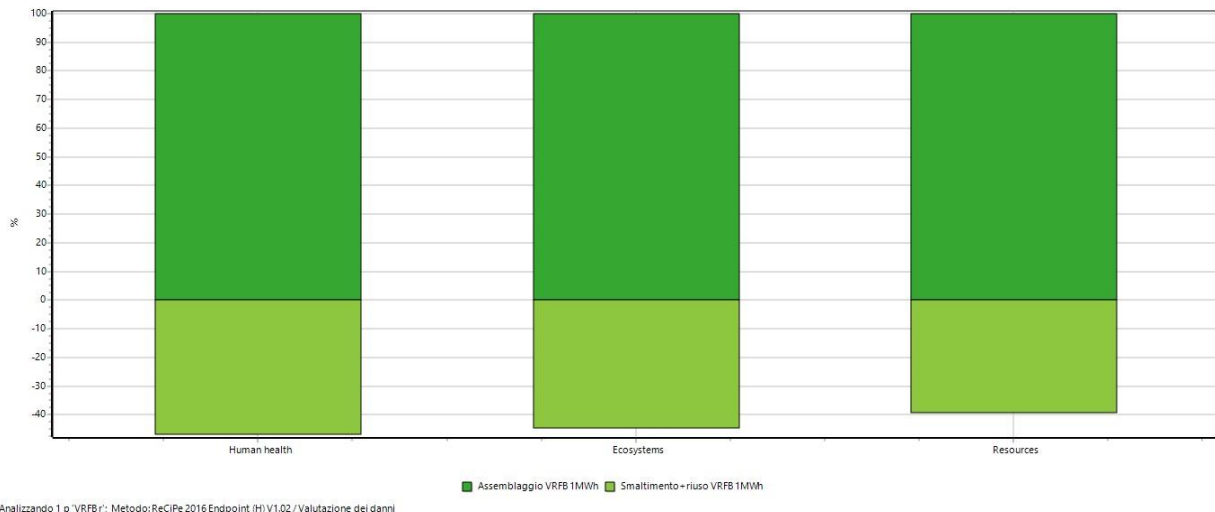


Fig 6.5 – Valutazione dei danni nella fase di assemblaggio e smaltimento con riuso

Salta subito all'occhio che gli impatti della fase di assemblaggio restano positivi mentre quelli riguardanti lo smaltimento e il riuso sono negativi. Questo fatto è da imputare alla composizione della batteria e alle caratteristiche intrinseche del suo elettrolita: il pentossido di vanadio è un elemento chimicamente stabile e, essendo in un ambiente dove avvengono solamente reazioni tra ioni di vanadio, non è soggetto a degradazione col tempo. Inoltre se la temperatura operativa viene mantenuta costantemente sotto i 35°C non si ha formazione né di impurità né di precipitati, rendendolo utilizzabile potenzialmente all'infinito. Va da sé che questo porta all'eliminazione di molteplici impatti ambientali, come si evince dalle tabelle sottostanti:

- Per quanto riguarda sia salute umana che l'ecosistema, l'impatto negativo che dà il maggior contributo è il non consumo di acqua negli impianti a turbina per l'alimentazione delle fabbriche atte alla produzione e alla lavorazione di nuovo elettrolita e la non emissione in ambiente di diossido di zolfo, tipicamente emesso dalle fabbriche che utilizzano del calore estratto da combustibile fossile per le lavorazioni;
- Per quanto riguarda le risorse, i valori che costituiscono circa il 90% del valore negativo sono dati dal risparmio di petrolio e gas naturale per estrazione, trasporto e lavorazione delle materie prime. Si noti come il consumo di vanadio incide comunque positivamente per circa il 5%, a causa dell'efficienza di recupero posta pari al 80% che portano comunque allo smaltimento di parte dell'elettrolita.

Per completezza si riporta di seguito la caratterizzazione nelle sotto categorie di impatto, a riprova che se i materiali ottenuti dalla lavorazione dei rifiuti vengono riutilizzati per un secondo ciclo di vita si arriva ad avere una diminuzione dell'impatto globale della batteria per ogni singola categoria considerata.

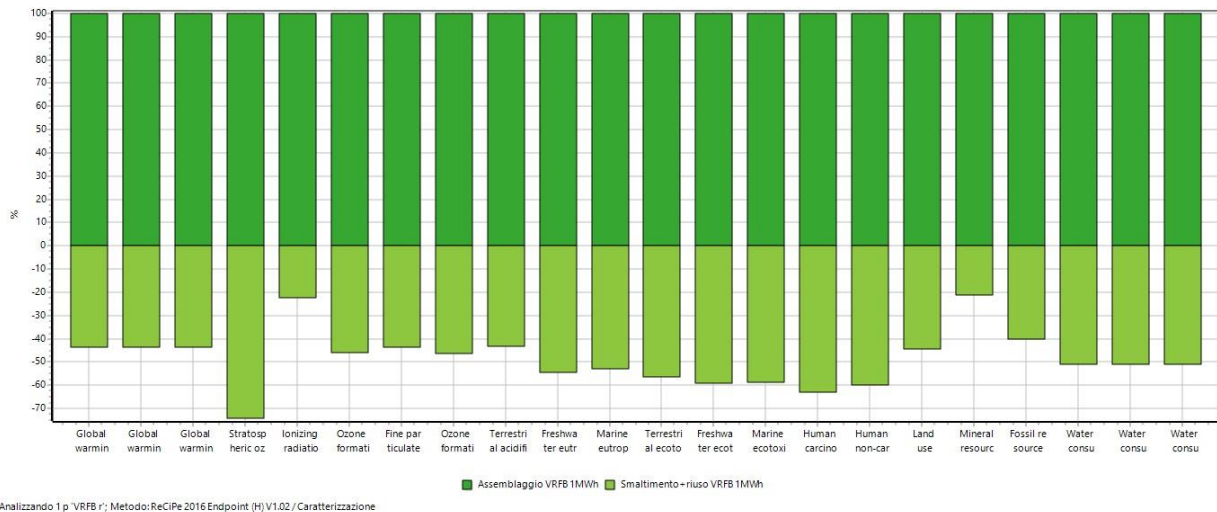


Fig 6.6 – Caratterizzazione degli impatti nella fase di assemblaggio e smaltimento con riuso

6.1.2 LFP

Le batterie al litio che sfruttano la tecnologia al ferro-fosfato presentano i seguenti impatti nella fase di assemblaggio:

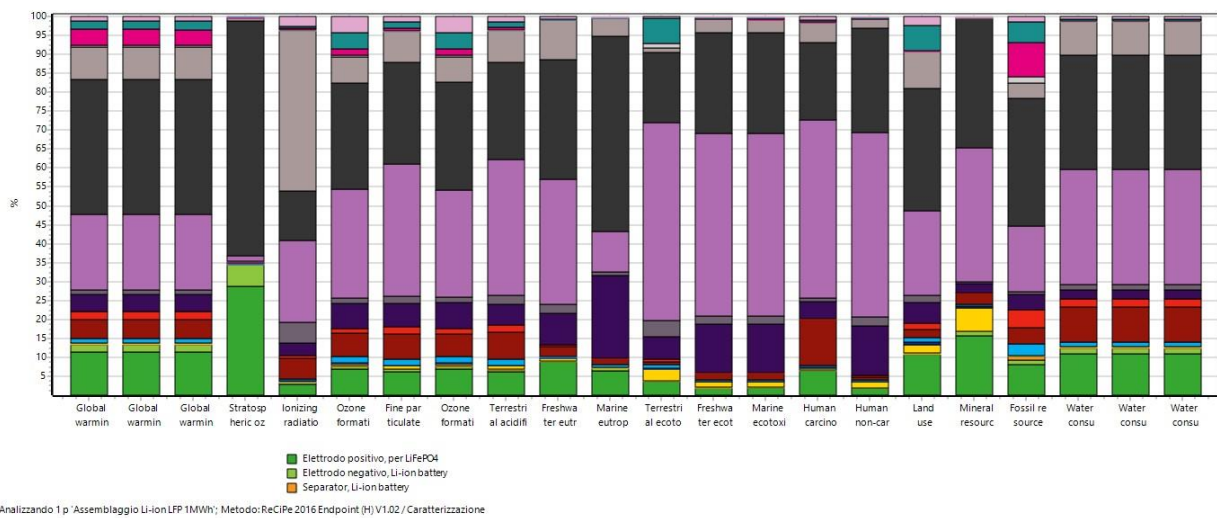


Fig 6.7 – Caratterizzazione degli impatti nella fase di assemblaggio

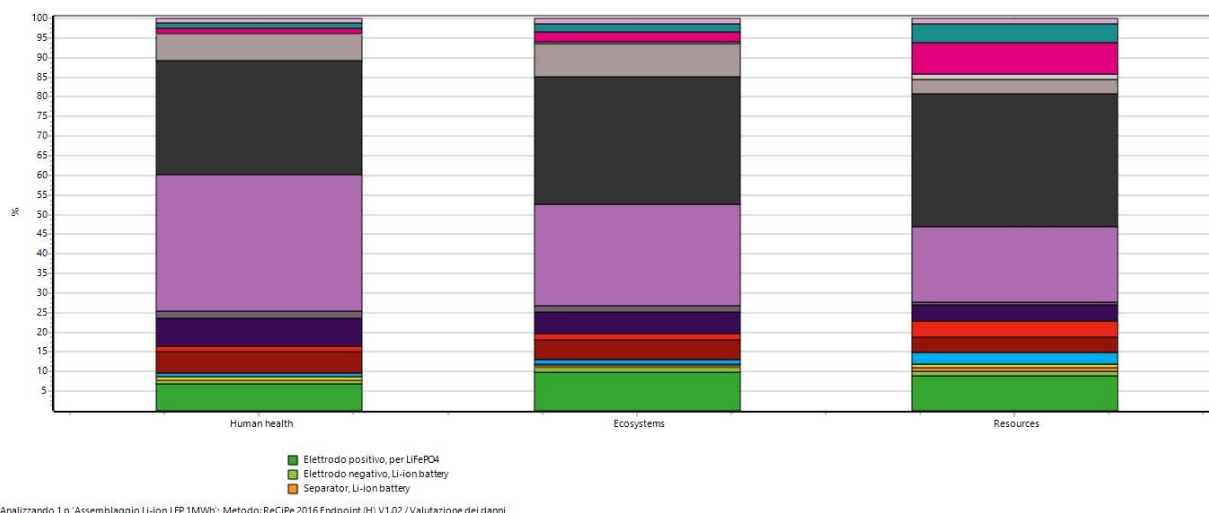


Fig 6.8 – Valutazione dei danni nella fase di assemblaggio

Dove i colori rappresentano, dal basso verso l'alto:

- verde per l'elettrodo positivo;
- verde chiaro per l'elettrodo negativo;
- arancione per il separatore;
- azzurro per l'elettrolita;
- rosso bordeaux per il cell container;
- rosso per il packaging;
- viola per il BMS;
- grigio per il rame;
- lilla per i componenti in acciaio;
- nero per le componenti in plastica;
- grigio l'elettricità in media tensione;
- bianco e fuxia per il calore direttamente da centrali termiche;
- azzurro acqua per il trasporto su gomma;
- rosa per il trasporto su rotaia.

Ora è possibile confrontare il ciclo di vita, suddividendo gli impatti nelle 3 macro sezioni di endpoint: l'assemblaggio incide per il 40% degli impatti sulla salute umana, per il 39% sull'alterazione dell'ecosistema e per il 38% sulle risorse utilizzate, mentre la parte di trattamento dei rifiuti e smaltimento delle materie ottenute contribuisce per il restante 60-61-62%. La parte più consistente dell'inquinamento è anche qui data dalla fase dello smaltimento.

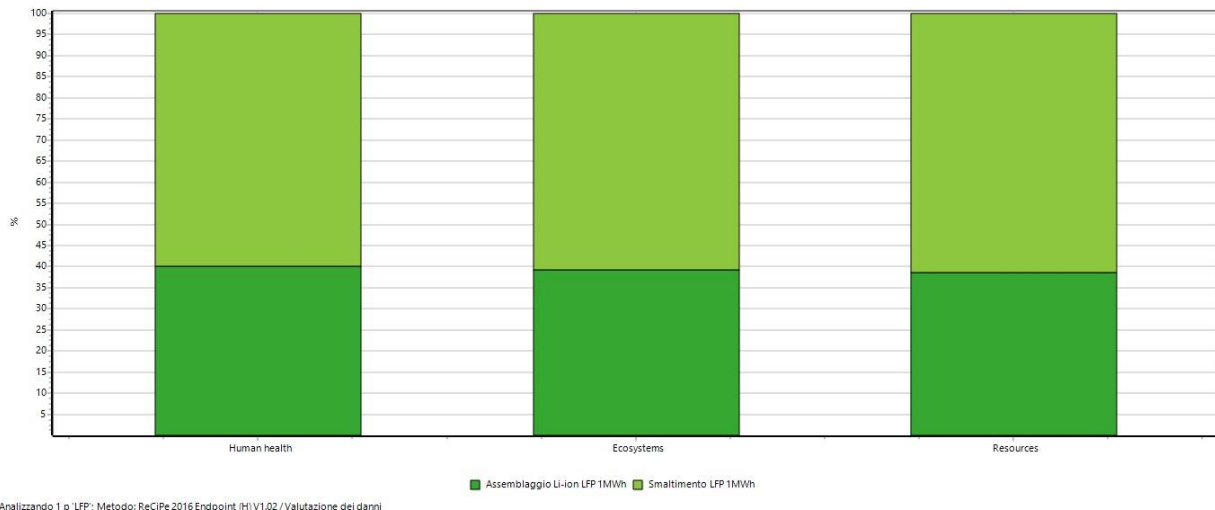


Fig 6.9 – Valutazione dei danni nella fase di assemblaggio e smaltimento

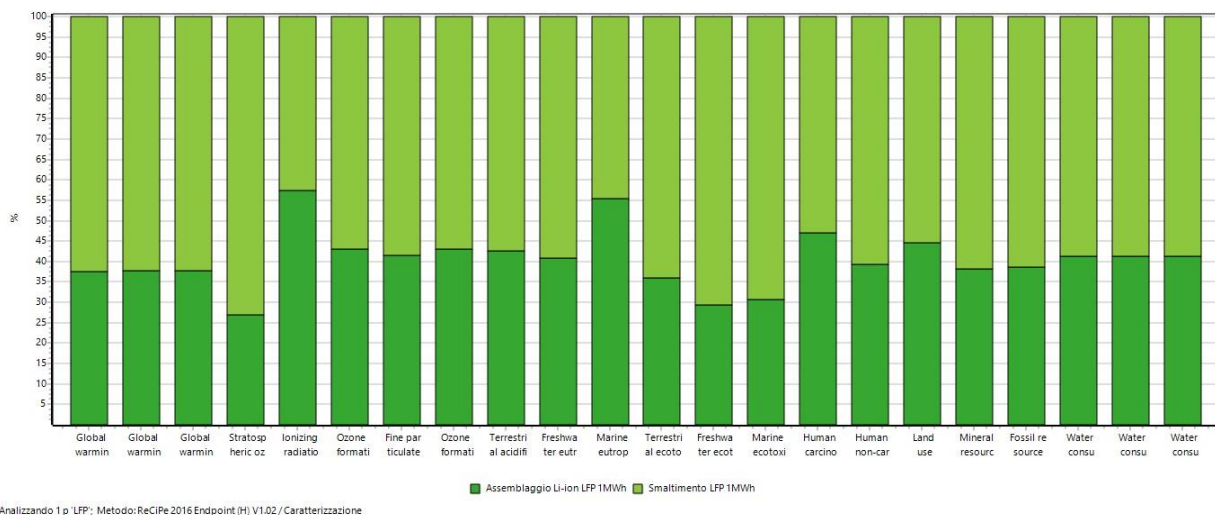


Fig 6.10 – Caratterizzazione degli impatti nella fase di assemblaggio e smaltimento

Andando ora a considerare la fase di riutilizzo delle materie prime ricavate dal trattamento dei rifiuti per un secondo ciclo di vita, si ottiene che l’impatto di questa fase risulta negativo nel complesso, per ognuna delle 3 categorie:

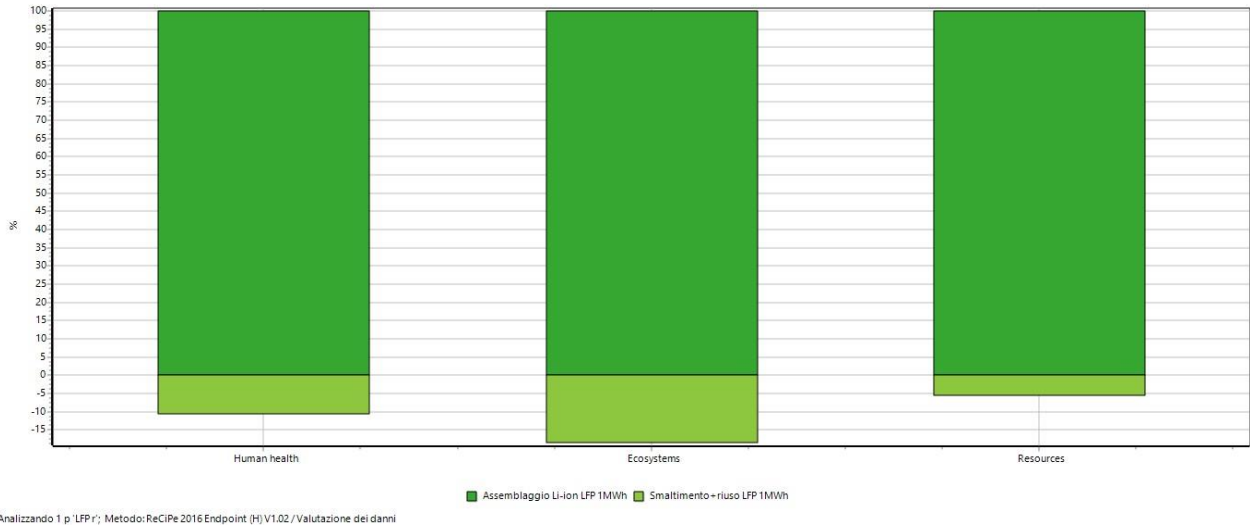


Fig 6.11 – Valutazione dei danni nella fase di assemblaggio e smaltimento con riuso

Andando a caratterizzare gli impatti per ogni tipologia si nota come con il riuso si va a diminuire l’impatto complessivo della batteria in tutte le categorie d’impatto, anche se per alcune di queste l’impatto resta comunque positivo (ecotossicità terrestre e delle acque e agenti tossici non cancerogeni per l’uomo): significa che la parte del riuso va a diminuire l’impatto rispetto al semplice smaltimento dei rifiuti ma a causa dell’elevato consumo energetico per il recupero delle materie prime (per es. processo idrometallurgico e pirometallurgico).

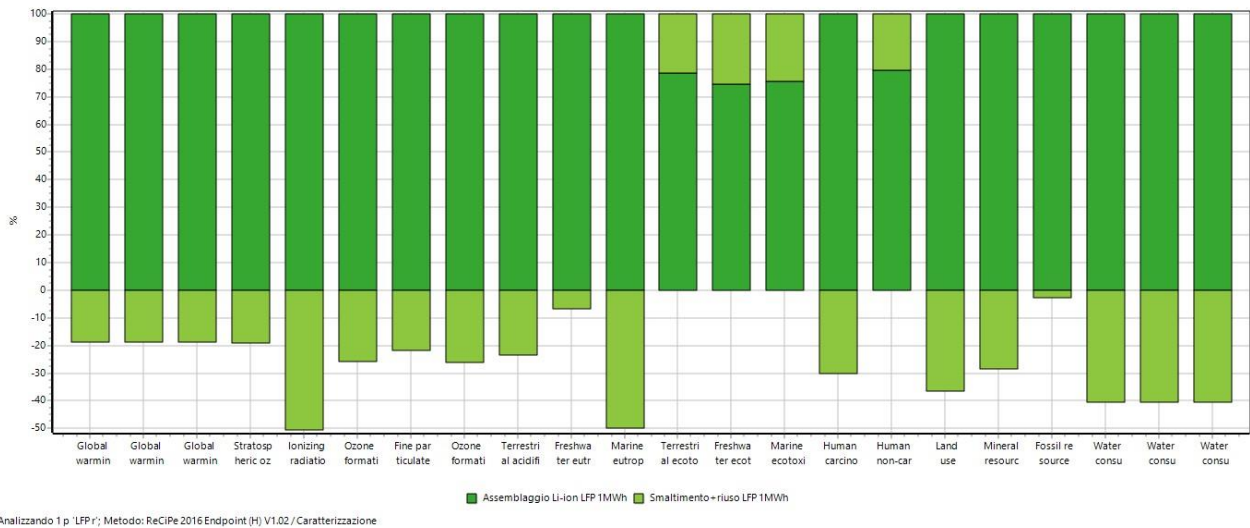


Fig 6.12 – Caratterizzazione degli impatti nella fase di assemblaggio e smaltimento con riuso

6.1.3 NCM

Anche in questo caso si passa ad analizzare innanzitutto la singola fase di assemblaggio, sia per gli impatti sui singoli indicatori di midpoint che sui 3 indicatori generali di endpoint:

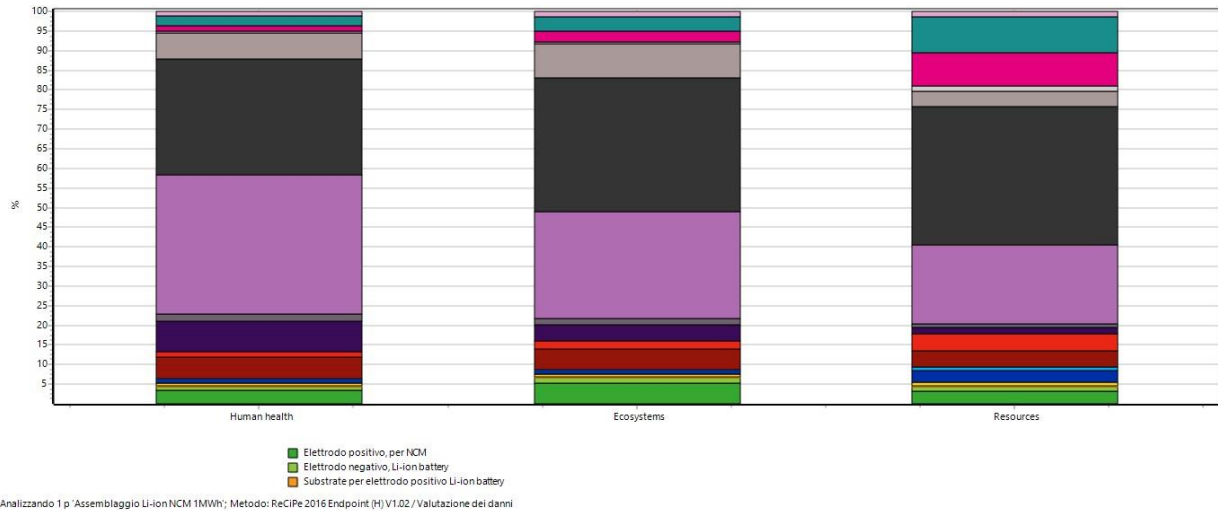


Fig 6.13 – Valutazione dei danni nella fase di assemblaggio

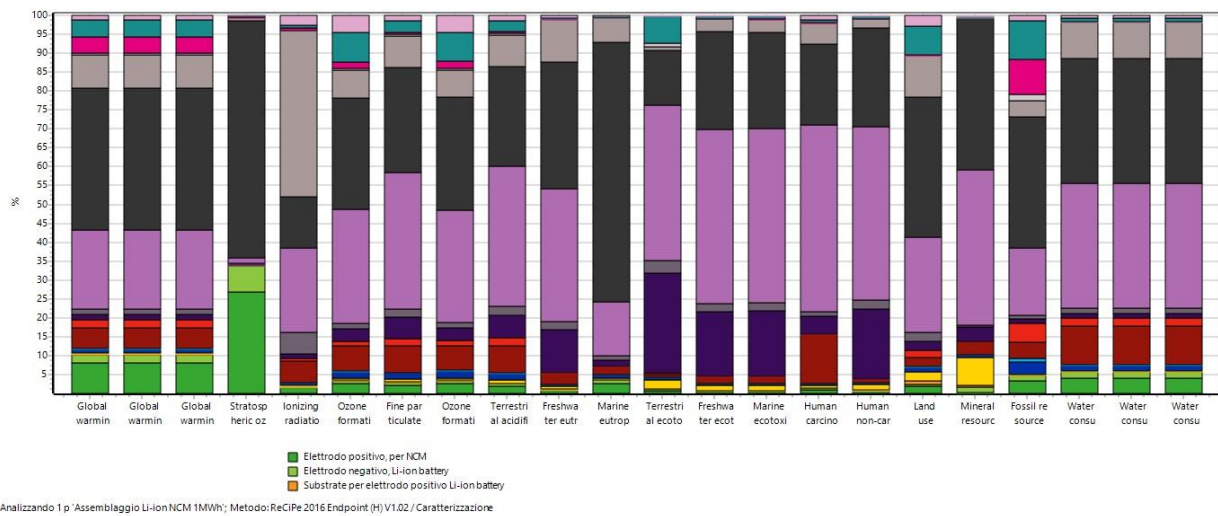


Fig 6.14 – Caratterizzazione degli impatti nella fase di assemblaggio

Dove anche in questo caso i colori stanno a simboleggiare, dal basso verso l'alto:

- verde per l'elettrodo positivo;
- verde chiaro per l'elettrodo negativo;
- arancione per il separatore;
- azzurro per l'elettrolita;

- rosso bordeaux per il cell container;
- rosso per il packaging;
- viole per il BMS;
- grigio per il rame;
- lilla per i componenti in acciaio;
- nero per le componenti in plastica;
- grigio l'elettricità in media tensione;
- bianco e fuxia per il calore direttamente da centrali termiche;
- azzurro acqua per il trasporto su gomma;
- rosa per il trasporto su rotaia.

Le batterie al litio-nichel-cobalto-manganese mostrano la seguente proporzione tra impatti dovuti alla fase di assemblaggio e quella di smaltimento: la fase più impattante è ancora lo smaltimento, che incide per il 61% del totale sulla salute umana e per il 63% circa sull'ecosistema globale e lo sfruttamento di risorse.

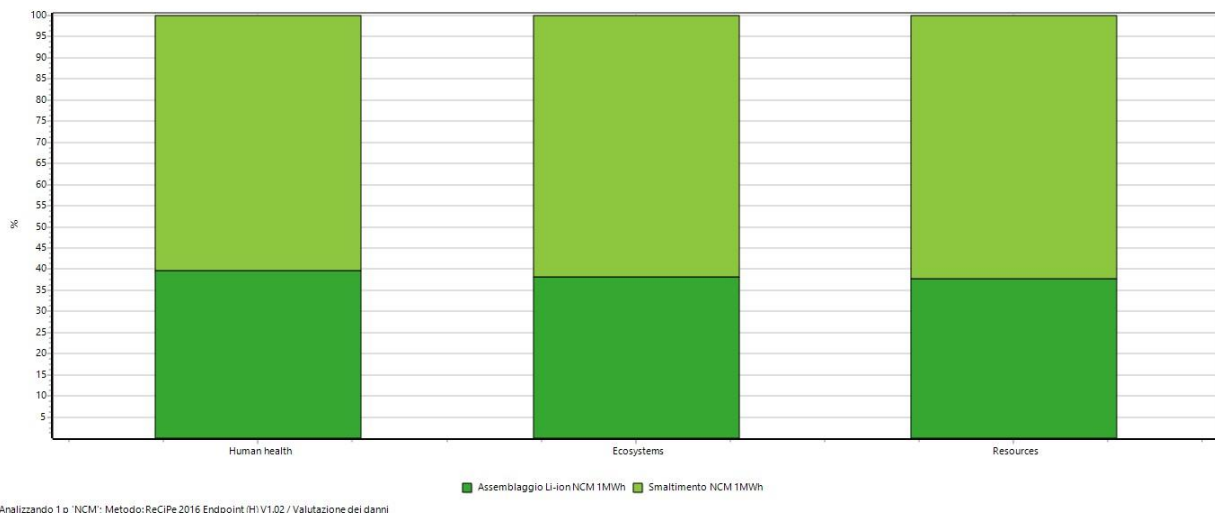


Fig 6.15 – Valutazione dei danni nella fase di assemblaggio e smaltimento

La caratterizzazione delle varie categorie specifiche d'impatto mostra come tutti gli indicatori oscillino uniformemente attorno alla media dei risultati esposti, è corretto notare come la fase di assemblaggio ha un picco del 56% di incidenza nella categoria delle radiazioni ionizzanti, a causa delle lavorazioni di rame e alluminio, mentre ha un impatto sotto la media (26% circa) per la categoria della distruzione dell'ozono stratosferico.

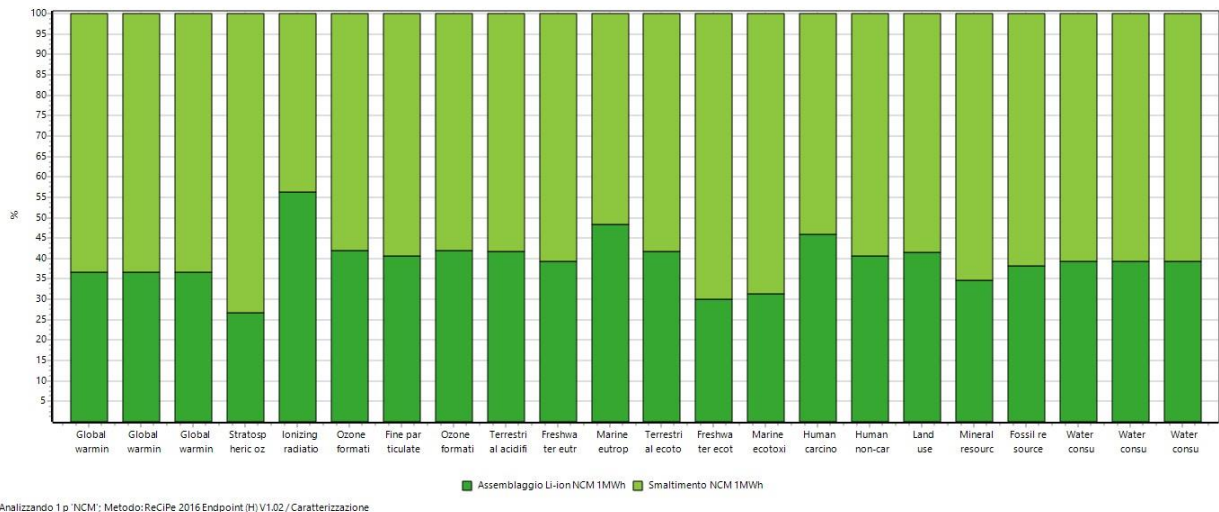


Fig 6.16 – Caratterizzazione degli impatti nella fase di assemblaggio e smaltimento

Integrando la parte del riutilizzo delle materie prime si conferma la tendenza delle due tecnologie sopra descritte in cui l’impatto globale della fase di assemblaggio resta inalterato mentre quello della fase del fine vita ha un impatto globalmente negativo.

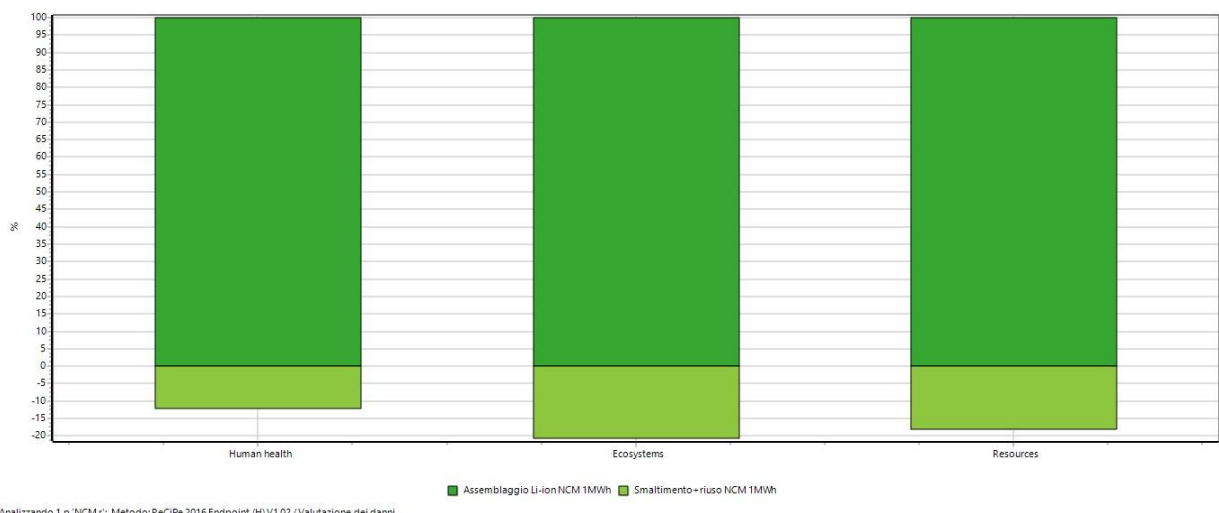


Fig 6.17 – Valutazione dei danni nella fase di assemblaggio e smaltimento con riuso

In particolare si evidenzia come l’impatto sia negativo per la maggior parte delle categorie caratterizzanti eccetto l’ecotossicità generale e la tossicità non cancerogena per l’uomo. La diminuzione generale degli impatti dimostra come il riutilizzo delle materie prime ottenute dal trattamento dei rifiuti ha un impatto generalmente benefico sull’ambiente per un duplice motivo:

- previene all’emissione di sostanze inquinanti dovute all’estrazione e alla e alla prima lavorazione di tali materie prime;

- evita la dispersione in ambiente, lo stoccaggio in discarica o l'incenerimento dei componenti giunti a fine vita.

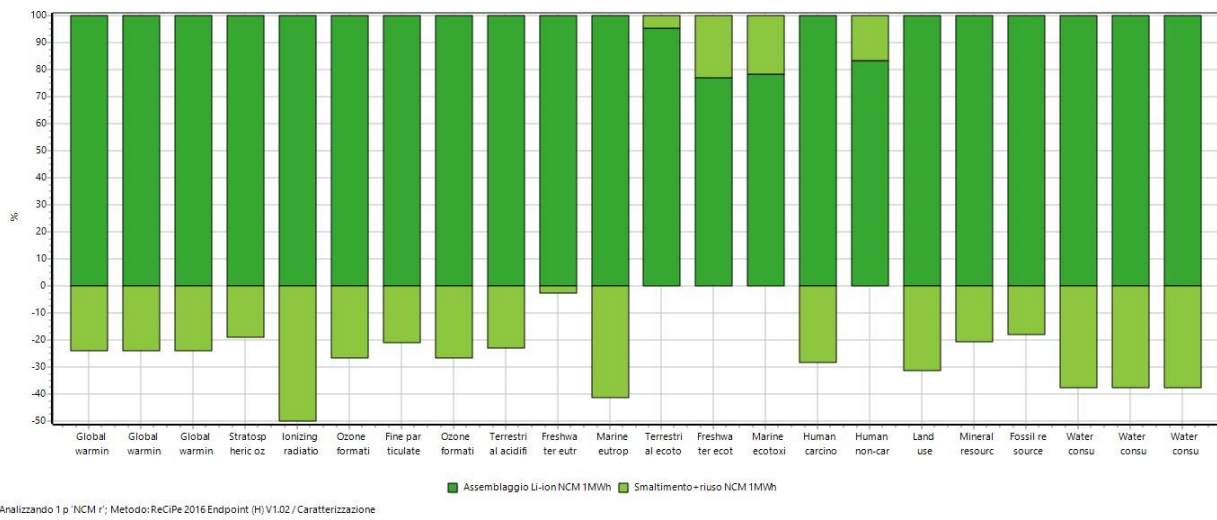


Fig 6.18 – Caratterizzazione degli impatti nella fase di assemblaggio e smaltimento con riuso

6.2 Confronto tra tecnologie

6.2.1 Assemblaggio

Viene riportato di seguito la caratterizzazione degli impatti mediante metodologia ReCiPe 2016 tra le diverse tecnologie analizzate nella fase di estrazione delle materie prime, lavorazione, trasporto ed assemblaggio. I grafici seguenti si riferiscono al prodotto finito, trasportato nel sito d'interesse e pronto per essere messo in funzione.

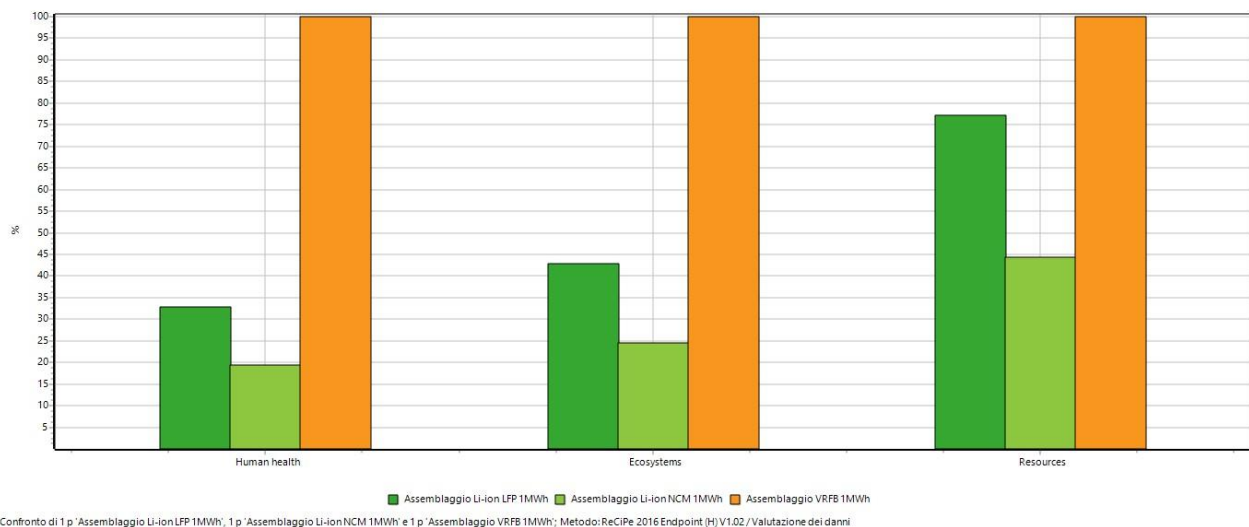


Fig 6.19 – Valutazione dei danni tra tecnologie nella fase di assemblaggio

Si noti come le batterie a flusso di vanadio abbiano un impatto omogeneamente maggiore in tutte le categorie. E' evidente il rapporto mediamente costante tra gli impatti delle due batterie al litio, nelle quali la tecnologia LFP è più impattante della tecnologia NCM a causa della minore densità energetica che porta all'impiego, mediamente, di più risorse e lavorazioni maggiori a parità di capacità d'accumulo. E' importante notare il ruolo delle VRFB: nonostante la densità energetica da 5 a 8 volte minore rispetto le LFP e NCM tale proporzione non viene rispettata sugli impatti. La categoria risorse indica che, fatto 100 il valore delle risorse impiegate per ottenere una batteria a flusso di vanadio da 1MWh, per ottenere la stessa capacità d'accumulo mediante una NCM viene impiegato il 45% del valore equivalente. Valore ben lontano dalla proporzione in peso (41136:5000=8.2). Si può concludere che i materiali e le lavorazioni siano globalmente più onerosi e impattanti percentualmente nelle batterie al litio, a parità di capacità d'accumulo.

6.2.2 Smaltimento

Considerando ora prettamente la fase di trattamento dei materiali giunti a fine vita e loro smaltimento si ha la seguente valutazione dei danni in percentuale:

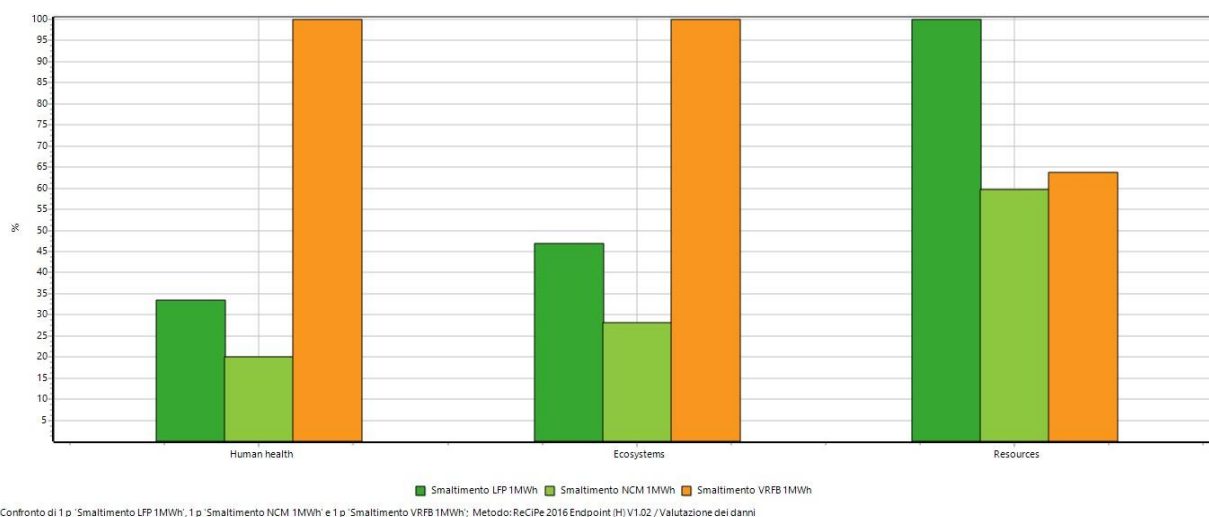


Fig 6.20 – Valutazione dei danni tra tecnologie nella fase di smaltimento

L'impatto maggiore sulla salute umana e sull'ecosistema è ancora una volta dato dalle batterie a flusso di vanadio: le tecnologie al litio si fermano a valori percentualmente simili alla fase di assemblaggio ovvero mantengono il rapporto 1,6:1 che hanno le LFP rispetto alle NCM in tutte le macrocategorie. La differenza in questa fase è data dal valore che SimaPro attribuisce alle risorse da smaltire: le VRFB risultano avere un valore di risorse pari al 64% circa del totale riferito alle LFP e solo 3 punti percentuali maggiore delle NCM. Questo si traduce in un minore impatto dei singoli trattamenti sulle componenti a fine vita, data l'esigua presenza di metalli pesanti e lavorazioni energivore per la loro estrazione al fine di permettere in corretto smaltimento: la scarsa densità energetica porta la batteria ad un peso circa 8 volte maggiore rispetto alle NCM ma l'impatto in questa macrocategoria è differisce solo del 3%.

6.2.3 Smaltimento con riuso

Si considera ora lo smaltimento dei componenti giunti a fine vita tenendo conto anche dei benefici dovuti al riutilizzo delle materie prime ricavate dalle lavorazioni di separazione dei rifiuti. La valutazione dei danni dà i seguenti risultati:

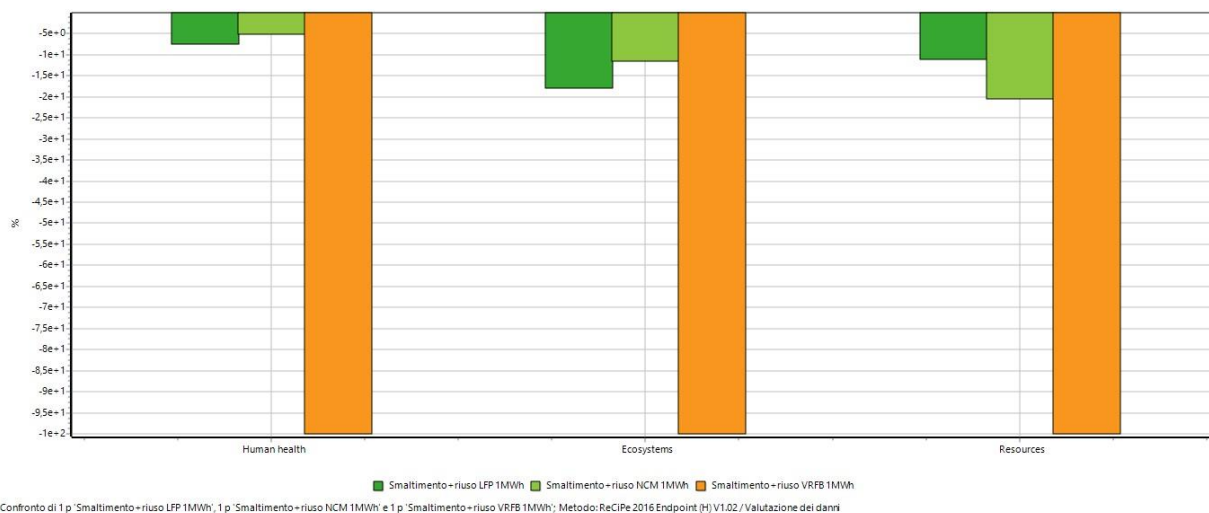


Fig 6.21 – Valutazione dei danni tra tecnologie nella fase di smaltimento con riuso delle materie prime

Si nota innanzitutto che in ogni macrocategoria il valore globale è negativo, come visto in precedenza analizzando ogni singola tecnologia d'accumulo. Il confronto tra le 3 tipologie di batteria evidenzia in maniera marcata come il vantaggio ambientale nel riciclare totalmente le VRFB in un'ottica di economia circolare dia i maggiori benefici. Questo risultato si spiega interpretando i valori ottenuti dai singoli indicatori:

- per la salute umana il valore che dà il contributo maggiore nelle VRFB (-0.87 DALY) è la non emissione di diossido di zolfo, tipicamente emesso dai fumi di combustione delle centrali termoelettriche alimentate a carbone o a gasolio. Un altro contributo importante (-0.81 DALY) è il risparmio d'acqua che si usa nelle turbine di produzione di corrente e calore, necessario per le lavorazioni e l'estrazione delle materie prime; questo dato va considerato nella sua totalità: esso va a pareggiare sostanzialmente il consumo che si ha nelle lavorazioni per lo smaltimento. Un ultimo parametro con un valore interessante è lo zinco (-0.228 DALY): questo metallo pesante è impiegato principalmente nelle lavorazioni delle schede ed i circuiti integrati dovuti al controllo elettronico per il corretto funzionamento della batteria che, in caso di riuso, porta ad un notevole vantaggio ambientale nonostante la sua limitata presenza rispetto al volume totale della batteria. Per le batterie al litio gli ossidi di zolfo sono i maggiori contributori nell'evitare gli impatti ambientali, rispettivamente -0.041 e -0.024 DALY per LFP e NCM. I contributi dati da tutte le altre sostanze sono in quantità molto minori e si possono considerare uniformi.

- Per la totalità dell'ecosistema si hanno risultati simili: l'ossido di zolfo (0.001 specie/anno) è il maggior contributore per le VRFB, mentre nelle altre batterie non sono presenti risultati che necessitano di commenti.
- La valutazione delle risorse indica come il risparmio di petrolio sia la componente dominante in ogni batteria. Si evidenzia per le tipologie al litio un considerevole riduzione degli impatti dovuta al riuso del rame, marginale invece nelle VRFB. Salta all'occhio l'impatto dell'elettrolita al vanadio che nel complesso è positivo del 5% circa: significa che le lavorazioni necessarie al suo trattamento vanno ad impattare, in termini assoluti, in maniera maggiore rispetto alla sua produzione da zero. Va considerato però che la percentuale di elettrolita nel complesso della batteria è del 85% quindi tra produzione da zero e riciclo con riuso la differenza è esigua.

6.2.4 Ciclo di vita

Si considera ora l'insieme delle due fasi più importanti e che saranno quelle utilizzate per l'analisi da qui in avanti: assemblaggio e smaltimento con riuso delle materie prime. La valutazione dei danni indica i seguenti risultati:

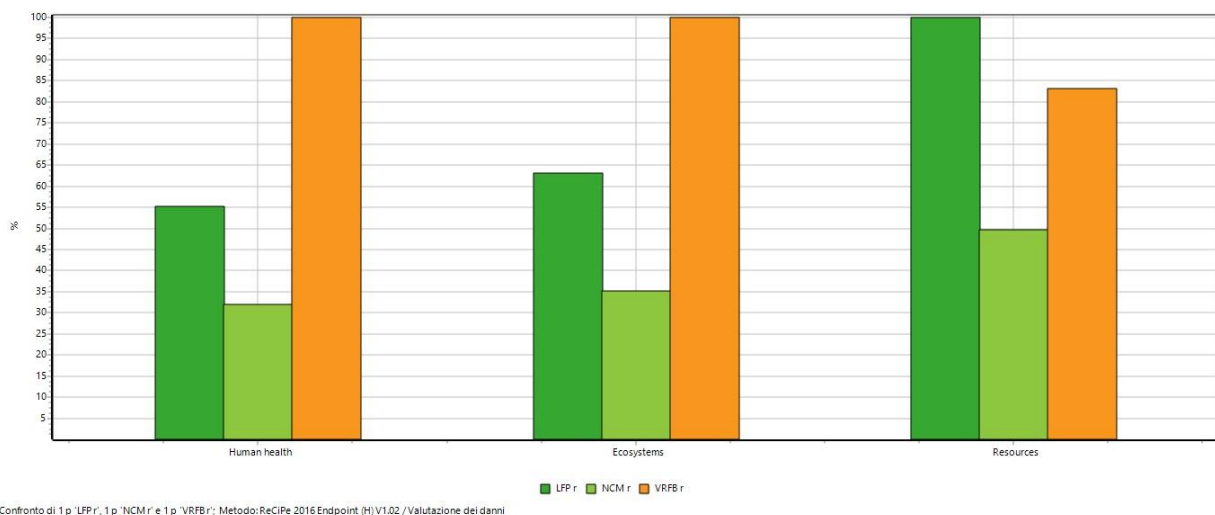


Fig 6.21 – Valutazione dei danni tra tecnologie nel ciclo di vita completo

Si nota come la proporzione 1.6:1 tra LFP e NCM è all'incirca rispettata per l'impatto sulla salute umana e l'ecosistema, come prevedibile; il valore delle risorse impiegate invece arriva ad un 2:1, indicando come l'elettrolita specifico al ferro-fosfato e le lavorazioni necessarie alla sua lavorazione siano mediamente più costosi in termini economici rispetto a quello al nichel-cobalto-manganese. Le VRFB invece si confermano le più impattanti a livello assoluto sia per la salute umana che per la diversità dell'ecosistema, mentre si collocano ad un livello intermedio per quanto riguarda il valore assegnato alla scarsità delle risorse utilizzate.

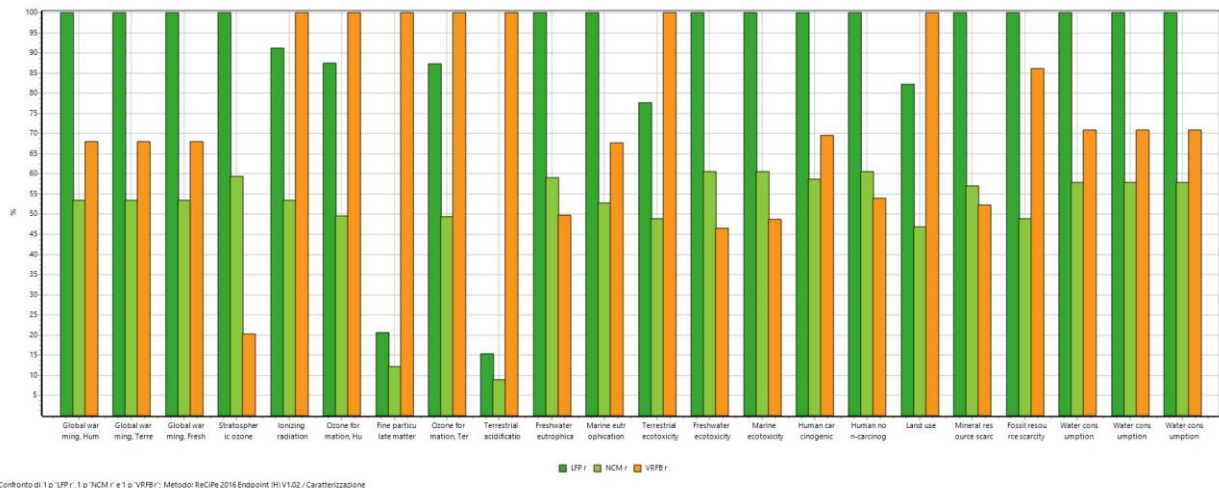


Fig 6.22 – Caratterizzazione tra tecnologie nel ciclo di vita completo

Guardando ogni indicatore più da vicino si nota come da un punto di vista del riscaldamento globale le VRFB si collocano a metà tra le due al litio, mentre hanno un’incidenza nettamente maggiore nell’emissione di particolato fine (<2,5µm), nell’acidificazione e nell’ecotossicità della terra e, come ci si poteva aspettare, anche per quanto riguarda lo sfruttamento del suolo. La scarsa densità energetica porta sia al maggior sfruttamento di suolo per estrarre più materiale che al maggior inquinamento per il suo trasporto, proporzione circa lineare. L’estrazione e la lavorazione del vanadio per ottenere l’elettrolita invece contribuiscono per l’85% dell’acidificazione totale del terreno ma anche per l’81% circa alla formazione totale di particolato fine.

Analizzando con una visione più generale l’insieme degli impatti, delle sostanze inquinanti e dei processi che le emettono si può concludere che:

- Le fasi di trasporto dal sito di estrazione all’Europa, luogo dove avvengono la maggior parte delle lavorazioni, non sono influenti in maniera significativa nella globalità dell’assemblaggio; il trasporto dei prodotti lavorati per assemblaggio, disassemblaggio e trasporto delle materie prime per essere riusate incide per dal 1 al 5% a causa del fatto che esso è supposto avvenire principalmente su gomma per coprire distanze che variano dai 10 ai 100 km;
- La densità energetica gioca un ruolo chiave per gli impatti nelle batterie al litio: escludendo il valore economico dei componenti, essendo buona parte dei componenti pressoché uguale in percentuale al peso le LFP risultano più impattanti in maniera assoluta rispetto alle NCM. Per le VRFB si può concludere che per la realizzazione di 1MWh di capacità d’accumulo siano le più inquinanti in valore assoluto sia per la salute umana che per l’ecosistema globale. E’ però da considerare che, essendo quasi un ordine di grandezza più pesanti ed ingombranti di quelle al litio, esse mostrano nel complesso lavorazioni meno energivore e di conseguenza meno impattanti. Se in futuro si riuscisse ad aumentare la densità energetica di questa tipologia di batterie non è da escludere che possa essere sugli stessi livelli di impatto delle batterie al litio.

- Il riutilizzo delle materie prime ottenute da disassemblaggio e trattamento dei componenti giunti a fine vita è fondamentale per ridurre l’impatto globale del ciclo di vita di ogni tipologia di batteria.

6.3 Integrazione degli accumulatori negli impianti di produzione di energia

Una volta analizzate e confrontate tra di loro le 3 tipologie di batteria è necessario inserirle nel contesto dove andranno ad operare. A causa dell’elevata quantità di dati da analizzare di seguito saranno riportati spesso solo i grafici che mostrano i 3 indicatori di endpoint, che forniscono una visione d’insieme agli impatti globali. Saranno comunque commentati ma per maggiori approfondimenti si possono trovare grafici più specifici e tabelle dettagliate in Appendice [B].

6.3.1 El Hierro

El Hierro è un’isola alimentata prevalentemente dall’energia proveniente dall’ampio parco eolico e per il 5% dalla centrale diesel che garantisce un efficiente regolazione della frequenza alla rete. Inserendo le batterie, Enel ha eliminato completamente il contributo di questa centrale mantenendo la stessa qualità del servizio. Viene mostrato di seguito il risultato in termini di impatto ambientale che hanno le 3 tipologie di SdA analizzati dapprima a 3000 cicli, poi 5000 e infine 13000.

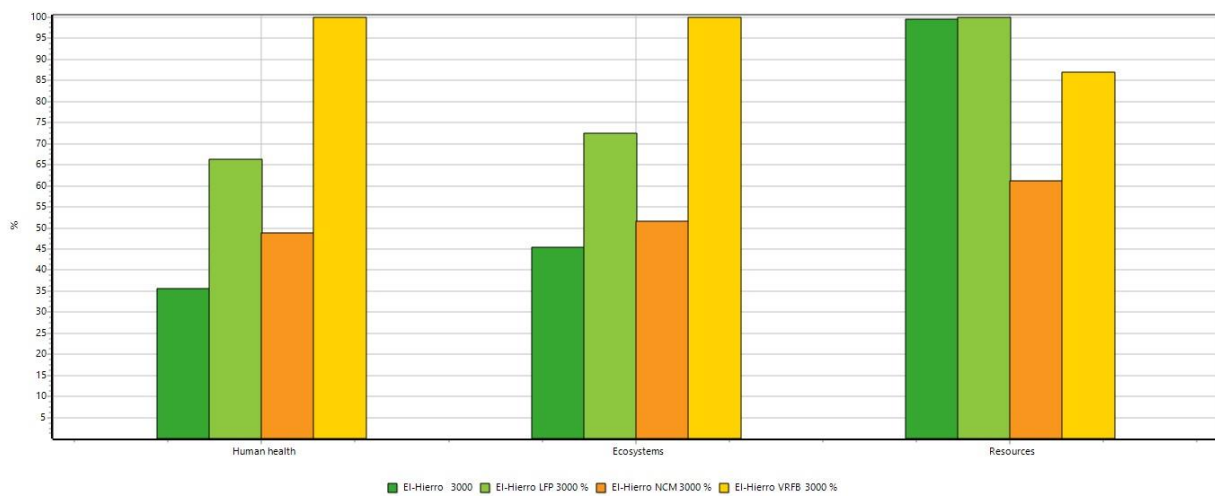


Fig 6.23 – Valutazione dei danni, 3000 cicli

Partendo dalla Human Health, si vede come su un totale di 2.4 DALY attribuiti al parco energetico dell’isola tutte le batterie risultano avere impatti maggiori (4.3, 3.2, 6.6 DALY). Il contributo principale è dato dalle turbine eoliche onshore, seguito dalla lavorazione del rame nelle batterie al litio e dal contributo consistente del pentossido di vanadio, l’elettrolita nelle VRFB.

Per la parte Ecosystem si ha un impatto di 0.004 specie/anno per il parco energetico isolano, mentre ogni batteria li incrementa fino ad arrivare a 0.009 specie/anno delle VRFB. Possono sembrare valori

bassi, ma è opportuno ricordare che è un sistema tutto sommato piccolo e circoscritto: ad esempio, potenzialmente ogni 3 GWh di accumulo con le LFP corrisponde la scomparsa di 6 specie viventi all'anno.

Nella sezione delle risorse il programma attribuisce l'impatto delle risorse fossili maggiore alla centrale isolana dato dal consumo specifico di crude oil e relativa lavorazione. La riduzione globale dello sfruttamento delle risorse fossili è piuttosto evidente: eccetto le LFP che hanno un valore circa pari, le altre batterie si attestano a 62% e 87%.

Si riportano di seguito anche gli andamenti dei risultati per 5000 e 13000 cicli: l'andamento degli impatti globali è il medesimo, ma si intravede che le batterie NCM risultano in questo scenario appena il 4% più impattanti per la salute umana rispetto il parco energetico senza batteria; sono inoltre l'8% circa meno inquinanti per l'ambiente e, addirittura, impattano per meno del 50% sulle risorse fossili da estrarre, rispetto al 57% delle VRFB e al 70% delle LFP.

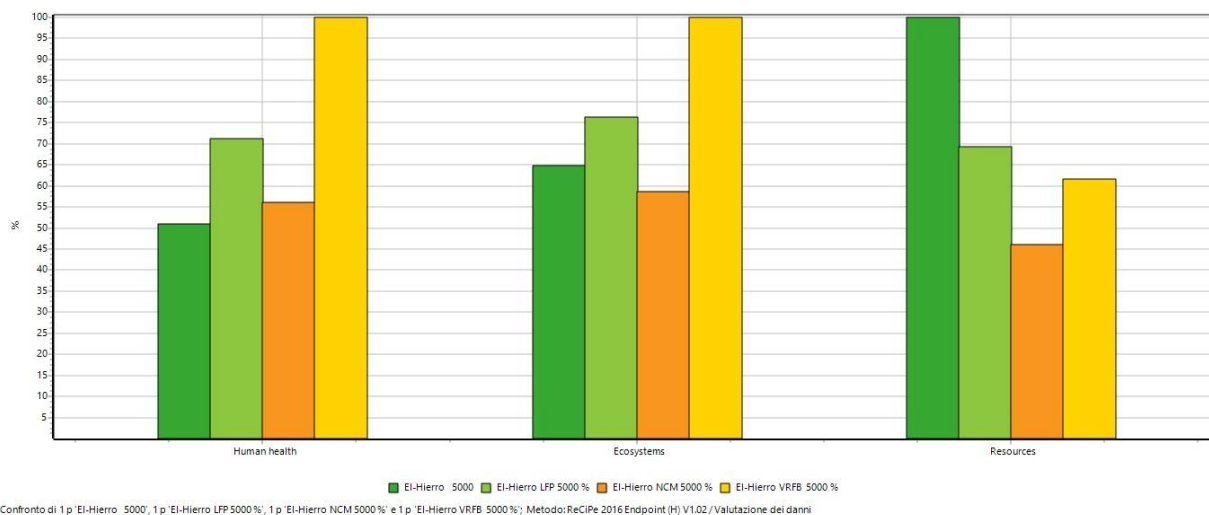


Fig 6.24 – Valutazione dei danni, 5000 cicli

Solo le batterie al vanadio possono sopportare ciclaggi elevati a causa del limite tecnologico delle altre batterie; si confrontano ora solo il parco energetico con e senza la batteria a flusso. Nell'arco dei 13000 cicli si riduce il gap nell'indicatore della salute umana mentre si ha una convenienza per l'ecosistema nell'installare la batteria. Le VRFB in questo caso possono essere confrontate percentualmente con le NCM, entrambe nello scenario di fine vita: risultano molto simili come prestazioni nell'intero ciclo di vita, con un leggero vantaggio nella riduzione i risorse fossili utilizzate nel caso delle VRFB.

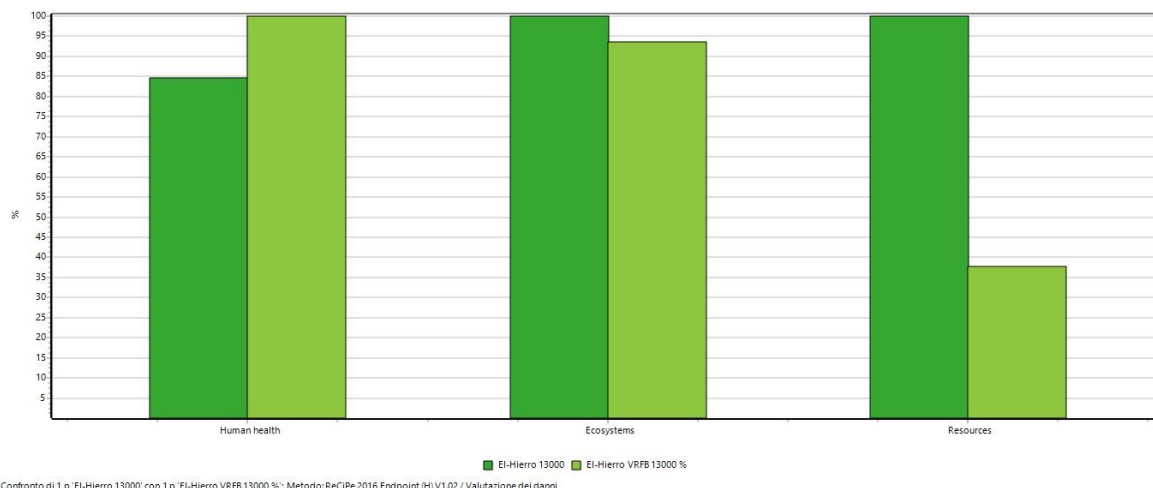


Fig 6.25 – Valutazione dei danni, 13000 cicli

Nel complesso si può affermare che non esiste una tecnologia migliore in assoluto, nè che le batterie analizzate vadano a ridurre in maniera assoluta gli impatti ambientali del sistema di approvvigionamento energetico dell'isola. Analizzando le tabelle numeriche in appendice A si nota come il combustibile non utilizzato è insufficiente a rendere conveniente in maniera assoluta l'adozione di una di queste tecnologie d'accumulo per ridurre l'impatto globale del parco energetico dell'isola.

6.3.2 Ventotene

Quest'isola prevede una penetrazione delle FER pari all'8%, limitata da vincoli paesaggistici, e dunque la maggior parte dell'energia è fornita da fonte fossile tradizionale. L'integrazione degli accumulatori ai generatori diesel già esistenti ha dato i seguenti risultati:

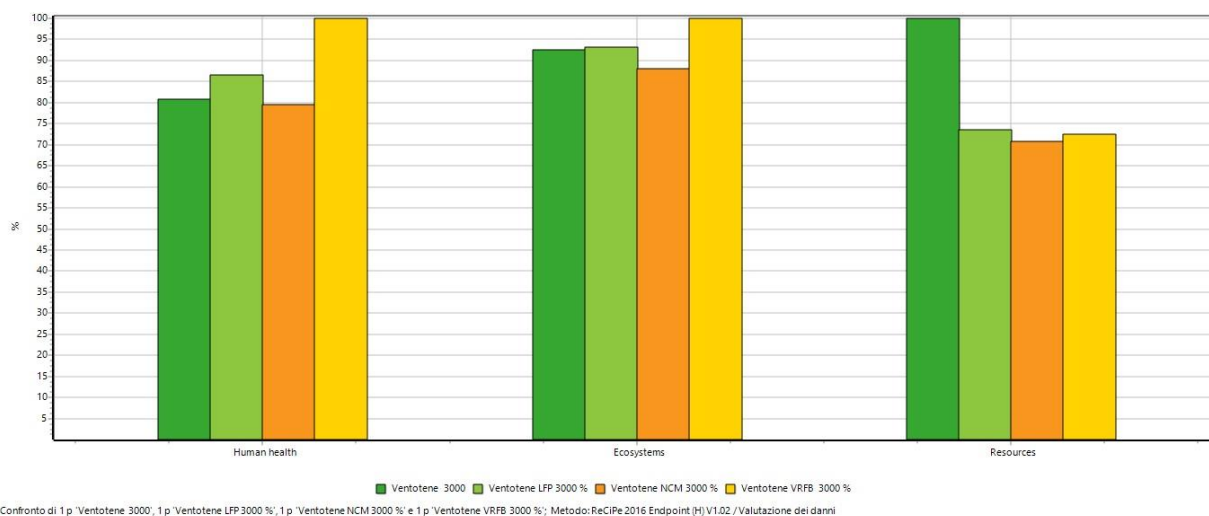


Fig 6.26 – Valutazione dei danni, 3000 cicli

Al compimento del ciclo numero 3000 si ha che le batterie al nickel-cobalto sono in linea con l'impatto sia ambientale che sulla salute umana del mix energetico dell'isola senza accumulatore, mentre le altre due tipologie sono più impattanti. Per la salute umana si ha il maggior contributo positivo dato dalla produzione della centrale diesel, in termini di emissione di particolato fine e contributo al riscaldamento globale. Contribuisce in maniera non trascurabile (5% mediamente) anche il trasporto via mare delle componenti delle batterie prima della lavorazione ed assemblaggio: questo dato non stupisce perché essendo la potenza installata piuttosto modesta l'allocatione dell'inquinamento di un'imbarcazione è maggiore avendo meno materiale su cui ripartirne l'impatto. Le batterie a flusso risultano più impattanti del parco energetico senza batteria, di circa il 13% mentre le LFP del 5%.

Per quanto riguarda le risorse già a 3000 cicli si nota come il risparmio di combustibile sia elevato (circa 27%) e vada a suggerire come nel complesso l'installazione di un SdA contribuisca a ridurre lo sfruttamento delle risorse fossili della Terra.

L'andamento degli impatti dopo 5000 cicli fa rientrare nel campo di convenienza ambientale anche le batterie LFP, mentre le VRFB hanno ancora un impatto sulla salute umana circa il 15% maggiore del caso senza batteria installata. Il risparmio di risorse fossili nell'intero ciclo di vita aumenta fino al 30%.

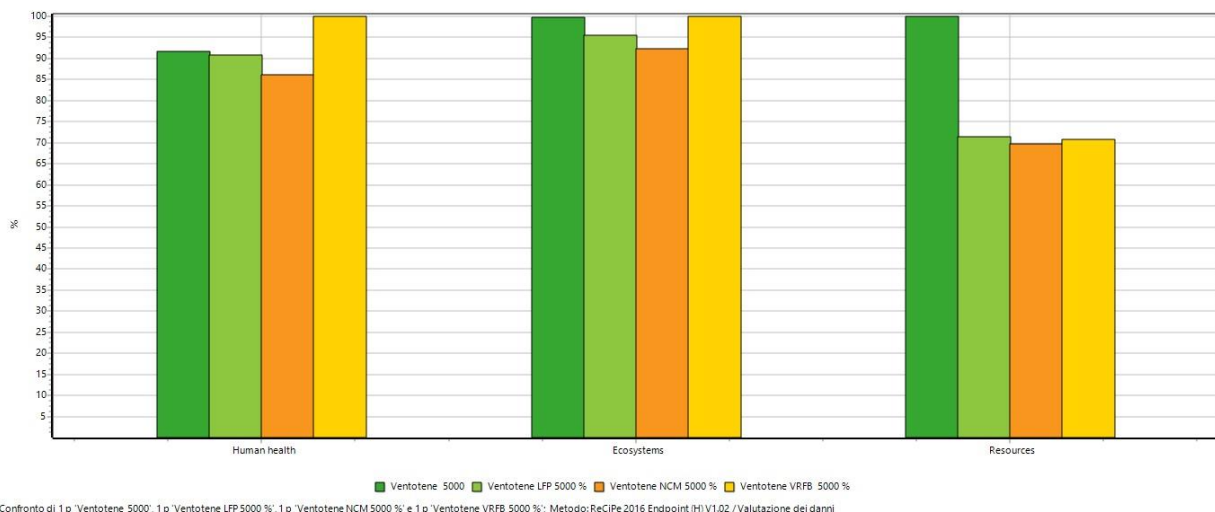


Fig 6.27 – Valutazione dei danni, 5000 cicli

Analizzando il fine vita delle VRFB a 13000 cicli emerge come anche questa tecnologia risulta conveniente in termini assoluti per diminuire l'impatto ambientale dell'approvvigionamento energetico dell'isola, pur mantenendo la qualità della rete.

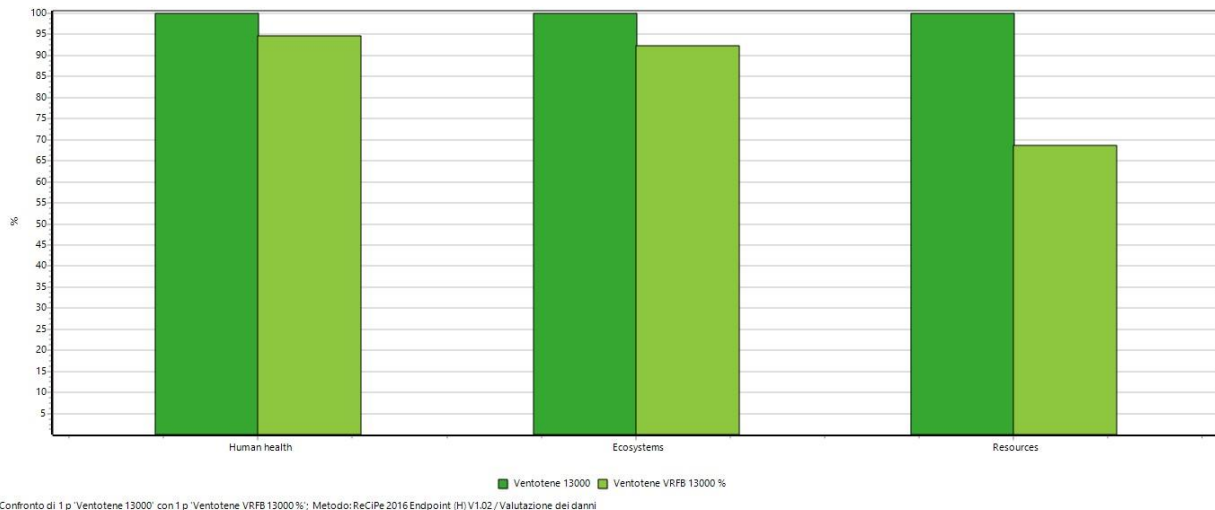


Fig 6.28 – Valutazione dei danni, 13000 cicli

Si può concludere affermando che il risparmio di risorse fossili nel complesso è buono per tutte le tecnologie analizzate e tutte risultano convenienti da un punto di vista strettamente ambientale. Da una bassa penetrazione di FER ci si aspetterebbe una maggior diminuzione degli impatti globali, ma in questo caso specifico è la ridotta capacità di accumulo installata che non permette di rispettare le aspettative a causa del grande impatto che ha un accumulatore rispetto ad una capacità installata modesta.

6.3.3 Ustica

Ustica presenta una penetrazione da FER del 43% e questo va ad incidere sulla convenienza dell'integrazione di eventuali SdA nella rete interna all'isola:

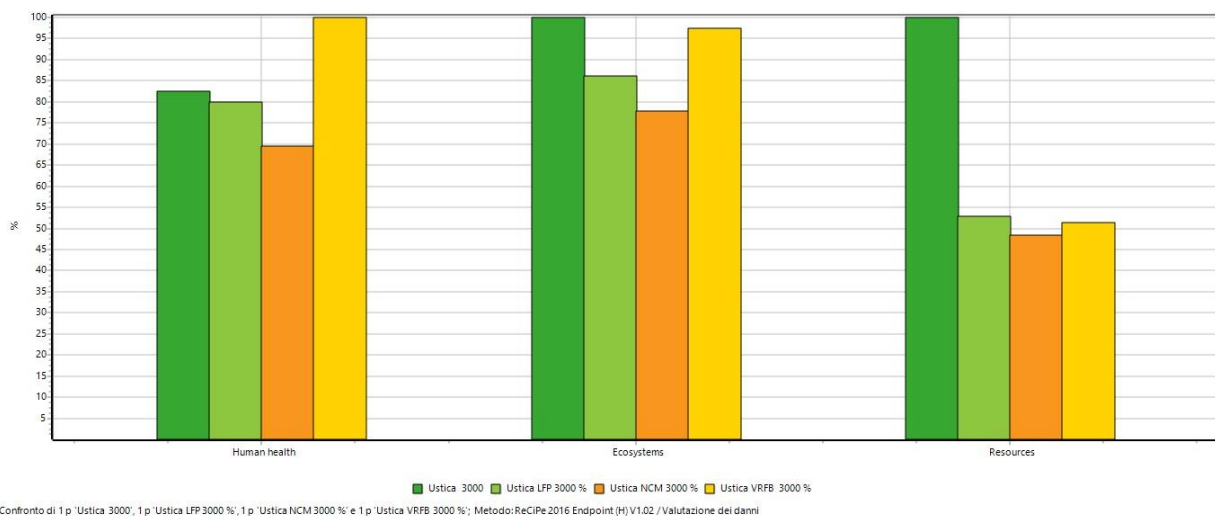


Fig 6.29 – Valutazione dei danni, 3000 cicli

Si vede come la riduzione di risorse fossili rende conveniente in maniera assoluta l'integrazione di un SdA nell'impianto dell'isola. Dai risultati offerti da SimaPro si evince che al ciclo numero 3000 si ha un indubbio risparmio di risorse fossili (mediamente del 87%) e impatti complessivamente minori per l'ecosistema per tutte le tecnologie in questione, mentre le VRFB risultano più impattanti del 20% circa rispetto al parco energetico senza accumulatore.

Considerando un numero di cicli superiore, si vede come a 5000 tutte le batterie risultano meno impattanti del caso che ne è sprovvisto, eccetto le VRFB per l'impatto sulla salute umana di circa 0.04 DALY. Se si arriva a 13000 cicli, limite supposto in questo elaborato per le VRFB, si nota come anch'esse entrano nel campo di convenienza in tutti e 3 gli indicatori di endpoint. Si può affermare che nel complesso del ciclo di vita di ogni singola batteria, la più conveniente per questo studio è la NCM, anche se di poco: migliora le performance ambientali del caso base del 21-25-45% rispettivamente per salute umana, ecosistema e scarsità di risorse fossili, rispetto al 18-20-46% delle batterie a flusso.

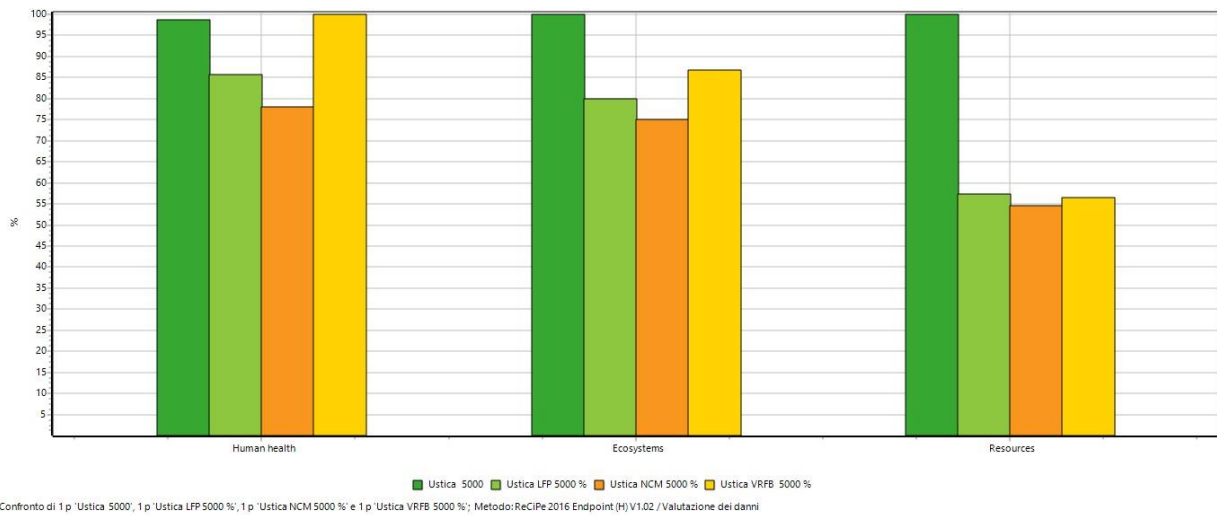


Fig 6.30 – Valutazione dei danni, 5000 cicli

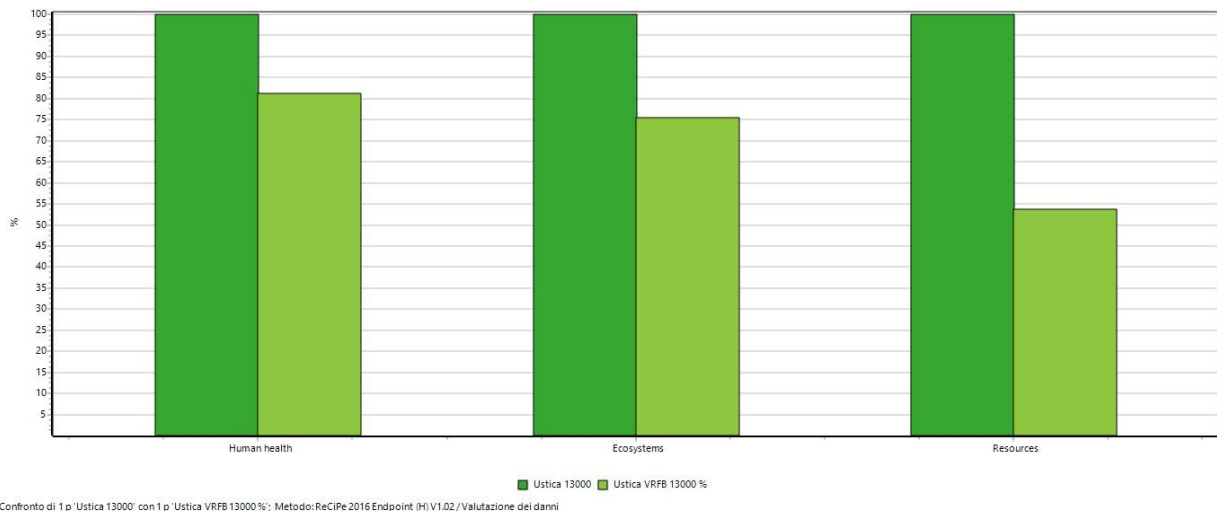


Fig 6.31 – Valutazione dei danni, 13000 cicli

6.3.4 Pantelleria

Il progetto Pantelleria Zero per azzerare i combustibili fossili dall'isola è molto ambizioso. Ora che si è conclusa l'analisi di inventario si va a vedere che risultati potrebbe portare in termini di impatto ambientale l'installazione sull'isola di un sistema d'accumulo per evitare al 100% la presenza di impianti a fonti fossili.

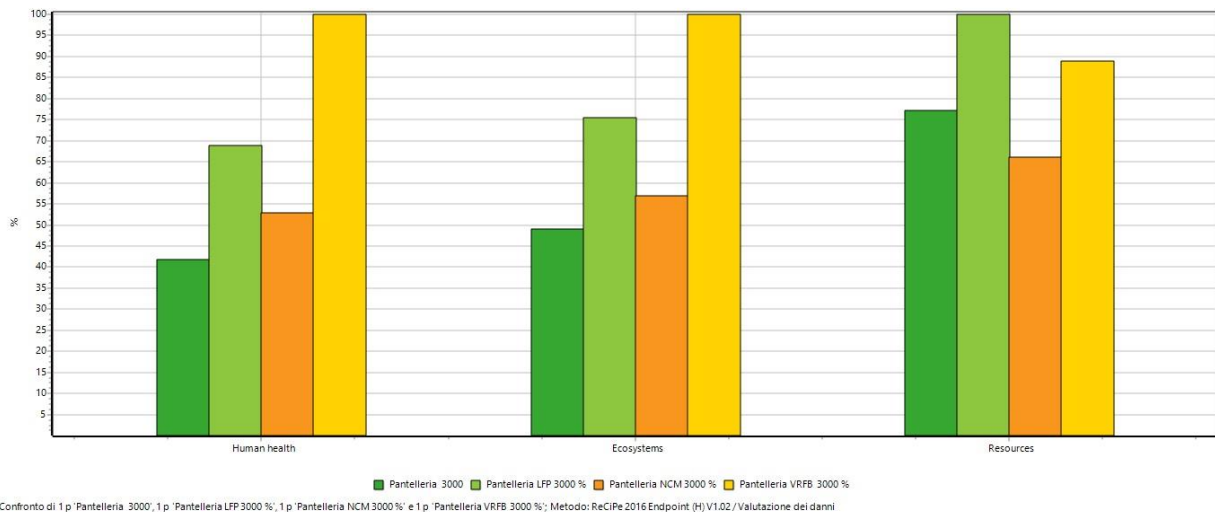


Fig 6.32 – Valutazione dei danni, 3000 cicli

Si nota subito che sia dal punto di vista dell'ecosistema che della salute umana non si hanno grandi benefici, anzi: nel migliore dei casi la batteria meno impattante sarebbe la NCM ma presenta impatti superiori del 30% rispetto al caso con la centrale a gas. Questo non deve stupire, dal momento che la centrale a gas in ciclo semplice dell'isola è alimentata a metano, combustibile considerato "pulito", e infatti lo dimostra tenendo un valore di 5 DALY e 0.0083 specie/anno per la soluzione con la centrale in funzione. E' da considerare che, oltre a bruciare un combustibile che si dimostra poco inquinante, essa produce solo il 5% del totale. Anche arrivando a 5000 cicli completi di carica-scarica non si ottiene alcun vantaggio ambientale implementando una batteria al posto di far funzionare la centrale già presente nell'isola. Per quanto riguarda le risorse fossili invece si ha un miglioramento: già a 3000 cicli le NCM, forti della loro alta densità energetica, fanno risparmiare circa il 10% di risorse. A 5000 cicli la situazione non varia in maniera significativa.

Solitamente le VRFB si dimostrano competitive a ciclaggi superiori dal momento che sono più impattanti in termini assoluti ma resistono meglio all'invecchiamento e alla degradazione dell'elettrolita. In questo caso però non riescono neanche al ciclo numero 13000 ad avere un vantaggio ambientale per la salute umana o per l'ecosistema.

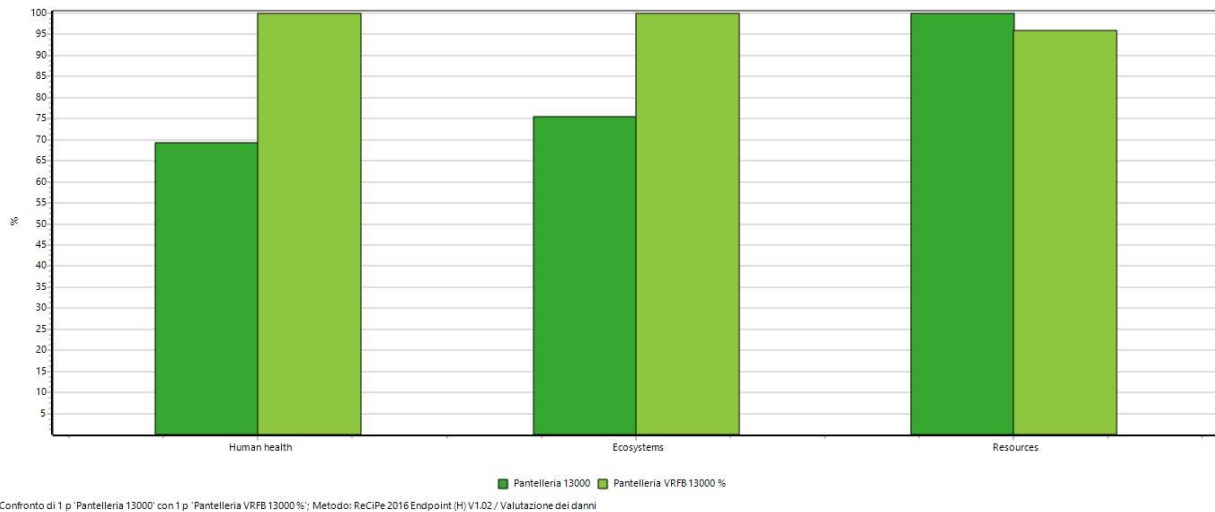


Fig 6.33 – Valutazione dei danni, 13000 cicli

Si può concludere come nessuna delle batterie analizzate compori una diminuzione assoluta degli impatti nell'approvvigionamento energetico dell'isola di Pantelleria rispetto alla regolazione effettuata dalla centrale a gas già presente.

6.3.5 Torre Valdaliga Nord

Si analizza ora uno scenario diverso dai precedenti: la centrale termoelettrica di Torre Valdaliga Nord. In questo caso l'accumulo ha un ordine di grandezza superiore a quelli già visti: 120 MWh. La centrale utilizza il carbone come combustibile e si stimano 1000 cicli all'anno per le batterie.

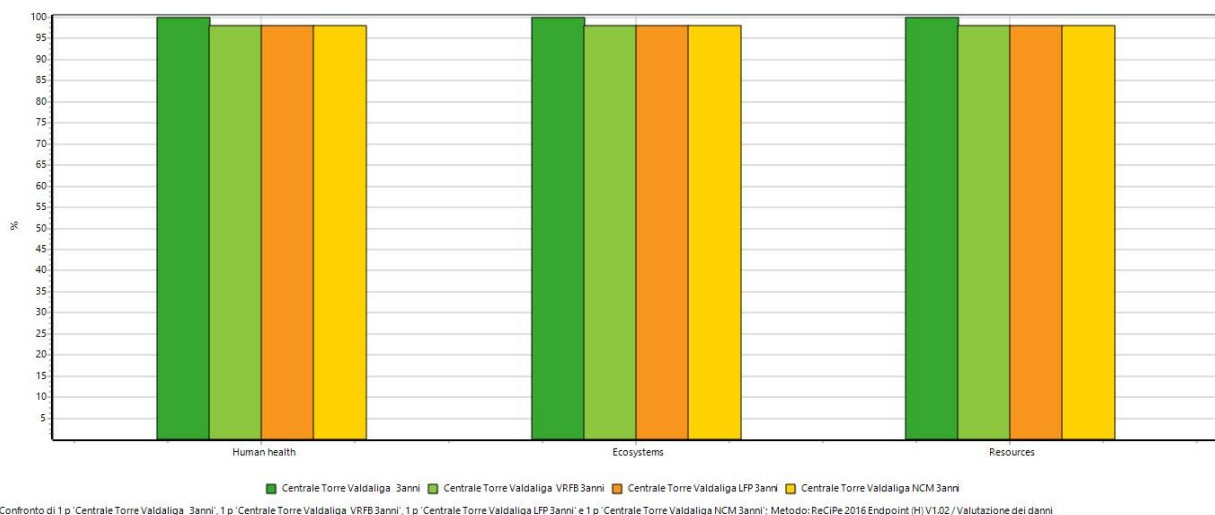


Fig 6.34 – Valutazione dei danni, 3 anni

Il risparmio di combustibile annuo stimato al 2% dopo l'implementazione di un accumulatore è significativo: essendo esso dovuto al miglioramento delle prestazioni dell'intera centrale termica va a far risparmiare circa 80 milioni di tonnellate di carbone. Questa grande quantità rende pressoché nullo, in percentuale, l'impatto di materiali e lavorazioni necessarie a produrre le batterie qui analizzate. Dalle tabelle in appendice si evince come l'impatto delle batterie è stato supposto proporzionale alla loro dimensione, ma questo risulta comunque irrilevante in termini assoluti rispetto all'enorme impatto che ha la centrale a carbone di per sé.

Si può concludere che ogni tipologia di batteria che si implementa in casi come questo è vantaggiosa dal punto di vista ambientale, proporzionalmente al combustibile risparmiato nell'intero ciclo di vita.

Viene riportato solo il caso il caso dei 3 anni dal momento che nei casi successivi l'andamento è identico.

Per quanto riguarda le risorse fossili si nota un caso interessante: per le NCM si ha un impatto negativo. Questo si può spiegare col fatto che il vantaggio dato dal risparmio del combustibile (sempre negativo, essendo un mancato impatto sulle risorse fossili) è in termini assoluti maggiore dell'impatto positivo dato da tutti gli altri materiali e lavorazione dei componenti necessari a creare la batteria.

Aumentando il ciclaggio si vede migliora proporzionalmente al numero di cicli l'impatto sia sull'ecosistema che sulla salute umana. Inoltre anche le VRFB mostrano un valore negativo sulla scarsità di risorse fossili, seppur in termini assoluti minore di quello registrato per le NCM. Appena sopra la parità quello delle LFP. Al compimento del ciclo numero 13000 si arriva a fine vita delle VRFB e si possono trarre delle conclusioni: al termine della vita utile, le NCM e le VRFB sono pressoché analoghe come impatti ambientali, con un leggero vantaggio percentuale nel risparmio di risorse fossili da estrarre per le batterie a flusso.

6.3.6 Mix energetico marginale nazionale

Si passa ora ad analizzare l'impatto ambientale complessivo che avrebbe l'inserimento di una batteria in un punto qualunque della rete elettrica nazionale nel quale ci sia una forte produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile. Essendo impossibile capire da che fonte provenga l'energia elettrica che passa attraverso una presa o una cabina qualunque a cui ci si collega, si suppone che essa sia al 100% da FER data l'ubicazione ipotizzata. La modalità di analisi prevede in maniera semplificata che le batterie vengano dunque caricate dal surplus da FER e scaricate in rete al posto della tecnologia marginale in quel momento: questa si è calcolata dallo storico del 2018 presente sul sito del GSE. Implementati questi dati, i risultati ottenuti con le batterie analizzate in questo studio sono i seguenti.

Si nota come l'ormai nota proporzione di impatti tra le batterie sia rispettata anche in questo caso, dal momento che l'impatto delle batterie è sostanzialmente dato dal loro ciclo di vita già visto in precedenza: è da valutare se questo risulta conveniente rispetto al mix energetico nazionale medio.

Dopo 3000 cicli spicca come sia conveniente in termini di impatto ambientale avere qualunque tipologia di batterie che svolge questa funzione lavorando con le FER in suddette condizioni di produzione di energia elettrica.

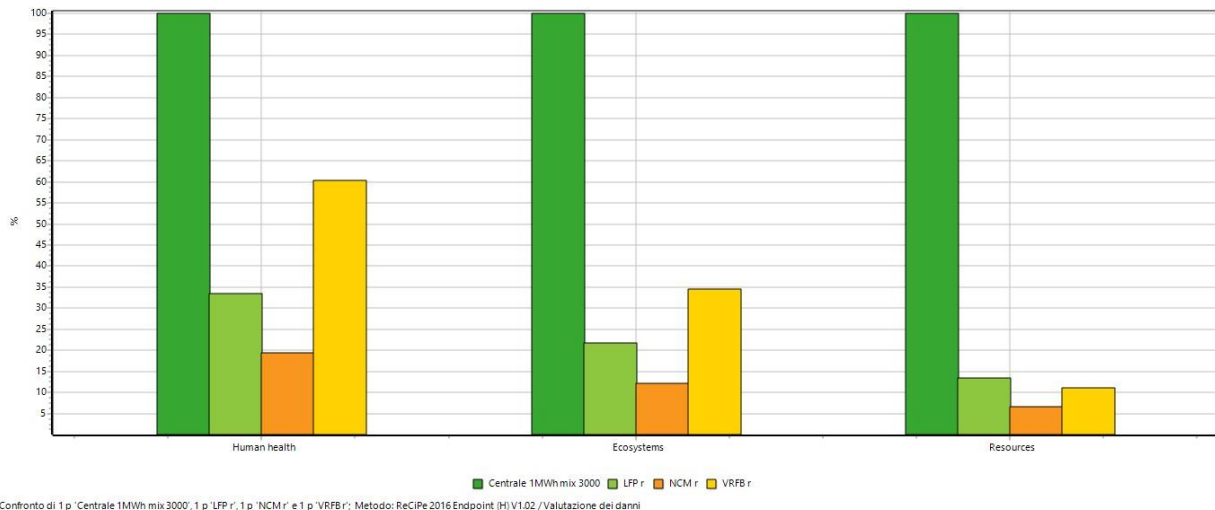


Fig 6.35 – Valutazione dei danni, 3000 cicli

Si evita di riportare la situazione per un ciclaggio superiore perché l'andamento che si andrebbe a mostrare è il medesimo già mostrato per i 3000 cicli. Si può concludere che si ha una convenienza assoluta in termini di impatto ambientale nel dotare la rete italiana di accumulatori elettrochimici in prossimità di siti che presentano un'alta penetrazione da fonti rinnovabili non programmabili. Essendo sempre vero che esse hanno priorità di dispacciamento, talvolta a causa di vincoli tecnologici o tecnici della rete la loro produzione necessita di un taglio, dunque uno spreco. Con l'introduzione di un SdA stazionario in punti specifici della rete si può arrivare all'azzeramento di energia in surplus da fonte rinnovabile e ad una diminuzione globale dell'impatto ambientale del mix attuale (e futuro) di approvvigionamento energetico, sia per le ripercussioni sulla salute umana, sia sull'ecosistema che sullo sfruttamento di risorse fossili

Capitolo 7

Conclusioni

Si viene ora alla parte conclusiva del lavoro fin qui svolto. Si può affermare che gli accumulatori elettrochimici siano in questi anni in una fase mai vista dalla loro scoperta, per varie cause, che li porta a compiere progressi tecnologici rilevanti anno dopo anno. Una delle cause che li sta chiamando alla ribalta negli ultimi due decenni è la questione ambientale: è noto dalla metà del '900 che le risorse fossili che si stanno utilizzando in tutto il mondo sono finite, ergo sono destinate ad esaurirsi nonostante la tecnologia stia facendo passi da gigante per riuscire a sfruttare tutti i giacimenti possibili. I combustibili fossili emettono diverse sostanze altamente impattanti come prodotto della loro combustione: anidride carbonica in primis ma è opportuno non tralasciare sostanze come ossidi di zolfo e di azoto, particolato, idrocarburi policiclici aromatici, metalli pesanti e altre sostanze in base alle impurità che contengono al momento della combustione.

Sulle batterie si effettuano molti studi di fattibilità tecnico-economica per giustificare la loro integrazione in sistemi di generazione di energia; gli studi di impatto ambientale a riguardo sono spesso approssimativi e vedono come indicatore principale il risparmio di anidride carbonica che si emetterebbe in ambiente se non si implementasse l'accumulatore nell'impianto in esame. In questo studio si è voluto dare un'idea più precisa possibile dell'impatto globale che una batteria ha nell'ambiente, dal momento dell'estrazione delle materie prime, al momento dello smaltimento dei suoi componenti a fine vita, fino a considerare il riuso di alcuni materiali in un ciclo di vita successivo. Come spesso accade, la risposta alla domanda "Conviene anche dal punto di vista ambientale installare una batteria in un impianto?" è: dipende. Dipende da talmente tanti fattori che riuscire ad elencarli tutti sarebbe impossibile. Questo studio si è posto l'obiettivo di fare chiarezza e riassumere quelli più importanti.

Si è partiti dalla scelta di tre tipologie di batteria per l'accumulo stazionario, le due al litio già mature tecnologicamente e quella a flusso di vanadio in piena fase di studio e sviluppo. In letteratura è stato difficile trovare degli studi che rivelassero la composizione precisa di tutti i loro componenti a causa di vincoli industriali che le aziende produttrici pongono ai loro prodotti: si è comunque trovato uno studio molto dettagliato per un accumulatore stazionario a flusso, mentre per le batterie al litio si è preso uno studio riguardante le batterie per veicoli totalmente elettrici e si sono adeguate le potenze in gioco.

Confrontando gli impatti globali di questi 3 SdA si possono trarre le prime conclusioni:

- In tutte e 3 le batterie la fase di assemblaggio, comprensiva di estrazione materie prime, prima lavorazione in loco, trasporto in Europa, lavorazione finale, trasporto in Italia e montaggio della batteria impatta per circa il 40% del totale; il restante 60% circa è dato da tutti i processi che prevedono il disassemblaggio, la lavorazione dei componenti giunti a fine vita e il loro smaltimento (sia esso in discarica o inceneritore, comprendendo anche possibili sversamenti non voluti ed emissioni in ambiente dati dalle lavorazioni).
- Considerare il processo di riuso delle materie prime dopo il loro primo trattamento per il disassemblaggio invece di smaltirle in maniera tradizionale consente di abbassare drasticamente gli impatti in tutti e 3 gli indicatori di endpoint analizzati, pervenendo ad un valore negativo per quanto riguarda la fase di "smaltimento+riuso": è indice del fatto che le

sole lavorazioni del materiale a fine vita e la sua preparazione per un nuovo ciclo di utilizzo sono generalmente meno impattanti, eccetto che per alcune categorie, della filiera tradizionale di approvvigionamento che comprende l'estrazione, la prima lavorazione e il trasporto nel sito d'utilizzo (in questo caso l'Italia) e nel complesso il valore per ogni endpoint risulta negativo.

- Il ciclo di vita complessivo esprime come i parametri che facciano la differenza sugli impatti in questo studio siano essenzialmente due: la densità energetica della batteria e l'energia richiesta per lavorazioni e trattamenti nei vari componenti. La prima incide sul peso totale, e quindi sulla quantità di materiali necessari a fabbricare l'intero accumulatore. La seconda incide sulle risorse che si consumano indirettamente per la realizzazione di semilavorati, sia nella fase di assemblaggio che di smaltimento ed è luogo di possibili imprecisioni. E' infatti difficile allocare in maniera precisa l'energia assorbita da ogni processo industriale e ripartirla sulla singola unità di prodotto, dal momento che le lavorazioni subite da ogni componente sono molteplici e avvengono in luoghi spesso molto lontani tra di loro in cui è fisicamente impossibile andare a compiere misurazioni dirette.

Analizzata la composizione si passa a vedere cosa accade integrando uno di questi SdA in un impianto di produzione di energia già esistente, sia stand-alone che collegato alla rete elettrica nazionale, considerando le ipotesi iniziali. La prima differenza tra le batterie al litio e le VRFB è la loro vita utile: dagli studi di Terna emerge che una batteria al litio ha un range di vita che si attesta tra i 3000 e i 5000 cicli completi di carica e scarica (DoD dell'80%), mentre le VRFB si stima che possano raggiungere i 13000 cicli senza problemi tecnici rilevanti, ma non è ancora stata testata in via sperimentale quale sia il ciclaggio massimo da esse raggiungibile. I confronti quindi sono stati effettuati sia a parità di ciclaggio, per l'esigenza di avere un confronto con le emissioni dell'impianto sprovvisto di batterie, sia a fine vita per confrontare le percentuali di impatto sul totale emesso dall'impianto senza accumulatore. Si è assunto infine che l'impatto di qualunque impianto di produzione a fonte fossile non tiene conto dell'allocazione relativa alla sua produzione e smaltimento, a causa della vita attesa dell'impianto generalmente è superiore a 30 anni; si è ritenuto quindi trascurabile l'incidenza di questi valori sulla singola unità di energia prodotta, considerando anche che la vita di un SdA elettrochimico generalmente non supera i 5-10 anni.

Nei 6 casi studiati in questo scritto si è notato che:

- Non è possibile sapere a priori se l'inserimento di una batteria in un centro di produzione di energia elettrica ne riduce in termini assoluti l'impatto ambientale globale;
- Le analisi qualitative sul risparmio di combustibile e di conseguenza di emissioni di anidride carbonica sono uno specchio per le allodole: in ognuno dei 6 casi si ha una riduzione, anche minima, delle risorse fossili consumate e della produzione di particolato, proprio perché l'introduzione di un SdA va a ridurre i consumi di combustibile portando ad un vantaggio economico che ne giustifichi l'adozione. Non è sempre vero però che il combustibile risparmiato in fase di vita attiva comporti anche una riduzione degli impatti globali sia sulla salute umana che per la diversità degli ecosistemi marino e terrestre, perché per valutare questi è necessario sapere come è stata realizzata e come verrà smaltita la batteria.
- Il mix energetico medio che viene utilizzato per produrre energia varia da impianto ad impianto. Ad un mix energetico corrisponde un mix che va a caricare la batteria: sistemi con una elevata penetrazione di FER fanno risultare generalmente meno conveniente l'adozione di una batteria per scopi di abbattimento degli impatti ambientali in termini assoluti.

- Il tipo di combustibile che si va a ridurre mediante l'integrazione di una batteria in un impianto è molto rilevante: dallo studio emerge come l'impianto a carbone di Torre Valdaliga Nord abbia un beneficio molto elevato in termini assoluti dall'introduzione di un SdA elettrochimico, qualunque esso sia; l'impianto a gas di Pantelleria avrebbe un vantaggio dalla riduzione delle risorse fossili utilizzate in loco, e dunque un vantaggio economico nell'approvvigionamento energetico, ma nessun giovamento per la salute umana e la diversità dell'ecosistema che anzi peggiorerebbero sensibilmente.

Le analisi qui eseguite si riferiscono alle emissioni globali per ogni processo. Non si è tenuto conto della differenza di località in cui queste emissioni sono state rilasciate. In futuro sarà possibile approfondire questo tipo di lavoro:

- Prendendo in considerazione altre tipologie di batterie, che sfruttano tecnologie diverse per l'accumulo elettrochimico;
- Tenendo in considerazione il luogo di emissione dell'inquinamento in tutte le fasi della vita dell'accumulatore;
- Considerare luoghi d'installazione e lavorazione delle materie prime diversi;
- Confrontare impianti presenti in realtà diverse con mix energetici differenti;
- Considerare il lavoro umano necessario alle lavorazioni della batteria e quantificarlo in qualche maniera per inserirlo nei parametri di valutazione dell'analisi LCA.

APPENDICE A

LCIA singole batterie

A.1 VRFB assemblaggio con smaltimento

| N. | Processo | Unità | Totale | Assemblaggio VRFB | Smaltimento VRFB |
|----|--|-------|--------|-------------------|------------------|
| | Il totale di tutti i processi | DALY | 7,716 | 3,135 | 4,581 |
| | Processi rimanenti | DALY | 0,185 | 0,121 | 0,064 |
| 1 | Ammonium sulfate, as N (RoW) ammonium sulfate production APOS, S | DALY | 0,192 | 0,064 | 0,128 |
| 2 | Copper {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,731 | 0,592 | 0,138 |
| 3 | Copper cake {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,051 | 0,000 | 0,051 |
| 4 | Glass fibre {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,111 | 0,034 | 0,077 |
| 5 | Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,101 | 0,031 | 0,070 |
| 6 | Graphite, battery grade {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,045 | 0,045 | 0,000 |
| 7 | Inverter, for electric passenger car {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,287 | 0,000 | 0,287 |
| 8 | Polyvinylchloride resin (E-PVC), emulsion polymerisation, production mix, at plant RER | DALY | 0,069 | 0,061 | 0,008 |
| 9 | Sheet rolling, copper {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,028 | 0,023 | 0,005 |
| 10 | Soda ash, dense {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,125 | 0,042 | 0,083 |
| 11 | Sodium sulfate, anhydrite {RER} market for APOS, S | DALY | 0,159 | 0,053 | 0,106 |
| 12 | Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,046 | 0,037 | 0,009 |
| 13 | Steel, low-alloyed {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,039 | 0,017 | 0,022 |
| 14 | Steel, low-alloyed {RER} steel production, converter, low-alloyed APOS, S | DALY | 0,043 | 0,018 | 0,025 |
| 15 | Sulfuric acid {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,105 | 0,041 | 0,064 |
| 16 | Tetrafluoroethylene {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,037 | 0,037 | 0,000 |
| 17 | Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | DALY | 0,056 | 0,055 | 0,000 |
| 18 | Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,132 | 0,131 | 0,001 |
| 19 | V2O5 vanadium pentoxide | DALY | 5,174 | 1,732 | 3,442 |

| N. | Processo | Unità | Totale | Assemblaggio VRFB | Smaltimento VRFB |
|----|--|------------|--------|-------------------|------------------|
| | Il totale di tutti i processi | species.yr | 0,0098 | 0,0040 | 0,0057 |
| | Processi rimanenti | species.yr | 0,0003 | 0,0002 | 0,0001 |
| 1 | Ammonium sulfate, as N (RoW) ammonium sulfate production APOS, S | species.yr | 0,0004 | 0,0001 | 0,0002 |
| 2 | Copper {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0007 | 0,0005 | 0,0001 |
| 3 | Copper cake {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0000 | 0,0001 |
| 4 | Electricity, medium voltage {ZA} market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 5 | Glass fibre {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0002 | 0,0001 | 0,0001 |
| 6 | Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0002 | 0,0001 | 0,0002 |
| 7 | Graphite, battery grade {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0001 | 0,0000 |
| 8 | Hexafluoroethane {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 9 | Inverter, for electric passenger car {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0003 | 0,0000 | 0,0003 |
| 10 | Soda ash, dense {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0002 | 0,0001 | 0,0002 |
| 11 | Sodium sulfate, anhydrite {RER} market for APOS, S | species.yr | 0,0003 | 0,0001 | 0,0002 |
| 12 | Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 13 | Steel, low-alloyed {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 14 | Steel, low-alloyed {RER} steel production, converter, low-alloyed APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 15 | Sulfuric acid {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0002 | 0,0001 | 0,0001 |
| 16 | Tetrafluoroethylene {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0001 | 0,0000 |
| 17 | Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0001 | 0,0000 |
| 18 | Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0003 | 0,0003 | 0,0000 |
| 19 | V2O5 vanadium pentoxide | species.yr | 0,0061 | 0,0020 | 0,0040 |

| N. | Processo | Unità | Totale | Assemblaggio VRFB | Smaltimento VRFB |
|----|---|---------|---------|-------------------|------------------|
| | Il totale di tutti i processi | USD2013 | 54937,8 | 30850,7 | 24087,1 |
| | Processi rimanenti | USD2013 | 3297,6 | 2550,2 | 747,3 |
| 1 | Ammonium sulfate, as N (RoW) ammonium sulfate production APOS, S | USD2013 | 6092,9 | 2040,0 | 4052,9 |
| 2 | Copper {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 3267,9 | 2649,9 | 617,9 |
| 3 | Glass fibre {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 3466,0 | 1058,9 | 2407,1 |
| 4 | Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 4863,3 | 1485,9 | 3377,5 |
| 5 | Graphite, battery grade {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 640,8 | 640,8 | 0,0 |
| 6 | Heat, central or small-scale, natural gas {RoW} market for heat, central or small-scale, r | USD2013 | 1127,2 | 377,4 | 749,8 |
| 7 | Hexafluoroethane {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 545,0 | 512,2 | 32,8 |
| 8 | Inverter, for electric passenger car {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 2646,4 | 0,0 | 2646,4 |
| 9 | Polypropylene, granulate {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 628,4 | 628,3 | 0,1 |
| 10 | Polyvinylchloride resin (E-PVC), emulsion polymerisation, production mix, at plant RER | USD2013 | 326,7 | 289,1 | 37,6 |
| 11 | Propylene {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 859,8 | 859,8 | 0,0 |
| 12 | Soda ash, dense {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 4679,9 | 1568,3 | 3111,6 |
| 13 | Sodium sulfate, anhydrite {RER} market for APOS, S | USD2013 | 5019,5 | 1680,6 | 3338,9 |
| 14 | Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 692,9 | 562,1 | 130,8 |
| 15 | Steel, low-alloyed {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 358,8 | 153,4 | 205,3 |
| 16 | Steel, low-alloyed {RER} steel production, converter, low-alloyed APOS, S | USD2013 | 433,9 | 184,9 | 249,0 |
| 17 | Sulfuric acid {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 3361,1 | 1305,5 | 2055,7 |
| 18 | Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | USD2013 | 1666,0 | 1654,5 | 11,5 |
| 19 | Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 10638,2 | 10521,2 | 117,0 |
| 20 | Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 325,5 | 127,6 | 197,9 |

A.2 VRFB assemblaggio con smaltimento e riuso

| N. | Processo | Unità | Totale | Assemblaggio VRFB | Smaltimento+riuso |
|----|--|-------|--------|-------------------|-------------------|
| | Il totale di tutti i processi | DALY | 1,668 | 3,135 | -1,467 |
| | Processi rimanenti | DALY | 0,035 | 0,109 | -0,074 |
| 1 | Ammonium sulfate, as N {RoW} ammonium sulfate production APOS, S | DALY | 0,038 | 0,064 | -0,026 |
| 2 | Copper {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,149 | 0,592 | -0,444 |
| 3 | Copper cake {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,013 | 0,000 | 0,013 |
| 4 | Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} market group for APOS, S | DALY | 0,050 | 0,012 | 0,038 |
| 5 | Glass fibre {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,014 | 0,034 | -0,020 |
| 6 | Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,013 | 0,031 | -0,018 |
| 7 | Graphite, battery grade {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,009 | 0,045 | -0,036 |
| 8 | Inverter, for electric passenger car {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,072 | 0,000 | 0,072 |
| 9 | Polyvinylchloride resin (E-PVC), emulsion polymerisation, production mix, at plant RER | DALY | 0,014 | 0,061 | -0,047 |
| 10 | Sheet rolling, copper {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,006 | 0,023 | -0,017 |
| 11 | Soda ash, dense {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,025 | 0,042 | -0,017 |
| 12 | Sodium sulfate, anhydrite {RER} market for APOS, S | DALY | 0,031 | 0,053 | -0,022 |
| 13 | Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,009 | 0,037 | -0,028 |
| 14 | Steel, low-alloyed {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,009 | 0,017 | -0,008 |
| 15 | Steel, low-alloyed {RER} steel production, converter, low-alloyed APOS, S | DALY | 0,010 | 0,018 | -0,009 |
| 16 | Sulfuric acid {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,021 | 0,041 | -0,020 |
| 17 | Tetrafluoroethylene {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,007 | 0,037 | -0,030 |
| 18 | Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | DALY | 0,011 | 0,055 | -0,045 |
| 19 | Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,113 | 0,131 | -0,018 |
| 20 | V2O5 vanadium pentoxide | DALY | 1,021 | 1,732 | -0,711 |

| N. | Processo | Unità | Totale | Assemblaggio VRFB | Smaltimento+riuso |
|----|--|------------|--------|-------------------|-------------------|
| | Il totale di tutti i processi | species.yr | 0,0022 | 0,0040 | -0,0018 |
| | Processi rimanenti | species.yr | 0,0001 | 0,0002 | -0,0002 |
| 1 | Ammonium sulfate, as N {RoW} ammonium sulfate production APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0001 | 0,0000 |
| 2 | Copper {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0005 | -0,0004 |
| 3 | Copper cake {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 4 | Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} market group for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0000 | 0,0001 |
| 5 | Electricity, medium voltage {ZA} market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 6 | Glass fibre {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0001 | 0,0000 |
| 7 | Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0001 | 0,0000 |
| 8 | Graphite, battery grade {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0001 | -0,0001 |
| 9 | Hexafluoroethane {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 10 | Inverter, for electric passenger car {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0000 | 0,0001 |
| 11 | Soda ash, dense {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0001 | 0,0000 |
| 12 | Sodium sulfate, anhydrite {RER} market for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0001 | 0,0000 |
| 13 | Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 14 | Steel, low-alloyed {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 15 | Steel, low-alloyed {RER} steel production, converter, low-alloyed APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 16 | Sulfuric acid {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0001 | 0,0000 |
| 17 | Tetrafluoroethylene {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0001 | -0,0001 |
| 18 | Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0001 | -0,0001 |
| 19 | Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0003 | 0,0003 | 0,0000 |
| 20 | V2O5 vanadium pentoxide | species.yr | 0,0012 | 0,0020 | -0,0008 |

| N. | Processo | Unità | Totale | Assemblaggio VRFB | Smaltimento+riuso |
|----|---|---------|---------|-------------------|-------------------|
| | Il totale di tutti i processi | USD2013 | 18718,9 | 30850,7 | -12131,8 |
| | Processi rimanenti | USD2013 | 729,9 | 2770,8 | -2040,9 |
| 1 | Ammonium sulfate, as N {RoW} ammonium sulfate production APOS, S | USD2013 | 1202,2 | 2040,0 | -837,8 |
| 2 | Copper {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 665,0 | 2649,9 | -1984,9 |
| 3 | Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} market group for APOS, S | USD2013 | 807,8 | 196,2 | 611,6 |
| 4 | Elettrolita al vanadio, 1L | USD2013 | 529,4 | 0,0 | 529,4 |
| 5 | Glass fibre {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 441,9 | 1058,9 | -617,1 |
| 6 | Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 620,0 | 1485,9 | -865,9 |
| 7 | Graphite, battery grade {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 123,2 | 640,8 | -517,7 |
| 8 | Heat, central or small-scale, natural gas {RoW} market for heat, central or small-scale, r | USD2013 | 222,4 | 377,4 | -155,0 |
| 9 | Hexafluoroethane {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 106,7 | 512,2 | -405,5 |
| 10 | Inverter, for electric passenger car {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 666,9 | 0,0 | 666,9 |
| 11 | Polypropylene, granulate {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 120,8 | 628,3 | -507,6 |
| 12 | Propylene {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 165,2 | 859,8 | -694,5 |
| 13 | Soda ash, dense {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 923,4 | 1568,3 | -644,9 |
| 14 | Sodium sulfate, anhydrite {RER} market for APOS, S | USD2013 | 990,4 | 1680,6 | -690,2 |
| 15 | Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 141,0 | 562,1 | -421,1 |
| 16 | Steel, low-alloyed {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 81,3 | 153,4 | -72,2 |
| 17 | Steel, low-alloyed {RER} steel production, converter, low-alloyed APOS, S | USD2013 | 98,3 | 184,9 | -86,6 |
| 18 | Sulfuric acid {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 661,8 | 1305,5 | -643,7 |
| 19 | Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | USD2013 | 319,7 | 1654,5 | -1334,8 |
| 20 | Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 9101,7 | 10521,2 | -1419,5 |

A.3 LFP assemblaggio con smaltimento

| N. | Processo | Unità | Totale | Assemblaggio Li-ion LFP | Smaltimento LFP |
|----|---|-------|--------|-------------------------|-----------------|
| | Il totale di tutti i processi | DALY | 2,5673 | 1,0312 | 1,5360 |
| | Processi rimanenti | DALY | 0,1596 | 0,0901 | 0,0694 |
| 1 | Aluminium, primary, ingot {IAI Area, EU27 & EFTA} market for APOS, S | DALY | 0,3167 | 0,2005 | 0,1162 |
| 2 | Copper {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,3362 | 0,0858 | 0,2504 |
| 3 | Electricity, medium voltage {UCTE} market group for APOS, S | DALY | 0,0673 | 0,0673 | 0,0000 |
| 4 | Electronics, for control units {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,0566 | 0,0566 | 0,0000 |
| 5 | Heat, central or small-scale, natural gas {Europe without Switzerland} market for heat, central or sn | DALY | 0,0643 | 0,0000 | 0,0643 |
| 6 | Heat, from steam, in chemical industry {RER} market for heat, from steam, in chemical industry A | DALY | 0,0442 | 0,0124 | 0,0318 |
| 7 | Integrated circuit, logic type {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,3380 | 0,0869 | 0,2511 |
| 8 | Liquid crystal display, unmounted {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,1466 | 0,1466 | 0,0000 |
| 9 | Lithium hexafluorophosphate {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,0737 | 0,0078 | 0,0659 |
| 10 | Lithium hydroxide {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,1193 | 0,0386 | 0,0808 |
| 11 | N-methyl-2-pyrrolidone {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,1516 | 0,0368 | 0,1148 |
| 12 | Non-Fe-Co-metals, from Li-ion battery, hydrometallurgical processing {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,1172 | 0,0000 | 0,1172 |
| 13 | Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,1058 | 0,0342 | 0,0716 |
| 14 | Polyethylene terephthalate (PET) granulate, production mix, at plant, amorphous RER | DALY | 0,0243 | 0,0223 | 0,0019 |
| 15 | Sheet rolling, aluminium {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,0224 | 0,0142 | 0,0082 |
| 16 | Sheet rolling, copper {RER} processing APOS, S | DALY | 0,0379 | 0,0241 | 0,0138 |
| 17 | Solvent, organic {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,0189 | 0,0020 | 0,0170 |
| 18 | Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,0252 | 0,0065 | 0,0187 |
| 19 | Tetrafluoroethylene {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,3177 | 0,0836 | 0,2341 |
| 20 | Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | DALY | 0,0237 | 0,0149 | 0,0088 |

| N. | Processo | Unità | Totale | Assemblaggio Li-ion LFP | Smaltimento LFP |
|----|---|------------|--------|-------------------------|-----------------|
| | Il totale di tutti i processi | species.yr | 0,0044 | 0,0017 | 0,0027 |
| | Processi rimanenti | species.yr | 0,0004 | 0,0002 | 0,0002 |
| 1 | Aluminium, primary, ingot {IAI Area, EU27 & EFTA} market for APOS, S | species.yr | 0,0005 | 0,0003 | 0,0002 |
| 2 | Copper {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0003 | 0,0001 | 0,0002 |
| 3 | Electricity, medium voltage {UCTE} market group for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0001 | 0,0000 |
| 4 | Electronics, for control units {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0001 | 0,0000 |
| 5 | Heat, central or small-scale, natural gas {Europe without Switzerland} market for heat, central or sr | species.yr | 0,0002 | 0,0000 | 0,0002 |
| 6 | Heat, district or industrial, natural gas {Europe without Switzerland} heat production, natural gas, at | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 7 | Heat, from steam, in chemical industry {RER} market for heat, from steam, in chemical industry A | species.yr | 0,0001 | 0,0000 | 0,0001 |
| 8 | Integrated circuit, logic type {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0003 | 0,0001 | 0,0002 |
| 9 | Liquid crystal display, unmounted {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0002 | 0,0002 | 0,0000 |
| 10 | Lithium hexafluorophosphate {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0000 | 0,0001 |
| 11 | Lithium hydroxide {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0002 | 0,0001 | 0,0002 |
| 12 | Lithium Iron Phosphate LiFePO4 | species.yr | 0,0001 | 0,0000 | 0,0001 |
| 13 | N-methyl-2-pyrrolidone {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0003 | 0,0001 | 0,0002 |
| 14 | Non-Fe-Co-metals, from Li-ion battery, hydrometallurgical processing {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0002 | 0,0000 | 0,0002 |
| 15 | Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0002 | 0,0001 | 0,0001 |
| 16 | Polyethylene terephthalate (PET) granulate, production mix, at plant, amorphous RER | species.yr | 0,0001 | 0,0001 | 0,0000 |
| 17 | Tetrafluoroethylene {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0009 | 0,0002 | 0,0006 |
| 18 | Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 |

| N. | Processo | Unità | Totale | Assemblaggio Li-ion LFP | Smaltimento LFP |
|----|---|---------|---------|-------------------------|-----------------|
| | Il totale di tutti i processi | USD2013 | 61639,5 | 23833,9 | 37805,6 |
| | Processi rimanenti | USD2013 | 5760,7 | 3364,1 | 2396,7 |
| 1 | Aluminium, primary, ingot {IAI Area, EU27 & EFTA} market for APOS, S | USD2013 | 5403,5 | 3420,9 | 1982,6 |
| 2 | Carbon black {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 701,2 | 226,6 | 474,6 |
| 3 | Copper {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 1504,1 | 384,0 | 1120,1 |
| 4 | Electricity, medium voltage {UCTE} market group for APOS, S | USD2013 | 877,4 | 877,4 | 0,0 |
| 5 | Heat, central or small-scale, natural gas {Europe without Switzerland} market for heat, central or sn | USD2013 | 6767,4 | 0,0 | 6767,4 |
| 6 | Heat, district or industrial, natural gas {Europe without Switzerland} heat production, natural gas, at | USD2013 | 1906,2 | 1906,2 | 0,0 |
| 7 | Heat, from steam, in chemical industry {RER} market for heat, from steam, in chemical industry A | USD2013 | 3286,3 | 924,1 | 2362,1 |
| 8 | Integrated circuit, logic type {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 2459,1 | 632,3 | 1826,8 |
| 9 | Liquid crystal display, unmounted {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 1929,0 | 1929,0 | 0,0 |
| 10 | Lithium hexafluorophosphate {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 2137,9 | 225,4 | 1912,5 |
| 11 | Lithium hydroxide {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 6596,3 | 2131,6 | 4464,7 |
| 12 | N-methyl-2-pyrrolidone {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 6783,4 | 1647,2 | 5136,2 |
| 13 | Non-Fe-Co-metals, from Li-ion battery, hydrometallurgical processing {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 1842,8 | 0,0 | 1842,8 |
| 14 | Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 2144,8 | 693,1 | 1451,7 |
| 15 | Polyethylene terephthalate (PET) granulate, production mix, at plant, amorphous RER | USD2013 | 2474,3 | 2275,6 | 198,7 |
| 16 | Solvent, organic {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 4224,5 | 445,3 | 3779,2 |
| 17 | Substrate per elettrodo negativo Li-ion battery | USD2013 | 970,4 | 615,8 | 354,5 |
| 18 | Tetrafluoroethylene {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 1997,1 | 525,8 | 1471,4 |
| 19 | Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | USD2013 | 709,9 | 446,5 | 263,4 |
| 20 | Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | USD2013 | 1163,2 | 1163,2 | 0,0 |

A.4 LFP assemblaggio con smaltimento e riuso

| N. | Processo | Unità | Totale | Assemblaggio Li-ion LFP | Smaltimento+riuso LFP |
|----|---|-------|--------|-------------------------|-----------------------|
| | Il totale di tutti i processi | DALY | 0,922 | 1,031 | -0,109 |
| | Processi rimanenti | DALY | 0,049 | 0,117 | -0,068 |
| 1 | Aluminium, primary, ingot (IAI Area, EU27 & EFTA) market for APOS, S | DALY | 0,077 | 0,200 | -0,123 |
| 2 | Copper (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,198 | 0,086 | 0,112 |
| 3 | Electricity, medium voltage (UCTE) market group for APOS, S | DALY | 0,016 | 0,067 | -0,051 |
| 4 | Electronics, for control units (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,014 | 0,057 | -0,043 |
| 5 | Forging, steel (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,015 | 0,000 | 0,015 |
| 6 | Heat, central or small-scale, natural gas (Europe without Switzerland) market for heat, central or sr | DALY | 0,013 | 0,000 | 0,013 |
| 7 | Heat, district or industrial, natural gas (RER) market group for APOS, S | DALY | 0,052 | 0,000 | 0,052 |
| 8 | Heat, from steam, in chemical industry (RER) market for heat, from steam, in chemical industry A | DALY | 0,009 | 0,012 | -0,003 |
| 9 | Integrated circuit, logic type (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,217 | 0,087 | 0,130 |
| 10 | Liquid crystal display, unmounted (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,035 | 0,147 | -0,111 |
| 11 | Lithium hexafluorophosphate (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,015 | 0,008 | 0,007 |
| 12 | Lithium hydroxide (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,026 | 0,039 | -0,013 |
| 13 | N-methyl-2-pyrrolidone (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,032 | 0,037 | -0,005 |
| 14 | Non-Fe-Co-metals, from Li-ion battery, hydrometallurgical processing (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,024 | 0,000 | 0,024 |
| 15 | Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,023 | 0,034 | -0,011 |
| 16 | Polyethylene terephthalate (PET) granulate, production mix, at plant, amorphous RER | DALY | 0,006 | 0,022 | -0,016 |
| 17 | Sheet rolling, copper (RER) processing APOS, S | DALY | 0,009 | 0,024 | -0,015 |
| 18 | Steel, chromium steel 18/8 (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,016 | 0,006 | 0,010 |
| 19 | Tetrafluoroethylene (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,068 | 0,084 | -0,016 |
| 20 | Wire drawing, copper (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,009 | 0,004 | 0,005 |

| N. | Processo | Unità | Totale | Assemblaggio Li-ion LFP | Smaltimento+riuso LFP |
|----|---|------------|--------|-------------------------|-----------------------|
| | Il totale di tutti i processi | species.yr | 0,0014 | 0,0017 | -0,0003 |
| | Processi rimanenti | species.yr | 0,0001 | 0,0003 | -0,0001 |
| 1 | Aluminium, primary, ingot (IAI Area, EU27 & EFTA) market for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0003 | -0,0002 |
| 2 | Copper (GLO) market for APOS, S | species.yr | 0,0002 | 0,0001 | 0,0001 |
| 3 | Electricity, medium voltage (UCTE) market group for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0001 | -0,0001 |
| 4 | Electronics, for control units (GLO) market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0001 | 0,0000 |
| 5 | Forging, steel (GLO) market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 6 | Heat, central or small-scale, natural gas (Europe without Switzerland) market for heat, central or sr | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 7 | Heat, district or industrial, natural gas (RER) market group for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0000 | 0,0001 |
| 8 | Heat, from steam, in chemical industry (RER) market for heat, from steam, in chemical industry A | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 9 | Integrated circuit, logic type (GLO) market for APOS, S | species.yr | 0,0002 | 0,0001 | 0,0001 |
| 10 | Liquid crystal display, unmounted (GLO) market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0002 | -0,0001 |
| 11 | Lithium hexafluorophosphate (GLO) market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 12 | Lithium hydroxide (GLO) market for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0001 | 0,0000 |
| 13 | Lithium Iron Phosphate LiFePO4 | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 14 | N-methyl-2-pyrrolidone (GLO) market for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0001 | 0,0000 |
| 15 | Non-Fe-Co-metals, from Li-ion battery, hydrometallurgical processing (GLO) market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 16 | Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state (GLO) market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0001 | 0,0000 |
| 17 | Polyethylene terephthalate (PET) granulate, production mix, at plant, amorphous RER | species.yr | 0,0000 | 0,0001 | 0,0000 |
| 18 | Steel, chromium steel 18/8 (GLO) market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 19 | Tetrafluoroethylene (GLO) market for APOS, S | species.yr | 0,0002 | 0,0002 | 0,0000 |
| 20 | Transport, freight train (Europe without Switzerland) market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

| N. | Processo | Unità | Totale | Assemblaggio Li-ion LFP | Smaltimento+riuso LFP |
|----|---|---------|---------|-------------------------|-----------------------|
| | Il totale di tutti i processi | USD2013 | 22494,3 | 23833,9 | -1339,6 |
| | Processi rimanenti | USD2013 | 1830,1 | 4816,3 | -2986,2 |
| 1 | Aluminium, primary, ingot (IAI Area, EU27 & EFTA) market for APOS, S | USD2013 | 1315,0 | 3420,9 | -2105,9 |
| 2 | Copper (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 884,9 | 384,0 | 501,0 |
| 3 | Forging, steel (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 382,6 | 0,0 | 382,6 |
| 4 | Heat, central or small-scale, natural gas (Europe without Switzerland) market for heat, central or sr | USD2013 | 1366,8 | 0,0 | 1366,8 |
| 5 | Heat, district or industrial, natural gas (Europe without Switzerland) heat production, natural gas, at | USD2013 | 456,5 | 1906,2 | -1449,7 |
| 6 | Heat, district or industrial, natural gas (RER) market group for APOS, S | USD2013 | 6731,8 | 0,0 | 6731,8 |
| 7 | Heat, from steam, in chemical industry (RER) market for heat, from steam, in chemical industry A | USD2013 | 701,7 | 924,1 | -222,4 |
| 8 | Integrated circuit, logic type (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 1578,2 | 632,3 | 945,9 |
| 9 | Liquid crystal display, unmounted (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 462,0 | 1929,0 | -1467,0 |
| 10 | Lithium hexafluorophosphate (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 439,9 | 225,4 | 214,6 |
| 11 | Lithium hydroxide (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 1415,8 | 2131,6 | -715,7 |
| 12 | N-methyl-2-pyrrolidone (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 1441,5 | 1647,2 | -205,7 |
| 13 | Non-Fe-Co-metals, from Li-ion battery, hydrometallurgical processing (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 371,9 | 0,0 | 371,9 |
| 14 | Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 460,4 | 693,1 | -232,7 |
| 15 | Polyethylene terephthalate (PET) granulate, production mix, at plant, amorphous RER | USD2013 | 600,5 | 2275,6 | -1675,1 |
| 16 | Solvent, organic (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 869,3 | 445,3 | 424,0 |
| 17 | Steel, chromium steel 18/8 (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 245,2 | 98,2 | 146,9 |
| 18 | Substrate per elettrodo negativo Li-ion battery | USD2013 | 236,1 | 615,8 | -379,7 |
| 19 | Tetrafluoroethylene (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 425,5 | 525,8 | -100,3 |
| 20 | Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 278,6 | 1163,2 | -884,6 |

A.5 NCM assemblaggio con smaltimento

| N. | Processo | Unità | Totale | Assemblaggio Li-ion NCM | Smaltimento NCM |
|----|---|-------|--------|-------------------------|-----------------|
| | Il totale di tutti i processi | DALY | 1,530 | 0,608 | 0,922 |
| | Processi rimanenti | DALY | 0,095 | 0,044 | 0,051 |
| 1 | Aluminium, primary, ingot {IAI Area, EU27 & EFTA} market for APOS, S | DALY | 0,190 | 0,121 | 0,070 |
| 2 | Copper {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,202 | 0,052 | 0,150 |
| 3 | Copper {RoW} production, primary APOS, S | DALY | 0,027 | 0,027 | 0,000 |
| 4 | Electricity, medium voltage {UCTE} market group for APOS, S | DALY | 0,040 | 0,040 | 0,000 |
| 5 | Electronics, for control units {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,022 | 0,022 | 0,000 |
| 6 | Heat, central or small-scale, natural gas {Europe without Switzerland} market for heat, central or sm | DALY | 0,037 | 0,000 | 0,037 |
| 7 | Heat, from steam, in chemical industry {RER} market for heat, from steam, in chemical industry A | DALY | 0,024 | 0,005 | 0,019 |
| 8 | Integrated circuit, logic type {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,221 | 0,070 | 0,151 |
| 9 | Liquid crystal display, unmounted {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,056 | 0,056 | 0,000 |
| 10 | Lithium hexafluorophosphate {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,044 | 0,005 | 0,040 |
| 11 | Lithium hydroxide {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,063 | 0,015 | 0,048 |
| 12 | N-methyl-2-pyrrolidone {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,091 | 0,022 | 0,069 |
| 13 | Non-Fe-Co-metals, from Li-ion battery, hydrometallurgical processing {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,070 | 0,000 | 0,070 |
| 14 | Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,056 | 0,013 | 0,043 |
| 15 | Polyethylene terephthalate (PET) granulate, production mix, at plant, amorphous RER | DALY | 0,015 | 0,013 | 0,001 |
| 16 | Sheet rolling, aluminium {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,013 | 0,009 | 0,005 |
| 17 | Sheet rolling, copper {RER} processing APOS, S | DALY | 0,023 | 0,014 | 0,008 |
| 18 | Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,016 | 0,005 | 0,011 |
| 19 | Tetrafluoroethylene {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,190 | 0,050 | 0,140 |
| 20 | Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | DALY | 0,014 | 0,009 | 0,005 |
| 21 | Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | DALY | 0,020 | 0,017 | 0,003 |

| N. | Processo | Unità | Totale | Assemblaggio Li-ion NCM | Smaltimento NCM |
|----|---|------------|--------|-------------------------|-----------------|
| | Il totale di tutti i processi | species.yr | 0,0026 | 0,0010 | 0,0016 |
| | Processi rimanenti | species.yr | 0,0002 | 0,0001 | 0,0001 |
| 1 | Aluminium, primary, ingot {IAI Area, EU27 & EFTA} market for APOS, S | species.yr | 0,0003 | 0,0002 | 0,0001 |
| 2 | Copper {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0002 | 0,0000 | 0,0001 |
| 3 | Copper {RoW} production, primary APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 4 | Electricity, medium voltage {UCTE} market group for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0001 | 0,0000 |
| 5 | Electronics, for control units {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 6 | Heat, central or small-scale, natural gas {Europe without Switzerland} market for heat, central or sm | species.yr | 0,0001 | 0,0000 | 0,0001 |
| 7 | Heat, district or industrial, natural gas {Europe without Switzerland} heat production, natural gas, at | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 8 | Heat, from steam, in chemical industry {RER} market for heat, from steam, in chemical industry A | species.yr | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 |
| 9 | Integrated circuit, logic type {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0002 | 0,0001 | 0,0001 |
| 10 | Liquid crystal display, unmounted {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0001 | 0,0000 |
| 11 | Lithium hexafluorophosphate {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0000 | 0,0001 |
| 12 | Lithium hydroxide {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0000 | 0,0001 |
| 13 | Lithium Iron Phosphate LiFePO4 | species.yr | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 |
| 14 | N-methyl-2-pyrrolidone {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0002 | 0,0000 | 0,0001 |
| 15 | Non-Fe-Co-metals, from Li-ion battery, hydrometallurgical processing {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0000 | 0,0001 |
| 16 | Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0000 | 0,0001 |
| 17 | Polyethylene terephthalate (PET) granulate, production mix, at plant, amorphous RER | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 18 | Sheet rolling, aluminium {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 19 | Sheet rolling, copper {RER} processing APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 20 | Solvent, organic {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 21 | Tetrafluoroethylene {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0005 | 0,0001 | 0,0004 |
| 22 | Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 23 | Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

| N. | Processo | Unità | Totale | Assemblaggio Li-ion NCM | Smaltimento NCM |
|----|---|---------|---------|-------------------------|-----------------|
| | Il totale di tutti i processi | USD2013 | 36236,0 | 13658,2 | 22577,8 |
| | Processi rimanenti | USD2013 | 2708,8 | 1760,5 | 948,3 |
| 1 | Aluminium, primary, ingot (IAI Area, EU27 & EFTA) market for APOS, S | USD2013 | 3247,9 | 2058,1 | 1189,8 |
| 2 | Carbon black (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 417,3 | 132,8 | 284,5 |
| 3 | Copper (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 902,9 | 230,4 | 672,6 |
| 4 | Electricity, medium voltage (UCTE) market group for APOS, S | USD2013 | 526,4 | 526,4 | 0,0 |
| 5 | Elettrodo negativo, Li-ion battery | USD2013 | 343,8 | 49,7 | 294,1 |
| 6 | Heat, central or small-scale, natural gas (Europe without Switzerland) market for heat, central or sr | USD2013 | 3932,5 | 0,0 | 3932,5 |
| 7 | Heat, district or industrial, natural gas (Europe without Switzerland) heat production, natural gas, at | USD2013 | 1143,7 | 1143,7 | 0,0 |
| 8 | Heat, from steam, in chemical industry (RER) market for heat, from steam, in chemical industry A | USD2013 | 1797,0 | 381,0 | 1416,1 |
| 9 | Integrated circuit, logic type (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 1608,7 | 511,8 | 1096,9 |
| 10 | Liquid crystal display, unmounted (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 739,1 | 739,1 | 0,0 |
| 11 | Lithium hexafluorophosphate (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 1281,2 | 135,2 | 1146,0 |
| 12 | Lithium hydroxide (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 3495,4 | 819,4 | 2676,1 |
| 13 | N-methyl-2-pyrrolidone (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 4065,9 | 986,4 | 3079,6 |
| 14 | Non-Fe-Co-metals, from Li-ion battery, hydrometallurgical processing (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 1104,2 | 0,0 | 1104,2 |
| 15 | Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 1136,5 | 266,4 | 870,1 |
| 16 | Polyethylene terephthalate (PET) granulate, production mix, at plant, amorphous RER | USD2013 | 1487,7 | 1365,6 | 122,0 |
| 17 | Solvent, organic (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 2531,7 | 267,2 | 2264,5 |
| 18 | Substrate per elettrodo negativo Li-ion battery | USD2013 | 582,4 | 369,6 | 212,8 |
| 19 | Tetrafluoroethylene (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 1194,9 | 312,8 | 882,1 |
| 20 | Transport, freight train (Europe without Switzerland) market for APOS, S | USD2013 | 419,1 | 261,3 | 157,9 |
| 21 | Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 1568,9 | 1341,0 | 227,9 |

A.6 NCM assemblaggio con smaltimento e riuso

| N. | Processo | Unità | Totale | Assemblaggio Li-ion NCM | Smaltimento+riuso |
|----|---|-------|--------|-------------------------|-------------------|
| | Il totale di tutti i processi | DALY | 0,534 | 0,608 | -0,074 |
| | Processi rimanenti | DALY | 0,030 | 0,072 | -0,042 |
| 1 | Aluminium, primary, ingot (IAI Area, EU27 & EFTA) market for APOS, S | DALY | 0,046 | 0,121 | -0,074 |
| 2 | Copper (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,119 | 0,052 | 0,067 |
| 3 | Copper (RoW) production, primary APOS, S | DALY | 0,006 | 0,027 | -0,020 |
| 4 | Electricity, medium voltage (UCTE) market group for APOS, S | DALY | 0,010 | 0,040 | -0,031 |
| 5 | Electronics, for control units (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,005 | 0,022 | -0,016 |
| 6 | Forging, steel (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,009 | 0,000 | 0,009 |
| 7 | Heat, central or small-scale, natural gas (Europe without Switzerland) market for heat, central or sr | DALY | 0,008 | 0,000 | 0,008 |
| 8 | Heat, district or industrial, natural gas (RER) market group for APOS, S | DALY | 0,015 | 0,000 | 0,015 |
| 9 | Heat, from steam, in chemical industry (RER) market for heat, from steam, in chemical industry A | DALY | 0,005 | 0,005 | 0,000 |
| 10 | Integrated circuit, logic type (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,135 | 0,070 | 0,064 |
| 11 | Liquid crystal display, unmounted (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,013 | 0,056 | -0,043 |
| 12 | Lithium hexafluorophosphate (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,009 | 0,005 | 0,004 |
| 13 | Lithium hydroxide (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,013 | 0,015 | -0,001 |
| 14 | N-methyl-2-pyrrolidone (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,019 | 0,022 | -0,003 |
| 15 | Non-Fe-Co-metals, from Li-ion battery, hydrometallurgical processing (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,014 | 0,000 | 0,014 |
| 16 | Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,012 | 0,013 | -0,001 |
| 17 | Sheet rolling, copper (RER) processing APOS, S | DALY | 0,006 | 0,014 | -0,009 |
| 18 | Steel, chromium steel 18/8 (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,010 | 0,005 | 0,005 |
| 19 | Tetrafluoroethylene (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,040 | 0,050 | -0,009 |
| 20 | Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,005 | 0,017 | -0,012 |
| 21 | Wire drawing, copper (GLO) market for APOS, S | DALY | 0,005 | 0,003 | 0,002 |

| N. | Processo | Unità | Totale | Assemblaggio Li-ion NCM | Smaltimento+riuso |
|----|---|------------|--------|-------------------------|-------------------|
| | Il totale di tutti i processi | species.yr | 0,0008 | 0,0010 | -0,0002 |
| | Processi rimanenti | species.yr | 0,0001 | 0,0002 | -0,0001 |
| 1 | Aluminium, primary, ingot (IAI Area, EU27 & EFTA) market for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0002 | -0,0001 |
| 2 | Copper (GLO) market for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0000 | 0,0001 |
| 3 | Electricity, medium voltage (UCTE) market group for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0001 | -0,0001 |
| 4 | Forging, steel (GLO) market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 5 | Heat, central or small-scale, natural gas (Europe without Switzerland) market for heat, central or sr | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 6 | Heat, district or industrial, natural gas (RER) market group for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 7 | Heat, from steam, in chemical industry (RER) market for heat, from steam, in chemical industry A | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 8 | Integrated circuit, logic type (GLO) market for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| 9 | Liquid crystal display, unmounted (GLO) market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0001 | -0,0001 |
| 10 | Lithium hexafluorophosphate (GLO) market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 11 | Lithium hydroxide (GLO) market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 12 | Lithium Iron Phosphate LiFePO4 | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 13 | N-methyl-2-pyrrolidone (GLO) market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 14 | Non-Fe-Co-metals, from Li-ion battery, hydrometallurgical processing (GLO) market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 15 | Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state (GLO) market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 16 | Polyethylene terephthalate (PET) granulate, production mix, at plant, amorphous RER | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 17 | Steel, chromium steel 18/8 (GLO) market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 18 | Tetrafluoroethylene (GLO) market for APOS, S | species.yr | 0,0001 | 0,0001 | 0,0000 |
| 19 | Transport, freight train (Europe without Switzerland) market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 20 | Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (GLO) market for APOS, S | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

| N. | Processo | Unità | Totale | Assemblaggio Li-ion NCM | Smaltimento+riuso |
|----|---|---------|---------|-------------------------|-------------------|
| | Il totale di tutti i processi | USD2013 | 11170,0 | 13658,2 | -2488,3 |
| | Processi rimanenti | USD2013 | 772,0 | 1863,5 | -1091,5 |
| 1 | Aluminium, primary, ingot (IAI Area, EU27 & EFTA) market for APOS, S | USD2013 | 789,7 | 2058,1 | -1268,4 |
| 2 | Copper (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 531,2 | 230,4 | 300,8 |
| 3 | Electricity, medium voltage (UCTE) market group for APOS, S | USD2013 | 125,9 | 526,4 | -400,5 |
| 4 | Forging, steel (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 229,5 | 0,0 | 229,5 |
| 5 | Heat, central or small-scale, natural gas (Europe without Switzerland) market for heat, central or sm | USD2013 | 794,6 | 0,0 | 794,6 |
| 6 | Heat, district or industrial, natural gas (Europe without Switzerland) heat production, natural gas, at | USD2013 | 273,6 | 1143,7 | -870,2 |
| 7 | Heat, district or industrial, natural gas (RER) market group for APOS, S | USD2013 | 1900,8 | 0,0 | 1900,8 |
| 8 | Heat, from steam, in chemical industry (RER) market for heat, from steam, in chemical industry A | USD2013 | 378,0 | 381,0 | -2,9 |
| 9 | Integrated circuit, logic type (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 978,9 | 511,8 | 467,2 |
| 10 | Liquid crystal display, unmounted (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 176,8 | 739,1 | -562,3 |
| 11 | Lithium hexafluorophosphate (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 262,6 | 135,2 | 127,4 |
| 12 | Lithium hydroxide (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 736,5 | 819,4 | -82,9 |
| 13 | N-methyl-2-pyrrolidone (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 861,5 | 986,4 | -124,8 |
| 14 | Non-Fe-Co-metals, from Li-ion battery, hydrometallurgical processing (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 221,8 | 0,0 | 221,8 |
| 15 | Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 239,5 | 266,4 | -27,0 |
| 16 | Polyethylene terephthalate (PET) granulate, production mix, at plant, amorphous RER | USD2013 | 361,3 | 1365,6 | -1004,3 |
| 17 | Solvent, organic (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 518,9 | 267,2 | 251,7 |
| 18 | Steel, chromium steel 18/8 (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 152,1 | 79,5 | 72,6 |
| 19 | Substrate per elettrodo negativo Li-ion battery | USD2013 | 141,6 | 369,6 | -228,0 |
| 20 | Tetrafluoroethylene (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 253,8 | 312,8 | -59,0 |
| 21 | Transport, freight train (Europe without Switzerland) market for APOS, S | USD2013 | 95,1 | 261,3 | -166,2 |
| 22 | Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (GLO) market for APOS, S | USD2013 | 374,3 | 1341,0 | -966,7 |

A.7 Assemblaggio: confronto tra le 3 tecnologie

| Categoria d'impatto | Unità | Assemblaggio Li-ion LFP | Assemblaggio Li-ion NCM | Assemblaggio VRFB |
|--|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|
| Global warming, Human health | DALY | 0,318 | 0,182 | 0,311 |
| Stratospheric ozone depletion | DALY | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| Ionizing radiation | DALY | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Ozone formation, Human health | DALY | 0,001 | 0,000 | 0,001 |
| Fine particulate matter formation | DALY | 0,334 | 0,194 | 2,240 |
| Human carcinogenic toxicity | DALY | 0,116 | 0,066 | 0,152 |
| Human non-carcinogenic toxicity | DALY | 0,250 | 0,159 | 0,420 |
| Water consumption, Human health | DALY | 0,011 | 0,006 | 0,009 |
| Global warming, Terrestrial ecosystems | species.yr | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| Global warming, Freshwater ecosystems | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Ozone formation, Terrestrial ecosystems | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Terrestrial acidification | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,002 |
| Freshwater eutrophication | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Marine eutrophication | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Terrestrial ecotoxicity | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Freshwater ecotoxicity | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Marine ecotoxicity | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Land use | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Water consumption, Terrestrial ecosystem | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Water consumption, Aquatic ecosystems | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Mineral resource scarcity | USD2013 | 2735,686 | 1405,441 | 1301,254 |
| Fossil resource scarcity | USD2013 | 21098,240 | 12252,798 | 29549,478 |

A.8 Smaltimento: confronto tra le 3 tecnologie

| Categoria d'impatto | Unità | Smaltimento LFP | Smaltimento NCM | Smaltimento VRFB |
|--|------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Global warming, Human health | DALY | 0,527 | 0,316 | 0,273 |
| Stratospheric ozone depletion | DALY | 0,003 | 0,002 | 0,000 |
| Ionizing radiation | DALY | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Ozone formation, Human health | DALY | 0,001 | 0,000 | 0,001 |
| Fine particulate matter formation | DALY | 0,471 | 0,284 | 3,880 |
| Human carcinogenic toxicity | DALY | 0,131 | 0,078 | 0,089 |
| Human non-carcinogenic toxicity | DALY | 0,387 | 0,232 | 0,328 |
| Water consumption, Human health | DALY | 0,015 | 0,009 | 0,009 |
| Global warming, Terrestrial ecosystems | species.yr | 0,002 | 0,001 | 0,001 |
| Global warming, Freshwater ecosystems | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Ozone formation, Terrestrial ecosystems | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Terrestrial acidification | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,004 |
| Freshwater eutrophication | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Marine eutrophication | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Terrestrial ecotoxicity | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Freshwater ecotoxicity | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Marine ecotoxicity | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Land use | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Water consumption, Terrestrial ecosystem | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Water consumption, Aquatic ecosystems | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Mineral resource scarcity | USD2013 | 4432,462 | 2658,180 | 937,602 |
| Fossil resource scarcity | USD2013 | 33373,110 | 19919,610 | 23149,503 |

A.9 Smaltimento con riuso: confronto tra le 3 tecnologie

| Categoria d'impatto | Unità | Smaltimento+riuso LFP | Smaltimento+riuso NCM | Smaltimento+riuso VRFB |
|--|------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| Global warming, Human health | DALY | -0,060 | -0,044 | -0,135 |
| Stratospheric ozone depletion | DALY | 0,000 | 0,000 | -0,001 |
| Ionizing radiation | DALY | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Ozone formation, Human health | DALY | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Fine particulate matter formation | DALY | -0,073 | -0,040 | -0,979 |
| Human carcinogenic toxicity | DALY | -0,035 | -0,019 | -0,095 |
| Human non-carcinogenic toxicity | DALY | 0,064 | 0,032 | -0,251 |
| Water consumption, Human health | DALY | -0,004 | -0,002 | -0,005 |
| Global warming, Terrestrial ecosystems | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Global warming, Freshwater ecosystems | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Ozone formation, Terrestrial ecosystems | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Terrestrial acidification | species.yr | 0,000 | 0,000 | -0,001 |
| Freshwater eutrophication | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Marine eutrophication | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Terrestrial ecotoxicity | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Freshwater ecotoxicity | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Marine ecotoxicity | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Land use | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Water consumption, Terrestrial ecosystem | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Water consumption, Aquatic ecosystems | species.yr | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Mineral resource scarcity | USD2013 | -777,189 | -289,831 | -278,102 |
| Fossil resource scarcity | USD2013 | -562,461 | -2198,432 | -11853,711 |

A.10 Ciclo di vita: confronto tra le 3 tecnologie

| Categoria d'impatto | Unità | LFP r | NCM r | VRFB r |
|--|------------|------------|------------|------------|
| Global warming, Human health | DALY | 0,2586 | 0,1384 | 0,1760 |
| Stratospheric ozone depletion | DALY | 0,0010 | 0,0006 | 0,0002 |
| Ionizing radiation | DALY | 0,0002 | 0,0001 | 0,0002 |
| Ozone formation, Human health | DALY | 0,0004 | 0,0002 | 0,0005 |
| Fine particulate matter formation | DALY | 0,2608 | 0,1531 | 1,2610 |
| Human carcinogenic toxicity | DALY | 0,0811 | 0,0475 | 0,0564 |
| Human non-carcinogenic toxicity | DALY | 0,3139 | 0,1904 | 0,1692 |
| Water consumption, Human health | DALY | 0,0065 | 0,0038 | 0,0046 |
| Global warming, Terrestrial ecosystems | species.yr | 0,0008 | 0,0004 | 0,0005 |
| Global warming, Freshwater ecosystems | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| Ozone formation, Terrestrial ecosystems | species.yr | 0,0001 | 0,0000 | 0,0001 |
| Terrestrial acidification | species.yr | 0,0002 | 0,0001 | 0,0014 |
| Freshwater eutrophication | species.yr | 0,0002 | 0,0001 | 0,0001 |
| Marine eutrophication | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| Terrestrial ecotoxicity | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| Freshwater ecotoxicity | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| Marine ecotoxicity | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| Land use | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0001 |
| Water consumption, Terrestrial ecosystem | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| Water consumption, Aquatic ecosystems | species.yr | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| Mineral resource scarcity | USD2013 | 1958,4976 | 1115,6101 | 1023,1513 |
| Fossil resource scarcity | USD2013 | 20535,7788 | 10054,3662 | 17695,7668 |

Bibliografia

- [1] www.rinnovabili.it
- [2] documento RSE “Sviluppo delle Fonti Energetiche Rinnovabili nelle Isole minori non interconnesse”
- [3] “Valutazioni del ciclo di vita di batterie al litio”, L. Cutaia, G. Barberio, R. Luciani, D. De Angelis (ENEA), settembre 2014.
- [4] “Handbook of batteries third edition”, D. Linden & T.B. Reddy, McGraw-Hill Handbooks.
- [5] “Litio, elemento base della nuova generazione di batterie per autotrazione”, Telios, Torino, ottobre 2009.
- [6] http://tesi.cab.unipd.it/25905/1/TESI_finale_in_PDF.pdf
- [7] “Il riciclo delle batterie al litio un problema aperto”, Jon Garcia Aguirre Stagista progetto Fomento San Sebastian, luglio 2014, Telios
- [8] “A Critical Review and Analysis on the Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries”, Weiguang Lv, Zhonghang Wang, Hongbin Cao, Yong Sun, Yi Zhang, and Zhi Sun.
- [9] “Lezioni di trasmissione dell’energia elettrica”, Antonio Paolucci.
- [10] Seeding energies, Bilancio di sostenibilità 2017, ENEL.
- [11] CNR-ITAE. Relazione sullo stato dell’arte su membrane per VRFB. Technical report, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, 2012.
- [12] M. A. G. M. Skyllas Kazacos, M. Rychcik, R. G. Robins, A. G. Fane. New All Vanadium Redox Flow Cell. *Journal of the Electrochemical Society. Electrochem. Soc.*, 133(5):1057–1058, 1986. doi: 10.1149/1.2108706. URL <http://dx.doi.org/10.1149/1.2108706>.
- [13] P. Alotto, M. Guarnieri, e F. Moro. Redox flow batteries for the storage of renewable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29:325–335, 2014. doi: 10.1016/j.rser.2013.08.001. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.001>.
- [14] EWE. NEXT ENERGY - Research Centre for Energy Technology.
- [15] a. a. Shah, M. J. Watt-Smith, e F. C. Walsh. A dynamic performance model for redox-flow batteries involving soluble species. *Electrochimica Acta*, 53:8087–8100, 2008. doi: 10.1016/j.electacta.2008.05.067. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2008.05.067>.
- [16] B. Zakeri e S. Syri. Electrical energy storage systems : A comparative life cycle cost analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42: 569–596, 2015. doi: 10.1016/j.rser.2014.10.011. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.011>.
- [17] Q. Xu, T. S. Zhao, e P. K. Leung. Numerical investigations of flow field designs for vanadium redox flow batteries. *Applied Energy*, 105:47–56, 2013. doi: 10.1016/j.apenergy.2012.12.041. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.041>.

- [18] C. Ding, H. Zhang, X. Li, T. Liu, e F. Xing. Vanadium Flow Battery for Energy Storage: Prospects and Challenges. *J. Phys. Chem. Lett.*, 4(3): 1281–1294, 2013. doi: 10.1021/jz4001032. URL <http://dx.doi.org/10.1021/jz4001032>.
- [19] A. Z. Weber, M. M. Mench, J. P. Meyers, P. N. Ross, J. T. Gostick, e Q. Liu. Redox flow batteries: A review. *Journal of Applied Electrochemistry*, 41:1137–1164, 2011. doi: 10.1007/s10800-011-0348-2. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10800-011-0348-2>.
- [20] M. S. K. E. Sum, M. Rychcik. Investigation of the V(V)/V(IV) system for use in the positive half-cell of a redox flow battery. *Journal of Power Sources*, 16:85–95, 1985. doi: 10.1016/0378-7753(85)80082-3. URL [http://dx.doi.org/10.1016/0378-7753\(85\)80082-3](http://dx.doi.org/10.1016/0378-7753(85)80082-3).
- [21] F. Maroni, S. Calcaterra, M. Secchiaroli, F. Nobili, e R. Marassi. Studi di base sulla batteria redox vanadio / vanadio. 2013. URL http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/accumulo/2012/rds-2013-253.pdf.
- [22] E. Rovera. *Sviluppo di un modello di una batteria a flusso vanadovanadio*. Master thesis, Politecnico di Milano, 2014. URL <http://hdl.handle.net/10589/93739>.
- [23] Minke, C.; Turek, T. Materials, System Designs and Modelling Approaches in Techno-Economic Assessment of All-Vanadium Redox Flow Batteries – A Review. *J. Power Sources* 2018, 376, 66–81.
- [24] Life cycle assessment of a vanadium redox flow battery, Selina Weber, Jens F. Peters, Manuel Baumann and Marcel Weil.
- [25] GfE Metalle und Materialien GmbH. Vanadium Electrolyte Solution 1.6 M. 637 <http://www.gfe.com/produktbereiche/vanadium-chemikalien/anwendungen/> 638 energiespeicher/ (accessed Sep 3, 2017).
- [26] Adolfsson, M.; Rashid, S. Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost of Heat Exchangers 687 A Case for Inter Terminals Sweden AB Located in Port of Gothenburg, Chalmers 688 University of Technology, Gothenburg, 2016.
- [27] www.vinyloop.com
- [28] www.quantis-intl.com
- [29] www.rivm.nl
- [30] www.to.be.it
- [32] www.batteryuniversity.com
- [33] www.eniday.com
- [34] Liu, Z. Synthesis and characterization of $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{O}_2$ as the cathode materials of secondary lithium batteries. *J. Power Sources* 1999, 8182, 416419.
- [35] Nabertherm. *Thermal Process Technology*; Lilienthal, Germany, 2010.

- [36] Ngala, J. K.; Chernova, N. A.; Ma, M.; Mamak, M.; Zavalij, P. Y.; Whittingham, M. S. The synthesis, characterization and electrochemical behavior of the layered $\text{LiNi}_{0.4}\text{Mn}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ compound. *J. Mater. Chem.* 2004, 14, 214.
- [37] Lascelles, K.; Morgan, L. G.; Nicholls, D.; Beyersmann, D. Nickel Compounds; In *Ullmanns' Encyclopedia of Industrial Chemistry*; WileyVCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim, Germany, 2005.
- [38] Donaldson, J. D.; Beyersmann, D. Cobalt and Cobalt Compounds; In *Ullmanns Encyclopedia of Industrial Chemistry*; WileyVCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim, Germany, 2005.
- [39] Wellbeloved, D. B.; Craven, P. M.; Waudby, J. W. Manganese and Manganese Alloys; In *Ullmanns Encyclopedia of Industrial Chemistry*; WileyVCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim, Germany, 2000.
- [40] Schexnayder, S. M.; Das, S.; Dhingra, R.; Overly, J. G.; Tonn, B. E.; Peretz, J. H.; Waidley, G.; Davis, G. A. *Environmental Evaluation of New Generation Vehicles and Vehicle Components*; Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy: Washington, D.C., 2001.
- [41] Verso Pantelleria Zero, studio realizzato nel 2015 su richiesta dell'Europarlamentare D'Amato del gruppo EFDD al parlamento Europeo.
- [42] Relazione Tecnica e ambientale, Centrale di Torrevaldaliga Nord – Electric Storage System (ESS). 19/04/2018, Enel Spa.
- [43] <https://www.ledspadova.eu/2018/03/batteria-a-flusso-padova/>
- [44] Massimo Guarnieri, professore ordinario dell'Università di Padova, intervista al Bo Magazine del 16 marzo 2018.
- [45] Application of Life Cycle Assessment to Nanoscale Technology: Lithium-ion Batteries for electric Vehicles, EPA, United States Environmental Protection Agency, 24 aprile 2013.
- [46] Rapporto pubblico anno 2016, sperimentazione di progetti pilota di accumulo energetico di tipo powerintensive, Terna, 27/04/2017.