

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Energetica e Nucleare

A.a. 2020/2021

Sessione di Laurea: Dicembre 2021

Tesi di Laurea Magistrale

ANALISI DI CICLO DI VITA DEL SISTEMA PROPULSIVO DI UN TRENO AD IDROGENO



**Politecnico
di Torino**

Relatore:

Prof. Andrea Carpignano

Correlatore:

Dr. Raffaella Gerboni

Candidata:

Arianna Russo

Abstract

Nel settore ferroviario la ricerca di nuove forme di propulsione ha portato allo sviluppo dei primi treni ad idrogeno del mondo, nei quali la locomotiva a diesel è stata sostituita con una carrozza che ospita i principali elementi del sistema energetico integrato ad idrogeno. Durante la fase operativa di un treno ad idrogeno le emissioni inquinanti sono nulle; questo lavoro è, dunque, focalizzato sull'analisi dell'intero ciclo di vita della carrozza propulsiva, ispirandosi a un progetto reale. L'obiettivo principale perseguito ha riguardato la valutazione di impatto ambientale del sistema integrato, considerando l'intera vita della carrozza dalla culla alla tomba in due scenari. Per ogni componente della carrozza è stato valutato il potenziale impatto, prestando particolare attenzione al cambiamento climatico. L'impatto di Global Warming Potential (GWP100) del sistema propulsivo nel suo insieme, calcolato nei due scenari, è risultato rispettivamente di 0,0314 kg CO_{2-eq}/p*km nello "scenario SMR" e 0,0222 kg CO_{2-eq}/p*km nello "scenario elettrolisi". L'analisi ha rilevato che, tra le fasi di produzione, uso e fine vita, la fase di uso genera l'impatto maggiore a causa della produzione di idrogeno durante la vita utile del treno. Inoltre, si è evidenziato come la batteria agli ioni di litio costituisca il componente più impattante, in termini ambientali, e quindi quello su cui indirizzare ottimizzazioni e approfondimenti.

Sommario

Abstract	1
1 Introduzione	5
1.1 Contesto.....	5
1.2 Obiettivi.....	6
1.3 Struttura.....	7
2 Tecnologia del treno ad idrogeno	9
2.1 Progetti nel mondo	9
2.2 Letteratura sui treni ad idrogeno.....	13
2.3 Descrizione del treno ad idrogeno.....	19
3 Metodologia dell'analisi di ciclo di vita	25
3.1 Definizione	25
3.2 Sviluppo della metodologia LCA	26
3.3 Normativa di riferimento	28
3.4 Fasi della LCA.....	29
3.4.1 Definizione degli obiettivi e campo di applicazione.....	31
3.4.2 Analisi dell'inventario.....	32
3.4.3 Valutazione degli impatti	33
3.4.4 Interpretazione dei risultati e miglioramenti.....	33
3.5 Finalità della LCA.....	34
4 Applicazione del metodo LCA ad un treno alimentato ad idrogeno	35
4.1 Introduzione al caso studio.....	35
4.2 Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione dello studio	37
4.2.1 Obiettivo e finalità	37
4.2.2 Unità funzionale.....	38
4.2.3 Confini del sistema.....	39
4.2.4 Categorie di dati.....	42
4.2.5 Criteri per l'inclusione e l'esclusione degli output.....	43
4.2.6 Qualità dei dati.....	43
4.3 Analisi di inventario del caso studio	44
4.3.1 Flowchart	44
4.3.2 Raccolta dati.....	46
4.3.3 Allocazione	90

4.3.4	Risultati dell'analisi di inventario	90
4.4	Valutazione degli impatti del caso studio	94
4.4.1	Classificazione e caratterizzazione.....	94
4.4.2	Valutazione degli impatti dello scenario SMR	98
4.4.3	Valutazione degli impatti dello scenario elettrolisi	109
4.5	Interpretazione dei risultati e altre analisi.....	113
4.5.1	Valutazione degli impatti dei componenti principali.....	113
4.5.2	Valutazione degli impatti della localizzazione della batteria.....	118
4.6	Suggerimenti per approfondimenti futuri	121
5	Conclusioni	123
6	Bibliografia	127
7	Allegati	133
7.1	Allegato 1	133
7.2	Allegato 2	135
7.3	Allegato 3	137
7.4	Allegato 4	141

1. Introduzione

1.1 Contesto

Nell'ambito della transizione ecologica si prevede che l'idrogeno possa ricoprire nel prossimo futuro un ruolo da protagonista. I governi e le aziende hanno puntato su questo combustibile per aiutare il processo di decarbonizzazione poiché possiede una densità energetica superiore a quella dei combustibili fossili, rappresentando una valida opzione per lo stoccaggio di energia e, insieme alle celle a combustibile, permette di produrre energia elettrica senza emissioni inquinanti.

Anche il settore ferroviario ha individuato nell'idrogeno una possibile alternativa al diesel. Molte linee ferroviarie, infatti, sono inadatte all'elettrificazione e consentono solo il passaggio di treni convenzionali. Negli ultimi anni sono stati finanziati nel mondo diversi progetti con l'obiettivo di realizzare i primi treni ad idrogeno, i quali, nella fase operativa, emettono solo acqua. Tuttavia, le altre fasi di vita come la manifattura dei componenti, i trasporti e i trattamenti di fine vita, determinano sicuramente un certo impatto ambientale, valutabile mediante un'analisi di ciclo di vita (LCA).

Non avendo riscontrato in letteratura alcuna LCA su questo nuovo tipo di treno, si è deciso di condurre l'analisi di ciclo di vita del sistema propulsivo di un treno ad idrogeno in modo da poter valutare l'impatto ambientale durante l'intera vita del sistema.

Il lavoro che è stato svolto è ispirato a un progetto reale che si sta realizzando in Italia.

1.2 Obiettivi

L'obiettivo principale perseguito è quello di valutare l'impatto sull'ambiente, sull'uomo e sul consumo di risorse del sistema propulsivo di un treno ad idrogeno, ovvero dell'insieme dei componenti necessari a realizzare la propulsione: gli stack di celle a combustibile di tipo *Proton Exchange Membrane* (PEM) comprese di *Balance of Plant* (BOP), le batterie agli ioni di litio a ossidi di nickel, cobalto e manganese (NCM), i serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno compresi di BOP in materiale composito di fibra di carbonio e resina epossidica e la carrozzeria necessaria per ospitarli.

La metodologia scelta è l'analisi di ciclo di vita perché si vogliono stimare gli impatti ambientali del sistema propulsivo considerando la vita dell'oggetto di studio dalla culla alla tomba, dall'estrazione delle materie prime ai trattamenti di fine vita. Inoltre, l'LCA permette di individuare i processi e i componenti più impattanti sui quali indirizzare ulteriori approfondimenti.

Gli impatti considerati riguardano la tossicità, l'eutrofizzazione, l'acidificazione, lo sfruttamento delle risorse, il consumo di suolo, lo strato di ozono, l'ossidazione fotochimica ma, soprattutto, il cambiamento climatico. Infatti, nell'indirizzare l'analisi si è deciso di porre particolare attenzione a quest'ultima categoria perché rappresenta, nel contesto contemporaneo, il problema più attuale.

Un ulteriore obiettivo della tesi è stato quello di produrre informazioni quantitative sull'impatto del sistema propulsivo ad idrogeno in una forma adeguata a poter, successivamente, essere confrontate con altri sistemi propulsivi, come quelli tradizionali (elettrico e diesel) o basati su ecofuels, in un'ottica di LCA comparativa.

1.3 Struttura

La struttura della tesi si può suddividere in quattro fasi: la ricerca sulla tecnologia dell'oggetto di studio, la presentazione della metodologia LCA, l'applicazione della metodologia al caso di studio, il commento dei risultati.

Il capitolo 2 ha l'obiettivo di delineare il contesto in cui si inserisce questa analisi: inquadra i progetti sui treni ad idrogeno in via di sviluppo nel mondo, prosegue con la ricerca bibliografica sugli studi pubblicati in materia e conclude con la descrizione tecnologica del sistema propulsivo.

Il capitolo 3 descrive brevemente la metodologia scelta per condurre l'analisi, riportando alcuni cenni storici sullo sviluppo della LCA e una breve descrizione di tutte le fasi che la caratterizzano.

Il capitolo 4 rappresenta il corpo del lavoro. Dopo la descrizione del caso da studiare, si è proceduto con l'applicazione della metodologia LCA al prodotto scelto, ovvero il sistema propulsivo del treno ad idrogeno. Dopo aver compilato l'inventario, si è effettuata la valutazione degli impatti analizzando due scenari: lo "scenario SMR", in cui il sistema propulsivo è alimentato da idrogeno prodotto tramite *Steam Methane Reforming* (SMR), e lo "scenario elettrolisi", in cui l'idrogeno è prodotto dall'elettrolisi dell'acqua.

Lo studio si chiude con il commento generale sui risultati ottenuti e su possibili approfondimenti futuri.

2 Tecnologia del treno ad idrogeno

2.1 Progetti nel mondo

La tecnologia del treno alimentato ad idrogeno è ancora in fase di studio e sviluppo. L'idea della sua implementazione nasce, in genere, dalla necessità di decarbonizzare le tratte ferroviarie attualmente coperte da treni a propulsione diesel che non è possibile elettrificare a causa di problemi tecnici o economici. Inoltre l'idrogeno, con una densità energetica di 120 MJ/kg, molto al di sopra del rispettivo valore del diesel o del carbone, sembra la risorsa ideale per poter accogliere le sfide riguardanti le ferrovie del futuro.

La Germania rappresenta il paese con il più alto numero di treni alimentati a diesel in Europa, come si nota nella Figura 1.

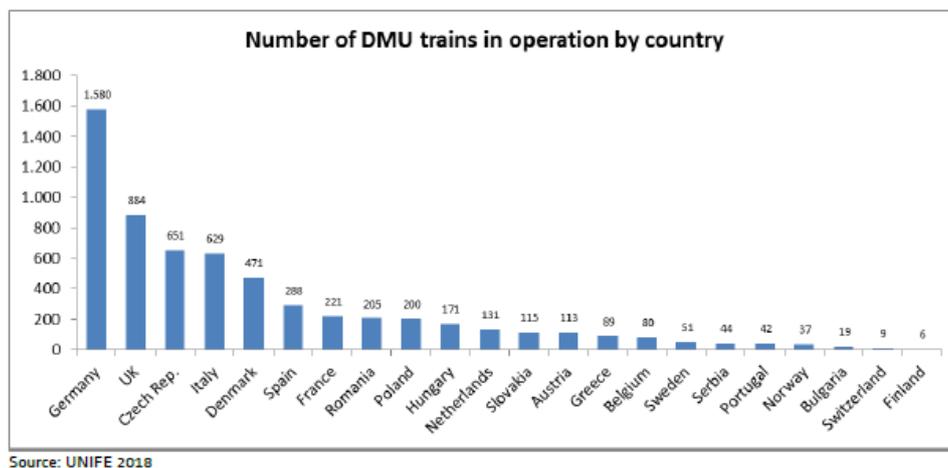


Figura 1 – Numero di treni alimentati a diesel in negli Stati europei [1].

I piani governativi tedeschi prevedevano di ridurre le emissioni di CO₂ del 40% entro il 2020 (rispetto al 1990) e di generare entro il 2050 l'80% della potenza richiesta mediante fonti rinnovabili, per cui ridurre l'utilizzo del

diesel è un obiettivo cruciale [1]. Per questa serie di motivi l'azienda Alstom ha sviluppato il primo treno ad idrogeno del mondo per il mercato tedesco: il Coradia iLint.

Il treno è stato presentato per la prima volta nel 2016 a Berlino durante l'*InnoTrans*, mentre i test con i passeggeri sono iniziati nel 2018 e si sono conclusi nel 2020. La propulsione si basa sulla tipologia di treno "Coradia Lint 54", nel quale le parti relativi al diesel sono state sostituite da un sistema di celle a combustibile di tipo PEM che, nella fase operativa, emette solo acqua come prodotto di scarto.

In base ai test, si è visto che il treno è in grado di raggiungere la velocità massima di 140 km/h, trasportando fino a 300 persone con un'autonomia di circa 1000 km.

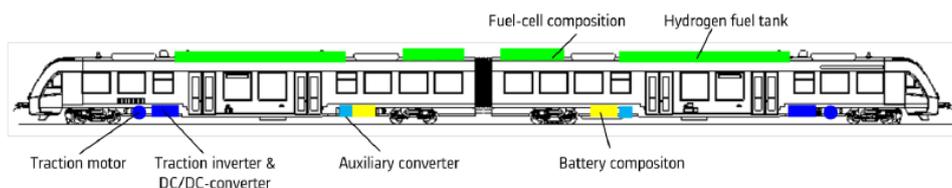


Figura 2 – Rappresentazione del Coradia iLint e dei principali sistemi della propulsione [1].

Lo stack di celle a combustibile di tipo PEM guida la trazione alimentato dall'idrogeno, stoccato a 350 bar all'interno dei serbatoi posizionati sul tetto. L'autonomia è elevata grazie alla presenza di batterie agli ioni di litio altamente performanti, le quali immagazzinano l'energia elettrica prodotta dallo stack quando non serve alla trazione e la forniscono nel momento in cui ce n'è bisogno, come ad esempio durante le fasi di accelerazione. Questo meccanismo, utilizzato nella maggior parte dei progetti in via di sviluppo, consente di ottimizzare il consumo di carburante [1]. Nel 2022 il Coradia iLint entrerà ufficialmente a far parte della flotta ferroviaria tedesca.

Negli ultimi anni, inoltre, molti stati europei hanno confermato le collaborazioni con Alstom per la fornitura di nuovi treni a idrogeno. L'Italia è fra questi. Infatti, Ferrovie Nord Milano, Trenord e Alstom hanno siglato un

accordo per la realizzazione del progetto H2iseO, che prevede la creazione di una vera e propria *Hydrogen Valley* nei dintorni della linea ferroviaria Brescia-Iseo-Edolo. Tra gli obiettivi perseguiti c'è la volontà di decarbonizzare il trasporto pubblico locale e la creazione di un distretto industriale ed economico legato alla filiera dell'idrogeno [2]. Gli step del progetto sono:

- la fornitura di sei treni alimentati da idrogeno prodotto tramite lo *steam methane reforming* (SMR) di biometano più un sistema di cattura della CO₂;
- la fornitura di ulteriori otto treni per completare la sostituzione dei diesel operanti sulla linea e l'installazione di elettrolizzatori per la produzione di idrogeno, possibilmente alimentati da energia green;
- la fornitura di quaranta autobus a idrogeno per il trasporto pubblico locale.

Ulteriori informazioni su questo tipo di treno sono fornite nel paragrafo 2.3, poiché l'analisi di ciclo di vita effettuata in questa tesi ha come oggetto di studio la carrozza propulsiva di un treno ad idrogeno modellata prendendo ispirazione dal treno di Alstom in questione.

Un altro progetto che ha quasi concluso i test è HydroFLEX, il primo treno alimentato da idrogeno in Gran Bretagna. I promotori sono la University of Birmingham's Centre for Railway Research and Education (BCRRE) e l'azienda Porterbrook. L'idea è quella di modificare i treni a diesel Class 319 per adattarli a ospitare i sistemi necessari per alimentare il treno con l'idrogeno. Il progetto prevede la presenza di quattro serbatoi ad alta pressione in grado di stoccare 20 kg di idrogeno. L'azione combinata di celle a combustibile e batterie fornisce l'energia elettrica necessaria per azionare il treno [3].

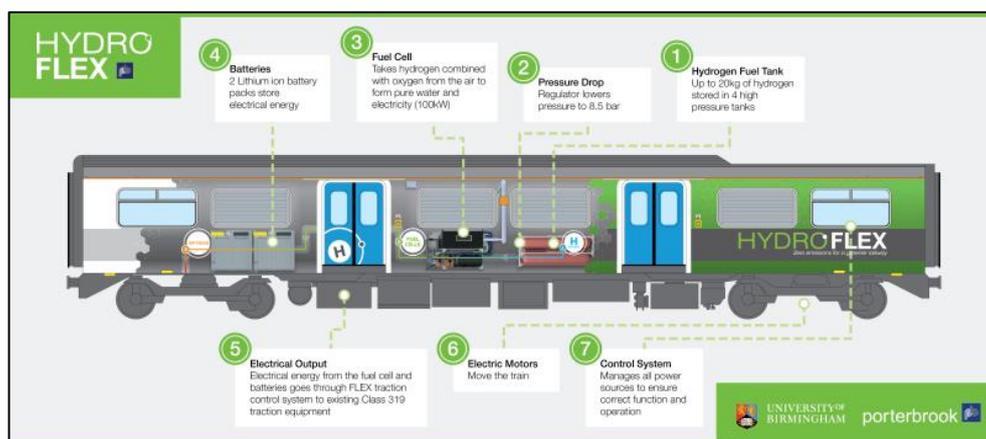


Figura 3 – Rappresentazione del treno Hydroflex [4].

Sulla scia dell'HydroFLEX, è stata annunciata la collaborazione tra Alstom e l'azienda Eversholt Rail in UK per convertire più di cento treni a quattro carrozze in treni di tre vagoni, chiamati *Breeze Trains*, da adoperare sulle linee suburbane [5][5] .

Al di fuori dell'Europa il progetto sulla propulsione ad idrogeno più importante è stato sviluppato in Cina dalla compagnia Sifang. Si tratta di un tram progettato per offrire servizio esclusivamente in aree urbane a un massimo di 380 passeggeri [6].



Figura 4 – Tram cinese ad idrogeno [7].

Il tram è in grado di rifornirsi in tre minuti e percorrere con un pieno circa 100 km, riuscendo a raggiungere la velocità di 70 km/h [6].

L'interesse per la decarbonizzazione del settore ferroviario ha dato una spinta allo sviluppo della tecnologia del treno ad idrogeno, garantendo sempre più investimenti in progetti di ricerca innovativi.

2.2 Letteratura sui treni ad idrogeno

Nella letteratura vi sono numerosi studi che analizzano i treni ad idrogeno, valutandone le condizioni operative, i consumi stimati, le problematiche, i costi e le emissioni generate, contrapponendoli alle tecnologie ferroviarie già affermate e consolidate.

Molte ricerche si riferiscono all'area geografica dell'Ontario in Canada, poiché si era manifestato interesse nel proporre una soluzione ferroviaria ad idrogeno per GO Transit, compagnia del trasporto pubblico della regione dell'Ontario, in collaborazione con Alstom e Siemens. Nel 2017, inoltre, era stato annunciato dal ministro dei trasporti dell'Ontario uno studio di fattibilità per verificare le problematiche tecniche, i costi del progetto e i vantaggi rispetto ad una linea convenzionale. Tuttavia, i risultati hanno mostrato delle criticità sia nell'integrazione del sistema di celle a combustibile nel veicolo sia nella quantità di energia elettrica giornaliera necessaria, pari all'1% di quella totale generata dalla provincia dell'Ontario, rendendola troppo esposta alle fluttuazioni dei prezzi [8]. A causa di questi risultati si è deciso di sospendere il progetto.

Nel 2010 sono stati effettuati degli studi che prendono in considerazione proprio la possibilità di impiegare delle locomotive ad idrogeno nel corridoio di *GO Transit Lakeshore*, in particolare attraverso Toronto, tra Oshawa e Hamilton. In particolare, G.D. Marin et al. effettuano un confronto tra l'impiego di una locomotiva ad idrogeno e di una elettrica per sostituirla una a diesel, prendendo in considerazione nel primo paper [9] lo stoccaggio e la propulsione, e, nel secondo paper [10], l'approvvigionamento e la

distribuzione di idrogeno. Nel primo [9] si conclude che l'elettrificazione rappresenta una valida alternativa per ridurre rumore ed emissioni GHG nelle aree urbane e in quelle densamente popolate. Lo svantaggio è rappresentato dal costo di investimento per l'adeguamento della linea all'infrastruttura elettrica e dall'impatto sullo sfruttamento del suolo. I treni ad idrogeno invece godono di una maggiore flessibilità: non necessitano di infrastrutture più ingombranti di quelle necessarie per il diesel. La questione più rilevante riguarda l'adattamento del veicolo al sistema idrogeno. In particolare, nel caso considerato da G.D. Marin et al. [9], il peso dello stack di celle a combustibile e dei serbatoi di stoccaggio aumenterebbe il peso totale delle locomotive tradizionali elettriche del 30% e, per questo motivo, nelle conclusioni consigliano di impiegare serbatoi in pressione a 700 bar piuttosto che a 350 bar.

Lo studio successivo [10] degli stessi autori è indirizzato alla valutazione degli aspetti tecnologici, operativi e economici dell'elettrificazione del corridoio del *Lakeshore*, contrapponendola alla produzione e distribuzione dell'idrogeno per un servizio operato da un treno a celle a combustibile. Le conclusioni dello studio consigliano di impiegare treni ad idrogeno sulla tratta ferroviaria, evitando onerosi investimenti per l'elettrificazione ed emissioni inquinanti durante le fasi operative. Il metodo di produzione del combustibile considerato è la produzione termochimica con ciclo Cu-Cl, ottenuta sfruttando l'energia termica in eccesso di una centrale nucleare, in modo da ottenere ottime performance e poche emissioni. L'idrogeno viene stoccato all'interno di serbatoi a 350 bar, con una densità energetica di 2,2 MJ/l, molto minore rispetto a quella del diesel di 36,85 MJ/l. Le ricerche precedenti suggeriscono di utilizzare idrogeno liquefatto perché possiede un contenuto energetico superiore, ma la liquefazione dell'idrogeno implica un aumento dei costi e delle problematiche tecniche aggiuntive. Dal punto di vista economico, le celle a combustibile PEM (PEMFC) hanno un costo atteso per i trasporti ad alta potenza dell'ordine di 500 \$/kW, fattore che

rappresenta sicuramente il punto da implementare per lo sviluppo di questa tecnologia nel settore ferroviario [10].

Lo studio di A. Hoffrichter et al. del 2012 [11], invece, verte su un'analisi Well-to-Wheel (WTW) volta a confrontare una locomotiva elettrica, una a diesel, una a combustione interna di idrogeno e una a celle a combustibile alimentate da idrogeno. La Figura 5 riassume i risultati dell'analisi.

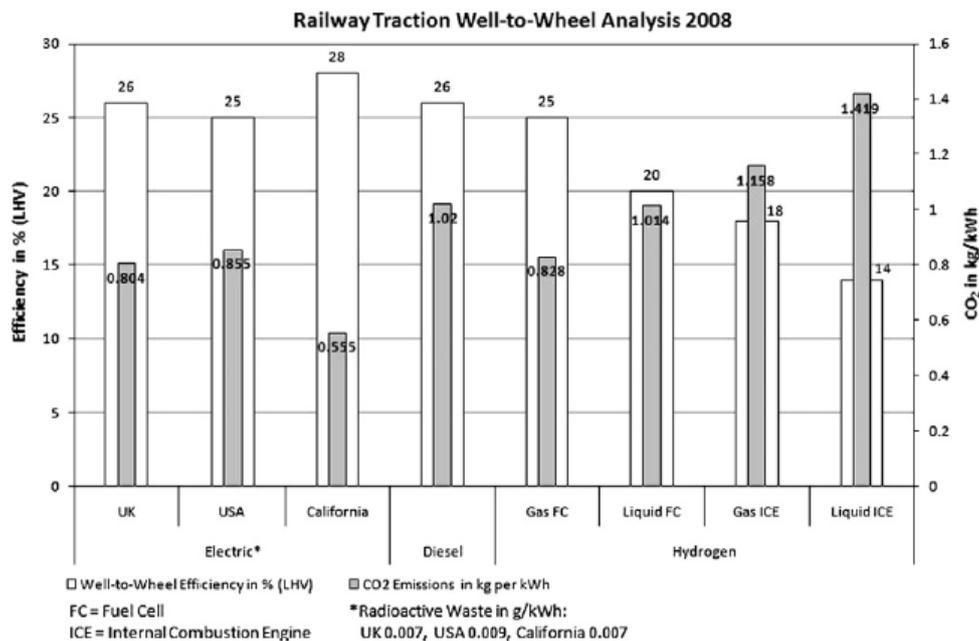


Figura 5 – Immagine dei risultati dell'analisi WTW A. Hoffrichter et al. a pag. 32 [11].

La ricerca mostra che l'efficienza WTW è simile tra la trazione elettrica e quella a diesel, mentre le emissioni di CO₂ in $\frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$ rilevano il valore più alto nella trazione a diesel, seguito da due valori simili per la trazione alimentata da celle a combustibile e quella elettrica.

Il report del lavoro di S. Kent (2015) [12] è stato svolto nell'ambito di un concorso volto a definire il miglior progetto di veicolo ferroviario per la ferrovia del futuro. La proposta elaborata prevedeva l'adattamento di due tipologie diverse di treno in uno ad idrogeno: un treno Class 156 Diesel Multiple Unit (DMU) e un treno elettrico di quattro carrozze AT200. La

tecnologia utilizzata per il progetto prevedeva l'installazione di un motore a celle a combustibile di tipo PEM (2x104 kW per carrozza), una batteria ad alta capacità (circa 22 kWh per carrozza) e dei serbatoi di idrogeno a 350 bar, con l'obiettivo di percorrere circa 500 miglia con 63 kg di combustibile.

Per quanto riguarda le emissioni, è stata stimata la quantità annuale di CO₂ emessa dalla flotta di 25 treni Class 156 DMU a due carrozze, considerando per ognuno 115'500 miglia.

Vehicle Type	Energy Source	Tonnes CO2 per Fleet (tonnes)
Class 156 DMU	Diesel	15,500 tonnes
Class 156 FCEMU	Electrolysis	20,600 tonnes
	Gas Reformation	8,900 tonnes

Figura 6 – Emissioni annuali di 25 treni Class 156 DMU e FCEMU [12].

La Figura 6 mostra come la produzione di idrogeno tramite elettrolisi alimentata da elettricità di rete UK aumenterebbe le emissioni del 33%, mentre la produzione tramite SMR la ridurrebbe del 43%. La soluzione ideale sarebbe quella di produrre l'idrogeno tramite elettrolisi alimentata da elettricità prodotta dal nucleare o da fonti rinnovabili, così da ridurre drasticamente le emissioni di CO₂.

Le conclusioni dello studio riportano che il progetto è perseguibile e che le performance nella trazione tramite celle a combustibile sarebbero le migliori. Il problema principale riguarda la quantità di idrogeno necessaria giornalmente per alimentare 25 treni, che è considerevole. Il suggerimento finale è quello di considerare la conversione dei treni come una valida alternativa all'elettrificazione nelle aree rurali, sia per le difficoltà tecniche (e economiche) dell'elettrificare, sia per ridurre il carico sulla rete elettrica nazionale.

Lo studio di Fragiaco e Piraino (2019) [13], invece, elabora un modello per valutare le performance di quattro veicoli ferroviari su quattro diverse linee, alimentati da celle a combustibile, in modo da determinare la versatilità di questo tipo di propulsione. Le quattro linee scelte sono: una linea tramviaria tra Cosenza e l'Università della Calabria, la linea ferroviaria Sud Tirrenica tra Reggio Calabria e Napoli, la linea Silana tra San Giovanni in Fiore e Cosenza e la linea merci tra il porto di Gioia Tauro e l'aeroporto di Lamezia.

I quattro veicoli hanno in comune la propulsione alimentata dalle PEMFC e un sistema di recupero e stoccaggio dell'energia elettrica ottenuto da batterie e/o supercondensatori, mostrando tutti delle buone performance.

Il successivo studio di Piraino et al. (2021) [14] si riaggancia al precedente nell'investigare il sistema di produzione e distribuzione di idrogeno necessario per alimentare un treno per il trasporto passeggeri e un treno per il trasporto merci, operanti lungo una linea regionale del Sud Italia di 140 km. I risultati evidenziano performance simili per i due treni aventi condizioni operative diverse: l'efficienza media dello stack nel caso di treno passeggeri è del 50%, rispetto al 47% del treno merci, mentre il consumo di idrogeno nel primo caso è di 29 kg/ciclo (ciclo di guida pari a 2 ore circa, con quattro stop da un minuto) e nel secondo di 52 kg/ciclo (ciclo di guida pari a circa 3 ore senza stop). Per la stazione di rifornimento è stato considerato un giorno operativo con un consumo giornaliero calcolato di circa 250 kg di idrogeno. La stazione quindi è risultata composta da 670 kW di elettrolizzatori PEM (PEMEC) in grado di produrre 260 kg al giorno di idrogeno a 350 bar. Il sistema richiede acqua deionizzata e elettricità necessari alle PEMEC per produrre idrogeno. Il prodotto viene compresso da un compressore volumetrico fino a 350 bar e stoccato. In queste condizioni, la stazione richiederebbe 15,6 MWh/giorno, la cui quota maggiore è da attribuire agli elettrolizzatori che necessitano di 57,2 kWh/kg di idrogeno prodotto [14].

Infine, lo studio di K.G. Logan et al. (2020) [15] effettua un confronto tra treni ad idrogeno, treni elettrici e treni a diesel in termini di emissioni, prendendo in considerazione quattro scenari di generazione elettrica in UK in un periodo compreso tra il 2017 e il 2050. Si nota che in tutti gli scenari, le emissioni annuali dei treni ad idrogeno sono più alte rispetto ai treni elettrici, anche se si prevede che in futuro le emissioni dei treni ad idrogeno diminuiscano notevolmente rispetto al presente.

	2017 MtCO ₂	2020 MtCO ₂	2025 MtCO ₂	2030 MtCO ₂	2035 MtCO ₂	2040 MtCO ₂	2045 MtCO ₂	2050 MtCO ₂
Electric Trains	0,91	0,50	0,33	0,17	0,11	0,07	0,07	0,08
Hydrogen Trains	3,54	1,96	1,28	0,67	0,42	0,28	0,29	0,30
Conventionally Fuelled Trains	1,52	1,52	1,54	1,56	1,56	1,57	1,58	1,59

Figura 7 – Emissioni annuali previste per diverse tipologie di treni [15][15].

Le questioni principali sollevate dagli studi illustrati finora riguardano la quantità di spazio occupato dai serbatoi di idrogeno tale da garantire una soddisfacente autonomia del mezzo, ma anche la questione di impatto ambientale legata alla produzione di idrogeno. Nel 2020 infatti, a causa dell'impiego di combustibili fossili, la produzione di idrogeno è stata responsabile di quasi 900 Mt di CO₂ [16].

Essendo il treno ad idrogeno una tecnologia ancora in fase di sviluppo e con pochissimi progetti concretizzati, non è stato ancora oggetto di alcuna LCA.

2.3 Descrizione del treno ad idrogeno

La carrozza propulsiva oggetto di questa LCA è ispirata a quella del progetto H2iseO di Alstom in collaborazione con Trenord e FNM. I primi sei treni ad idrogeno verranno consegnati entro il 2023 ed entreranno a far parte della flotta di treni in servizio sulla linea Brescia-Iseo-Edolo [17]. Il convoglio sarà ispirato ai treni Donizetti a quattro casse a cui verrà aggiunta una carrozza centrale contenente la parte propulsiva.

La carrozza in questione è in acciaio, a differenza delle carrozze tradizionali in alluminio, e si trova nella parte centrale del treno. Al suo interno ritroviamo i componenti fondamentali per generare la propulsione.

Il sistema di celle a combustibile rappresenta il cuore del sistema: è la fonte di energia primaria necessaria per la trazione del treno. Le celle a combustibile, scelte per questo tipo di impiego, sono di tipo PEM, ovvero possiedono una membrana polimerica di Nafion, che funge da elettrolita, e lavorano a basse temperature (80 °C circa).

La composizione di una cella può essere rappresentata come nella Figura 8.

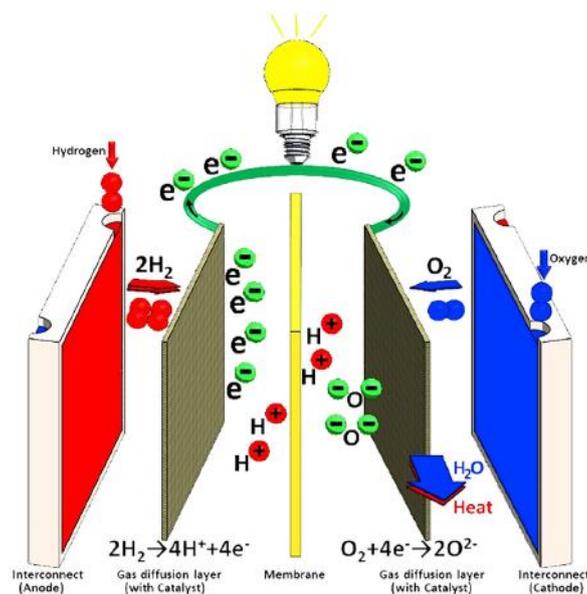
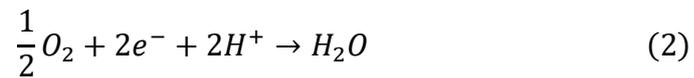


Figura 8 – Struttura di una singola PEMFC [18].

Le reazioni che avvengono all'anodo, al catodo e nel complesso sono rispettivamente:



L'idrogeno che entra nell'anodo, negativo, si divide in ioni H^+ e elettroni e^- . Gli ioni H^+ passano attraverso la membrana polimerica e raggiungono il catodo, positivo, dove reagiscono con l'ossigeno dell'aria e gli elettroni passati attraverso un circuito esterno, producendo acqua [18]. Il voltaggio di una cella normalmente è molto basso per poter produrre una quantità considerevole di potenza, per cui vengono inserite in una configurazione in serie creando uno stack.

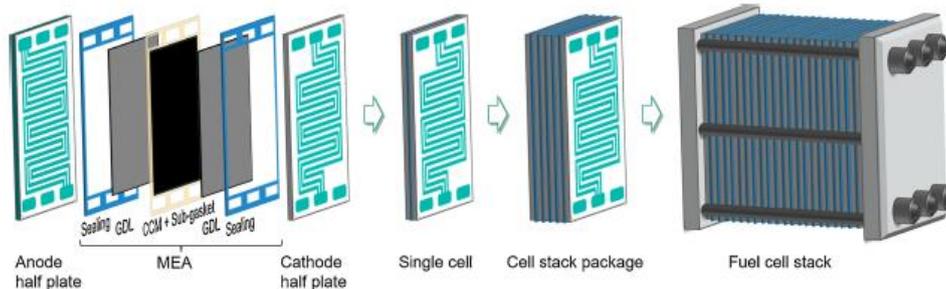


Figura 9 – Composizione di uno stack di celle a combustibile [18].

Gli stack necessari per fornire l'elettricità per la trazione del treno sono quattro, per un totale di potenza in output di 1110 kW. Il sistema di celle a combustibile non subisce repentine e frequenti oscillazioni di potenza; nei

momenti in cui l'elettricità prodotta non è necessaria per la trazione, fluisce nelle batterie per essere stoccata.

La presenza delle batterie è fondamentale poiché consente di aumentare notevolmente l'autonomia del mezzo, evitando sprechi di energia nei momenti in cui c'è sovrapproduzione e aiutando la trazione nei momenti in cui c'è maggiore bisogno. Ad esempio, le fasi di breve accelerazione con una richiesta di potenza limitata sono supportate principalmente dalle batterie, mentre lunghe fasi di richiesta di alta potenza richiedono la massima funzionalità degli stack.

Nelle fasi di discesa e decelerazione, la potenza prodotta dalle PEMFC ricarica le batterie alimentando i sistemi di bordo tramite il convertitore ausiliario. Se la batteria è carica, la potenza delle PEMFC viene abbassata per poter solo sopperire alla richiesta dei sistemi di bordo. Durante le fasi di frenata, il sistema del freno rigenerativo permette di recuperare l'energia elettrica generata dall'energia cinetica del veicolo andando ad alimentare i sistemi di bordo e le batterie [1].

Il tipo di batteria scelta è agli ioni di litio di tipo NCM (le tre lettere indicano un catodo contenente nickel, cobalto e manganese), impiegato largamente nel campo della trazione elettrica. Le batterie di questo studio sono le NCM 611. La cifra che segue le tre lettere indica il rapporto tra i componenti presenti. La capacità totale installata è di otto batterie da 100 kWh l'una, con un peso totale di 8800 kg.

Per il progetto H2iseO era stata valutata anche la possibilità di utilizzare un treno con sole batterie, senza celle a combustibile. Tuttavia l'autonomia risultava troppo limitata: circa 60 km a fronte di una linea ferroviaria lunga 103 km.

Il combustibile che alimenta gli stack è l'idrogeno, che viene stoccato all'interno di serbatoi in materiale composito di fibra di carbonio e resina a 350 bar. Questo tipo di serbatoio è detto di tipo IV ed è caratterizzato da un

rivestimento interno polimerico. Esso consente di stoccare in pressione a 350 bar circa 5.6 kg di combustibile, in alcuni casi anche a 700 bar se si vuole ridurre lo spazio occupato. Sono più leggeri rispetto a quelli in acciaio e più sicuri, per questo si rendono più adatti ai trasporti.

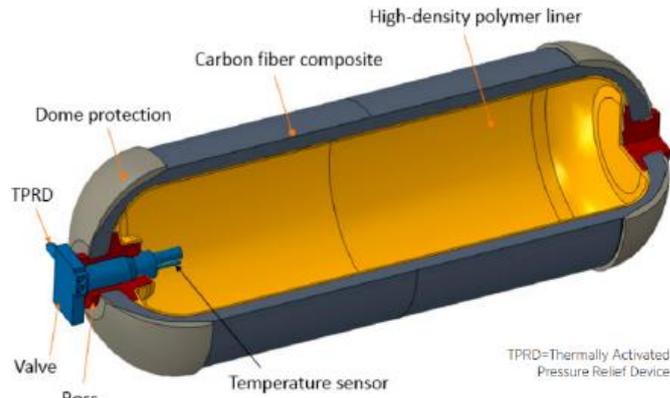


Figura 10 – Strati componenti un serbatoio di tipo IV [19].

Il processo di fabbricazione invece si chiama rotostampaggio: i materiali vengono avvolti da una macchina attorno alla forma cilindrica seguendo uno schema incrociato [19].

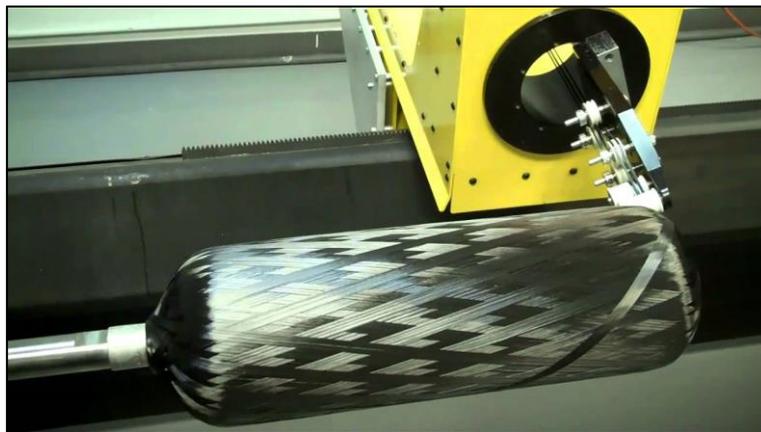
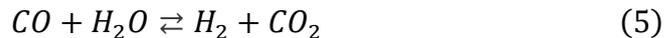


Figura 11 – Immagine istantanea presa da video su Youtube "TCR Composite Towpreg Winding Demo", minuto 8:27.

L'idrogeno, per quanto molto abbondante sulla Terra, non è mai presente in natura in forma pura, per cui è necessario produrlo. I metodi principali

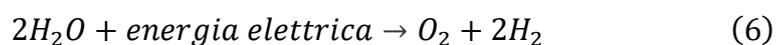
permettono di ricavarlo dagli idrocarburi mediante processo di *Steam Reforming* (SR) oppure dall'elettrolisi dell'acqua. Nel progetto H2iseO c'è in programma la creazione di un impianto di *Steam Methane Reforming* (SMR) per la produzione di idrogeno dal metano, da installare all'interno di un deposito nei dintorni della ferrovia di proprietà di Trenord, completo anche di un sistema di cattura della CO₂ (CCS). Nella seconda fase del progetto, invece, si prevede di installare degli elettrolizzatori da alimentare primariamente con fonti rinnovabili.

La tecnologia di SMR è la più matura e conveniente al momento. Il processo è composto da due fasi: la fase di *steam methane reforming* (SMR) e la fase di *water gas shift* (WGS), le cui equazioni sono riportate rispettivamente di seguito [20]:



Il primo processo è endotermico, ovvero richiede energia termica dall'esterno, e necessita di una temperatura di circa 800 °C. Il vapore ad alta temperatura viene iniettato nel reattore in grande quantità per far sì che tutto il metano reagisca, evitando fenomeni di deposizione di carbonio. In uscita dalla fase di SMR ci sarà comunque un 7% di CO, una sostanza pericolosa. Per questo motivo è necessario inserire la fase di WGS, esotermica, ottenendo anidride carbonica e idrogeno.

Il processo dell'elettrolisi dell'acqua consente di ottenere idrogeno di alta qualità attraverso la conversione elettrochimica dell'acqua in idrogeno e ossigeno [20]:



La maggior parte degli elettrolizzatori industriali sono di tipo PEMEC, costituiti da un anodo e un catodo separati da un elettrolita e funzionanti a

bassa temperatura (circa 80 °C), o di tipo SOEC, basati sull'elettrolisi a ossidi solidi ad alte temperature (650-850 °C).

Gli input necessari per l'elettrolisi sono l'elettricità e l'acqua deionizzata. La condizione ideale per la generazione di idrogeno sarebbe utilizzare energia elettrica proveniente da fonti *green* in modo da ridurre nettamente le emissioni.

L'idrogeno prodotto dagli impianti servirà a rifornire il treno, impiegando circa 20-25 minuti per riempire tutti i serbatoi, che ospiteranno 300 kg di idrogeno.

Dalla sinergia di tutti i componenti si svilupperà la propulsione che partirà dalla carrozza centrale e alimenterà la trazione del treno, consentendo di raggiungere un'autonomia di circa 600 km con un pieno.

Sul treno presentato finora, con le sue caratteristiche uniche, verrà applicata nei capitoli successivi la metodologia della LCA che ne valuterà gli impatti ambientali dalla culla alla tomba.

3 Metodologia dell'analisi di ciclo di vita

3.1 Definizione

L'attenzione crescente alle tematiche ambientali ha contribuito alla diffusione del concetto di *Life Cycle Thinking* (LCT). Applicare il LCT a un prodotto o a un servizio *“significa andare oltre la semplice considerazione delle questioni riguardanti i processi manifatturieri per porre una maggiore attenzione sugli impatti ambientali, economici e sociali generati durante l'intero ciclo di vita di quel determinato prodotto o servizio”* [21].

Uno dei metodi con cui si concretizza il LCT è la *Life Cycle Assessment* (LCA). La definizione ufficiale di LCA è: *“Una LCA è un procedimento oggettivo che permette di valutare gli impatti ambientali associati ad un prodotto, un processo o un'attività, effettuato attraverso l'identificazione e la quantificazione dei consumi di materia, energia ed emissioni nell'ambiente, e l'identificazione e la valutazione delle opportunità per diminuire questi impatti. L'analisi riguarda l'intero ciclo di vita del prodotto (“dalla culla alla tomba”): dall'estrazione e trattamento delle materie prime, alla produzione, trasporto e distribuzione del prodotto, al suo uso, riuso e manutenzione, fino al riciclo e allo smaltimento finale”* [22].

Sono stati sviluppati dalla comunità scientifica anche altri metodi di valutazione degli impatti, ma la metodologia LCA sembra essere la più completa. Ad esempio, esiste la Carbon Footprint, ma quest'ultima si concentra solo sulla quantificazione delle emissioni di gas serra e il relativo impatto ambientale.

La LCA, oltre ad essere un metodo standardizzato e sostenuto anche dalla Commissione Europea, permette di avere una visione d'insieme della vita del prodotto e degli impatti generati [23].

3.2 Sviluppo della metodologia LCA

Le origini del LCT e conseguentemente della LCA risalgono agli anni Sessanta, quando alcuni scienziati iniziarono a cambiare il modo di concepire l'ottimizzazione dei sistemi di produzione. In particolare, fino ad allora era consuetudine ottimizzare i processi di produzione dal punto di vista del singolo componente, supponendo che l'efficientamento di un'unità produttiva giovasse all'intera filiera. Ma questo non sempre risultava veritiero. Infatti, molto spesso, il risparmio energetico o economico ottenuto si traduceva in una spesa localizzata in un altro ambito [21].

A partire da quegli anni si fece strada la possibilità di analizzare i prodotti attraverso un'analisi "*from cradle to grave*", dalla culla alla tomba, ovvero che includesse l'estrazione delle materie prime, le fasi di lavorazione, di uso e consumo, per finire con il processamento dei rifiuti.

Uno dei primi studi che pose l'attenzione sull'uso delle risorse e sulle emissioni generate fu condotto dal *Midwest Research Institute* (MRI) per *Coca Cola Company* nel 1969. La ricerca era volta a definire quale materiale tra il vetro, la plastica e l'alluminio, fosse ecologicamente e energeticamente migliore per contenere la Coca Cola. Il MRI continuò negli anni successivi su questo genere di ricerche, riferendosi ad esse con il termine "*Resource and Environmental Profile Analysis*" (REPA) e definendo le basi per lo sviluppo della metodologia LCA. Il metodo REPA inoltre inserì il concetto di valutazione dell'energia in termini di risorsa, iniziando il dibattito scientifico sulla limitatezza delle risorse energetiche e sulla necessità di un uso razionale delle stesse. Al contempo, in Europa, Boustead e Hancock pubblicavano il "*Manuale di Analisi Energetica*" che, descrivendo per la prima volta il procedimento analitico, poneva le basi della LCA moderna [21].

Successivamente, l'interesse per questo genere di studio subì una leggera flessione, finché nel 1984 l'istituto *Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research* (EMPA) pubblicò una lista di dati necessari per poter condurre una LCA, introducendo anche il primo metodo di valutazione degli impatti [24].

Tra gli anni Settanta e Ottanta le LCA vennero condotte seguendo approcci diversi, dal momento che la metodologia non era ancora stata standardizzata. Bisognò aspettare gli anni Novanta, contraddistinti da una prolungata collaborazione scientifica internazionale, per ottenere le prime forme di standardizzazione.

I risultati di questa cooperazione sono racchiusi nella pubblicazione *Guidelines for a Life Cycle Assessment: A Code of Practice* della *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC), una raccolta di linee guida a cui attingere per poter effettuare questo tipo di analisi. Negli anni successivi la SETAC continuò ad occuparsi dell'armonizzazione di metodi e terminologia, seguita anche dalla *International Organization for Standardization* (ISO) impegnata nella standardizzazione delle procedure.

Nel 21esimo secolo la presa di coscienza dell'impatto delle nostre azioni sui cambiamenti climatici e i temi riguardanti la salvaguardia ambientale hanno mosso il dibattito pubblico. La Commissione Europea nel 2006 ha commissionato la *Co-ordination Action for innovation in Life Cycle Analysis for Sustainability* (CALCAS), il cui lavoro ha evidenziato le questioni irrisolte sulla sostenibilità e la necessità di indirizzarvi i programmi di ricerca futuri [24].

Le LCA costituiscono uno strumento di valutazione sempre più considerato dai governi e dai privati per attuare uno sviluppo sostenibile da tutti i punti di vista: sociale, economico e ambientale.

3.3 Normativa di riferimento

La serie di norme ISO 14040 rappresenta il punto di riferimento per le valutazioni di ciclo di vita. All'interno della serie 14040 sono raccolte le indicazioni generali per poter svolgere in modo coerente e standardizzato le analisi di ciclo di vita di prodotti e servizi.

La commissione che si occupa delle stesure, pubblicazioni e aggiornamenti è il Comitato Tecnico ISO/TC 207 *Environmental management*, il quale sottopone il testo al Comitato Europeo di Normazione (CEN/CS) affinché venga approvata come Norma Europea [25].

Le prime edizioni sono state pubblicate alla fine degli anni Novanta per poi essere riviste e aggiornate periodicamente nel corso degli anni. In particolare:

- Norma EN ISO 14040:1997: *Environmental management - Life cycle assessment – Principles and framework*. Questa norma fornisce la metodologia generale per approcciarsi all'analisi di ciclo di vita, mettendone in evidenza gli obiettivi, la struttura, le potenzialità e i limiti. Non descrive la tecnica della LCA nel dettaglio [25];
- Norma EN ISO 14041:1998: *Environmental Management – Life cycle assessment – Goal and scope definition and inventory analysis*;
- Norma EN ISO 14042:2000: *Environmental management – Life cycle assessment – Life cycle impact assessment*;
- Norma EN ISO 14043:2000: *Environmental management – Life cycle assessment – Life cycle interpretation*;
- Norma EN ISO 14044:2006: *Environmental management - Life cycle assessment – Requirements and guidelines*. Questa norma riporta un insieme di linee guida di supporto per approcciarsi alla Norma EN ISO 14040.

Le versioni del 2006 delle ISO 14040 e 14044 hanno sostituito le precedenti versioni delle stesse e inglobato le altre norme della serie, diventando il punto di riferimento per qualsiasi studio di analisi di ciclo di vita [26].

3.4 Fasi della LCA

Nella Norma ISO 14040 [25] si riporta che *“la LCA è una tecnica di valutazione di aspetti ambientali e potenziali impatti associati a un prodotto, la quale consiste nel compilare un inventario di input e output rilevanti di un product system, analizzare i potenziali impatti ambientali associati a quegli input e output, interpretare i risultati delle fasi di analisi di inventario e valutare gli impatti in relazione all’obiettivo dello studio”*.

Per comprendere meglio la frase sopra riportata e la struttura che dovrebbe avere una completa analisi di ciclo di vita, è utile riportare alcune definizioni fornite dalla Norma ISO 14040:1997 [25]:

- Product: il prodotto scelto per lo studio.
- Product system: un insieme di unità di processo, connesse materialmente e energeticamente, che esegue una o più definite funzioni.
- Unità di processo: i più piccoli elementi considerati nell’analisi di inventario per i quali è possibile quantificare input e output.
- Input e output: possono essere flussi di semilavorati in ingresso e uscita dal sistema oppure flussi elementari scambiati direttamente con l’ambiente. Questi flussi generalmente nel caso di input sono materiali grezzi e flussi energetici in tutte le forme, mentre nel caso degli output sono rappresentati da emissioni di vario tipo.

Il “sistema” nell’ambito delle LCA è definito come “*un qualsiasi insieme di dispositivi che realizzano una o più precise operazioni industriali aventi una determinata funzione; esso è delimitato da appropriati confini fisici rispetto al sistema ambiente e con questo ha rapporti di scambio caratterizzati da una serie di input e output*” [21].

Inoltre, quando si parla di impatto ambientale di un *product system* è importante specificare come l’ambiente in questione sia tutto ciò che è definito al di fuori dei confini del sistema. Essi infatti sono l’interfaccia tra il *product system* e l’ambiente (o altri *product systems*).

La struttura dell’analisi di ciclo di vita di un prodotto viene descritta nella Norma ISO 14040.

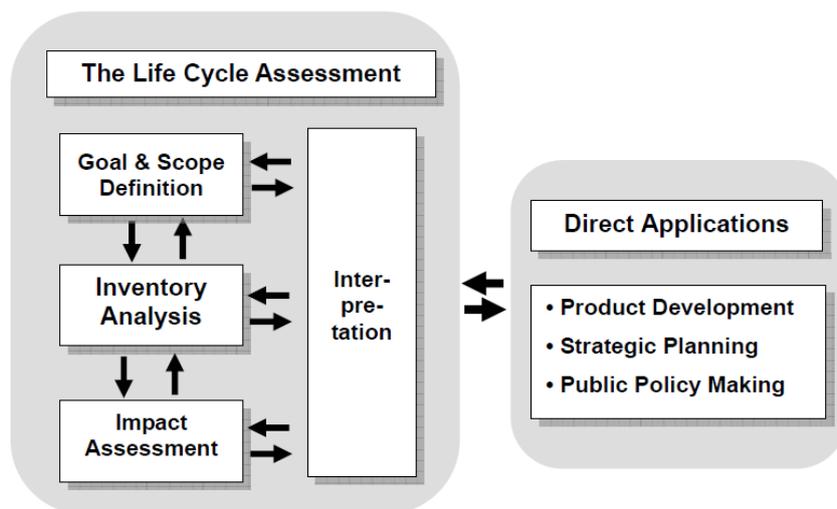


Figura 12 – Fasi dell’analisi di ciclo di vita (ISO 14040:1997).

Rispetto alla struttura elaborata dalla SETAC nel 1993, la LCA moderna segue una metodologia fondata su quattro macro fasi:

- Definizione degli obiettivi e campo di applicazione (3.4.1);
- Analisi di inventario (3.4.2);
- Valutazione degli impatti (3.4.3);
- Interpretazione dei risultati e miglioramenti (3.4.4).

3.4.1 Definizione degli obiettivi e campo di applicazione

La prima macro fase della LCA comprende la definizione degli obiettivi e del campo di applicazione dello studio. Questa prima fase è suddivisa in altre fasi, sviluppate nel dettaglio nel capitolo successivo, che possono essere riassunte come [26]:

- Obiettivo e finalità: esplicitazione dell'obiettivo perseguito, delle ragioni per condurre lo studio, con indicazione del destinatario a cui è rivolto.
- Unità funzionale: definizione dell'unità di misura funzionale, consistente con l'obiettivo e il campo di applicazione dello studio. Tutti i risultati dell'analisi, in termini di input e output, infatti sono matematicamente normalizzati all'unità di misura scelta come funzionale. I confronti vengono effettuati tra sistemi con la stessa unità funzionale.
- Confini del sistema: definizione delle unità di processo che devono essere incluse nell'analisi, giustificando le scelte di inclusione e di esclusione.
- Categorie di dati: dati primari, secondari, calcolati o stimati ai fini dello studio.
- Criteri per l'inclusione e esclusione degli output: esplicitazione dei criteri di massa, energia, ambientali o economici impiegati per la selezione dei flussi in ingresso e in uscita dal sistema.
- Qualità dei dati: caratterizzazione qualitativa e quantitativa dei dati.

3.4.2 Analisi dell'inventario

In seguito alla definizione dell'obiettivo dello studio e del campo di applicazione, è necessario sviluppare l'inventario di input e output normalizzati all'unità funzionale scelta per descrivere il sistema.

In sintesi, le fasi per giungere alla definizione e analisi dell'inventario sono:

- Flowchart: definizione grafica del sistema considerato e dei confini dello stesso.
- Raccolta dati: raccolta quantitativa e qualitativa dei dati riguardanti ogni unità di processo inclusa nei confini del sistema. I dati possono provenire dai produttori (dati primari), dalla letteratura (dati secondari), da database oppure da misure e stime effettuate dal conduttore dello studio.

I database rappresentano una fonte di informazioni molto ricca. Ecoinvent è il database di LCI più completo e utilizzato in commercio, conta infatti circa 18000 datasets [27].

- Allocazione: processo di partizione dei flussi di input e output nel sistema. Spesso viene considerato come un atto di ripartizione proporzionale del carico ambientale generato dalle unità di processo [28]. La norma ISO 14044:2006 suggerisce, se possibile, di evitare questa fase.
- Analisi di inventario: tutti i flussi considerati in ingresso e uscita dalle unità di processo vengono riferiti al flusso di riferimento dello studio mediante la normalizzazione all'unità funzionale.

3.4.3 Valutazione degli impatti

La fase successiva alla LCI è dedicata alla valutazione degli impatti dei risultati dell'inventario. Dopo aver selezionato le categorie di impatto più rappresentative del caso studio, la valutazione continua con le due fasi obbligatorie prescritte dalle norme [26]:

- **Classificazione:** i risultati dell'analisi di inventario vengono assegnati alle categorie di impatto in cui risultano più rilevanti.
- **Caratterizzazione:** il calcolo degli indicatori delle categorie di impatti consente, per ogni categoria, di confrontare il contributo delle varie sostanze sulla base di un unico indicatore rappresentativo dell'impatto in questione.

Le due fasi facoltative sono invece la Normalizzazione e la Pesatura.

3.4.4 Interpretazione dei risultati e miglioramenti

L'ultima fase di una LCA è l'interpretazione dei risultati dell'analisi di inventario e di impatto ambientale. L'obiettivo di questa parte di LCA è trarre le conclusioni, evidenziando i risultati ottenuti e identificando le questioni su cui è necessario condurre un approfondimento [28].

Si può dividere per semplicità in tre fasi:

- Identificazione delle questioni chiave;
- Valutazione della completezza e consistenza dei risultati;
- Conclusioni e raccomandazioni per il futuro.

3.5 Finalità della LCA

Le analisi di ciclo di vita rappresentano uno strumento fondamentale per aumentare la consapevolezza di produttori e consumatori nell'ambito dell'impatto ambientale e impiego delle risorse. Non sono solo un mezzo di salvaguardia ambientale, ma anche un mezzo decisionale per indirizzare scelte e strategie del futuro.

Dal punto di vista dei produttori, gli studi di LCA rappresentano un importante strumento aziendale sotto molti aspetti. In particolare consentono di [29]:

- effettuare comparazioni tra prodotti o materiali al fine di valutare il più conveniente;
- analizzare i processi di produzione per identificare i più impattanti e quindi attuare delle modifiche al fine di ridurre emissioni o sprechi;
- fornire informazioni fondamentali per le decisioni strategiche del futuro;
- accrescere la competitività sul mercato e la fiducia dei consumatori.

Per quanto concerne le istituzioni, la LCA è impiegata per:

- aiutare nella differenziazione dei prodotti nell'ambito delle etichettature (Ecolabel);
- raccogliere informazioni sui prodotti, al fine di valutarne gli impatti, identificare le questioni su cui intervenire ed emanare o aggiornare le norme;
- informare i consumatori sul ciclo di vita dei prodotti che acquistano;
- valutare gli effetti degli interventi attuati per la mitigazione degli impatti.

Il software usato per condurre l'analisi è OpenLCA versione 1.10.3 e il database a cui si è attinto è Ecoinvent 3.7.1.

4 Applicazione del metodo LCA ad un treno alimentato ad idrogeno

4.1 Introduzione al caso studio

Il progetto di treno ad idrogeno da cui si è preso spunto per effettuare questo studio LCA della carrozza propulsiva è stato sviluppato, come detto precedentemente, in collaborazione con FNM e Trenord, dall'azienda Alstom, leader nel campo ferroviario, che ha deciso di puntare sulla tecnologia dell'idrogeno per poter alimentare i treni del futuro. Il progetto si chiama H2iseO e prevede la sostituzione della flotta dei treni diesel di Trenord che operano sulla linea Brescia-Iseo-Edolo.

La tratta ferroviaria adibita al trasporto passeggeri è lunga 103 km. Si tratta di una ferrovia a binario semplice non elettrificato, che fornisce un servizio giornaliero continuativo tra le 7:07 e le 19:54.

La linea in questione è stata scelta perché presenta tutte le caratteristiche tecniche, territoriali e industriali necessarie per poter adattarsi all'introduzione dei primi treni alimentati ad idrogeno.

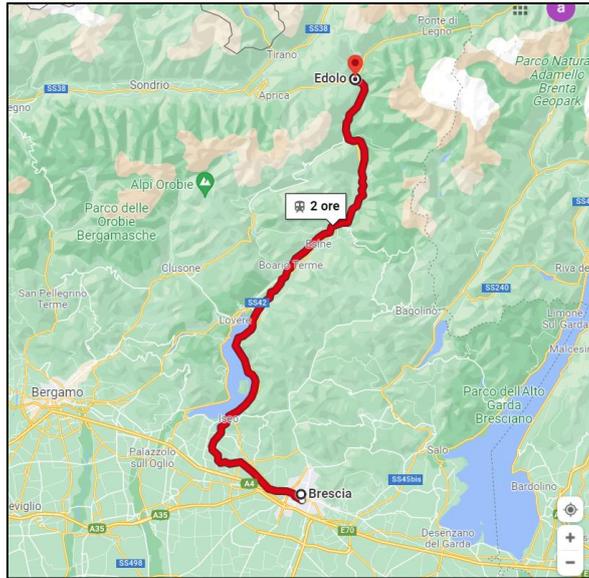


Figura 13 – Rappresentazione del percorso effettuato dal treno della linea Brescia-Iseo-Edolo.

Il tipo di treno progettato per percorrere la tratta è lungo circa 100 m ed è composto da cinque carrozze [2]. Quella centrale, costruita in modo diverso rispetto alle classiche carrozze, rappresenta il fulcro di questo studio.

Infatti, al suo interno, sono presenti quasi tutti i componenti principali che permettono la trazione del treno, come le otto batterie agli ioni di litio di tipo NCM e i cinquantasei serbatoi di idrogeno di tipo IV. La carrozzeria che li ospita è in acciaio, mentre i quattro stack di celle a combustibile a membrana elettrolitica polimerica (PEMFC) sono posizionati sul tetto.

Carrozza propulsiva		
Serbatoi idrogeno	56	items
Batterie	8	items
Stack PEMFC	4	items
Carrozzeria	1	items

Tabella 1 – Tabella riassuntiva dei componenti della carrozza propulsiva.

Il funzionamento è circa il medesimo dei progetti già sviluppati ed è stato già discusso nel paragrafo 2.3: la trazione viene alimentata dagli stack di celle a

combustibile che producono elettricità dalla conversione dell'idrogeno stoccato in pressione, ma anche da un sistema di accumulo, composto da batterie agli ioni di litio che si ricaricano durante le frenate e si scaricano nei momenti in cui c'è bisogno di più potenza, come nelle salite e nei momenti di accelerazione [30].

4.2 Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione dello studio

Essendo una tecnologia ancora in fase di sviluppo, non sono stati effettuati studi di analisi di ciclo di vita né di treni ad idrogeno nella loro interezza né tantomeno della sola parte propulsiva. Infatti, le informazioni disponibili sulle fasi di uso e fine vita non sono numerose; l'unico treno ad idrogeno nel mondo che è pronto per essere inserito nel mercato è il Coradia iLint di Alstom.

Ispirandosi al progetto reale di H2IseO, l'analisi è volta a valutare l'impatto ambientale dalla culla alla tomba della carrozza propulsiva di un treno ad idrogeno realistico.

4.2.1 Obiettivo e finalità

Gli studi di analisi di ciclo di vita rappresentano uno strumento fondamentale per quantificare gli impatti relativi a un prodotto o a un processo, nonché il mezzo per operare dei confronti e quindi delle scelte.

Il prodotto scelto non è l'intero treno ad idrogeno, ma la carrozza ospitante la parte propulsiva, per cui il fine principale è la valutazione degli impatti ambientali che essa genera nel suo intero ciclo di vita, focalizzandosi non

solo sul risultato completo, ma anche sugli impatti relativi ai processi di produzione, uso e disposizioni finali.

In particolare, la carrozza in esame include i sistemi principali della propulsione a idrogeno che differiscono da quelli classici della propulsione in ambito ferroviario, in modo anche da individuare il componente più impattante di questo nuovo tipo di motore, sul quale effettuare delle ulteriori analisi e indirizzare le ricerche future.

4.2.2 Unità funzionale

L'unità funzionale scelta per rappresentare i risultati dell'analisi di ciclo di vita della carrozza è il passeggero-km: unità di misura della domanda di trasporto. La grandezza si calcola come sommatoria dei prodotti del numero dei passeggeri trasportati per le relative percorrenze [31].

I risultati dell'analisi di inventario sono rapportati all'unità funzionale, ovvero rappresentano le quantità di materia ed energia spese e le emissioni generate per trasportare un passeggero per un km, tenendo conto dell'intero ciclo di vita della carrozza propulsiva.

Alla fine del processo di valutazione degli impatti, i risultati sono espressi come quantità di emissione rappresentativa della categoria d'impatto al passeggero-km, tenendo conto di tutte le fasi del ciclo di vita.

Anche se non si è preso in considerazione nello studio l'intero treno, si è scelta questa unità di misura ipotizzando che il treno si completi con altre 4 carrozze in grado di trasportare 183 passeggeri in media a viaggio sulla tratta considerata e con un numero di viaggi stimabili pari a 31.200 in tutta la vita tecnica del mezzo.

Vita utile	3000000	km
Passeggeri medi	183	items
Autonomia	600	km/pieno

Tabella 2 - Tabella con dati indicativi sulla vita del treno di Alstom.

4.2.3 Confini del sistema

I confini del sistema separano il sistema del prodotto dal sistema ambiente. I due sistemi hanno rapporti di scambio all'interfaccia in termini di input e output. Il confine delinea gli input e output che sono inclusi nell'analisi e quelli che invece sono da escludere.

Non avendo a disposizione molti dati reali, per effettuare l'analisi di ciclo di vita della carrozza propulsiva si è partiti effettuando una prima selezione dei componenti più rappresentativi del problema per identificare il "sistema carrozza". Si è deciso di includere nel modello la parte di carrozzeria adibita al trasporto del sistema idrogeno e tutti i componenti relativi alla propulsione: celle a combustibile di tipo PEM, serbatoi di idrogeno di tipo IV e batterie agli ioni di litio di tipo NCM.

Il sistema considerato è rappresentato dal diagramma riportato di seguito:

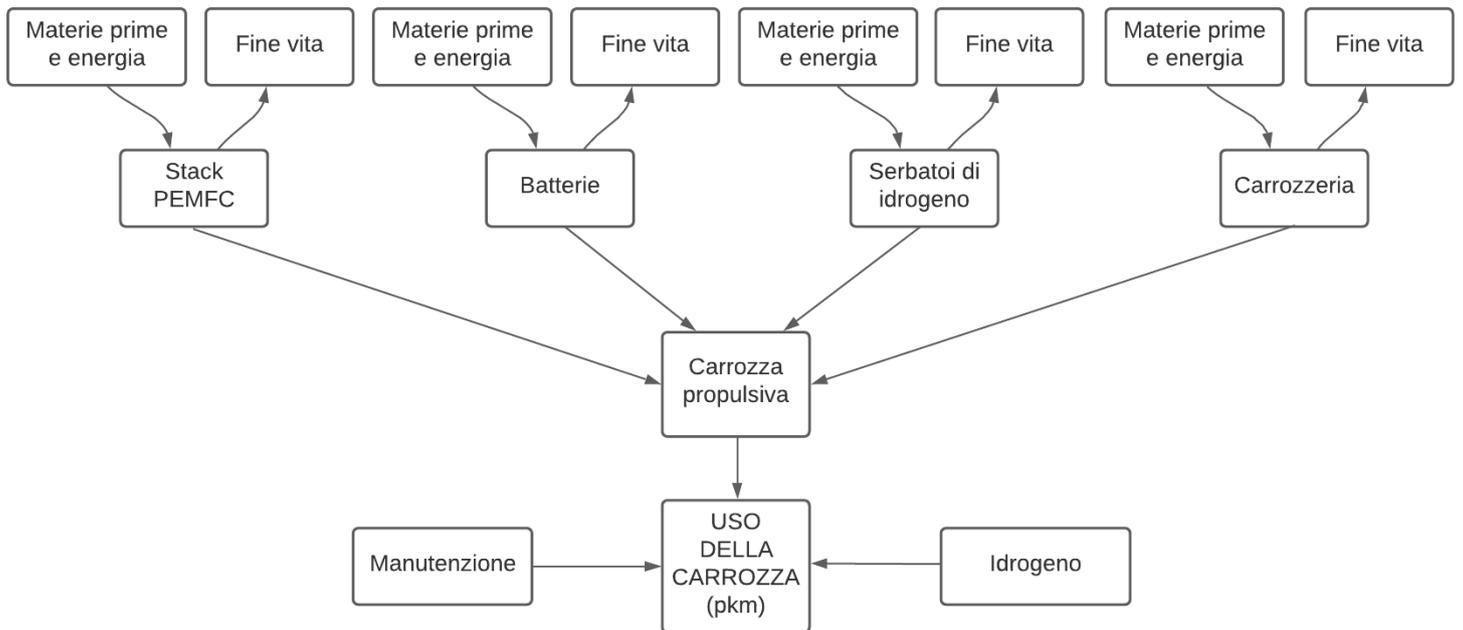


Figura 14 – Rappresentazione dei confini del sistema.

Nei confini si ritrovano le fasi di produzione, di uso e di fine vita della carrozza.

Per produrre la carrozza si sono considerati separatamente, mediante quattro processi, i quattro sistemi principali che la compongono.

Ognuno di questi processi include l'analisi dall'estrazione delle materie prime ai cancelli della fabbrica e i trattamenti di fine vita. Per ogni componente è stato scelto di inglobare le fasi di produzione e fine vita all'interno di un unico processo in modo che, nel momento in cui l'insieme dei pezzi, ovvero la carrozza, entra nel processo di uso, includa tutte le fasi della propria vita da poter riferire all'unità funzionale.

La "produzione della carrozza", il cui output è "1 carrozza", rappresenta il processo che unisce gli output dei processi precedenti. Infatti, comprende in input i quattro macro componenti modellati prima e il loro trasporto dal

luogo di produzione al luogo di assemblaggio. In questa fase è stato considerato solo il processo di saldatura a causa della mancanza di altre informazioni. Tuttavia, si tratta di operazioni trascurabili se si considera l'intera vita della carrozza. L'output "1 carrozza" possiede alle sue spalle tutta la storia riguardante la sua produzione e quella relativa al suo fine vita. Esso entra in input nell'ultimo processo, ovvero "uso della carrozza", rappresentato dall'unità funzionale dello studio a cui riferire tutti i risultati: il passeggero-km.

Nella fase d'uso, quindi, sono stati inseriti la carrozza modellata in precedenza, la manutenzione generale della carrozza (non dei singoli componenti) e il consumo di idrogeno.

Per quanto riguarda il combustibile, sono state incluse le materie prime dalla loro estrazione e l'elettricità necessaria per la conversione, mentre non è stata presa in considerazione la distanza tra il luogo di produzione dell'idrogeno e la stazione di rifornimento del treno, dal momento che il progetto originale prevede la costruzione di un impianto di SMR su aree e terreni di proprietà FNM e contigui alla stazione [32].

In generale, in quanto alle infrastrutture, si è deciso di escluderle quasi totalmente, considerando solo la loro fase operativa e includendo quindi soltanto i consumi energetici necessari alla realizzazione del processo in esame.

Non sono stati inclusi i processi relativi alle stazioni per il rifornimento del treno né le infrastrutture ferroviarie come rotaie e binari, sia perché la linea già esiste, sia per mancanza di informazioni precise legate al caso idrogeno.

Non è stato inserito nessun valore di Cut-off nella scelta degli input.

4.2.4 Categorie di dati

I dati necessari per svolgere una LCA possono essere di tre tipi:

- primari: dati raccolti sul campo, ottenuti da documenti o questionari inviati all'azienda produttrice per poter raccogliere le informazioni sul prodotto e sul suo ciclo di vita;
- secondari: dati di letteratura provenienti da studi precedenti oppure dati disponibili all'interno di database come Ecoinvent;
- dati frutto di stime e calcoli personali.

Essendo la LCA di una carrozza propulsiva ad idrogeno ispirata a un caso reale, sono stati considerati alcuni dati pubblici del progetto H2iseO come dati indicativi da cui partire.

In particolare:

	NUMERO	TIPO	CAPACITA' TOTALE	PESO TOTALE
STACK	4	PEMFC	1110 kW	2000 kg
BATTERIE	8	Ioni Li NCM	800 kWh	8800 kg
SERBATOI	56	IV, 350 bar	300 kg di idrogeno	x
CARROZZERIA	1	Acciaio bassolegato e alluminio	x	6651 kg 680 kg

Tabella 3 – Dati indicativi del treno di Alstom.

Nella Tabella 3 sono raccolti i dati che possono essere considerati primari, oltre alle informazioni riportate nella Tabella 2 sulla vita del treno, la capacità massima e l'autonomia.

La maggior parte dei dati inseriti in questo studio sono presi dalla letteratura e adattati al progetto in questione, sia per quanto riguarda i materiali sia per i processi di lavorazione degli stessi. Laddove non è stato possibile ottenere informazioni, si è deciso di non inserirli.

I dati sono stati adattati ed elaborati in base alle esigenze del progetto e verranno discussi nel dettaglio nel paragrafo 4.3.2 sulla raccolta dati. Il modello è stato costruito su OpenLCA 1.10.3, utilizzando i flussi e i processi del database Ecoinvent versione 3.7.1.

4.2.5 Criteri per l'inclusione e l'esclusione degli output

Nella fase di definizione del modello, per ogni processo sono state inserite tutte le informazioni che riguardano i materiali e l'energia necessari per la creazione dell'output e le eventuali emissioni. La mancanza di alcuni dati è dovuta alla difficile reperibilità delle informazioni. Nella creazione dei processi non è stato inserito alcun valore di cut-off.

4.2.6 Qualità dei dati

Il treno ad idrogeno, di cui si è stata analizzata la carrozza propulsiva, è progettato in Europa per viaggiare su una tratta italiana, per cui, ogni qual volta è stato possibile, i processi scelti per rappresentare i dati sono stati localizzati in Italia, in Europa o in una nazione europea.

I dati raccolti per modellare lo stack di celle a combustibile e i serbatoi sono quasi tutti provenienti da studi di letteratura europei, in modo da ottenere corrispondenza geografica e tecnologica. La batteria, nel software localizzata in Cina, è stata modellata con i dati di uno studio cinese. I dati della carrozzeria, come tutti quelli definiti "primari", sono invece stati resi pubblici dall'azienda.

Sui processi di produzione o smaltimento, alcune informazioni sono state dedotte dai siti internet di aziende produttrici o siti di divulgazione.

Invece, dal punto di vista cronologico, gli studi da cui si è attinto sono tutti stati pubblicati tra il 2015 e il 2021, in modo da ottenere informazioni aggiornate alle ultime scoperte. Gli unici dati che fanno riferimento a uno studio meno recente sono quelli relativi alla creazione della fibra di carbonio, necessaria per la produzione degli strati di diffusione del gas della cella a combustibile. Infatti questo studio risale al 1997.

Nella fase di uso e smaltimento, oltre a quelli “primari” e di letteratura, sono stati usati dati frutto di ipotesi e elaborazioni personali. La provenienza, comunque, è stata specificata per ogni dato riportato.

4.3 Analisi di inventario del caso studio

La fase di definizione degli obiettivi e del campo di applicazione dello studio rappresenta il punto di partenza per poter condurre la seconda fase della LCA: la compilazione e analisi dell’inventario. Ogni unità di processo inclusa nei confini del sistema necessita di input e output che la mettano in relazione con le altre unità di processo al fine di creare un sistema interconnesso. La fase di *Life Cycle Inventory* (LCI) prevede la raccolta dei dati, l’eventuale allocazione di alcuni flussi e la compilazione dell’inventario, ovvero la lista di tutte le risorse e materie prime che entrano nel sistema e tutte le emissioni che escono, in quantità tali da riferirle all’unità funzionale dello studio.

4.3.1 Flowchart

Il flowchart rappresenta i principali processi che sono stati modellati e seguiti per poter rappresentare il ciclo di vita del sistema propulsivo.

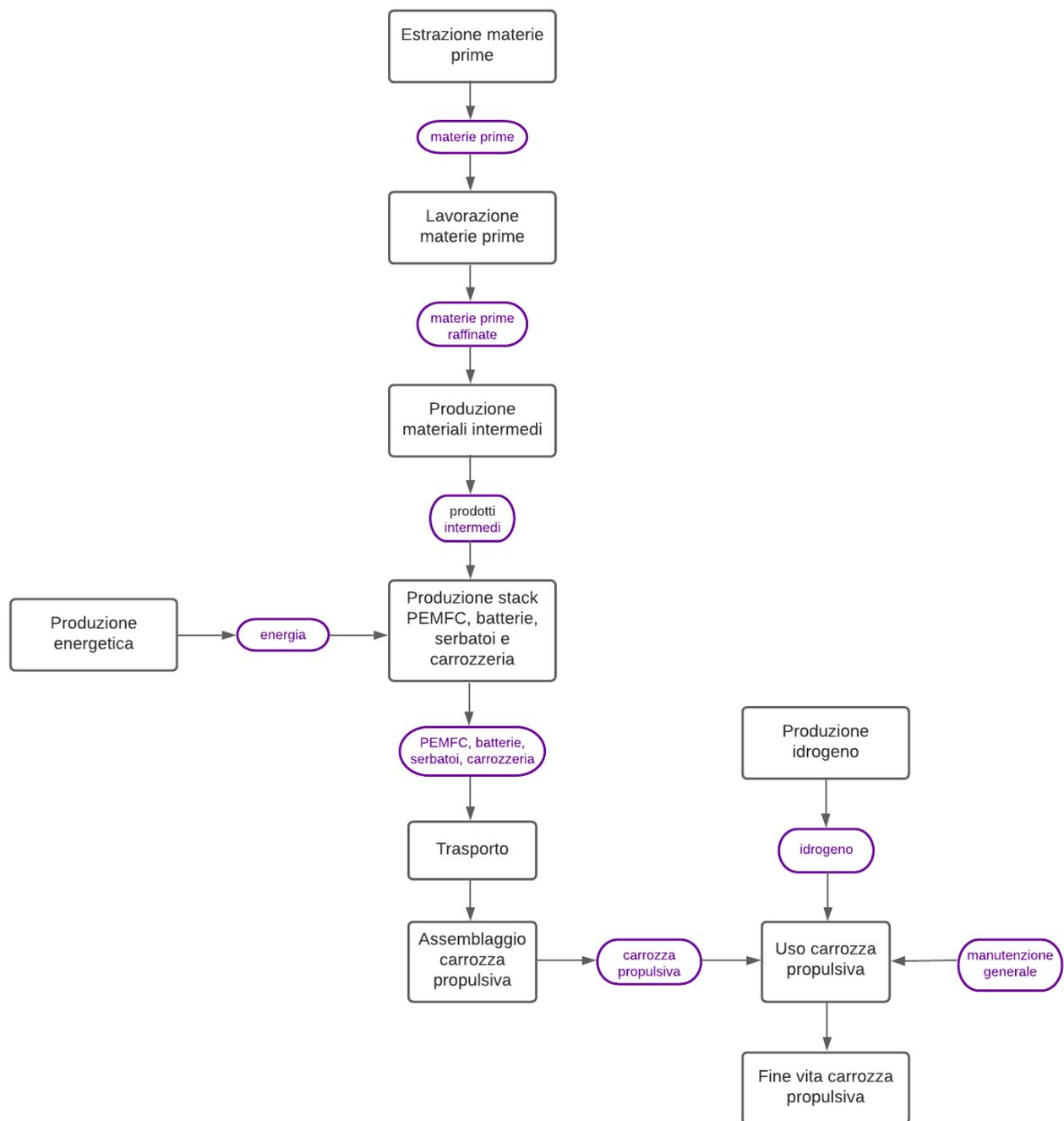


Figura 15 – Flowchart del sistema.

4.3.2 Raccolta dati

La fase di raccolta dati ha richiesto l'impegno maggiore per lo sviluppo del modello. I dati primari erano pochi, come si può notare dalla Tabella 3.

Per questo motivo è stata effettuata una lunga ricerca di informazioni, al fine di poter elaborare lo studio di analisi di ciclo di vita della carrozza propulsiva del treno ad idrogeno nel modo più realistico e consistente possibile. La ricerca si è focalizzata inizialmente sui componenti principali della carrozza per capirne le dimensioni, i materiali, i processi di formazione e le condizioni di smaltimento. I processi principali creati sono:

1. processo di produzione di uno stack PEMFC 1110 kW con BOP;
2. processo di produzione di una batteria agli ioni di litio NCM, 100 kWh;
3. processo di produzione di una carrozzeria;
4. processo di produzione di un serbatoio di tipo IV;

In seguito si è passati alle fasi di trasporto dei pezzi e assemblaggio della carrozza:

5. processo di produzione della carrozza;

Infine si sono esaminate le condizioni operative della carrozza:

6. processo di uso della carrozza.

Come spiegato in precedenza, nel modello creato su OpenLCA, nei processi 1-2-3-4 è stata inclusa sia la fase di produzione che i trattamenti di fine vita in modo che la carrozza entrasse nel processo finale di "uso della carrozza", che ha in output il flusso di riferimento "trasporto di 1 passeggero per 1 km", con alle spalle tutta la storia dalla culla alla tomba. È stata effettuata questa scelta per semplificare la forma e il peso del modello nel software.

Di seguito sono discussi tutti i processi e sottoprocessi che sono stati creati, riportando i relativi dati, le considerazioni compiute per effettuare delle scelte, i processi di produzione dei materiali e le approssimazioni effettuate.

In tutto il modello si è proceduto selezionando la localizzazione italiana (IT) quando possibile, altrimenti europea (RER), altrimenti globale (GLO) o specifica di un'altra nazione.

1) STACK PEMFC+BOP

Il cuore della propulsione del treno è rappresentato dalle celle a combustibile. Le informazioni di partenza sullo stack sono riportate nella Tabella 4:

Dati primari celle a combustibile		
Tipo	PEMFC	
Numero	4	items
Potenza	1110	kW totali
Peso	2000	kg totali

Tabella 4 – Dati di partenza stack PEMFC.

Per effettuare l'analisi "from cradle to gate", dalla culla (estrazione delle materie prime) ai cancelli della fabbrica, è necessario ricostruire la storia che ha portato alla creazione del prodotto. Si è deciso di considerare uno stack da 1110 kW di potenza netta invece che quattro stack da 280 kW, per cui ogni volta che si fa riferimento allo stack, si intende quello da 1110 kW. A questo proposito è stato creato un processo di produzione dello stack PEMFC il cui output è "1 stack PEMFC 1110 kW, con BOP" e gli input sono "8880 celle PEMFC", "1 BOP per stack PEMFC 1110 kW" e i trattamenti di fine vita. Per i primi due si è ricostruita la storia precedente fino alla culla.

Per descrivere il processo di creazione dello stack, è stata effettuata una ricerca nella letteratura al fine di capire la composizione di uno stack, la composizione di una cella, i processi di lavorazione dei materiali e l'energia necessaria.

Le celle a combustibile di tipo PEM sono molto adatte all'ambito dei trasporti, grazie alla rapidità di accensione e all'alta densità di potenza, per cui la maggior parte degli studi vagliati riguardava l'analisi di un veicolo elettrico alimentato da PEMFC, generalmente un'automobile. Essendo il treno un veicolo di dimensioni molto maggiori, la potenza necessaria per la trazione è molto più grande. Nella letteratura non sono stati trovati molti studi che analizzassero delle PEMFC di tali dimensioni; al massimo sono stati vagliati stack da 100 kW, mentre nel caso del treno si hanno quattro stack da circa 280 kW.

Lo studio a cui si è fatto riferimento per definire la composizione della cella elementare è lo studio di Evangelisti et al. [33], nel quale è stata portata avanti l'analisi di ciclo di vita di un'automobile a PEMFC. Lo stack analizzato da Evangelisti et al. è da 80 kW, alimentato da idrogeno stoccato all'interno di serbatoi di tipo IV. I dati dello studio sono riportati nella Tabella 5:

Caratteristiche stack 80 kW di Evangelisti et al. [33]		
Pt loading	0,6	mg/cm ²
Power stack	80	kW
kW stack/kW system	1,1	kW/kW
Specific mass	1,7	kg/kW
Operating T	80	°C
Active area each cell	0,2	m ²
Power density per active area	0,65	W/cm ²
Power per cell	125	W/cell
Voltage at rated power/cell	0,65	V
Current density	1	A/cm ²
Number of cells/kW	8	
Number of cells	640	

Tabella 5 – Dati dello stack PEMFC da 80 kW di Evangelisti et al. 2018 [33].

I dati primari sullo stack di cui necessita la carrozza propulsiva indicano una massa specifica di 1,8 kg/kW e lo stack PEMFC analizzato nello studio di Evangelisti et al. riporta quasi lo stesso valore di massa specifica, per cui si è deciso di modellare lo stack da 1110 kW sfruttando il numero di celle: conoscendo il valore di potenza per cella fornito, si è calcolato il numero di celle necessarie per erogare la potenza richiesta di 1110 kW. In questo caso si è ottenuto un numero di celle totali pari a 8880.

Caratteristiche stack azienda		
Potenza singolo stack	277,5	kW
Peso singolo stack	500	kg
Massa specifica	1,8	kg/kW
Potenza per cella	125	W/cell
Celle per 280 kW stack	2220	
Celle per 1110 kW stack	8880	

Tabella 6 – Dati di partenza per dimensionare lo stack per il treno ad idrogeno.

Ogni cella è formata da diversi strati sovrapposti:

- 1 membrana catalitica (*catalyzed membrane*);
- 2 strati di diffusione del gas (*gas diffusion layers* (GDL));
- 2 piastre bipolari (*bipolar plates* (BPP));
- 2 guarnizioni (*gaskets*).

Disponendo in serie le celle si ottiene uno stack, chiuso alle estremità da due piastre metalliche imbullonate (*end plates*).

La composizione della cella è stata presa uguale, nel peso e negli spessori dei vari strati, a quella dello stack di Evangelisti et al., tranne che per la membrana catalitica, sulla quale verranno fatte successive considerazioni. Sono stati inseriti anche i valori di elettricità necessaria per applicare la soluzione catalitica sulla membrana e per assemblare la membrana con i due GDL e il catalizzatore (MEA):

Processo di produzione di 1 cella PEMFC				
output	Cella PEMFC	1	items	source
input	Piastre bipolari	148,9	g	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	Piastre finali	37,7	g	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	GDL	23,0	g	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	Gaskets	5,2	g	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	Membrana	1,95	g	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	Catalizzatore	0,0188	g	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	Elettricità assemblaggio MEA	0,04	kWh	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	Elettricità applicazione catalizzatore	0,63	kWh	Evangelisti et al. (2018) [33]

Tabella 7 – Dati di input nel modello OpenLCA per processo di produzione di 1 cella PEMFC.

La quantità di ogni materiale o energia che compone lo stack è riportata nella

Tabella 8:

Processo di produzione di 1 stack PEMFC da 1110 kW				
output	Cella PEMFC	8880	items	source
input	Piastre bipolari	1322,2	kg	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	Piastre finali	334,8	kg	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	GDL	204,2	kg	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	Gaskets	46,2	kg	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	Membrana	17,3	kg	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	Catalizzatore	166,5	g	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	Elettricità assemblaggio MEA	355,2	kWh	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	Elettricità applicazione catalizzatore	5594,4	kWh	Evangelisti et al. (2018) [33]

Tabella 8-- Masse dei materiali componenti 1 stack da 1110 kW.

Per ognuno degli input sopra riportati sono stati creati i processi di produzione descritti di seguito.

I due dati di energia elettrica a basso voltaggio fanno riferimento al processo di assemblaggio della MEA e al processo di applicazione della soluzione catalitica sulla membrana. Non sono state incluse altre informazioni sull'assemblaggio perché non sono state trovate.

Il processo di assemblaggio della MEA consiste nel pressare a caldo, circa 100°C per 124 s, la membrana catalitica tra i due strati di diffusione del gas e fustellare per ottenere le dimensioni volute [33]. Sarà composta alla fine

da una membrana, due strati catalitici e due strati di diffusione del gas. L'energia richiesta per effettuare il procedimento è 0,04 kWh/cella.

Il secondo dato di elettricità riportato, 0,63 kWh/cella, include la somma dell'energia spesa per la creazione della soluzione catalitica (0,58 kWh/cella) e quella per la fase di applicazione della stessa sulla membrana (0,05 kWh/cella). È necessario, infatti, disperdere il catalizzatore (platino) sulla superficie della membrana per aumentare il rateo della reazione [33]. Il processo considerato per la preparazione della soluzione catalitica prevede la macinatura con mulino a biglie di diversi materiali quali platino, carbon black, Nafion, acqua deionizzata e metanolo. I materiali utilizzati per creare la soluzione non sono stati considerati poiché ricostruire il processo chimico per creare la soluzione andava fuori dall'intento dello studio, considerando le piccole quantità in gioco. È stata inserita quindi solo l'elettricità richiesta per la realizzazione del processo.

Il secondo valore di elettricità riportato riguarda l'applicazione della soluzione catalitica. Essa avviene mediante spray, utilizzato dalla parte dell'anodo, direttamente sulla membrana e asciugato, mentre dalla parte del catodo viene trasferito attraverso un substrato aggiuntivo di poliestere che viene poi rimosso. Per fissare il catalizzatore i due strati catalitici vengono riscaldati e pressati a caldo [33]. Anche in questo caso è stato incluso solo il dato di energia elettrica.

L'elettricità nel modello è stata inserita come flusso "Electricity, low voltage", con provider "market for electricity, low voltage, Cutoff, S, IT" del database Ecoinvent.

Ogni volta che si è inserito un dato di energia elettrica a basso o medio voltaggio, si è scelto il mercato elettrico italiano, tranne che per le batterie. Il dataset fa riferimento al mercato italiano del 2014 e include gli input elettrici, prodotti nel Paese selezionato o importati, trasformati a basso voltaggio, oltre che la linea di trasmissione. Le tecnologie di trasmissione e

distribuzione dell'elettricità considerati sono rappresentative della media italiana.

Non sono state incluse le spese energetiche necessarie per completare l'assemblaggio dello stack per mancanza di informazioni. Si ritiene comunque che non impattino in modo consistente né nel ciclo di vita di uno stack né nel ciclo di vita di un impianto di assemblaggio di celle a combustibile destinato a funzionare per decenni.

Catalizzatore

Affinché avvenga il trasporto degli ioni H^+ dall'anodo al catodo, la membrana deve essere ben idratata. Per questo motivo è necessario cercare di tenere le temperature al di sotto dei 100°C. Le basse temperature però implicano anche un basso rateo della reazione elettrochimica, per cui è necessaria la presenza di un catalizzatore di ottima qualità. Il platino è il più usato perché grazie ad esso si riescono ad ottenere ottimi risultati. Gli svantaggi nell'impiego del platino sono principalmente due: l'impatto ambientale causato dalla sua estrazione e lavorazione e i problemi di avvelenamento da molecole carboniose. Tuttavia rimane ancora il catalizzatore più utilizzato nel mercato delle PEMFC [33].

Il dato scelto per inserire il platino nella cella è preso da A. Simons e C. Bauer (2015) [34], perché rappresenta il valore documentato più piccolo che si è riusciti a trovare. Il dato riportato nelle *Supportive Information* (SI) è di 0,15 g/kW di platino, considerando un valore nella cella di 0,125 mg/cm². In questo modo in tutto lo stack da 1110 kW si ritrovano 167 grammi di platino. In A. Simons e C. Bauer (2015) [34] si riporta anche che la quantità di platino ha un impatto molto negativo sui costi e sulla LCA, per cui è stato ridotto.

Lo studio di L. Usai et al. (2021) [35] invece riporta un dato secondo cui in uno stack da 100 kW si possono considerare circa 30 g di platino, con 0,32

mg/cm². Applicando una proporzione lineare, per uno stack da 1110 kW, si otterrebbero 333 g, che nell'analisi degli impatti rappresenterebbero la quota maggiore.

Il platino è un metallo prezioso che proviene principalmente dal Sud Africa, il quale detiene il 70-80 % della produzione mondiale, mentre la restante parte appartiene alla Russia [33]. Il flusso scelto per rappresentare il catalizzatore su OpenLCA è il flusso di Ecoinvent “metal catalyst for catalytic converter” prodotto dal processo “platinum to generic market for metal catalyst for catalytic converter | Cutoff, S, GLO”.

Processo di produzione di 1 kg di catalizzatore				
output	Catalizzatore	1	kg	
input	metal catalyst for catalytic converter	0,426	kg	Evangelisti et al. (2018) [33]

Tabella 9 – Processo di produzione di 1 kg di catalizzatore.

Il processo è localizzato come “Global” (GLO).

Membrana

La membrana in una cella a combustibile ha il ruolo di separare le reazioni di ossidazione e di riduzione, permettendo il passaggio soltanto degli ioni H^+ . Il materiale di cui è fatta la maggior parte delle membrane è il Nafion della DuPont. La sua struttura porosa permette il passaggio dei protoni ma, grazie alla scarsa conduttività, impedisce quello degli elettroni che invece fluiscono nel circuito esterno.

La massa della membrana nella cella è stata calcolata partendo dal dato fornito nello studio di Evangelisti et al. [33] in cui veniva riportata la massa di membrana catalizzata, sottraendo ad essa la massa di platino.

Processo di produzione di 1 kg di membrana polimerica				
output	Proton exchange membrane	1	kg	source
input	sulfuric acid	0,426	kg	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	tetrafluoroethylene	0,574	kg	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	extrusion, plastic film	1,027	kg	Simons e Bauer (2015) [34]

Tabella 10 – Input del processo di produzione della membrana polimerica.

Non ci sono dataset LCI sul Nafion in Ecoinvent. Il suo processo di formazione prevede la copolimerizzazione di una quantità variabile di sostanza perfluoroalchilica con il tetrafluoroetilene (TFE). Evangelisti et al. (2018) [33] riportano la composizione utilizzata per modellare la membrana, sulla base dello studio precedente di Simons e Bauer (2015) [34]. Si è utilizzato dell'acido solforico e del tetrafluoroetilene, le cui quantità sono riportate nella Tabella 10.

Per quanto riguarda l'acido solforico, è stato scelto il processo di produzione "sulfuric acid production, RER" che si basa su dati primari raccolti nel 2011 in Europa e modellati effettuando una media annuale. Sono inclusi tutti i dati relativi all'estrazione, alla lavorazione e alle emissioni. L'attività descritta è "from cradle to gate".

Il tetrafluoroetilene invece viene prodotto dal processo "tetrafluoroethylene production, RER", creato sulla base di dati non riferiti a un luogo preciso ma molti dei quali sono stati raccolti tra il 2011 e il 2015 in una grande fabbrica tedesca.

Per considerare il processo di produzione della membrana è stato usato il flusso "extrusion, plastic film" derivante dal processo "extrusion, plastic film, RER". 1 kg di questo processo indica 0,976 kg di film plastici estrusi. Per cui per produrre 1 kg di membrana è necessario un flusso di estrusione di film plastici di $1/0,976$ kg. Nel processo sono incluse tutte le attività relative al processo di estrusione, elettricità ed energia per i sistemi ausiliari, mentre non è incluso il materiale estruso.

Gasket

I gaskets sono i due strati che servono a sigillare la membrana alle piastre bipolari, evitando perdite di idrogeno. Sono composti da una matrice siliconica che viene pressata e tagliata per ottenere le dimensioni volute. Il processo di produzione del gasket modellato su OpenLCA è il seguente:

Processo di produzione di 1 kg di Gasket				
output	Gasket	1	kg	source
input	seal, natural rubber base	1	kg	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	injection moulding process	1/0,994	kg	Stima personale

Tabella 11 – Dati del processo di produzione di 1 kg di Gasket.

Si è scelto di selezionare come materiale un composto a base di gomma usato come guarnizione, il cui processo di produzione, selezionato dal database Ecoinvent, è “seal production, natural rubber based, DE”, localizzato in Germania perché i dati provengono da un produttore tedesco. Questo dataset non include i consumi energetici spesi per produrlo e, per mancanza di informazioni, non sono stati inseriti.

Il processo per creare il gasket invece è stato descritto inserendo 1/0,994 kg di processo di Ecoinvent “injection moulding”, ovvero stampaggio a iniezione di materie plastiche. I dati per creare il processo provengono da diverse compagnie europee e svizzere.

Gas Diffusion Layers

Gli strati per consentire la diffusione del gas verso lo strato catalitico si chiamano GDL. Essi sono composti principalmente da fibra di carbonio e politetrafluoroetilene [33]. La fibra di carbonio è fondamentale perché

consente di ottenere alti valori di conduttività elettrica e una porosità >70% [34].

Il processo per generare 1 kg di GDL su OpenLCA è stato modellato nel modo seguente:

Processo di produzione di 1 kg di GDL				
output	Gas diffusion layers	1	kg	source
input	carbon fiber	0,85	kg	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	carbon black	0,05	kg	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	PTFE	0,1	kg	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	thermoforming	1,024	kg	Evangelisti et al. (2018) [33]

Tabella 12 – Dati del processo di produzione di 1 kg di GDL.

Sullo studio di Evangelisti et al. [33] si riporta che il materiale in tessuto di carbonio è composto dal 10% di politetrafluoroetilene (PTFE) e dal 5% di carbon black. Il processo selezionato per tenere conto della manifattura del GDL è il processo di termoformatura, una tecnica di stampaggio a caldo, preso da Ecoinvent: “thermoforming, with calendering, RER”.

Per quanto riguarda il politetrafluoroetilene, esso è un polimero appartenente alla classe dei perfluorocarburi (PFC) derivante dall'omopolimerizzazione del tetrafluoroetilene. Nel database Ecoinvent non è presente un proxy che lo descriva. Per questo motivo è stato creato un processo di produzione di 1 kg di politetrafluoroetilene, i cui dati sono riportati nella Tabella 13:

Processo di produzione di 1 kg di PTFE				
output	1 kg di PTFE	1	kg	
input	water deionised	0,03	kg	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	tetrafluoroethylene	0,97	kg	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	ammonium sulphate	0,057	kg	Evangelisti et al. (2018) [33]

Tabella 13 – Dati del processo di produzione di 1 kg di PTFE.

Nel processo andava inserito anche un valore di 0,00426 kg di triossido di boro, ma non era presente nel database. Dato il valore molto piccolo non è stato incluso. Non sono state trovate informazioni sulle spese energetiche del processo di produzione, quindi non sono state inserite. Tutti e tre i flussi sono prodotti da processi localizzati in Europa.

Il carbon black è una polvere molto fine, principalmente composta da carbonio. La produzione avviene all'interno di una fornace ed è descritta all'interno del database Ecoinvent nella sezione "Tecnologia" del processo "carbon black production, GLO". Non essendoci la possibilità di localizzarlo in Europa è stato scelto Globale.

Ultimo flusso necessario per modellare la produzione di 1 kg di GDL è la fibra di carbonio. Si è dovuto valutare se servirsi del processo di creazione presente su Ecoinvent oppure creare un processo sulla base di alcuni dati di letteratura.

In base ai dati dello studio di O.M De Vegt et al., 1997 [36], si è ricostruito il processo di formazione: il poliacrilonitrile (PAN) viene riscaldato fino a 220°C per l'ossidazione e poi fino a 1000 °C per il processo di carbonizzazione. Il 50-55% del PAN originale viene convertito in fibra di carbonio. Si riporta che l'energia in forma di calore necessaria è 2,52 MJ/kg, mentre l'energia totale richiesta è 7,56 MJ/kg. Non essendo specificato quanto di questa quota è energia termica e quanta è energia elettrica, si è considerata la quota di 2,52 MJ/kg termica e la restante parte elettricità.

Processo di produzione di 1 kg di fibra di carbonio				
output	1 kg Carbon fiber production	1	kg	
input	PAN	1,818	kg	O.M De Vegt et al., 1997
input	heat consumption, oxidation and carbonization	2,520	MJ	O.M De Vegt et al., 1997
input	electricity, medium voltage	5,040	MJ	O.M De Vegt et al., 1997

Tabella 14 – Dati per produrre 1 kg di fibra di carbonio.

L'elettricità è stata scelta di medio voltaggio, presa dalla rete elettrica italiana. La produzione di energia termica è stata affidata al processo "market for heat, district or industrial, natural gas, RER".

Il PAN, non essendo presente nel database, è stato ricreato seguendo sempre le indicazioni di O.M De Vegt et al. [36], come riportato nella Tabella 15:

Processo di produzione di 1 kg di PAN				
output	1 kg PAN	1	kg	O.M De Vegt et al., 1997 [36]
input	acrylonitrile	1	kg	O.M De Vegt et al., 1997 [36]
input	ammonia	0,4	kg	O.M De Vegt et al., 1997 [36]
input	propylene	1	kg	O.M De Vegt et al., 1997 [36]

Tabella 15 – Dati riferiti alla produzione di 1 kg di PAN.

Per ogni kg di acrilonitrile sono necessari 1 kg di propilene e 0,4 kg di ammonia [36]. Non specifica quanto acrilonitrile si perde nel processo di conversione in PAN, per cui è stato ipotizzato il 100% di conversione. Non sono fornite informazioni sui consumi energetici o emissioni.

I providers scelti per i tre componenti sono:

- propylene production | propylene, RER;
- ammonia production, steam reforming, liquid | ammonia, anhydrous, liquid | RER;
- Sohio process | acrylonitrile | RER: questo processo è il più diffuso nella produzione di acrilonitrile e prevede la reazione catalitica di propene, ossigeno (come aria) e ammoniaca in acrilonitrile all'interno di un reattore a letto fluido operante a temperature di 400 – 500°C. Il dataset include input di materiali, energia ed emissioni.

Se invece si vuole utilizzare il dataset sulla fibra di carbonio, su Ecoinvent si trova “carbon fibre reinforced plastic, injection moulded | GLO”, che indica una fibra di carbonio adatta all’ambito aeronautico. Valutando l’impatto GWP100 di due tipi di GDL, differenti solo per il tipo di fibra di carbonio, si è notato che il processo di produzione della fibra di carbonio di Ecoinvent ha un impatto circa cinque volte maggiore del processo modellato con i dati di letteratura. Si è deciso di utilizzare il meno impattante, anche se probabilmente meno completo.

Piastre bipolari

Le piastre bipolari hanno diverse funzioni in una cella: servono a distribuire combustibile e ossidante, facilitare la gestione dell’acqua e del calore, separare le celle nello stack e aiutare il trasporto della corrente [33]. Per assolvere alla loro funzione presentano delle scanalature che possono essere di vario tipo, come nella Figura 16.

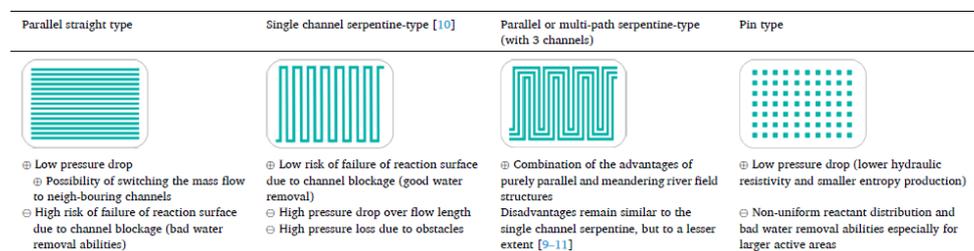


Figura 16 - Diversi tipologie di piastre bipolari [37].

Le piastre bipolari (BBP) possono essere di due tipi: metalliche o grafittiche. Dagli studi sembrerebbe che le piastre bipolari in metallo non siano molto adatte per PEMFC operanti più di 8000 ore, come si pensa possa accadere nel breve futuro con le automobili alimentate da PEMFC. Infatti si dovrebbero utilizzare molte sostanze anticorrosione e rivestimenti da adattare alle BBP. Inoltre, di solito, quelle metalliche occupano più spazio

rispetto a quelle grafite, questione importante nel settore automotive, anche se consentono una densità di potenza maggiore [37].

Grazie alla durata maggiore riscontrata nelle BPP grafite, normalmente per stack PEMFC di grandi dimensioni, queste ultime sono preferite. Per questi motivi, si è deciso di considerare nella cella a combustibile delle BPP in materiale composito grafite.

Processo di produzione di 1 kg di BPP				
output	Bipolar plates	1	kg	
input	Electricity	21,5	kWh	Evangelisti et al. (2018) [33][33]
input	Graphite composite material	1	kg	Evangelisti et al. (2018) [33]

Tabella 16 – Dati di input per produrre 1 kg di piastre bipolari.

L'elettricità, medio voltaggio acquistata dalla rete italiana, serve per produrre le BPP e il valore è stato calcolato in base ai dati di Evangelisti et al. (2018) [38]. Le attività incluse sono la definizione della forma richiesta, lo stampaggio a compressione a 160°C e la cottura del materiale a 175°C per 15 minuti.

Per quanto riguarda il materiale, il composto grafite scelto è stato modellato sui dati di M.C. Hsiao et al. [38]:

Processo di produzione di 1 kg di materiale composito grafite				
output	graphite composite material	1	kg	
input	bisphenol A epoxy vinyl ester resin	0,225	kg	M.C. Hsiao et al. [38]
input	graphite, battery grade	0,7	kg	M.C. Hsiao et al. [38]
input	styrene	0,0105	kg	M.C. Hsiao et al. [38]
input	magnesium oxide	0,0054	kg	M.C. Hsiao et al. [38]

Tabella 17 – Dati di input nel processo di produzione di 1 kg di composito grafite.

Non sono state considerate emissioni e consumi energetici relativi al processo di produzione per mancanza di informazioni. Inoltre, non sono state incluse due sostanze: l'ossido di magnesio e il TBPB per mancanza di dati sul database, ma comunque sono presenti nel composto in quantità minime. Si può considerare anche il composto come 70% grafite e 30% vinilestere. Il processo di produzione del vinilestere è "bisphenol A epoxy based vinyl ester resin production | RER" e descrive il processo di produzione della resina dall'estrazione delle materie prime ai cancelli della fabbrica.

Per la grafite è stato scelto, come suggerito nello studio di M.C. Hsiao [38], il processo di "graphite production, battery grade | CN", dataset che include la produzione di grafite per batterie. Questo tipo di grafite possiede un'intensità energetica molto maggiore della grafite industriale. Il processo di produzione consta di alcune incertezze, ma viene descritto nella sezione "Tecnologia" del processo di Ecoinvent. I consumi energetici associati sono inclusi e il mix energetico è quello cinese.

Piastre finali

Le piastre finali sono due per stack e vengono imbullonate alle estremità per tenerlo sigillato. Sono di solito metalliche, per questo è stato scelto di definirle in alluminio. Sono inclusi anche i bulloni. Il valore di g/cella di Evangelisti et al. (2018) [33] è stato calcolato considerando uno spessore di 20 mm per piastra.

I dati del processo di produzione di 1 kg di piastre finali sono:

Processo di produzione di 1 kg di piastre finali				
output	End plates	1	kg	
input	aluminium, primary, cast alloy slab	1	kg	Evangelisti et al. [33]
input	sheet rolling, aluminium	1	kg	Stima personale

Tabella 18 – Dati di input nel processo di produzione di 1 kg di piastre finali.

Le bramme di alluminio vengono create mediante processo di colata continua. Il processo include il pretrattamento del metallo, recupero e movimentazione dei rottami, produzione della lega, trattamento dei metalli, colata, segatura e raffreddamento. Per tenere conto del processo di stampaggio della piastra, è stato deciso di inserire un processo di “sheet rolling aluminium, RER” che include le laminazioni a caldo e freddo, i trattamenti superficiali e le rifiniture finali.

Balance of Plant (BOP)

Per completare la descrizione del sistema PEMFC è stato inserito anche il BOP dello stack, ovvero l’insieme dei componenti necessari per gestire aria, acqua, energia termica e combustibile. Il BOP per lo stack da 1110 kW è stato ottenuto mediante una proporzione lineare a partire dai dati riportati nello studio di Evangelisti et al. (2018) [33] su un BOP di uno stack da 80 kW.

Il processo di “produzione di un BOP per stack PEMFC 1110 kW” è stato modellato prendendo come flusso di riferimento “1 BOP per stack PEMFC 1110 kW”:

Processo di produzione di 1 BOP			
output	BOP per stack PEMFC 1110 kW	1	items
input	Aluminium oxide (alumina)	97,1	kg
input	CH: pump 40W	485,6	pcs
input	GLO: fan,at plant	34,7	kg
input	Nafion	4,2	kg
input	Radiators	152,6	kg
input	Air compressor, screw-type, 4 kw	1,9	pcs
input	Air filter, in exhaust air valve	13,9	pcs
input	Steel, chromium steel 18/8	25,0	Kg

Tabella 19 – Dati del processo di produzione del BOP.

Al posto del Nafion è stato inserito del politetrafluoroetilene, mentre i radiatori sono stati scelti di alluminio riciclato.

Fine vita Stack

Su OpenLCA i flussi “waste”, che indicano dei rifiuti entranti in un processo di trattamento, vanno inseriti come output, mentre i flussi “product”, che sono prodotti da un processo di trattamento, vanno inseriti negli input.

L’approccio metodologico usato per definire la fase di fine vita è l’approccio Cut-off, ovvero il modello termina con la raccolta e il trattamento dei rifiuti, escludendo la fase di riciclo e realizzazione di un nuovo prodotto [39]. Il riciclo rientra nel modello in alcuni flussi di prodotti secondari in input.

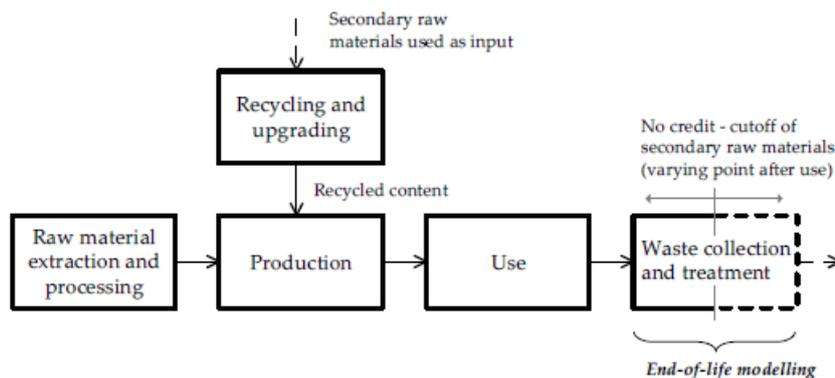


Figura 17 – Confini del modello in base all'approccio cut-off [39].

Per alcuni componenti non è stato trovato un processo su Ecoinvent che potesse rappresentarne lo smaltimento, per cui non sono stati inseriti dati riguardanti il fine vita di Nafion, filtri dell’aria, piastre bipolari in materiale composito e GDL in fibra di carbonio. Il processo di trattamento del platino non è stato inserito perché c’è solo il processo di riciclo completo.

I compressori dell’aria inseriti nel modello invece includono già la fase di smaltimento.

Sono stati considerati i trattamenti dell'acciaio presente nel BOP (pompe di circolazione [40] e una quota generica) e dell'alluminio presente sia nel BOP, in ventole e radiatori, che nelle piastre finali dello stack. Per l'acciaio è stato considerato una percentuale di riciclo del 95%, mentre per l'alluminio del 90%.

Nel modello, il trattamento di fine vita dell'acciaio è stato rappresentato dai processi "treatment of waste reinforcement steel, recycling, CH", per la quota da riciclare, e "treatment of waste reinforcement steel, collection for final disposal, CH" per la quota da smaltire.

Per quanto riguarda l'alluminio, sono stati usati i processi "treatment of aluminium scrap, post-consumer, by collecting, sorting, cleaning, pressing, RER", per descrivere la preparazione degli scarti per il riciclo, e "treatment of waste aluminium, sanitary landfill, CH", per la quota da smaltire.

Il trattamento scelto per i gaskets è "treatment of waste sealing sheet, polyethylene, municipal incineration with fly ash extraction, CH", anche se si tratta di guarnizioni in polietilene anziché a base di gomma naturale.

In conclusione, il processo di produzione dello stack PEMFC più il BOP, includendo le fasi di produzione e fine vita, è stato modellato su OpenLCA come riportato nella Figura 18:

Inputs/Outputs: Produzione di Stack PEMFC+BOP 1110 kW, con EoL

Inputs			
Flow	Category	Amount	Unit
Fe aluminium scrap, post-consumer, prepared for melting	242:Manuf...	0.9*522	kg
Fe BOP 1110 kW fuel cell stack		1.00000	Item(s)
Fe PEMFC, single cell		8880.000...	Item(s)
<hr/>			
Outputs			
Flow	Category	Amount	Unit
Fe Stack Pemfc 1110 kW+BOP		1.00000	Item(...
Fe waste aluminium	382:Waste t...	0.1*522	kg
Fe waste reinforcement steel	382:Waste t...	0.95*1346	kg
Fe waste reinforcement steel	382:Waste t...	0.05*1346	kg
Fe waste sealing sheet, polyethylene	382:Waste t...	46.20000	kg

Figura 18 – Processo di produzione e EoL dello stack PEMFC+BOP modellato su OpenLCA.

Il flusso evidenziato in grassetto è il flusso di riferimento dell'intero processo che entra come input nel processo di "produzione della carrozza".

2) BATTERIE AGLI IONI DI LITIO DI TIPO NCM

Altro componente fondamentale della carrozza propulsiva è il sistema di batterie. Le batterie scelte sono agli ioni di litio di tipo NCM, ovvero con nichel, cobalto e manganese che compongono il catodo. La formula che le descrive è $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$, le cui incognite delineano le rispettive quantità e quindi i diversi tipi di NCM [41]. Questo tipo di batteria viene molto utilizzata per le automobili elettriche grazie alla sua elevata densità energetica. Si riporta che fino al 2018 le batterie NCM rappresentavano il 77% delle batterie utilizzate nelle auto elettriche in Cina [42].

Il problema principale legato alle batterie è l'impatto ambientale, associato alla fase di produzione, ma soprattutto alla fase di fine vita, i cui trattamenti generano rifiuti inquinanti e tossici.

I dati primari da cui si è partiti per la definizione del modello del sistema batteria sono riassunti nella Tabella 20:

Tipo batterie	Li-Ion NCM	
Numero	8	
Capacità l'una	100	kWh
Peso l'una	1100	kg

Tabella 20 – Dati primari relativi alle batterie della carrozza propulsiva.

Nel database Ecoinvent sono presenti i seguenti processi:

- anode production, graphite, for lithium-ion battery, CN;
- cathode production, LiMn2O4, for lithium-ion battery, CN.

Tuttavia il processo di produzione del catodo fa riferimento a una batteria agli ioni di litio a ossidi di manganese, differente da quella da installare sulla carrozza propulsiva. Si è preferito quindi ricercare in letteratura degli studi che prendessero in esame una batteria agli ioni di litio NCM.

Lo studio di X. Sun et al. (2020) [43] ha rappresentato la base per la definizione del processo di produzione della batteria, includendo materiali e flussi energetici.

I dati dello studio [43] sulla composizione del sistema batteria da 72,5 kWh di capacità sono i seguenti:

Battery type	NCM 622			X. Sun et al. 2020 [43]
Energy capacity	72,5	kWh		X. Sun et al. 2020 [43]
Cathode active material	NCM 622			X. Sun et al. 2020 [43]
Anode active material	graphite			X. Sun et al. 2020 [43]
Cicli/anni	2000/10			X. Sun et al. 2020 [43]
	Massa (kg)	Percentuale	kg/kWh	source
Cathode (NCM622)	168,3	0,267	2,32	X. Sun et al. 2020 [43]
Anode (graphite)	96,2	0,153	1,33	X. Sun et al. 2020 [43]
Binder (PVDF)	12	0,019	0,17	X. Sun et al. 2020 [43]
Copper	54,1	0,086	0,75	X. Sun et al. 2020 [43]
Wrought aluminum battery pack	113,4	0,18	1,56	X. Sun et al. 2020 [43]
Wrought aluminum cell	31,5	0,05	0,43	X. Sun et al. 2020 [43]
Electrolyte LiPF6	7,2	0,011	0,10	X. Sun et al. 2020 [43]
Electrolyte ethylene carbonate	75,2	0,119	1,04	X. Sun et al. 2020 [43]
Electrolyte dimethyl carbonate	34,3	0,054	0,47	X. Sun et al. 2020 [43]
Plastic polypropylene	9,6	0,015	0,13	X. Sun et al. 2020 [43]
Steel	6,3	0,01	0,09	X. Sun et al. 2020 [43]
Thermal insulation	1,9	0,003	0,03	X. Sun et al. 2020 [43]
Coolant glycol	10,1	0,016	0,14	X. Sun et al. 2020 [43]
Electronic parts	9,5	0,015	0,13	X. Sun et al. 2020 [43]
TOT	629,6	0,998	8,68	X. Sun et al. 2020 [43]

Tabella 21 – Tabella dei dati dello studio di X. Sun et al. 2020

Le batterie che servono per la carrozza hanno invece una capacità di 100 kWh l'una. Per tenere conto della differenza di capacità è stata effettuata una proporzione lineare per determinare la quantità di ogni materiale necessaria.

In questo modo si è ottenuta una batteria da 100 kWh, con gli stessi materiali in quantità proporzionali, per un peso totale di 868 kg. Dato che tra i dati primari vi è il peso di ciascuna batteria, 1100 kg, le masse dei materiali sono state aumentate in maniera proporzionale per raggiungere un peso totale di 1100 kg l'una. Di seguito le quantità e i materiali per definire il modello della batteria:

		Tipo batterie	Li-ion NMC	
		Numero	8	
		Capacità	100	kWh/batteria
		Massa	1100	kg/batteria
	output	BATTERIA NCM622 100 kWh		1
		Massa (kg)	Massa aggiuntiva (kg)	Massa totale (Kg)
Cathode (NCM622)	input	232,1	61,8	294,0
Anode (graphite)	input	132,7	35,4	168,1
Binder (PVDF)	input	16,6	4,4	21,0
Copper	input	74,6	19,9	94,5
Wrought aluminum battery pack	input	156,4	41,7	198,1
Wrought aluminum cell	input	43,4	11,6	55,0
Electrolyte LiPF6	input	9,9	2,5	12,5
Electrolyte ethylene carbonate	input	103,7	27,6	131,3
Electrolyte dimethyl carbonate	input	47,3	12,5	59,8
Plastic polypropylene	input	13,2	3,5	16,7
Steel	input	8,7	2,3	11,0
Thermal insulation	input	2,6	0,7	3,3
Coolant glycol	input	13,9	3,7	17,6
Electronic parts	input	13,1	3,5	16,6
TOT	input	868,4	231,1	1100

Tabella 22 – Dati di materiali in input per produrre 1 batteria Li-Ion NCM da 100 kWh

Di seguito si riporta l'elenco dei flussi scelti da Ecoinvent come input per descrivere i materiali componenti la batteria, accompagnati dai processi di produzione scelti. Il catodo è in fondo all'elenco perché necessita di considerazioni maggiori:

- Anodo: "graphite, battery grade". L'anodo è fatto di grafite per batteria, leggermente diversa dalla grafite industriale. Nel database è presente anche l'anodo di una batteria agli ioni litio, ma include nel processo anche l'elettrolita e il separatore (che sono inseriti a parte), per cui si è deciso di inserire solo la grafite per batteria. Il processo

inizia con l'estrazione delle materie prima, termina con la produzione della grafite per batteria ed è localizzato in Cina.

- Binder PVDF: "acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer". Il materiale originale dello studio è il polivinilidene fluoruro (PVDF), "un polimero termoplastico parzialmente fluorurato a elevate prestazioni, caratterizzato da buone caratteristiche di resistenza chimica agli acidi forti e agli ossidanti" [44]. Questo materiale sul database di Ecoinvent non è presente, per cui si è inserito un binder basato sul copolimero stirene butadiene [45]. Il processo di produzione è localizzato in Rest of the World (RoW).
- Rame: "copper, anode". Il rame per anodo è stato scelto prodotto dal processo "smelting of copper concentrate, sulfide ore", localizzato in Cina.
- Alluminio: "aluminium, wrought alloy". L'alluminio scelto è alluminio riciclato in uscita dal processo "treatment of aluminium scrap, new, at remelter" localizzato in RoW.
- Elettrolita: "lithium hexafluorophosphate". Il processo di produzione è il "lithium hexafluorophosphate production" localizzato in Cina.
- Carbonato di etilene: "ethylene carbonate". Il processo di produzione è "ethylene carbonate production" localizzato in Cina.
- Dimetilcarbonato: "dimethyl carbonate". Il processo di produzione è il "dimethyl carbonate production" localizzato in RoW.
- Polipropilene: "polypropylene, granulate". Il processo di produzione è il "polypropylene, granulate production" localizzato in RoW.
- Acciaio: "steel, chromium steel 18/8". Il processo di produzione è "steel production, electric, chromium steel 18/8" localizzato in RoW.
- Isolante termico: non essendoci informazioni sul tipo di isolante utilizzato nello studio originale, è stata effettuata una ricerca sui materiali tipici per isolare le batterie. Tra i più usati c'è il film di polipropilene, che ha eccellenti proprietà dielettriche [46]. Nel

database Ecoinvent è presente il granulato di polipropilene, per cui oltre ad esso, è stato aggiunto il processo di lavorazione per creare dei film plastici.

- Refrigerante: “propylene glycol, liquid”. Il processo di produzione è “propylene glycol production, liquid” localizzato in RoW.
- Parti elettroniche: non avendo informazioni precise, si è diviso in due il valore di massa e per descriverli si sono inseriti due flussi, uno sui componenti elettronici passivi generici e uno sui componenti elettronici attivi generici. Entrambi sono localizzati in Cina.

Infine è stato modellato il catodo NCM 622. Il processo di produzione del materiale di cui è fatto il catodo è descritto da X. Sun et al. (2020) [43] ed è rappresentato di seguito:

NCM622 active material production				
output	NCM622 active material	1	kg	X. Sun et al. 2020
input	Precursor NCM622	1	kg	X. Sun et al. 2020
input	Li2CO3	0,4	kg	X. Sun et al. 2020
input	Oxygen	3	m3	X. Sun et al. 2020
input	Electricity	36	MJ	X. Sun et al. 2020
input	Steam	6,8	MJ	X. Sun et al. 2020
input	Water	0,0003	m3	X. Sun et al. 2020

Tabella 23 – Dati del processo di produzione del catodo NCM 622.

Precursor NCM622 production				
output	Precursor NCM622	1	kg	X. Sun et al. 2020
input	NiSO4	1	kg	X. Sun et al. 2020
input	CoSO4	0,3	kg	X. Sun et al. 2020
input	MnSO4	0,3	kg	X. Sun et al. 2020
input	NaOH	0,9	kg	X. Sun et al. 2020
input	NH4OH	0,1	kg	X. Sun et al. 2020
input	Natural gas	1,1	m3	X. Sun et al. 2020
input	Water	0,6	m3	X. Sun et al. 2020

Tabella 24 – Dati del processo di produzione del precursore NCM 622.

Sono stati inseriti tutti i materiali tranne l'idrossido d'ammonio perché non è presente nel database Ecoinvent.

Una volta definiti tutti i materiali e le quantità necessarie per creare la batteria, sono stati calcolati i consumi energetici del processo di produzione, adattandoli alla capacità di 100 kWh di ogni batteria. Le fasi incluse sono la miscelazione, rivestimento e asciugatura, asciugatura sotto vuoto e processo di formazione [43].

Energy consumption per 100 kWh NCM622 battery pack production [47]						
	Cell manufacturing				Module and pack assembly	Total (MJ/battery pack)
	Mixing	Coating and drying	Vacuum drying	Formation		
Electricity (MJ/kWh)	360	2520	2880	1080	360	7200
Steam (MJ/kWh)		1700	1700			3400
Water (Kg/kWh)	3390					3390

Tabella 25 – Consumi energetici e di risorse per la produzione di 1 batteria Li-Ion NCM 622 da 100 kWh.

L'elettricità scelta è a medio voltaggio, prodotta dal mix energetico cinese. Il vapore è stato scelto come vettore energetico proveniente dall'industria chimica. Infine l'acqua è stata scelta di origine non specificata.

Fine vita batterie

Le batterie agli ioni di Litio di tipo NCM contengono il cobalto, per cui è necessario un trattamento pirometallurgico per lo smaltimento. Per questo motivo è stato inserito il flusso "used Li-ion battery" che entra come input nel processo di trattamento di Ecoinvent "treatment of used Li-ion battery, pyrometallurgical treatment, GLO".

Il processo completo di produzione e fine vita modellato su OpenLCA è composto come descritto dalla Figura 19:

Inputs/Outputs: Produzione di 1 batteria a ioni di Litio NCM, 100 kWh

Inputs				
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Rev...
F ₂ acrylonitrile-butadiene-styren...	201:Manufacture of ba...	21.00000	kg	
F ₂ aluminium, wrought alloy	242:Manufacture of ba...	198.1+55	kg	
F ₂ copper, anode	242:Manufacture of ba...	94.50000	kg	
F ₂ dimethyl carbonate	201:Manufacture of ba...	59.80000	kg	
F ₂ electricity, medium voltage	351:Electric power gen...	7200.00000	MJ	
F ₂ electronic component, active, ...	261:Manufacture of ele...	13.30000	kg	
F ₂ electronic component, passiv...	261:Manufacture of ele...	13.30000	kg	
F ₂ ethylene carbonate	201:Manufacture of ba...	131.30000	kg	
F ₂ graphite, battery grade	201:Manufacture of ba...	168.10000	kg	
F ₂ heat, from steam, in chemical ...	353:Steam and air con...	3400.00000	MJ	
F ₂ lithium hexafluorophosphate	201:Manufacture of ba...	12.50000	kg	
F ₂ NCM active material		294.00000	kg	
F ₂ polypropylene, granulate	201:Manufacture of ba...	16.70000	kg	
F ₂ propylene glycol, liquid	201:Manufacture of ba...	17.60000	kg	
F ₂ steel, chromium steel 18/8	241:Manufacture of ba...	11.00000	kg	
F ₂ Thermal insulation		3.30000	kg	
F ₂ Water, unspecified natural ori...	Resource/in water	3390/994	m3	
Outputs				
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Rev...
F₂ NCM battery 100 kWh		1.00000	Item(s)	
F ₂ used Li-ion battery	383:Materials recovery...	1100.00000	kg	

Figura 19 – Dati del modello OpenLCA della batteria.

Il flusso di riferimento è quello in grassetto ed è una batteria agli ioni di litio da 100 kWh di capacità. Sono inclusi i processi di produzione e smaltimento.

3) Carrozzeria

La carrozzeria della carrozza propulsiva è differente rispetto alle classiche carrozze. Infatti, oltre ad essere di dimensioni minori, anziché prevalentemente in alluminio, è quasi interamente composta da acciaio.

È stata fatta una stima dei componenti necessari per ospitare e proteggere tutta la parte di propulsione e i relativi materiali e processi di produzione.

Quasi tutti sono fatti di acciaio basso legato R 450 e R 355, tranne le pareti esterne che sono di alluminio.

I componenti principali sono stati definiti come:

Componenti carrozzeria	N°	Materiale	Lavorazione	Massa totale (kg)	
Tetto	barre	2	Acciaio basso legato R 450	barra	384
	strutture	2	Acciaio basso legato R 450	barra	192
	traverse	7	Acciaio basso legato R 450	trave	63
	piastre	1	Acciaio basso legato R 355	sheet rolling	288
Pavimento	barre	4	Acciaio basso legato R 450	barra	640
	traverse	8	Acciaio basso legato R 355	trave	72
Terminali	traversa	2	Acciaio basso legato R 450	trave	45
	colonne	8	Acciaio basso legato R 450	barra	112
	piastra	4	Acciaio basso legato R 355	sheet rolling	336
Barre e irrigidimenti	barre cave	12	Acciaio basso legato R 450	barra	672
	barre irrigidimento	18	Acciaio basso legato R 355	trave	432
Pareti corridoio	piastre	2	Acciaio basso legato R 355	sheet rolling	2016
Carrelli	carrelli (fusione)	2	Acciaio basso legato R 450	travi	1400
Pareti esterne	Pareti esterne alluminio	2	Alluminio	sheet rolling	680

Tabella 26 – Dati sui pezzi della carrozzeria, le relative masse e i processi di lavorazione.

Le lavorazioni dei materiali sono state il punto di partenza per la definizione del modello. Se ne sono individuate di tre tipi: lavorazione per creare una barra, lavorazione per creare una trave e laminazione per piastre (*sheet rolling*), per cui il modello su OpenLCA è stato formato a partire dalla creazione dei processi di produzione di barre, travi e piastre. Gli output sono stati impiegati come input nei processi di produzione dei macropezzi della carrozzeria nelle giuste quantità.

Barre e travi

Il processo di produzione “from cradle to gate” considerato per le barre e le travi (cambia solo la forma finale) è il seguente:

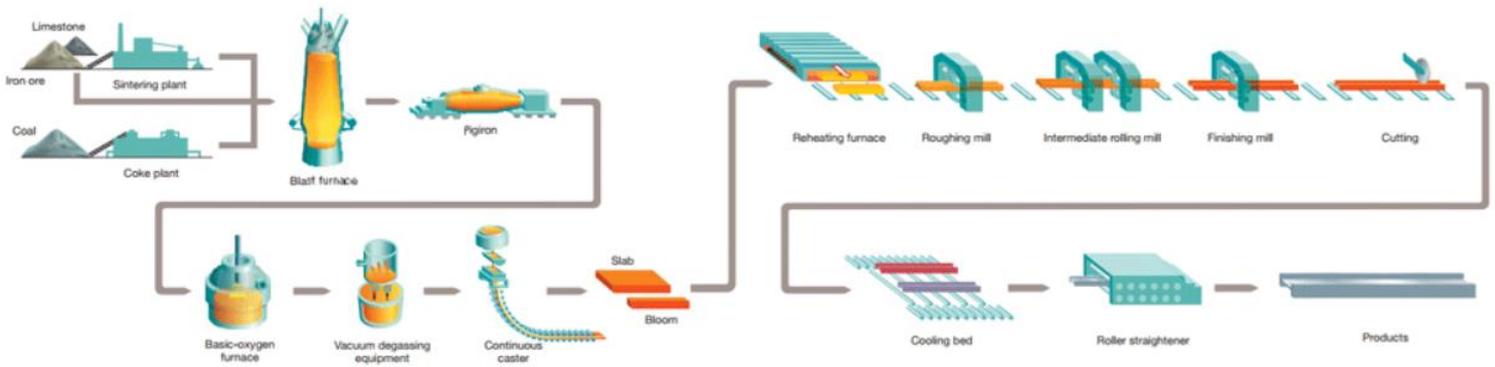


Figura 20 – Processo di lavorazione per creare una trave [47].

La riproduzione del processo, uguale per barre e travi, sul software è stata modellata nel modo seguente:

Processo produzione 1 kg barra/trave			
output	barra	1	kg
input	steel, low alloyed	1	kg
input	section bar rolling	1	kg
input	steel removed by milling	0,23	kg

Tabella 27 - Dati input per produrre 1 kg di barra o di trave.

Il database Ecoinvent fornisce informazioni dettagliate sulle lavorazioni dell'acciaio.

Il processo di produzione dell'acciaio bassoalegato scelto è “steel production, converter, low-alloyed, RER”, che produce acciaio bassoalegato primario. Questa attività include la produzione mediante BOF (*basic oxygen furnace*), il processo Linz-Donawitz [48], che è il processo principale di produzione dell'acciaio. In particolare, comprende la miscelazione e il pretrattamento di materiali ferrosi (comprese le aggiunte di lega), il caricamento del forno e la

fusione dei rottami, maschiatura dell'acciaio e rottami, trattamento metallurgico secondario in forno siviera e colata (in continuo e/o in lingotto).

Dopo aver completato la colata, inizia il processo di lavorazione "section bar rolling, steel": come la maggior parte delle altre tipologie di laminatoi, i laminatoi profilati si dividono in gabbie sbozzatrici, intermedie e finitrici, precedute da una scagliatrice posta tra il forno di riscaldamento e il laminatoio sbozzatore. Dopo il raffreddamento, le barre vengono modellate da raddrizzatrici meccaniche o idrauliche e tagliate a seconda della misura che si vuole ottenere.

Per finire, è stato incluso il processo di "steel milling, average" per includere un processo di fresatura volto ad ottenere la forma voluta. Non avendo ulteriori informazioni è stato assunto il valore di 0,23 kg di "steel milling" per 1 kg di prodotto, come suggerito dal processo Ecoinvent nel caso in cui non si abbiano dati precisi.

Questo processo è stato usato sia per le travi che per le barre dal momento che, cambiando solo i laminatoi, si ottengono le due forme diverse.

Tutti i processi sono localizzati in Europa.

Piastre di acciaio e alluminio

Nel modello sono stati creati due processi di produzione delle piastre, uno per quelle in acciaio e uno per quelle in alluminio. Di seguito, i processi modellati usando i dati di Ecoinvent:

Processo produzione 1 kg piastra acciaio			
output	piastra acciaio	1	kg
input	steel, low alloyed	1	kg
input	hot rolling steel	1	kg
input	sheet rolling steel	1	kg

Tabella 28 – Dati di input per la produzione di 1 kg di piastra in acciaio.

Processo produzione 1 kg piastra alluminio			
output	piastra alluminio	1	kg
input	aluminium alloy, AlMg3	1	kg
input	sheet rolling aluminium	1	kg

Tabella 29 – Dati di input per la produzione di 1 kg di piastra in alluminio

Per le piastre è stato scelto un acciaio secondario, per cui il processo di produzione è “steel production, electric, low-alloyed, EU senza AU e CH” che usa il forno elettrico ad arco. Il processo di lavorazione invece è composto da “hot rolling, steel | Cutoff, S, EU senza AU e CH” e “sheet rolling, steel | Cutoff, S, RER” per definire la forma.

Per creare la piastra è stato usato un processo di laminazione a caldo seguito dalla laminazione per lamiera. Il primo crea dei prodotti semifiniti, come billet, travi grezze o lastre grezze. Il processo successivo comprende la linea continua di decapaggio, la laminazione a freddo, ricottura, tempra, ispezione e finitura, confezionamento bobine o foglio e la manutenzione del rotolo.

Per quanto riguarda le piastre in alluminio, è stata effettuata una ricerca per capire il tipo di alluminio più adatto all’ambito ferroviario. Una lega usata è l’AlMg_{4.5}Mn_{0.7} [49]. Tuttavia non è presente in Ecoinvent, per cui si è scelta la lega AlMg₃.

Per creare la piastra in alluminio è stato usato il processo di produzione del lingotto in alluminio, “aluminium alloy production, AlMg3, RER”, il quale viene lavorato dal processo successivo mediante laminazione a caldo e a freddo, “sheet rolling, aluminium | Cutoff, S, RER” [50].

Tutti i processi utilizzati sono localizzati in Europa.

Le barre, le travi e le piastre sono state usate nelle giuste quantità per comporre i pezzi della carrozzeria riportati nella Tabella 26, ovvero tetto,

pavimento, terminali, barre e irrigidimenti, pareti corridoio, carrelli e pareti esterne.

Per quanto riguarda la fase di assemblaggio di tutti i pezzi per formare la carrozzeria, non avendo informazioni sull'energia o la manodopera necessaria, è stata stimata solo la saldatura, considerando con un eccesso del 10% una lunghezza da saldare di 144 m.

Fine vita carrozzeria

Per definire il fine vita della carrozzeria si è deciso di inviare alla fase di riciclo, non incluso, il 95% dell'acciaio e il 90% dell'alluminio.

Per entrambi sono stati considerati i processi di raccolta e preparazione della quota da riciclare e smaltimento degli scarti.

Nel modello, è stato inserito negli input l'alluminio trattato e pronto per essere riciclato, prodotto dal processo "treatment of aluminium scrap, post-consumer, by collecting, sorting, cleaning, pressing, RER", mentre il 10 % di alluminio non riciclabile è riportato come "waste aluminium".

Per quanto riguarda l'acciaio, è stato inserito negli output il flusso di rifiuti da riciclare (95%) mediante il processo "treatment of waste reinforcement steel, recycling, CH" e il flusso di rifiuti (5%) per il processo di smaltimento finale "treatment of waste reinforcement steel, collection for final disposal, CH".

È stata effettuata un'approssimazione sui materiali, infatti i processi di Ecoinvent fanno riferimento a un tipo di acciaio rinforzato.

Inputs/Outputs: Produzione Carrozzeria con EoL																																											
<p>▼ Inputs</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Flow</th> <th>Category</th> <th>Amount</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F_g aluminium scrap, post-consumer, prepared for melting</td> <td>242:Manufactur...</td> <td>0.9*680</td> <td>kg</td> </tr> <tr> <td>F_g Barre e Irrigidimenti</td> <td></td> <td>1.00000</td> <td>Item(s)</td> </tr> <tr> <td>F_g Carrelli carrozza</td> <td></td> <td>1.00000</td> <td>Item(s)</td> </tr> <tr> <td>F_g Pareti corridoio carrozza</td> <td></td> <td>1.00000</td> <td>Item(s)</td> </tr> <tr> <td>F_g Pareti esterne carrozza</td> <td></td> <td>1.00000</td> <td>Item(s)</td> </tr> <tr> <td>F_g Pavimento carrozza</td> <td></td> <td>1.00000</td> <td>Item(s)</td> </tr> <tr> <td>F_g Terminali carrozza</td> <td></td> <td>1.00000</td> <td>Item(s)</td> </tr> <tr> <td>F_g Tetto carrozza</td> <td></td> <td>1.00000</td> <td>Item(s)</td> </tr> <tr> <td>F_g welding, gas, steel</td> <td>259:Manufactur...</td> <td>144.00000</td> <td>m</td> </tr> </tbody> </table>				Flow	Category	Amount	Unit	F _g aluminium scrap, post-consumer, prepared for melting	242:Manufactur...	0.9*680	kg	F _g Barre e Irrigidimenti		1.00000	Item(s)	F _g Carrelli carrozza		1.00000	Item(s)	F _g Pareti corridoio carrozza		1.00000	Item(s)	F _g Pareti esterne carrozza		1.00000	Item(s)	F _g Pavimento carrozza		1.00000	Item(s)	F _g Terminali carrozza		1.00000	Item(s)	F _g Tetto carrozza		1.00000	Item(s)	F _g welding, gas, steel	259:Manufactur...	144.00000	m
Flow	Category	Amount	Unit																																								
F _g aluminium scrap, post-consumer, prepared for melting	242:Manufactur...	0.9*680	kg																																								
F _g Barre e Irrigidimenti		1.00000	Item(s)																																								
F _g Carrelli carrozza		1.00000	Item(s)																																								
F _g Pareti corridoio carrozza		1.00000	Item(s)																																								
F _g Pareti esterne carrozza		1.00000	Item(s)																																								
F _g Pavimento carrozza		1.00000	Item(s)																																								
F _g Terminali carrozza		1.00000	Item(s)																																								
F _g Tetto carrozza		1.00000	Item(s)																																								
F _g welding, gas, steel	259:Manufactur...	144.00000	m																																								
<p>▼ Outputs</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Flow</th> <th>Category</th> <th>Amount</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F_g Carrozzeria</td> <td></td> <td>1.00000</td> <td>Item(s)</td> </tr> <tr> <td>F_g waste aluminium</td> <td>382:Waste treat...</td> <td>0.1*680</td> <td>kg</td> </tr> <tr> <td>F_g waste reinforcement steel</td> <td>382:Waste treat...</td> <td>0.95*6651</td> <td>kg</td> </tr> <tr> <td>F_g waste reinforcement steel</td> <td>382:Waste treat...</td> <td>0.05*6651</td> <td>kg</td> </tr> </tbody> </table>				Flow	Category	Amount	Unit	F_g Carrozzeria		1.00000	Item(s)	F _g waste aluminium	382:Waste treat...	0.1*680	kg	F _g waste reinforcement steel	382:Waste treat...	0.95*6651	kg	F _g waste reinforcement steel	382:Waste treat...	0.05*6651	kg																				
Flow	Category	Amount	Unit																																								
F_g Carrozzeria		1.00000	Item(s)																																								
F _g waste aluminium	382:Waste treat...	0.1*680	kg																																								
F _g waste reinforcement steel	382:Waste treat...	0.95*6651	kg																																								
F _g waste reinforcement steel	382:Waste treat...	0.05*6651	kg																																								

Figura 21 – Immagine del processo di produzione della carrozzeria creato su openLCA.

Il processo che mette insieme tutti i componenti è il processo di “produzione della carrozzeria con EoL” con in output il flusso “1 carrozzeria” che include il processo di produzione e di fine vita. Esso entra come input nel processo di “produzione della carrozza”.

4) Serbatoi

I serbatoi di idrogeno nella carrozza propulsiva hanno il compito di stoccare il combustibile e consentirne il trasporto sicuro. Quelli scelti sono serbatoi ad alta pressione di tipo IV, ovvero realizzati con un rivestimento polimerico (*liner*) completamente avvolto da un materiale composito di resina e fibra di

carbonio, ricoperto da uno strato protettivo di fibra di vetro. Il tappo è metallico e integrato nella struttura (*boss*) [51].

La Figura 22 rappresenta gli strati che compongono un serbatoio di idrogeno in pressione di tipo IV:

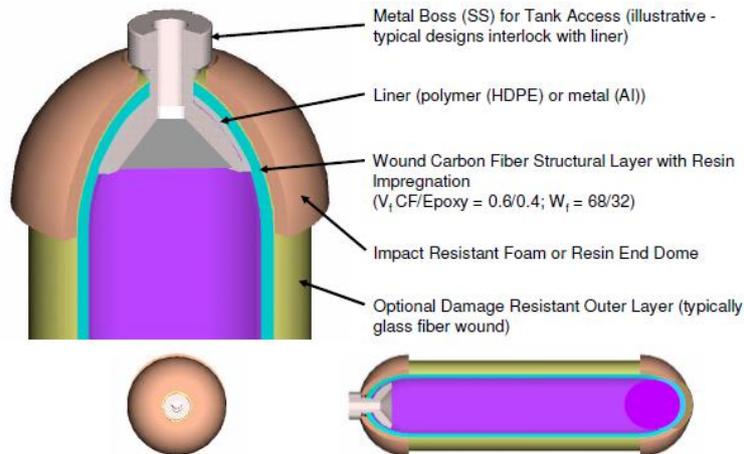


Figura 22 – Strati serbatoio di tipo IV, immagine da T. Hua et al. 2010, [52][52].

Il rivestimento viene arrotolato da una macchina per l'avvolgimento dei filamenti (*filament winding*). Per i serbatoi cilindrici i tipi di rivestimento sono tre: polare, a cerchio o elicoidale. Normalmente per quelli di tipo IV si usano tutti.

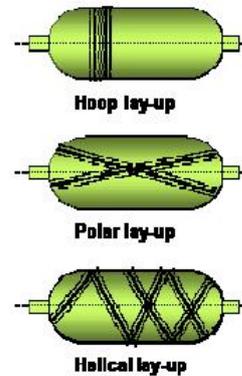


Figura 23 – Processo di avvolgimento dei filamenti nei serbatoi [51].

Non viene impiegato l'acciaio per le applicazioni che prevedono l'impiego dell'idrogeno, perché è soggetto a infragilimento e corrosione.

Il rivestimento interno si preferisce in materiale polimerico per evitare che gli atomi di idrogeno permeino nella struttura. I materiali più usati sono il polietilene ad alta densità e la poliammide [51]. Invece, il materiale composito che vi viene avvolto attorno è in fibra di carbonio impregnato di resina epossidica, in grado di avere ottime performance ad alte pressioni (>350 bar).

Per creare il modello dei serbatoi da inserire nella carrozza propulsiva si è effettuata una ricerca in letteratura sulle LCA dei serbatoi di tipo IV. Uno degli studi che si è preso in considerazione è quello di A. Benitez et al. (2021) [53], il quale effettua l'LCA di un serbatoio di tipo IV per un veicolo elettrico alimentato da PEMFC. Lo studio prende in considerazione in modo molto approfondito tutto il processo di produzione della fibra di carbonio, del rivestimento interno e dei restanti materiali. Il serbatoio modellato è un serbatoio in fibra di carbonio composita di tipo Toray T700G, caratterizzato da un volume di 146 litri per un peso di 102 kg, una capacità di 5,6 kg di idrogeno e una pressione operativa di 700 bar.

Tuttavia, la tipologia di serbatoio necessaria per il treno ad idrogeno è da 248 litri con una pressione operativa di 350 bar. Per questo motivo è stato scelto di modellare il serbatoio seguendo lo studio di S. Evangelisti et al. [33], che include un serbatoio in fibra di carbonio composito *Toray T700S* [54] da 248 litri per un peso di 93 kg, una capacità di 5,6 kg di idrogeno, pressione operativa di 350 bar e con liner in polietilene ad alta densità. Tutti i processi di produzione sono presi da Ecoinvent.

Processo di produzione di 1 serbatoio di idrogeno di tipo IV				
output	Hydrogen tank 350 bar	1	items	Source
input	Carbon fibre reinforced plastic	19,78	kg	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	Epoxy resin	29,67	kg	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	Glass fibre	5,6	kg	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	HDPE Polyethylene high density granulate, recycled	10,26	kg	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	Polyurethane flexible foam	4,67	kg	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	Electricity	12,87	MJ	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	Aluminium (For BOP)	7,09	kg	Evangelisti et al. (2018) [33]
input	Steel, chromium steel 18/8 (BOP)	10,64	kg	Evangelisti et al. (2018) [33]

Tabella 30 - Dati di input nel processo di produzione di 1 serbatoio di tipo IV.

Tutti i processi di produzione dei flussi della Tabella 30 sono localizzati in Europa tranne:

- Carbon fibre reinforced plastic, injection moulded, GLO;
- Market for electricity, medium voltage, IT.

L'alluminio e l'acciaio tengono conto del BOP del serbatoio. Il polietilene è stato scelto riciclato.

L'elettricità inserita nel modello rappresenta l'energia necessaria alla fabbricazione del serbatoio mediante avvolgimento del materiale composito. Il dato (4,5 kWh per produrre un serbatoio) è stato preso da Evangelisti et al. (2018) [33]. I metalli inseriti, acciaio inox e alluminio, includono il boss e il BOP.

Non sono inclusi nel modello i macchinari utilizzati per creare il serbatoio mediante rotostampaggio e gli scarti di lavorazione.

Fine vita serbatoi

Il processo di fine vita dei serbatoi di idrogeno di tipo IV è ancora un punto dolente, dal momento che i metodi per riciclare la fibra di carbonio dai compositi polimerici rinforzati sono pochi e molto costosi. Inoltre, spesso non riescono a ricreare un tipo di fibra con delle proprietà simili a quelle

originali, per cui molti scarti finiscono direttamente in discarica [55]. Si stanno sperimentando diversi metodi per il trattamento della fibra rinforzata in modo da bruciare la matrice di resina e poter estrarre la fibra.

Non essendo ancora dei metodi consolidati, nel database Ecoinvent non è presente un proxy per poter descrivere il fine vita della fibra di carbonio rinforzata, per cui si è inserito il trattamento solo degli altri materiali:

- Alluminio: del dato originale si è considerato riciclabile il 90%. I processi usati per descrivere la fase di fine vita sono “treatment of aluminium scrap, post-consumer, RER”, che termina con i rifiuti pronti per essere riciclati. Negli output è stato inserito il flusso “waste aluminium”, descritto dal processo “treatment of waste aluminium, sanitary landfill, CH”, per rappresentare il 10% dell’alluminio originale che non è stato riciclato.
- Acciaio: del dato originale si è riciclato il 95%. I processi scelti sono “treatment of waste reinforcement steel, recycling, CH”, approssimando il tipo di acciaio usato nei serbatoi a un acciaio rinforzato, e il processo “treatment of waste reinforcement steel, collection for final disposal, CH” per il 5% di scarti non riciclabili. Il trasporto ai luoghi di smaltimento è incluso.
- Polietilene: l’unico trattamento disponibile su Ecoinvent per il polietilene è “treatment of waste polyethylene, sanitary landfill, CH”.
- Poliuretano: l’unico trattamento disponibile su Ecoinvent è “treatment of waste polyurethane foam, collection for final disposal, CH”. Il trasporto al luogo di smaltimento è incluso.

Non sono stati inseriti dati sui trasporti dal luogo di produzione dei materiali al luogo di produzione del serbatoio e i trasporti dei materiali a fine vita verso i luoghi di smaltimento.

In conclusione, il modello del serbatoio di tipo IV per lo stoccaggio dell'idrogeno che tiene conto sia della fase di produzione che della fase di fine vita, è riportato di seguito:

Inputs/Outputs: Produzione Serbatoio di tipo IV con EoL			
Inputs			
Flow	Category	Amount	Unit
F: aluminium scrap, post-consumer, ...	242:Manufacture of basic ...	0.9*7.09	kg
F: aluminium, wrought alloy	242:Manufacture of basic ...	7.09000	kg
F: carbon fibre reinforced plastic, inj...	222:Manufacture of plasti...	19.78000	kg
F: electricity, medium voltage	351:Electric power genera...	12.87000	MJ
F: epoxy resin, liquid	201:Manufacture of basic ...	29.67000	kg
F: glass fibre	231:Manufacture of glass ...	5.60000	kg
F: polyethylene, high density, granul...	383:Materials recovery/38...	10.26000	kg
F: polyurethane, flexible foam	201:Manufacture of basic ...	4.67000	kg
F: steel, chromium steel 18/8	241:Manufacture of basic ...	10.64000	kg
Outputs			
Flow	Category	Amount	Unit
F: Hydrogen tank type IV		1.00000	Item(s)
F: waste aluminium	382:Waste treatment and ...	0.1*7.09	kg
F: waste polyethylene	382:Waste treatment and ...	10.26000	kg
F: waste polyurethane foam	382:Waste treatment and ...	4.67000	kg
F: waste reinforcement steel	382:Waste treatment and ...	0.05*10.64	kg
F: waste reinforcement steel	382:Waste treatment and ...	0.95*10.64	kg

Figura 24 – Modello OpenLCA del serbatoio di tipo IV.

Il flusso di riferimento in grassetto entra con input nel processo di “produzione della carrozza”.

5) Produzione della carrozza

Una volta modellati i processi dei quattro macropezzi della carrozza propulsiva (stack PEMFC, batteria, carrozzeria e serbatoio), si è passati a modellare il processo di “produzione della carrozza” con in output il flusso “1 carrozza”.

Il processo è stato modellato come Tabella 31:

PROCESSO PRODUZIONE DELLA CARROZZA			
output	Carrozza	1	items
input	Serbatoi idrogeno	56	items
input	Batterie	8	items
input	Stack PEMFC+BOP 1110 kW	1	items
input	Carrozzeria	1	items
input	Trasporto Stack	795,48	t*km
input	Trasporto Serbatoi	5208,00	t*km
input	Trasporto Carrozzeria	10997,40	t*km
input	Trasporto Batteria (nave)	140800,00	t*km
input	Trasporto Batteria (terra)	10560,00	t*km

Tabella 31 – Dati di input nel processo di produzione di 1 carrozza.

Sono state inserite le giuste quantità dei pezzi ed è stato incluso il trasporto dei pezzi dal luogo di origine stimato al luogo di assemblaggio del treno individuato in Savigliano (CN).

Lo stack PEMFC è stato considerato prodotto ad Aix-en-Provence dalla Helion Hydrogen Power che è stata acquisita da Alstom, diventando Hydrogène [56]. Il tipo di trasporto scelto è tramite camion e il processo preso da Ecoinvent è “transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5”, il cui output è riferito all’unità funzionale di 1 tonnellata-km (tkm), ovvero il servizio di trasporto di una tonnellata per un km. Nel dataset è incluso anche il ciclo di vita del veicolo, la manutenzione e le infrastrutture stradali. Questa tipologia di trasporto è stata utilizzata per il trasporto di tutti i pezzi.

La distanza tra Aix-en-Provence e Savigliano è di circa 330 km, mentre il peso dello stack più il BOP è di 2,411 t.

Per i serbatoi è stata effettuata una ricerca sui produttori europei di serbatoi per idrogeno di tipo IV, individuando l’azienda NPROXX [57] localizzata in Germania. Per effettuare il trasporto è stato scelto lo stesso servizio

utilizzato per il trasporto dello stack. L'azienda dista da Savigliano circa 1000 km, mentre il peso dei 56 serbatoi è di 5,208 t.

Per la carrozzeria, essendo quasi completamente in acciaio, è stata scelta la Polonia come nazione di produzione. Nelle tonnellate calcolate per definire il trasporto sono stati inclusi anche i pochi pezzi in alluminio. La distanza calcolata tra la Polonia e Savigliano è di circa 1500 km, mentre il peso totale è di 7,332 t.

Per le batterie, essendo prodotte in Cina, è stato scelto di utilizzare il trasporto via mare con nave container, seguito dal trasporto via terra con camion dal porto al luogo di assemblaggio. Il processo che descrive il servizio di trasporto su Ecoinvent è "transport, freight, sea, container ship", il cui flusso in output si misura sempre in tkm. La distanza tra il porto di Shanghai e il porto di Rotterdam è di 19116 km [58], mentre la distanza tra Rotterdam e Savigliano è di 1200 km. Il peso totale delle otto batterie è 8,8 t.

L'output del processo "produzione della carrozza" è "1 carrozza", che include i processi di produzione e di fine vita, ed entra come input nel processo finale di "uso della carrozza".

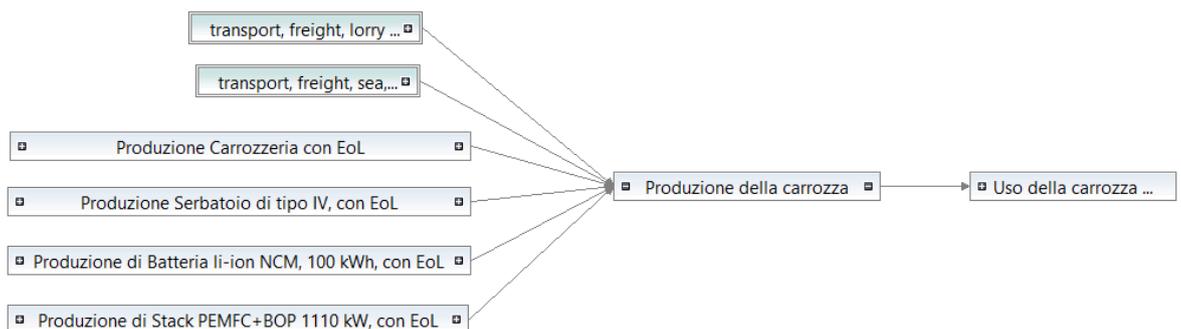


Figura 25 – Immagine del modello del processo di produzione della carrozza.

6) Uso della carrozza

Il processo finale è “uso della carrozza”, il cui flusso di riferimento è “il trasporto di 1 passeggero per 1 km”, misurato quindi in passeggero-km, l’unità funzionale dello studio. Gli input del processo sono i seguenti:

PROCESSO DI USO DELLA CARROZZA			
output	uso carrozza	1	pkm
input	carrozza	1,705E-09	items
input	manutenzione carrozza	2,664E-10	items
input	idrogeno	0,0027	kg

Tabella 32 – Dati del processo "Uso della carrozza".

Per tenere conto dell’impatto dell’intero ciclo di vita della carrozza è stato calcolato il carico medio dei passeggeri per i km percorsi dal treno durante la vita stimata.

La linea Brescia-Iseo-Edolo viene servita da RegioExpress, treni che possono ospitare un massimo di 427 persone. Il carico medio è stato ricavato dal Programma Regionale Mobilità e Trasporti della regione Lombardia del 2016 [59]:

Indicatore		Regionali	Regio Express	Suburbani	Totale
Corse/giorno	valore	1.053	348	702	2.103
Pax/giorno	valore in mgl	236	108	283	627
	%	38%	17%	45%	100%
Pax/treno ⁽¹⁾	valore	224	312	403	298⁽²⁾

⁽¹⁾ Rappresentano i viaggiatori medi per treno e non il carico massimo (numero max viaggiatori contemporaneamente presenti)

⁽²⁾ Valore medio

Fonte: Regione Lombardia, rilevazioni Trenord nell’ambito del contratto di servizio

Figura 26 – Informazioni sul carico dei trasporti ferroviari in Lombardia [59].

Il carico medio considerabile è quindi $312/427 = 73\%$. Avendo come dato la capienza massima del treno ad idrogeno, 250, il carico medio è 183 passeggeri.

Per quanto riguarda la distanza percorsa dal treno durante la sua vita operativa, da alcune informazioni indicative sulla durata del treno ad idrogeno è stata ricavata una vita attesa di 3 milioni di km.

Considerando la lunghezza della tratta e il tempo necessario per percorrerla, sono state fatte le seguenti assunzioni per definire le condizioni operative:

Vita utile treno	3000000	km
Passeggeri, carico max	250	items
Passeggeri, carico medio	183	items
Lunghezza tratta	103	km
Tratte al giorno	4	items
Ore al giorno	8	h/day
Percorsi al giorno	412	km/day
Giorni funz/sett	6	day/7
Ore funz/anno	2496	h/y
Giorni funz/anno	312	day/y
Km annuali	128544	km/y
Anni vita	25	y
Km vita	3213600	km

Tabella 33 – Dati sulle condizioni operative del treno.

Moltiplicando il carico medio dei passeggeri (183) per la distanza percorsa durante l'intera vita (3'213'600 km) si ottiene un valore di 586'482'000 pkm.

Questo valore è stato usato per dividere i flussi in input nel processo di "Uso della carrozza" per poterli riferire a 1 pkm.

Il primo flusso in input è "1 carrozza", ovvero la carrozza modellata precedentemente per includere fasi di produzione e fine vita. Il valore al passeggero-km è dato da:

$$\frac{1}{586'482'000} = 1,705 * 10^{-9} \frac{\text{carrozza}}{\text{pkm}}$$

Il secondo input è la manutenzione del treno durante la sua vita. Per definirla è stato usato il processo di Ecoinvent "maintenance, train, passenger, regional, CH" che include la manutenzione di un treno elettrico svizzero

regionale. Il treno in questione percorre circa 150'000 km/anno per 40 anni ed è formato da 4 carrozze. Il processo include la manutenzione ordinaria del treno, come quella delle ruote o della sostituzione delle ganasce [60]. Per adattarla alla carrozza propulsiva dello studio si è utilizzati:

$$1 * \frac{25}{40} * \frac{1}{4} = 0,156$$

Del valore unitario di manutenzione, indicante quella di una vita del treno regionale svizzero, si è usato $\frac{25}{40}$ per la differenza negli anni di servizio e $\frac{1}{4}$ per la differenza nel numero di carrozze.

Il valore di input inserito per rapportarlo al passeggero-km è:

$$\frac{0,156}{586'482'000} = 2,664 * 10^{-10} \frac{\text{manutenzione}}{\text{pkm}}$$

Non sono stati inseriti valori riguardanti la manutenzione specifica dei serbatoi, PEMFC e batterie o eventuali sostituzioni dei pezzi, perché non ci sono dati sulle condizioni operative dei treni ad idrogeno.

L'ultimo input inserito nel processo di "uso della carrozza" è l'idrogeno. È stato calcolato l'idrogeno necessario per percorrere la distanza prevista in 25 anni di vita, partendo dal dato suggerito da Alstom nel webinar "*Energy for Motion*" del Politecnico di Milano [2], ovvero di 600 km percorsi con un pieno.

I dati sono riassunti nella Tabella 34:

Capacità 1 serbatoio	5,36	kg
Capacità totale serbatoi	300	kg
Distanza con 1 pieno	600	km
Distanza totale vita	3213600	km
Pieni di una vita	5356	pieni
Massa idrogeno vita	1606800	kg
Massa idrogeno al giorno	206	kg/day
Massa idrogeno all'anno	64272	kg/anno

Tabella 34 – Dati sul consumo di idrogeno.

Il valore di input da inserire nel processo è stato quindi calcolato:

$$\frac{1'606'800}{586'482'000} = 0,0027 \frac{\text{kg H}_2}{\text{pkm}}$$

Per produrre l'idrogeno sono stati considerati i processi di SMR, nello "scenario SMR", e di elettrolisi dell'acqua, nello "scenario elettrolisi". Per alimentarli si sono valutati sia l'energia elettrica di rete generata dal mix energetico italiano che un mix energetico modellato con il 60% prodotto da un impianto fotovoltaico e il 40% da un impianto eolico.

Processo di produzione di 1 kg di idrogeno tramite SMR				
output	Hydrogen gaseous	1	kg	
output	carbon dioxide	8,33	kg	calcolata
input	natural gas	165	MJ	Mehmeti et al. 2018 [20]
input	electricity	1,11	kWh	Mehmeti et al. 2018 [20]
input	water deionised	21,87	kg	Mehmeti et al. 2018 [20]

Tabella 35 – Processo di produzione di 1 kg di idrogeno tramite SMR

Processo di produzione di 1 kg di idrogeno tramite elettrolisi dell'acqua				
output	Hydrogen gaseous	1	kg	
input	electricity	54,60	kWh	Mehmeti et al. 2018 [20]
input	water deionised	18,04	kg	Mehmeti et al. 2018 [20]

Tabella 36 – Dati di produzione di 1 kg di idrogeno tramite elettrolisi

La CO₂ in output è la quantità emessa durante il processo di SMR e WGS per produrre 1 kg di idrogeno.

In conclusione, nei risultati del processo finale di uso della carrozza, sono inclusi: la produzione dei pezzi, la produzione della carrozza con il trasporto dei pezzi dal luogo di produzione al luogo di assemblaggio, l'uso della carrozza per 25 anni e il fine vita dei pezzi.

4.3.3 Allocazione

La Norma ISO 14044:2006 suggerisce di evitare la fase di allocazione, se possibile [26]. Nei processi che sono stati modellati, non avendo ottenuto co-prodotti, non si è resa necessaria. Nel software OpenLCA non è stato selezionato alcun tipo di allocazione.

4.3.4 Risultati dell'analisi di inventario

Una volta completato il modello dello scenario di base, ovvero considerando il processo di SMR per la produzione di idrogeno, si è proceduto con la compilazione dell'inventario, composto da una lunga lista di input e output in quantità tali da riferirsi all'unità funzionale scelta per lo studio, tenendo conto di tutte le fasi del ciclo di vita incluse nel sistema.

È composto dai flussi elementari scambiati dal sistema del prodotto con il sistema ambiente. In input si hanno le risorse consumate in termini di materie prime, energia o sfruttamento del suolo, mentre in output si ritrovano le emissioni in aria, in acqua o nel sottosuolo.

Essendo una lunghissima lista, si è deciso di considerare i valori >1% del totale: in questo modo si sono ottenuti 241 input e 1722 output. Le materie prime riferite all'unità funzionale sono riportate in ordine decrescente nell'Allegato 1, mentre nella Tabella 37 si riportano le prime venti in termini di quantità:

MATERIE PRIME				
Name	Category	Sub-category	Amount	Unit
Gangue, in ground	Resource	in ground	8,70E-04	kg
Gravel, in ground	Resource	in ground	5,80E-04	kg
Shale, in ground	Resource	in ground	2,50E-04	kg
Sand, unspecified, in ground	Resource	in ground	2,10E-04	kg
Iron, in ground	Resource	in ground	1,40E-04	kg
Calcite, in ground	Resource	in ground	8,60E-05	kg
Sodium chloride, in ground	Resource	in ground	2,83E-05	kg
Gangue, bauxite, in ground	Resource	in ground	2,24E-05	kg
Clay, unspecified, in ground	Resource	in ground	1,54E-05	kg
Barium, in ground	Resource	in ground	1,11E-05	kg
Sulfur, in ground	Resource	in ground	9,67E-06	kg
Granite, in ground	Resource	in ground	4,93E-06	kg
Metamorphous rock, graphite containing, in ground	Resource	in ground	4,09E-06	kg
Copper, in ground	Resource	in ground	3,97E-06	kg
Silicon, in ground	Resource	in ground	3,35E-06	kg
Magnesite, in ground	Resource	in ground	3,00E-06	kg
Aluminium, in ground	Resource	in ground	2,66E-06	kg
Nickel, in ground	Resource	in ground	2,46E-06	kg
Manganese, in ground	Resource	in ground	2,28E-06	kg
Fluorspar, in ground	Resource	in ground	1,98E-06	kg

Tabella 37 – Prime venti materie prime in termini di quantità dell'inventario del ciclo di vita della carrozza propulsiva, riferite al passeggero-km.

Tra i materiali maggiormente impiegati risultano la ganga, la ghiaia, la sabbia e lo scisto, che sono riconducibili ai processi di estrazione dei minerali, e il ferro, molto utilizzato nella produzione dell'acciaio e dei macchinari.

Un indice importante per capire il consumo energetico è il *Gross Energy Requirement* (GER), che include diversi tipi di energia [61]:

- diretta: energia ricevuta e consumata da ogni processo;
- indiretta: energia necessaria per la produzione e il trasporto dei vettori energetici che entrano nel processo;
- dei trasporti;
- di *feedstock*: energia contenuta in un combustibile che entra nel processo sotto forma di altro.

Per valutare il GER per prima cosa si sono raccolti tutti gli input energetici del sistema nella Tabella 38.

GER				
Name	Category	Sub-category	Amount	Unit
Energy, gross calorific value, in biomass	Resource	biotic	0,00108	MJ
Energy, gross calorific value, in biomass, primary forest	Resource	biotic	1,18E-01	MJ
Energy, kinetic (in wind), converted	Resource	in air	0,00108	MJ
Energy, solar, converted	Resource	in air	1,69E+00	MJ
Energy, geothermal, converted	Resource	in ground	0,00048	MJ
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	Resource	in water	0,00369	MJ
Coal, brown, in ground	Resource	in ground	0,00012	kg
Coal, hard, unspecified, in ground	Resource	in ground	0,00057	kg
Oil, crude, in ground	Resource	in ground	0,00013	kg
Gas, mine, off-gas, process, coal mining	Resource	in ground	4,93E-01	m3
Gas, natural, in ground	Resource	in ground	0,01511	m3
Wood, hard, standing	Resource	biotic	4,70E-03	m3
Wood, soft, standing	Resource	biotic	5,18E-03	m3
Wood, unspecified, standing	Resource	biotic	6,21E-07	m3
Uranium, in ground	Resource	in ground	8,51E-04	kg

Tabella 38 – Input energetici risultanti dall’analisi di ciclo di vita della carrozza propulsiva, riferiti al passeggero-km.

Tutti i valori sono riferiti all’unità funzionale dello studio, ovvero il p*km. Per ottenere il GER è stato necessario convertire i valori espressi in masse e volumi in MJ, tenendo conto del potere calorifico inferiore (PCI) delle risorse.

I dati considerati per la conversione sono riportati nella Tabella 39:

PCI URANIO	10,0	MJ/kg	[62]
PCI PETROLIO	41,9	MJ/kg	[62]
PCI CARBONE	27,6	MJ/kg	[63]
PCI METANO	36,0	MJ/Nm3	[63]
PCI LEGNO	14,4	MJ/kg	[63]
Densità legno	750	kg/m3	[63]

Tabella 39 – Dati di potere calorifico inferiore e densità usati per convertire i feedstock in energia.

Il valore di GER calcolato è di 126,91 MJ/p*km.

Per quanto riguarda le emissioni, data la numerosità, si è posta l'attenzione sulle sostanze più rilevanti e più comuni in termini di impatto ambientale, ovvero CO₂, CO, N₂O, CH₄, SO_x, NO_x e fosfati. La tabella con tutti i dati riguardanti le sostanze elencate è presente nell'Allegato 2, mentre nella Tabella 40 sono riportate in ordine decrescente le prime venti emissioni in termini di quantità:

EMISSIONI				
Name	Category	Sub-category	Amount	Unit
Carbon dioxide, fossil	Emission to air	high population density	2,57E-02	kg
Carbon dioxide, fossil	Emission to air	low population density	2,70E-03	kg
Carbon dioxide, fossil	Emission to air	unspecified	2,50E-04	kg
Carbon dioxide, non-fossil	Emission to air	high population density	1,20E-04	kg
Methane, fossil	Emission to air	low population density	1,00E-04	kg
Carbon dioxide, non-fossil	Emission to air	low population density	9,55E-05	kg
Sulfur dioxide	Emission to air	low population density	2,01E-05	kg
Nitrogen oxides	Emission to air	high population density	9,94E-06	kg
Carbon dioxide, fossil	Emission to air	low population density, long-term	6,71E-06	kg
Nitrogen oxides	Emission to air	low population density	6,28E-06	kg
Carbon dioxide, non-fossil	Emission to air	unspecified	4,21E-06	kg
Carbon monoxide, fossil	Emission to air	high population density	3,17E-06	kg
Carbon monoxide, fossil	Emission to air	low population density	3,06E-06	kg
Phosphate	Emission to water	ground water, long-term	2,94E-06	kg
Carbon monoxide, fossil	Emission to air	unspecified	2,60E-06	kg
Carbon dioxide, from soil or biomass stock	Emission to air	low population density	2,14E-06	kg
Particulates, > 10 um	Emission to air	low population density	2,08E-06	kg
Nitrogen oxides	Emission to air	unspecified	1,90E-06	kg
Methane, fossil	Emission to air	unspecified	1,73E-06	kg

Tabella 40 – Prime venti emissioni in termini di quantità tra le sostanze selezionati dall'inventario del ciclo di vita della carrozza propulsiva, riferite al passeggero-km.

Le maggiori emissioni sono riferibili alla CO₂, probabilmente dovute ai processi di combustione per la produzione energetica.

4.4 Valutazione degli impatti del caso studio

L'analisi degli impatti ha l'obiettivo di valutare, mediante definiti parametri ambientali, l'impatto dei flussi materiali ed energetici dell'inventario [29].

Le fasi obbligatorie indicate dalle norme ISO da seguire sono:

- la selezione delle categorie di impatto, degli indicatori di categoria e dei modelli di caratterizzazione;
- l'assegnazione dei risultati dell'inventario alle categorie di impatto (Classificazione);
- il calcolo dei risultati in termini di indicatori di categoria (Caratterizzazione).

Le fasi facoltative, Normalizzazione e Pesatura, non sono state incluse.

4.4.1 Classificazione e caratterizzazione

Nella fase di Classificazione i flussi vengono assegnati alle varie categorie in base al loro potenziale impatto sull'ambiente, ovvero in base al potenziale contributo che possono apportare a una determinata categoria di impatto.

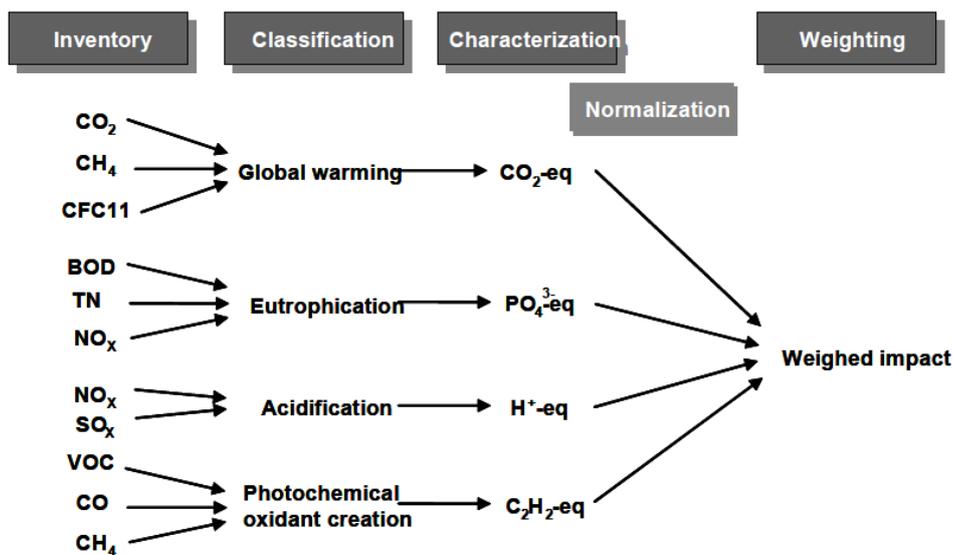


Figura 27 – Rappresentazione grafica delle fasi di valutazione degli impatti del ciclo di vita (LCIA) [28].

Invece, nella fase di Caratterizzazione, in base agli indicatori di categoria, viene calcolato per ogni sostanza il valore impattante equivalente, espresso nell'unità di misura della categoria. Ad esempio, per il GWP100, 1 kg di CH₄ equivale a 23 kg di CO_{2,eq}.

Inventory parameter (j)	Load _i (g/fu)	eqv _{i,j} (g CO ₂ eq/g)	Cl _{i,j} (g CO ₂ eq/fu)
CO ₂	1,000	1	1,000
CH ₄	10	23	230
CFC 11	0.01	4,500	45
Sum (∑ Cl _{i,j})		Cl _i = ∑ Cl _{i,j}	1,275

Figura 28 – Esempio di caratterizzazione GWP [28].

Il metodo scelto per effettuare la LCIA è ReCiPe Midpoint (H), il quale include le seguenti categorie [64]:

- Acidificazione: i gas acidi, come la SO₂, reagiscono con l'acqua presente nell'atmosfera e causano il fenomeno delle piogge acide,

innescando il potenziale impoverimento del suolo, della vegetazione e degli ecosistemi. L'unità di misura che descrive l'impatto è "kg SO_{2,eq}", biossido di zolfo.

- Cambiamento climatico: l'innalzamento della temperatura media globale viene causata dall'immissione nell'atmosfera di gas climalteranti in grado di alimentare il fenomeno dell'effetto serra. Il potenziale impatto viene espresso come GWP100, ovvero *Global Warming Potential* su un periodo temporale di 100 anni. L'unità di misura è "kg CO_{2,eq}", anidride carbonica equivalente.
- Esaurimento delle risorse abiotiche: è la misura della scarsità di una sostanza. Ci sono diverse subcategorie, come l'esaurimento di risorse fossili, marine e di metalli. Il primo si misura in "kg petrolio_{eq}", il secondo in m³ e il terzo in "kg Fe_{eq}", ferro equivalente.
- Ecotossicità: si suddivide in tre sottogruppi e misura la tossicità degli ecosistemi marini, di acqua dolce e terrestri. Si misura in "kg 1,4-DB_{eq}", diclorobenzene equivalente.
- Eutrofizzazione: è la crescita della concentrazione di nutrienti chimici in grado di generare la crescita eccessiva di alcune piante, come alghe, provocando danni all'ecosistema. Si misura in "kg N_{eq}", azoto equivalente.
- Tossicità: indica il potenziale danno che una sostanza chimica rilasciata nell'ambiente è in grado di causare all'uomo, all'ecosistema terrestre o all'ecosistema acquatico. Si misura in "kg 1,4-DB_{eq}", diclorobenzene equivalente.
- Radiazioni ionizzanti: indica il danno potenziale all'uomo e alla natura generato dall'emissione di radionuclidi. Si misura in "kg U_{eq}²³⁵", uranio-235 equivalente.

- Uso di suolo coltivabile: indica lo sfruttamento del suolo e il potenziale danno alle specie. Si misura in m^2a , metri quadri di terra per anno.
- Riduzione dello strato di ozono: indica il potenziale danno che alcuni gas possono generare all'ozono stratosferico. Tutti i composti clorurati e bromurati, che sono sufficientemente stabili da raggiungere la stratosfera, possono avere un effetto. Si misura in kg "kg CFC-11-_{eq}", triclorofluorometano 11 equivalente.
- Particolato: indica l'inquinamento causato dall'immissione nell'atmosfera del particolato. Si misura in "kg PM10_{eq}", PM-10 equivalente.
- Inquinamento fotochimico: l'ozono è protettivo nella stratosfera, ma a livello del suolo, ad alte concentrazioni, è tossico per l'uomo. L'"ozono troposferico" si forma dalla reazione di composti organici volatili e ossidi di azoto in presenza di calore e luce solare. La categoria di impatto dipende in gran parte dalle quantità di monossido di carbonio (CO), anidride solforosa (SO₂), ossido di azoto (NO), ammonio e NMVOC (Composti Organici Volatili Non Metanici). Si misura in "kg NMVOC_{eq}".

Nei paragrafi successivi sono presentati i risultati della valutazione degli impatti del ciclo di vita della carrozza propulsiva del treno ad idrogeno considerando due scenari che si distinguono per il metodo di produzione dell'idrogeno: lo scenario SMR e lo scenario elettrolisi.

Il software OpenLCA effettua automaticamente la fase di classificazione e di caratterizzazione, attribuendo ad ogni impatto i flussi dell'inventario che contribuiscono al potenziale danno.

La prima valutazione degli impatti riguarda lo scenario SMR, il quale considera tutto il ciclo di vita descritto nei paragrafi precedenti e la produzione di idrogeno mediante SMR, riferendo i risultati all'unità funzionale p*km.

4.4.2 Valutazione degli impatti dello scenario SMR

I dettagli sui dati della Classificazione e Caratterizzazione dello scenario SMR sono riportati in allegato.

L' Allegato 3 riporta per ogni categoria d'impatto i flussi che partecipano del potenziale danno, specificando per ognuno la tipologia di flusso, il risultato dell'inventario che lo caratterizza, il fattore utilizzato per convertire il dato nell'unità di misura del potenziale impatto, il valore dell'impatto generato dal flusso ed espresso nell'unità di misura della categoria.

I flussi che rappresentano <1% del risultato totale di ogni categoria non sono stati inclusi nell'allegato per una questione di numerosità.

L' Allegato 4, invece, riporta i risultati della valutazione degli impatti considerando per ogni categoria i processi che contribuiscono maggiormente.

Nella Tabella 41 sono elencati i valori cumulativi delle varie categorie di impatto.

Risultati valutazione degli impatti scenario SMR		
Name	Impact result	Unit
ionising radiation - IRP_HE	0,00030	kg U235-Eq
particulate matter formation - PMFP	1,06487	kg PM10-Eq
human toxicity - HTPinf	0,00134	kg 1,4-DCB-Eq
natural land transformation - NLTP	0,50305	m2
ozone depletion - ODPinf	0,00067	kg CFC-11-Eq
freshwater eutrophication - FEP	0,11029	kg P-Eq
marine eutrophication - MEP	0,74008	kg N-Eq
climate change - GWP100	0,03140	kg CO2-Eq
fossil depletion - FDP	0,01422	kg oil-Eq
water depletion - WDP	7,80151	m3
metal depletion - MDP	0,00072	kg Fe-Eq
agricultural land occupation - ALOP	0,00014	m2a
terrestrial ecotoxicity - TETPinf	0,03605	kg 1,4-DCB-Eq
urban land occupation - ULOP	4,01474	m2a
photochemical oxidant formation - POFP	3,22066	kg NMVOC
marine ecotoxicity - METPinf	0,00021	kg 1,4-DCB-Eq
terrestrial acidification - TAP100	3,31203	kg SO2-Eq
freshwater ecotoxicity - FETPinf	0,00023	kg 1,4-DCB-Eq

Tabella 41 – Risultati della valutazione degli impatti dello scenario di base.

Di seguito sono riportati, per le categorie più rappresentative dello studio, i cinque processi più impattanti, considerando le fasi di produzione, uso e fine vita della carrozza propulsiva.

Cambiamento climatico

Il danno potenziale relativo al cambiamento climatico è l'effetto serra, in questo caso valutato su un arco temporale di 100 anni.

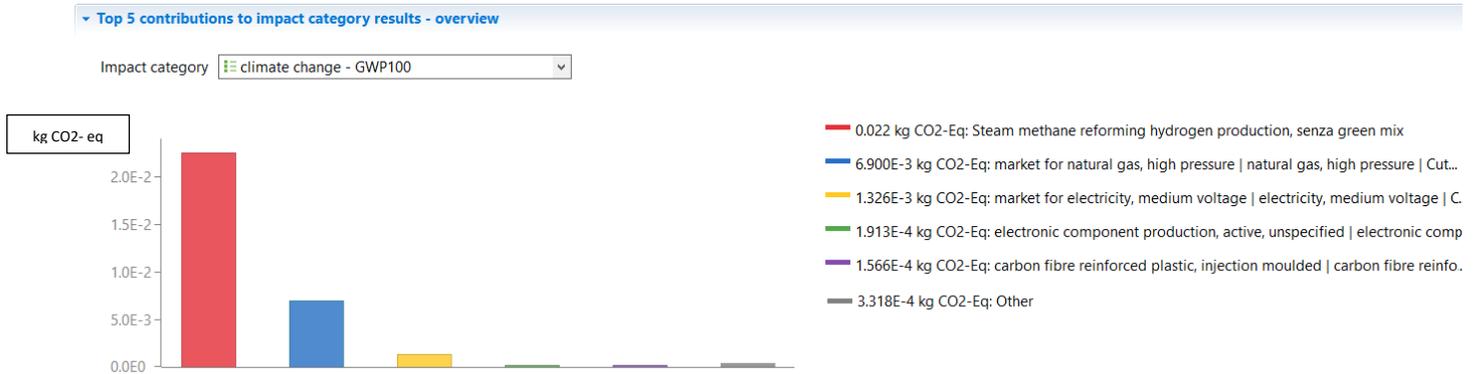


Figura 29 – Risultati impatto GWP100 della carrozza propulsiva.

Il processo che contribuisce maggiormente si è rivelato quello di produzione del combustibile mediante SMR, compreso anche di WGS. Infatti, come si è visto nella fase di modellazione, per produrre 1 kg di idrogeno si immettono circa 8,33 kg di CO₂ solo durante la fase di produzione, oltre all'impiego del gas naturale (secondo processo più impattante) necessario per la conversione. Non è stata considerata la cattura della CO₂ che consentirebbe di ridurre l'immissione in atmosfera. Nel futuro, comunque, si prevede di adottare tecnologie in grado di ridurre l'impatto della produzione di idrogeno, andando ad agire sia sulle tecnologie a monte sia sui sistemi di cattura a valle.

Al terzo posto, si trova l'elettricità a medio voltaggio della rete italiana, che entra come fonte energetica nelle lavorazioni industriali. Il quarto e il quinto processo, di un ordine di grandezza inferiore ai precedenti, sono la produzione dei componenti elettronici attivi presenti nelle batterie e la produzione della fibra di carbonio rinforzata utilizzata per i serbatoi di tipo IV di stoccaggio dell'idrogeno.

Consumo risorse fossili

Per quanto riguarda il consumo delle risorse fossili, la Figura 30 individua i processi più rilevanti.

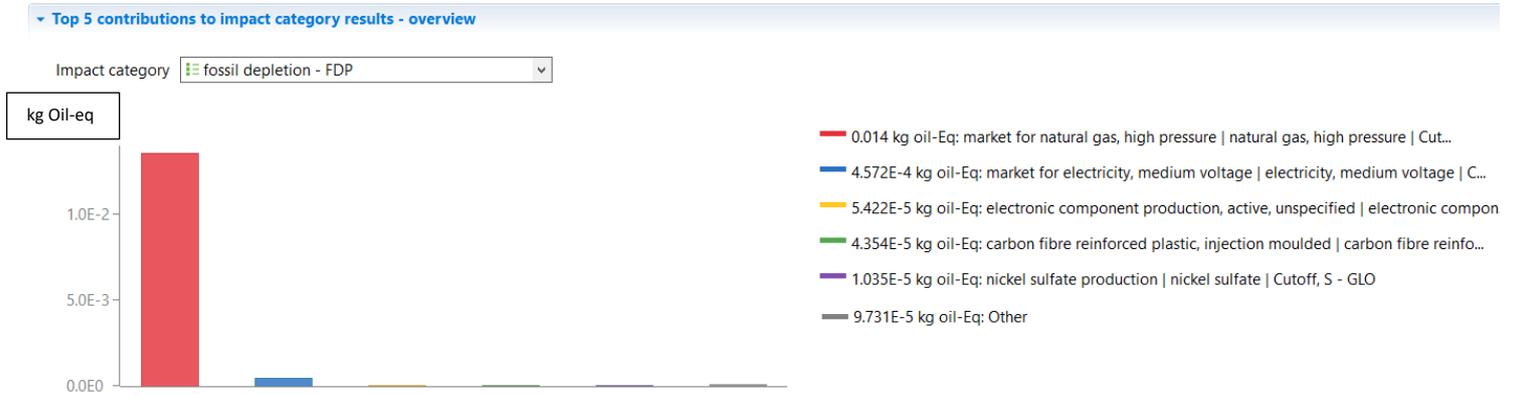


Figura 30 – Risultati impatto FDP della carrozza propulsiva.

In questo caso spicca su tutti il consumo di petrolio equivalente generato dal gas naturale, necessario per alimentare la conversione dell'idrogeno per 25 anni. I processi che consumano poi una quantità di risorse fossili considerevoli sono: la produzione di energia elettrica a medio voltaggio immessa nella rete elettrica italiana, dei componenti elettronici attivi, della fibra di carbonio rinforzata e la produzione del solfato di nickel necessario nelle batterie.

I processi in questione sono circa i medesimi della categoria di GWP perché i combustibili fossili determinano un elevato impatto ambientale e sono tra i principali responsabili all'effetto serra, a causa dell'elevata concentrazione di gas climalteranti e inquinanti che immettono nell'atmosfera durante la combustione.

Consumo di metalli

I processi che causano un maggior consumo di metalli sono riportati nella Figura 31:

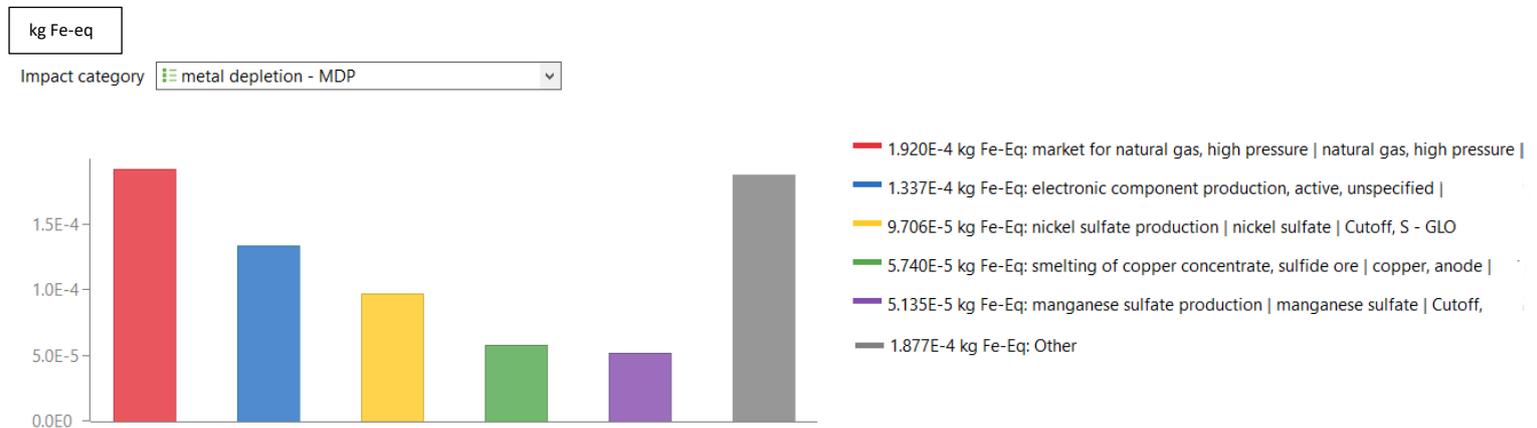


Figura 31 – Risultati impatto MDP della carrozza propulsiva.

Anche in questo caso, escludendo il gas naturale consumato dalla produzione di idrogeno, i processi restanti sono tutti relativi alla fabbricazione delle batterie, in particolare per la creazione del catodo a base di nickel, cobalto e manganese. La colonna “Other”, che è particolarmente rilevante, include la produzione del platino, del cobalto, dell’acciaio e dell’energia elettrica, come processi più impattanti, seguiti da tutti i restanti processi.

Acidificazione del suolo

Per quanto riguarda l’acidificazione del suolo, la principale responsabile è la caduta delle piogge acide. La causa è l’abbassamento del pH dovuto ad un aumento di anidride carbonica, ossidi di zolfo e ossidi di azoto [65].

Top 5 contributions to impact category results - overview

Impact category: terrestrial acidification - TAP100

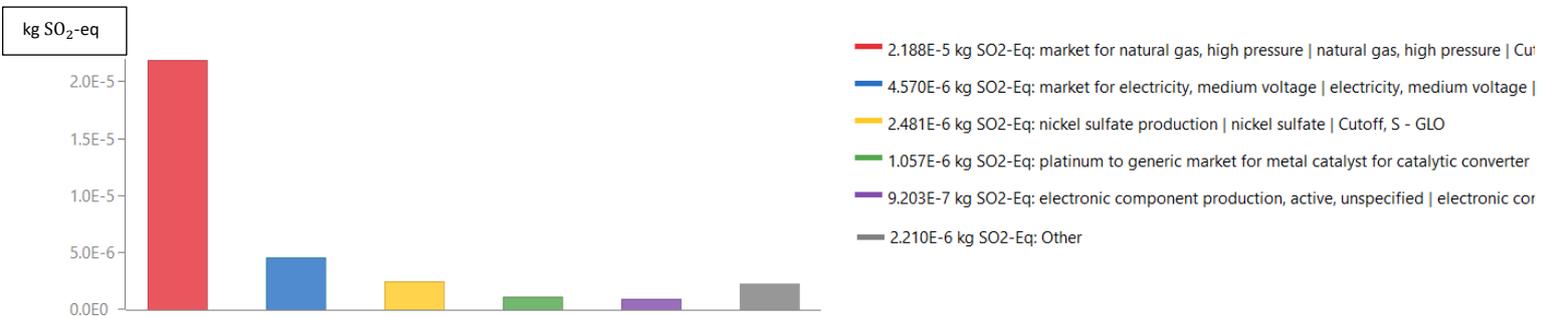


Figura 32 – Risultati impatto TAP100 della carrozza propulsiva.

In questo caso compare tra i processi più impattanti la produzione del platino, usato come catalizzatore nello stack di celle a combustibile. È interessante notare il fatto che abbia un impatto così rilevante nonostante ce ne siano 167 grammi. Le fasi di estrazione, purificazione e raffinazione del platino sono tecnologicamente e chimicamente impattanti, tuttavia è stato considerato solo platino primario e non riciclato, il che consentirebbe di ridurre la sua quota di impatto, non solo in questa categoria.

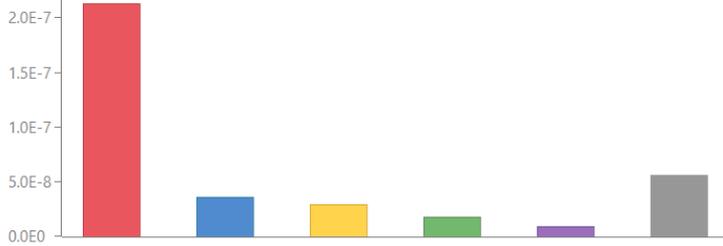
Ecotossicità

Per quanto riguarda l'effetto di tossicità, si riportano nella Figura 33 i risultati nel caso di tossicità terrestre, marina e umana.

Top 5 contributions to impact category results - overview

Impact category: terrestrial ecotoxicity - TETPinf

kg 1,4 DCB-eq



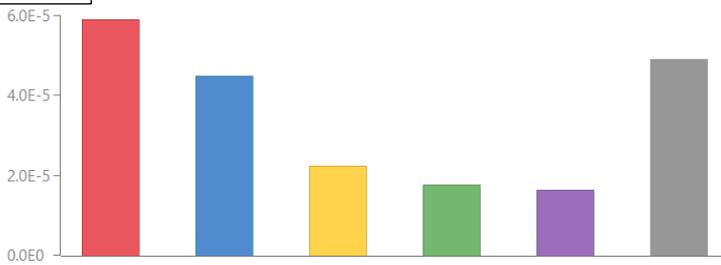
- 2.131E-7 kg 1,4-DCB-Eq: market for natural gas, high pressure | natural gas, high pressure | Cu
- 3.590E-8 kg 1,4-DCB-Eq: market for electricity, medium voltage | electricity, medium voltage
- 2.930E-8 kg 1,4-DCB-Eq: nickel sulfate production | nickel sulfate | Cutoff, S - GLO
- 1.799E-8 kg 1,4-DCB-Eq: electronic component production, active, unspecified | electronic co
- 8.615E-9 kg 1,4-DCB-Eq: treatment of used Li-ion battery, pyrometallurgical treatment | used
- 5.557E-8 kg 1,4-DCB-Eq: Other

Figura 33 – Risultati impatto TEF della carrozza propulsiva.

Top 5 contributions to impact category results - overview

Impact category: marine ecotoxicity - METPinf

kg 1,4 DCB-eq



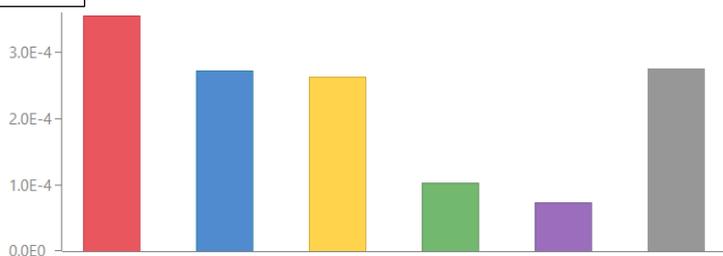
- 5.883E-5 kg 1,4-DCB-Eq: electronic component production, active, unspecified | electronic cor
- 4.476E-5 kg 1,4-DCB-Eq: treatment of aluminium scrap, post-consumer, by collecting, sorting,
- 2.238E-5 kg 1,4-DCB-Eq: smelting of copper concentrate, sulfide ore | copper, anode | Cutoff,
- 1.757E-5 kg 1,4-DCB-Eq: market for natural gas, high pressure | natural gas, high pressure | Cut
- 1.635E-5 kg 1,4-DCB-Eq: market for electricity, medium voltage | electricity, medium voltage |
- 4.896E-5 kg 1,4-DCB-Eq: Other

Figura 34 – Risultati impatto MET della carrozza propulsiva.

Top 5 contributions to impact category results - overview

Impact category: human toxicity - HTPinf

kg 1,4 DCB-eq



- 3.539E-4 kg 1,4-DCB-Eq: electronic component production, active, unspecified | electronic cor
- 2.712E-4 kg 1,4-DCB-Eq: market for natural gas, high pressure | natural gas, high pressure | Cu
- 2.626E-4 kg 1,4-DCB-Eq: market for electricity, medium voltage | electricity, medium voltage |
- 1.024E-4 kg 1,4-DCB-Eq: smelting of copper concentrate, sulfide ore | copper, anode | Cutoff,
- 7.356E-5 kg 1,4-DCB-Eq: platinum to generic market for metal catalyst for catalytic converter |
- 2.751E-4 kg 1,4-DCB-Eq: Other

Figura 35 – Risultati impatto HTP della carrozza propulsiva.

Dall'analisi si nota come molti dei processi che contribuiscono al potenziale impatto di tossicità, in tutti e tre i casi, riguardino le batterie. Infatti, la produzione dei componenti elettronici attivi emette la più alta quantità di sostanze potenzialmente tossiche sia per l'ecosistema marino che per l'uomo. Risulta particolarmente dannoso per il sottosuolo anche il trattamento pirometallurgico di fine vita delle batterie.

Riduzione dello strato di ozono

A seguire, per la categoria "riduzione dello strato di ozono", sono stati individuati i processi più significativi. Il principale risulta nuovamente il gas naturale, seguito questa volta dalla produzione del tetrafluoroetilene, polimero usato principalmente per produrre i GDL dello stack PEMFC e il politetrafluoroetilene per la membrana polimerica. Nonostante le ridotte quantità, determina un impatto ODPinf maggiore di quello della generazione di energia elettrica.

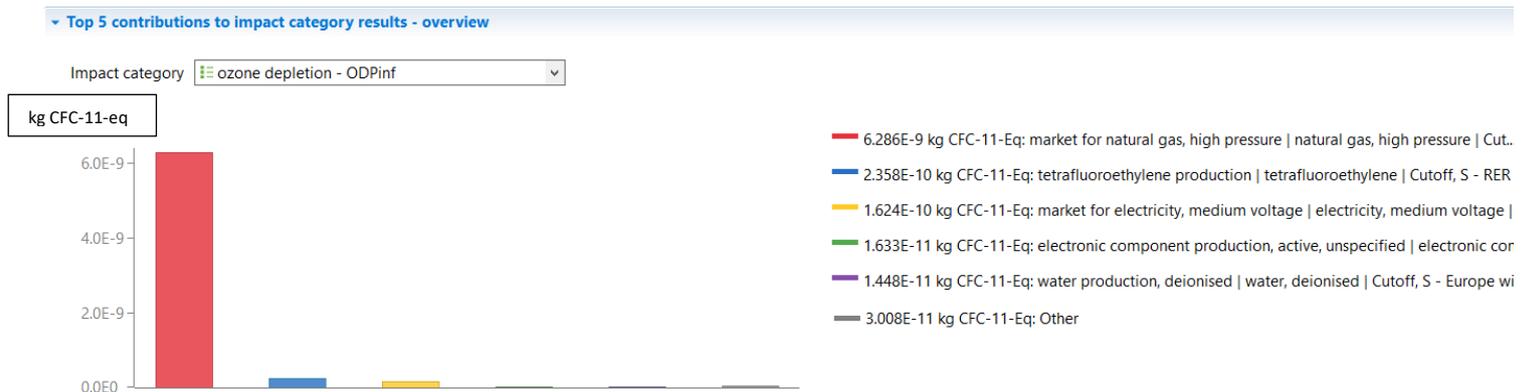


Figura 36 – Risultati impatto ODF dell'uso della carrozza.

Ossidazione fotochimica

Infine, vengono riportati i risultati dell'impatto "inquinamento da ossidazione fotochimica", causa di smog, molto frequente nelle zone industriali o ad alta densità abitativa.

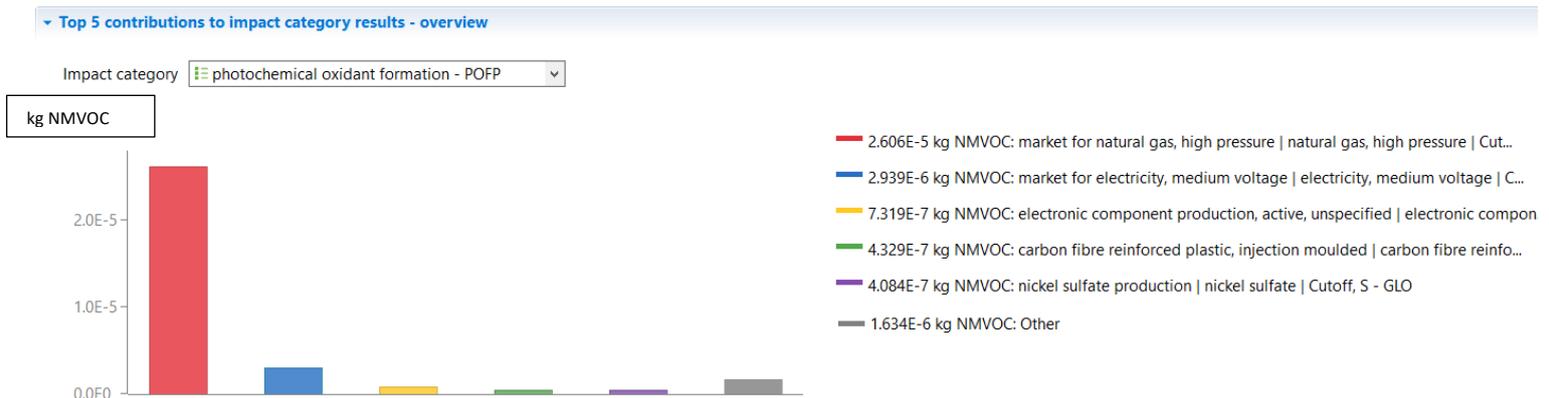


Figura 37 – Risultati impatto POFP della carrozza propulsiva.

I processi più rilevanti, in generale, si confermano quelli relativi alla produzione energetica: il gas naturale, necessario per produrre l'idrogeno, e l'elettricità della rete, il cui mix di generazione è ancora fortemente dominato dai combustibili fossili. Nella Tabella 42 sono riassunti i risultati delle categorie di impatto, considerando nella categoria di ecotossicità solo quella umana, in modo da visualizzare i processi più impattanti in generale:

SCENARIO SMR	Categorie di impatto principali						
	GWP100 (CO2-eq)	FDP (kg oil-eq)	MDP (kg Fe-eq)	TAP100 (kg SO2-eq)	HTPinf (kg 1,4 DCB-eq)	ODPinf (kg CFC11-eq)	POFP (kgNMVOC)
SMR produzione idrogeno	2,20E-02						
market for natural gas, high pressure, IT	6,90E-03	1,40E-02	1,92E-04	2,19E-05	2,71E-04	6,29E-09	2,61E-05
market for electricity, medium voltage, IT	1,33E-03	4,57E-04		4,57E-06	2,63E-04	1,62E-10	2,94E-06
electronic component production, active	1,91E-04	5,42E-05	1,34E-04	9,20E-07	3,54E-04	1,63E-11	7,32E-07
carbon fibre reinforced plastic	1,57E-04	4,35E-05					4,33E-07
nickel sulfate production		1,04E-05	9,71E-05	2,48E-06			4,08E-07
smelting of copper concentrate			5,74E-05		1,02E-04		
manganese sulfate production			5,14E-05				
platinum, market for catalyst				1,06E-06	7,36E-05		
tetrafluoroethylene production						2,36E-10	
water deionised production						1,45E-11	

Tabella 42 – Processi più impattanti per categoria di impatto, scenario SMR.

La produzione di gas naturale, energia elettrica e componenti elettronici attivi sono presenti in tutte le categorie di impatto considerato.

Tutti i dati sono riferiti al p*km.

Dopo aver valutato gli impatti ambientali dell'intero ciclo di vita della carrozza propulsiva, è stato effettuato un confronto tra gli impatti GWP100 delle tre fasi di vita principali: la produzione, l'uso e il fine vita. I processi di produzione e di fine vita sono riferiti a "1 carrozza propulsiva", per cui, per poterli confrontare con la fase di uso, sono stati riportati all'unità funzionale passeggero-km.

I risultati sono rappresentati nella Tabella 43 e nella Figura 38:

Impatto GWP100 delle fasi di vita, scenario SMR		
Uso della carrozza propulsiva	3,07E-02	kgCO2eq/pkm
Produzione carrozza propulsiva	6,38E-04	kgCO2eq/pkm
Fine vita della carrozza propulsiva	2,52E-05	kgCO2eq/pkm

Tabella 43 – Impatto GWP100 delle fasi di produzione, uso e fine vita della carrozza propulsiva.

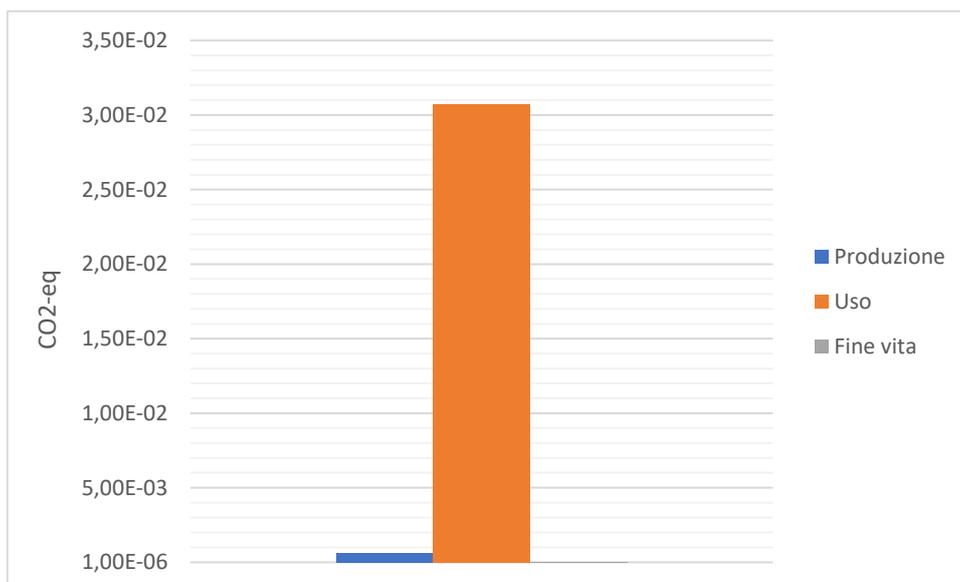


Figura 38 – Impatto GWP100 delle fasi di produzione, uso e fine vita della carrozza propulsiva.

Come si può notare, la fase di uso è circa due ordini di grandezza più impattante rispetto alla fase di produzione e tre ordini di grandezza rispetto alla fase di fine vita. Questo risultato è causato dall'utilizzo delle fonti fossili nella produzione di idrogeno.

Mettendo invece a confronto le fasi di produzione e di fine vita si riesce a visualizzare meglio il contributo delle parti:

GWP100	Batterie	Serbatoi	Stack	Carrozzeria	Unità
Produzione	1,97E+05	1,06E+05	4,92E+04	5,76E+03	kg CO ₂ -eq
Fine vita	1,30E+04	9,06E+02	3,34E+02	5,61E+02	kg CO ₂ -eq

Tabella 44 - Confronto GWP100 tra componenti della carrozza propulsiva nelle fasi di produzione e fine vita.

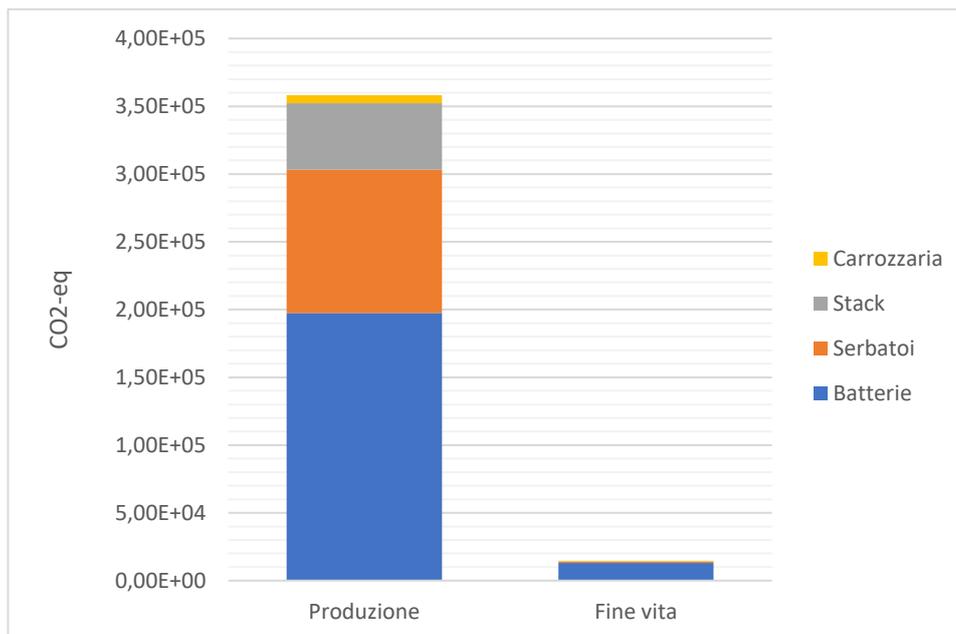


Tabella 45 - Confronto GWP100 tra i componenti della carrozza propulsiva nelle fasi di produzione e fine vita.

Le batterie apportano il contributo maggiore in entrambe le fasi, tuttavia, nel fine vita, il trattamento di alcuni materiali delle celle a combustibile e dei serbatoi non è stato considerato, come spiegato nei capitoli precedenti.

L'impiego di tecnologie differenti per la produzione dell'idrogeno potrebbe ridurre drasticamente l'impatto dovuto alle risorse fossili, per questo motivo è stata eseguita l'analisi di un altro scenario, indicato come "scenario elettrolisi", in cui l'idrogeno è prodotto tramite l'elettrolisi dell'acqua.

4.4.3 Valutazione degli impatti dello scenario elettrolisi

Nello scenario SMR, il consumo di gas necessario per lo SMR e le emissioni di CO₂ generate dal processo, rappresentano la quota di impatto GWP100 maggiore. Per questa ragione, si è provveduto a sostituire il processo di SMR con quello dell'elettrolisi dell'acqua.

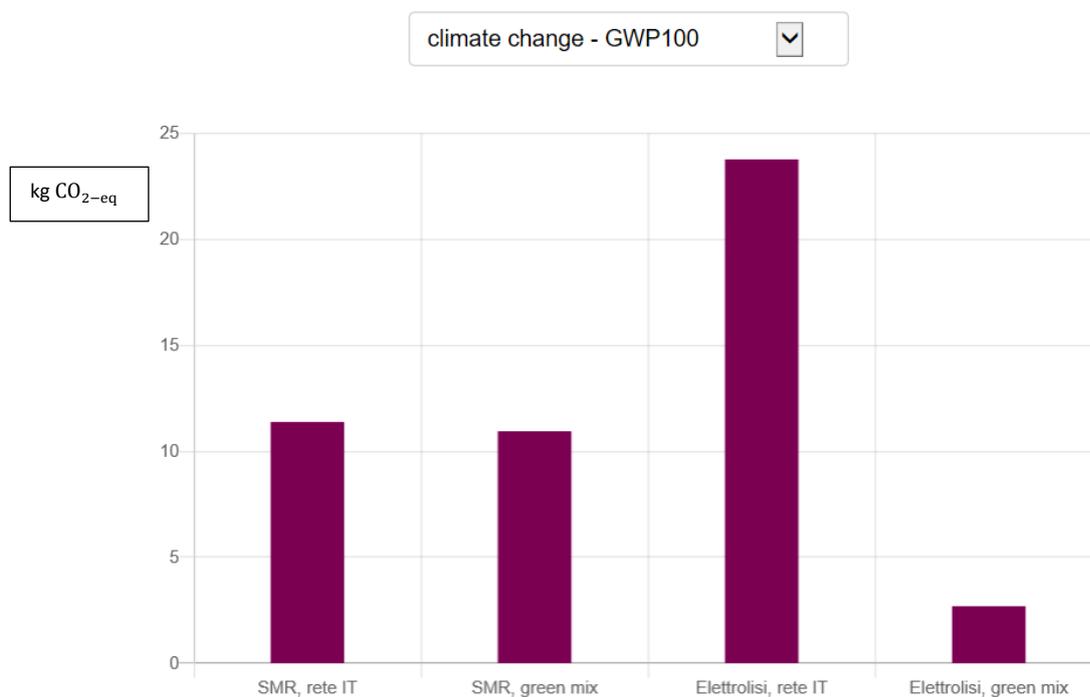


Figura 39 – Grafico di confronto tra l'impatto GWP100 della produzione di idrogeno mediante SMR e elettrolisi dell'acqua.

Nel grafico della Figura 39 si riporta l'impatto GWP100 della produzione di 1 kg di idrogeno, considerando lo SMR e l'elettrolisi dell'acqua alimentati da energia elettrica proveniente dalla rete italiana o da un mix green coperto per il 60% da fotovoltaico e per il 40% da eolico.

I valori precisi sono:

SMR, rete IT	11,3	kg CO ₂ -eq
SMR, green mix	10,9	kg CO ₂ -eq
Elettrolisi, rete IT	23,8	kg CO ₂ -eq
Elettrolisi, green mix	2,7	kg CO ₂ -eq

Tabella 46 – Confronto GWP tra metodi di produzione di 1 kg di idrogeno.

Il mix energetico che compone l'energia elettrica nel caso dello SMR influisce molto poco sull'impatto GWP100 poiché la quota maggiore è dovuta al gas

naturale e alle emissioni del processo di conversione. Invece, nel caso dell'elettrolisi, il risultato cambia in modo rilevante.

Si è deciso di modellare lo “scenario elettrolisi” considerando l'idrogeno prodotto tramite elettrolizzatori di tipo PEM alimentati da energia elettrica prodotta al 75% dal mix green e al 25% dalla rete elettrica italiana.

Di seguito sono presentati i risultati di impatto ambientale del ciclo di vita della carrozza propulsiva dello “scenario elettrolisi” a confronto con gli impatti ottenuti nello “scenario SMR”. Gli impatti peggiorati sono segnalati in rosso e quelli migliorati in verde. Tutti i valori sono riferiti al p*km.

Confronto scenario SMR e scenario elettrolisi dei risultati di valutazione degli impatti			
Name	Scenario elettrolisi	Scenario SMR	Unit
ionising radiation – IRP_HE	0,00251	0,00030	kg U235-Eq
particulate matter formation - PMFP	3,32593	1,06487	kg PM10-Eq
human toxicity - HTPinf	0,00772	0,00134	kg 1,4-DCB-Eq
natural land transformation - NLTP	0,31683	0,50305	m2
ozone depletion - ODPinf	0,00028	0,00067	kg CFC-11-Eq
freshwater eutrophication - FEP	0,70782	0,11029	kg P-Eq
marine eutrophication - MEP	1,95839	0,74008	kg N-Eq
climate change - GWP100	0,02216	0,03140	kg CO2-Eq
fossil depletion - FDP	0,00733	0,01422	kg oil-Eq
water depletion - WDP	0,00014	7,80151	m3
metal depletion - MDP	0,00224	0,00072	kg Fe-Eq
agricultural land occupation - ALOP	0,00120	0,00014	m2a
terrestrial ecotoxicity - TETPinf	0,89101	0,03605	kg 1,4-DCB-Eq
urban land occupation - ULOP	0,00250	4,01474	m2a
photochemical oxidant formation - POFP	6,11218	3,22066	kg NMVOC
marine ecotoxicity - METPinf	0,00121	0,00021	kg 1,4-DCB-Eq
terrestrial acidification - TAP100	8,64107	3,31203	kg SO2-Eq
freshwater ecotoxicity - FETPinf	0,00134	0,00023	kg 1,4-DCB-Eq

Tabella 47 – Confronto tra gli impatti della carrozza propulsiva considerando due scenari di produzione dell'idrogeno.

Il cambio nel metodo di produzione dell'idrogeno ha portato ad un miglioramento nella categoria di cambiamento climatico riducendo l'impatto GWP100 da 0,0314 a 0,0222 kg CO₂-eq. Infatti, le emissioni

climalteranti di impianti fotovoltaici e, ancora meno, eolici, durante la fase operativa sono quasi nulle. Tuttavia, altri impatti hanno subito un incremento.

La giustificazione di questi risultati risiede nell'utilizzo dei pannelli fotovoltaici e, in particolare, nel loro processo di manifattura. Per creare i pannelli, infatti, sono necessari materiali come il cadmio, il tellurio, il rame, il selenio, il gallio e il silicio che devono essere estratti e trattati. Inoltre molte delle sostanze chimiche e dei solventi usati durante i processi di manifattura e pulizia dei pannelli sono infiammabili, tossici, corrosivi e cancerogeni [66]. Per questi motivi si rileva un aumento degli impatti di tossicità e acidificazione.

Altra categoria in cui il risultato è peggiorato è lo sfruttamento del suolo coltivabile, dovuto all'area occupata dal campo fotovoltaico.

Dei risultati ancora migliori, sia in termini di GWP, sia nelle categorie in cui si è registrato un peggioramento, si otterrebbero riducendo la quota di fotovoltaico nella generazione elettrica a favore dell'eolico e del nucleare.

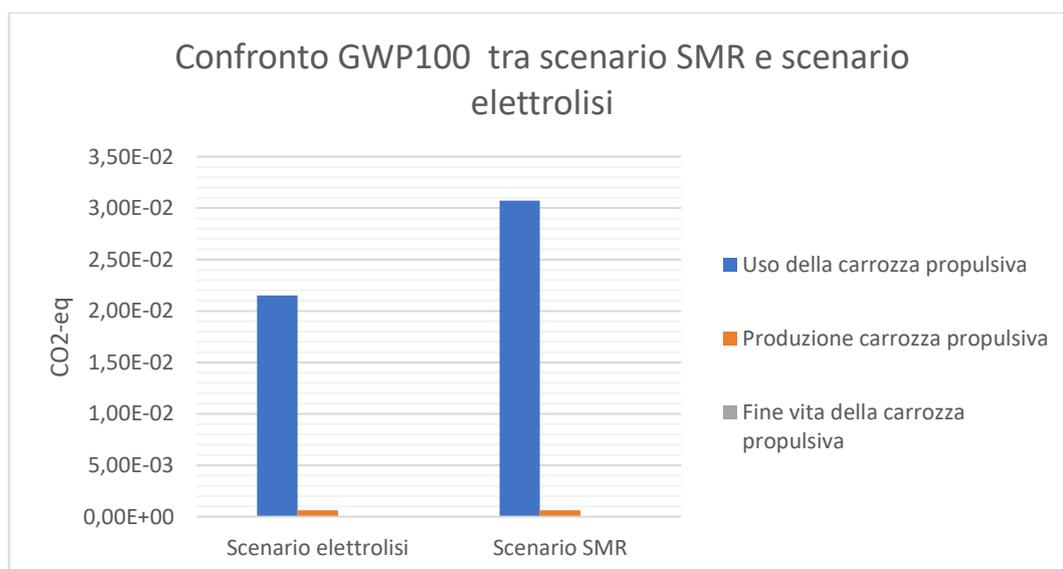


Figura 40 - Confronto GWP100 tra le fasi di vita della carrozza propulsiva nei due scenari.

Infine, nella Figura 40 è possibile visualizzare la riduzione dell'impatto GWP100 della fase di uso della carrozza propulsiva nello scenario elettrolisi rispetto allo scenario SMR.

4.5 Interpretazione dei risultati e altre analisi

La valutazione degli impatti del ciclo di vita della carrozza propulsiva ha rilevato che i processi più impattanti sono da imputare alla generazione energetica e alla manifattura delle batterie.

Per capire come siano ripartite le quote di impatto tra i componenti principali della carrozza, si è calcolato l'impatto GWP100 del ciclo di vita di uno stack di celle a combustibile di tipo PEM, di una batteria agli ioni di litio di tipo NCM da 100 kWh di capacità, di un serbatoio di tipo IV per lo stoccaggio di idrogeno e della carrozzeria in acciaio. Il confronto tra questi quattro sistemi è stato invece effettuato considerando le quantità necessarie per creare il sistema integrato della carrozza propulsiva.

4.5.1 Valutazione degli impatti dei componenti principali

Nell'analisi sono state incluse le fasi di produzione e di fine vita dei componenti. Della fase di uso è stato considerato solo il consumo di idrogeno, mentre non sono stati inseriti i dati sulla manutenzione dei componenti a causa della mancanza di informazioni.

I processi più impattanti per il cambiamento climatico di uno stack di celle a combustibile di tipo PEM da 1110 kW, includendo le fasi di produzione e fine vita, sono i seguenti:

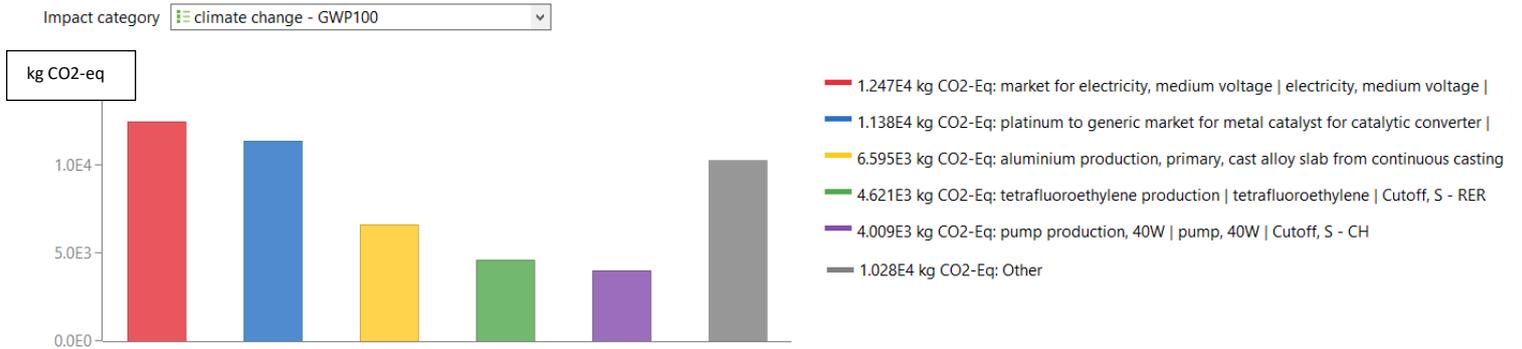


Figura 41 – Risultati impatto GWP100 dello stack di celle a combustibile.

Oltre all'energia elettrica necessaria per tutte le lavorazioni industriali, il processo più impattante riguarda la produzione del platino. È stato considerato solo platino primario, infatti si è visto che inserendo invece del platino riciclato, l'impatto GWP100 dovuto a 0,167 kg di Pt scenderebbe da 11380 kg CO₂-eq a 117 kg CO₂-eq.

Invece, nella valutazione GWP100 del serbatoio di idrogeno, spicca su tutti il processo di realizzazione della fibra di carbonio rinforzata, seguito dalla produzione della resina epossidica di cui la fibra viene impregnata:

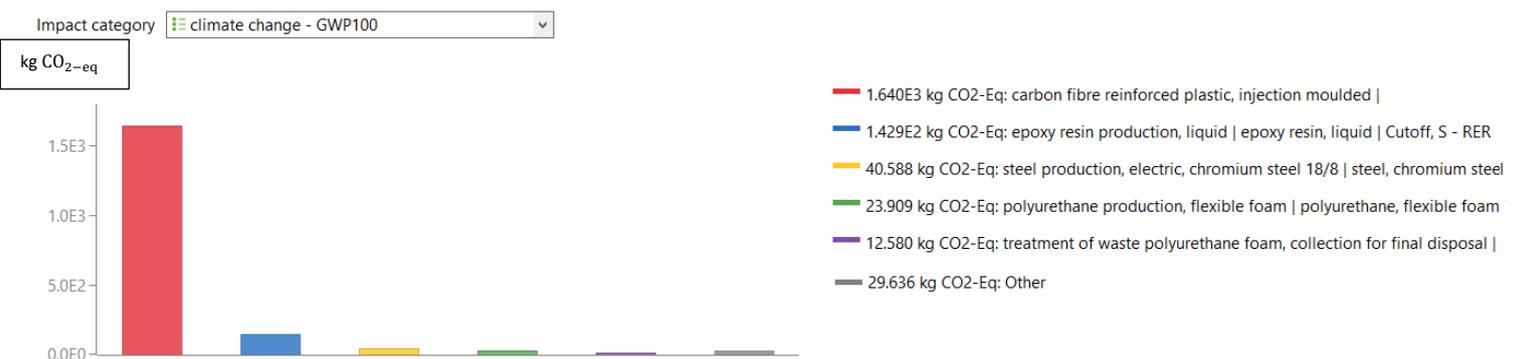


Figura 42 – Risultati impatto GWP100 di un serbatoio di tipo IV.

L'utilizzo di questo tipo di materiali compositi è fondamentale per il tipo di applicazione tecnologica di cui sono protagonisti, ma si accompagna ad alcuni problemi di impatto ambientale, sia nella fase di produzione, che nella

fase di smaltimento. In questo caso, i trattamenti di fine vita dei due materiali non sono stati inseriti per mancanza di proxy che li descrivessero nel database, ma nella realtà, nella maggior parte delle volte, i serbatoi finiscono in discarica.

Per quanto riguarda la carrozzeria, essendo in acciaio e alluminio, è giustificabile il fatto che gli impatti GWP maggiori siano da imputarsi alla produzione di acciaio e alluminio primario.

Il processo di acciaio prodotto tramite forno ad arco ha un impatto minore perché il forno viene alimentato con una quota di rifiuti di acciaio recuperati.

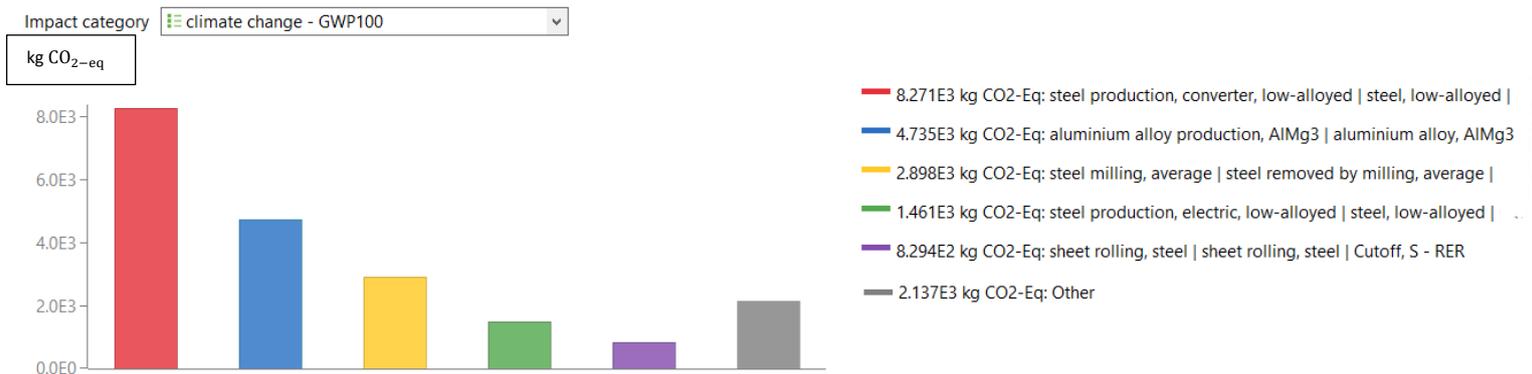


Figura 43 – Impatto GWP100 della carrozzeria.

Il quarto componente principale del sistema integrato di propulsione è la batteria agli ioni di litio da 100 kWh di capacità. In questo caso, la produzione dei componenti elettronici detiene il primato in termini di impatto GWP. Questo avviene perché per realizzare i dispositivi elettronici è necessario estrarre minerali rari e attuare delle lavorazioni molto dispendiose dal punto di vista energetico.

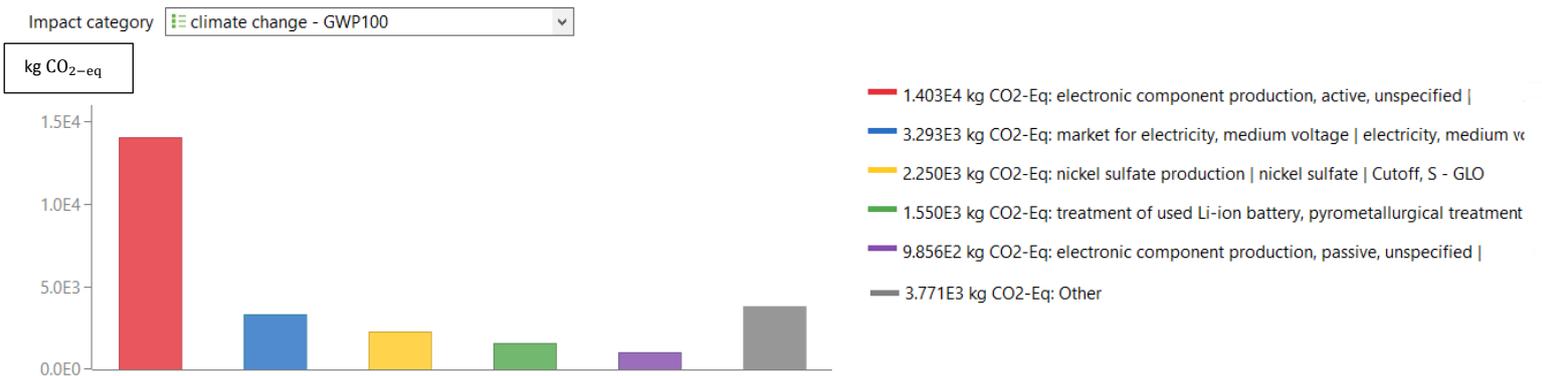


Figura 44 – Impatto GWP100 di una batteria a ioni litio NCM da 100 kWh

Tra i processi più impattanti compare anche il trattamento pirometallurgico di fine vita della batteria, necessario quando è presente del cobalto nel catodo. L'attività di recupero inizia con lo smantellamento dei pezzi, i quali poi vengono fusi in una fornace insieme a del calcare. Plastiche e solventi bruciano per fornire l'energia necessaria per la reazione di formazione di una lega relativamente pura di metalli preziosi come nickel, cobalto e rame. Tuttavia, altri metalli come il litio e il manganese finiscono nelle scorie e diventa molto difficile poterli recuperare [39].

I risultati degli impatti GWP100 illustrati finora riguardano un solo componente, ma nella carrozza sono necessarie 8 batterie e 56 serbatoi. Per questo motivo si sono valutati gli impatti dei quattro sistemi, considerando le giuste quantità per la propulsione. Sono incluse le fasi di produzione e fine vita.

Componente	Numero	GWP100 (kgCO ₂ -eq)
Batterie 100 kWh	8	207007,0
Serbatoi tipo IV	56	105795,0
Stack PEMFC 1110 kW	1	49359,7
Carrozzeria	1	20331,6

climate change - GWP100

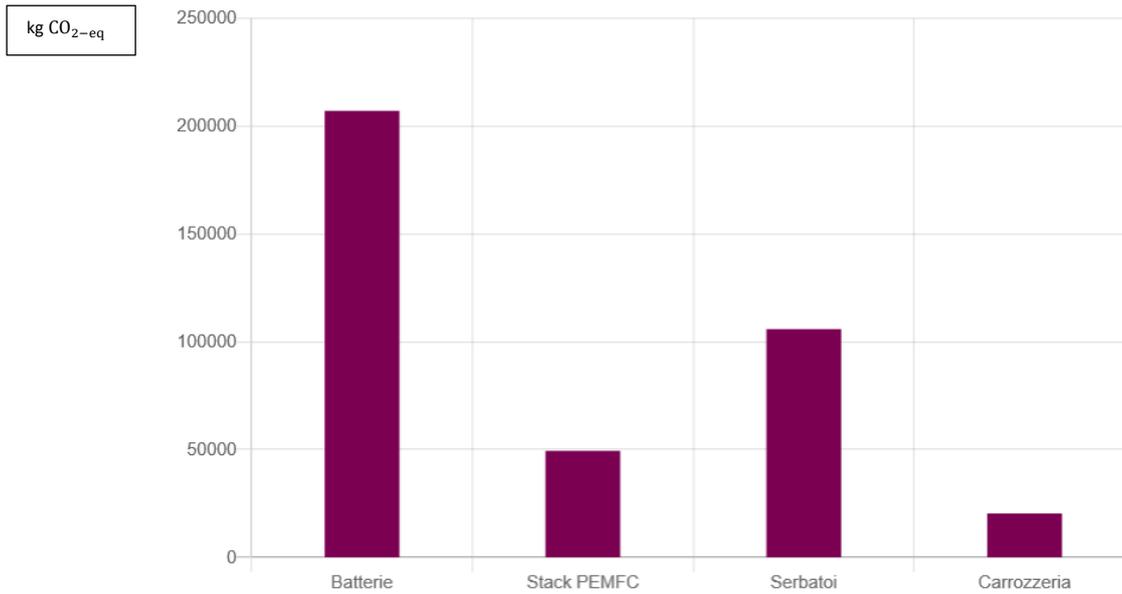


Figura 45 – Confronto GWP tra batterie, stack PEMFC, serbatoi e carrozzeria.

Indicator	Batterie	Stack PEMFC	Serbatoi	Carrozzeria	Unit
agricultural land occupation - ALOP	7.12E+03	1.67E+03	7.13E+03	7.68E+02	m2a
climate change - GWP100	2.07E+05	4.94E+04	1.06E+05	2.03E+04	kg CO2-Eq
fossil depletion - FDP	6.29E+04	1.60E+04	3.09E+04	5.24E+03	kg oil-Eq
freshwater ecotoxicity - FETPinf	8.44E+04	1.25E+04	9.59E+03	8.34E+03	kg 1,4-DCB-Eq
freshwater eutrophication - FEP	2.42E+02	3.44E+01	3.79E+01	9.79E+00	kg P-Eq
human toxicity - HTPinf	3.45E+05	6.88E+04	3.61E+04	9.90E+03	kg 1,4-DCB-Eq
ionising radiation - IRP_HE	2.68E+04	3.73E+03	8.67E+03	1.97E+03	kg U235-Eq
marine ecotoxicity - METPinf	7.55E+04	1.09E+04	8.33E+03	7.26E+03	kg 1,4-DCB-Eq
marine eutrophication - MEP	3.23E+02	1.05E+02	1.01E+02	2.38E+01	kg N-Eq
metal depletion - MDP	2.33E+05	3.43E+04	7.07E+03	1.95E+04	kg Fe-Eq
natural land transformation - NLTP	4.44E+01	1.63E+01	1.10E+01	3.61E+00	m2
ozone depletion - ODPinf	1.89E-02	1.42E-01	3.59E-03	1.23E-03	kg CFC-11-Eq
particulate matter formation - PMFP	8.76E+02	2.25E+02	2.34E+02	5.22E+01	kg PM10-Eq
photochemical oxidant formation - POFP	1.01E+03	3.69E+02	3.04E+02	8.41E+01	kg NMVOC
terrestrial acidification - TAP100	2.44E+03	7.89E+02	4.55E+02	7.62E+01	kg SO2-Eq
terrestrial ecotoxicity - TETPinf	4.51E+01	2.81E+00	5.43E+00	4.47E+00	kg 1,4-DCB-Eq
urban land occupation - ULOP	6.97E+03	9.75E+02	8.82E+02	4.81E+02	m2a
water depletion - WDP	2.06E+03	2.69E+02	3.01E+02	1.21E+02	m3

Tabella 48 – Confronto tra i componenti nelle categorie di impatto scelte.

I risultati confermano che il ciclo di vita del sistema di batterie è il più impattante nella categoria cambiamento climatico, ma anche in molte altre categorie di impatto.

4.5.2 Valutazione degli impatti della localizzazione della batteria

Per ridurre l'impatto della batteria si è provato a cambiare la localizzazione dei processi di produzione energetica e dei materiali, in modo da capire cosa impatti maggiormente.

Il modello di batteria originale, localizzata per lo più in Cina o in “Rest of World” (RoW), è stata identificata come “batteria cinese”.

La seconda batteria, identificata come “batteria cinese con energia RER”, è uguale all’originale, fatta eccezione per:

- l’elettricità a medio voltaggio da CN a IT;
- il gas naturale a bassa pressione da RoW a CH;
- l’energia termica da RoW a RER.

La terza batteria, oltre i cambiamenti della seconda batteria, è stata identificata come “batteria europea”, perché presenta anche i seguenti cambiamenti:

- processo di estrusione da RoW a RER;
- polipropilene da RoW a RER;
- idrossido di sodio da RoW a RER;
- carbonato di etilene da CN a RoW;
- grafite per batteria da CN a RoW;
- esafluorofosfato di litio da CN a RoW;
- polipropilene da RoW a RER;
- glicole propilenico da RoW a RER;
- acciaio inox da RoW a RER.

Il confronto GWP100 tra le tre batterie è il seguente:

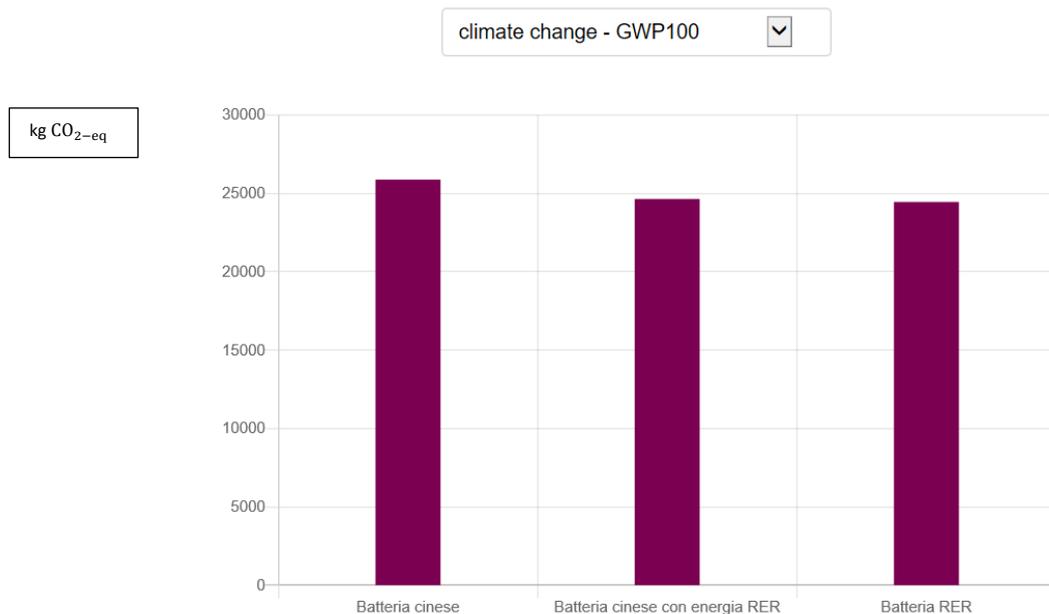


Figura 46 – Confronto GWP tra la batteria cinese, la batteria cinese con energia europea e batteria europea.

Indicator	Batteria cinese	Batteria cinese con energia RER	Batteria RER	Unit
agricultural land occupation - ALOP	8.90E+02	9.62E+02	9.66E+02	m2a
climate change - GWP100	2.59E+04	2.46E+04	2.45E+04	kg CO2-Eq
fossil depletion - FDP	7.86E+03	7.87E+03	7.83E+03	kg oil-Eq
freshwater ecotoxicity - FETPinf	1.05E+04	1.05E+04	1.05E+04	kg 1,4-DCB-Eq
freshwater eutrophication - FEP	3.02E+01	3.00E+01	3.01E+01	kg P-Eq
human toxicity - HTPinf	4.32E+04	4.29E+04	4.29E+04	kg 1,4-DCB-Eq
ionising radiation - IRP_HE	3.34E+03	3.40E+03	3.49E+03	kg U235-Eq
marine ecotoxicity - METPinf	9.44E+03	9.43E+03	9.42E+03	kg 1,4-DCB-Eq
marine eutrophication - MEP	4.04E+01	3.80E+01	3.77E+01	kg N-Eq
metal depletion - MDP	2.91E+04	2.91E+04	2.91E+04	kg Fe-Eq
natural land transformation - NLTP	5.55E+00	5.77E+00	5.73E+00	m2
ozone depletion - ODPinf	2.36E-03	2.66E-03	2.66E-03	kg CFC-11-Eq
particulate matter formation - PMFP	1.10E+02	1.04E+02	1.03E+02	kg PM10-Eq
photochemical oxidant formation - POFP	1.26E+02	1.19E+02	1.19E+02	kg NMVOC
terrestrial acidification - TAP100	3.05E+02	2.97E+02	2.97E+02	kg SO2-Eq
terrestrial ecotoxicity - TETPinf	5.63E+00	5.47E+00	5.45E+00	kg 1,4-DCB-Eq
urban land occupation - ULOP	8.71E+02	8.45E+02	8.42E+02	m2a
water depletion - WDP	2.58E+02	2.51E+02	2.51E+02	m3

Figura 47 – Risultati valutazione degli impatti delle tre batterie nelle categorie di impatto scelte.

Considerando la categoria di cambiamento climatico, tra la batteria cinese e la batteria europea c'è una differenza di 1400 di kg CO_{2-eq}, dovuta principalmente al cambio del mix energetico per le lavorazioni. Infatti, come si nota da confronto tra la batteria cinese con elettricità europea e quella europea, cambiando solo la localizzazione di alcuni pezzi, la differenza è quasi impercettibile. La differenza quindi tra la prima e la terza è da riferirsi alla produzione energetica.

Questo è dovuto al fatto che molte lavorazioni impattanti, come ad esempio la produzione di componenti elettronici o le lavorazioni di nickel e cobalto sono, oltre che energivore di base, localizzate nel Sud Est Asiatico in cui l'utilizzo dei combustibili fossili è ancora preponderante.

4.6 Suggerimenti per approfondimenti futuri

L'analisi di ciclo di vita della carrozza propulsiva di un treno ad idrogeno è servita a quantificare gli impatti ambientali del sistema, ma anche a individuare delle questioni da approfondire.

Innanzitutto, sarebbe opportuno effettuare un'analisi delle condizioni operative per capire l'entità della manutenzione di batterie, celle a combustibile e serbatoi di idrogeno. Al momento la loro aspettativa di vita è minore di venticinque anni, come si è ipotizzato per la vita utile del treno. È plausibile che quindi si rendano necessarie delle sostituzioni che graverebbero sui risultati di impatto ambientale. Inoltre, si potrebbero considerare i trattamenti di recupero della fibra di carbonio dei serbatoi di tipo IV, poiché nell'analisi compiuta non sono stati inclusi.

Al fine, invece, di confrontare l'impatto ambientale dell'intero treno ad idrogeno con altre tipologie di treno (elettrico o diesel), è necessario includere nel modello anche le carrozze destinate al trasporto passeggeri.

5 Conclusioni

In questo studio è stata effettuata l'analisi di ciclo di vita del sistema propulsivo di un treno ad idrogeno ispirato a un progetto reale. Per rappresentare l'oggetto di studio, è stata scelta l'unità funzionale passeggero-km, poiché la carrozza propulsiva del treno ad idrogeno è la motrice del treno ed è il sistema che garantisce il trasporto dei passeggeri.

L'analisi è stata condotta considerando l'oggetto di studio dalla culla alla tomba. Si sono considerate le fasi di estrazione delle materie prime, produzione dei principali componenti, trasporto e assemblaggio della carrozza propulsiva, uso della carrozza e smantellamento dopo una vita stimata di venticinque anni.

Considerando tutti i flussi in ingresso e in uscita dal sistema è stato compilato l'inventario, riferendo tutte le quantità all'unità funzionale. Dall'inventario è stato possibile calcolare il GER, ottenendo un valore di 126,91 MJ/p*km.

Per effettuare la valutazione degli impatti, sono stati analizzati due scenari: lo scenario SMR, in cui l'idrogeno è prodotto tramite SMR di gas naturale, e lo scenario elettrolisi, in cui è prodotto dall'elettrolisi dell'acqua. La differenza tra i due metodi di produzione dell'idrogeno è stata evidenziata mettendo a confronto i risultati della valutazione degli impatti nei due casi. Nello scenario SMR, tra gli impatti maggiori ci sono quelli relativi al processo di SMR per la produzione dell'idrogeno dal gas naturale. Per questo motivo, nello scenario elettrolisi è stato cambiato il metodo di produzione del combustibile: si è scelto di utilizzare l'elettrolisi dell'acqua alimentata al 75% da un mix energetico green (fotovoltaico e eolico) e al 25% dalla rete elettrica italiana. Valutandone gli impatti, il GWP100 si è ridotto dal valore dello scenario SMR di 0,0314 kg CO_{2-eq}/p*km al valore dello scenario elettrolisi di 0,0222 kg CO_{2-eq}/p*km. Tuttavia, altri tipi di impatti sono invece peggiorati a causa del processo di manifattura dei pannelli

fotovoltaici. In entrambi gli scenari, invece, la fase di uso è risultata due ordini di grandezza più impattante in termini di GWP100 rispetto alle fasi di produzione e fine vita.

Analizzando separatamente il ciclo di vita dei quattro sistemi della carrozza propulsiva, ovvero lo stack di celle a combustibile, le batterie, i serbatoi e la carrozzeria, è stato individuato il componente più impattante: la batteria. I motivi risiedono sia nei materiali rari e preziosi che è necessario estrarre e raffinare, sia al fatto che quasi tutte le lavorazioni e i pezzi sono o cinesi o del Sud Est Asiatico, luoghi in cui il mix energetico è ancora dominato dai combustibili fossili.

Al fine di ridurre l'impatto ambientale del sistema propulsivo del treno ad idrogeno sarebbe opportuno effettuare ulteriori analisi sul componente più impattante, in questo caso le batterie. Inoltre, non è stato inserito il processo di trattamento della fibra di carbonio, ma alcuni nuovi studi suggeriscono che sono stati brevettati dei nuovi metodi di trattamento che permettono di recuperare le fibre di carbonio restituendo ad esse proprietà simili a quelle originali.

Per completare il quadro di impatto ambientale, sarebbe necessario considerare l'intero treno, ovvero aggiungere al modello analizzato anche le carrozze adibite al trasporto dei passeggeri. In questo modo, si potrebbe effettuare un confronto tra diverse tipologie di treni, alimentati da combustibili diversi.

In conclusione, agendo sui metodi di produzione dell'idrogeno e prediligendo l'impiego di fonti rinnovabili insieme agli elettrolizzatori, si potrebbe ridurre in maniera considerevole l'impatto ambientale in termini di cambiamento climatico.

Gli sviluppi tecnologici futuri sicuramente consentiranno all'idrogeno di giocare un ruolo da protagonista nella decarbonizzazione del settore

ferroviario, sostituendo i treni a diesel con treni ad idrogeno dalle emissioni operative non inquinanti.

6 Bibliografia

- [1] Alstom press, *Coradia iLint: Alstom's zero emission train*, gennaio 2020.
- [2] https://www.youtube.com/watch?v=-lqp9FqdCk&t=8352s&ab_channel=ENERGYFORMOTION , consultato il 10/11/2021.
- [3] <https://www.railway-technology.com/projects/hydroflex-hydrogen-train/>, consultato il 03/11/2021.
- [4] <https://www.greencarcongress.com/2019/06/20190621-hydroflex.html>, consultato il 03/11/2021.
- [5] <https://www.railtechnologymagazine.com/Rail-News/new-hydrogen-breeze-trains-unveiled-by-alstom-and-everholt>, consultato il 03/11/2021.
- [6] Fuel Cells Bulletin, *China produces first hydrogen fuel cell tram, with Ballard unit*, Volume 2015, Numero 4, Aprile 2015, Pagina 5.
- [7] <https://www.alternative-energy-news.info/hydrogen-powered-tram/>, consultato il 03/11/2021.
- [8] <https://www.metrolinx.com/en/greaterregion/projects/hydrail.aspx>, consultato il 14/10/2021.
- [9] G.D. Marin et al., *Rail transportation by hydrogen vs. electrification e Case study for Ontario, Canada, I: Propulsion and storage*, *International Journal of Hydrogen Energy* 35 (2010), 6084-6096.
- [10] G.D. Marin et al., *Rail transportation by hydrogen vs. electrification e Case study for Ontario, Canada, II: Energy supply and distribution*, *International Journal of Hydrogen Energy* 35 (2010), 6097-6107.
- [11] A. Hoffrichter et al., *Well-to-wheel analysis for electric, diesel and hydrogen traction for railways*, *Transportation Reserch Part D* 17 (2012), 28-34.
- [12] S. Kent, *Fuel Cell Electric Multiple Unit (FCEMU) Project – Phase 1 Report – Issue 1*, Future Railway Powertrain Challenge, Giugno 2016.
- [13] P. Fragiaco, F. Piraino, *Fuel cell hybrid powertrains for use in Southern Italian railways*, *International Journal of Hydrogen Energy* 44 (2019), 27930-27946.
- [14] F.Piraino et al., *Towards a new mobility concept for regional trains and hydrogen infrastructure*, *Energy Conversion and Management* 228 (2021), 113650.

- [15] K.J. Logan et al., *Electric and hydrogen rail: Potential contribution to net zero in the UK*, *Transportation Research Part D* 87 (2020), 102523.
- [16] IEA, *Global Energy Review 2021*, disponibile su <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>.
- [17] <https://www.trenord.it/chi-siamo/la-rivoluzione-della-mobilita/la-novita-dellidrogeno/>, consultato il 16/10/2021.
- [18] S. Khosravi et al., *Electrochemical aspects of interconnect materials in PEMFCs*, *International Journal of hydrogen energy* 46 (2021), 35420-35447.
- [19] E. Rivard et al., *Hydrogen Storage for Mobility: A Review*, MDPI, 2019.
- [20] A. Mehmeti et al., *Life Cycle Assessment and Water Footprint of Hydrogen Production Methods: From Conventional to Emerging Technologies*, MDPI environments, 2018.
- [21] <https://lists.peacelink.it/economia/2005/09/msg00037.html>, consultato il 09/09/2021.
- [22] SETAC, *Guidelines for a Life Cycle Assessment: A "Code of Practice"*, SETAC Workshop held at Sesimbra, Portugal, 1993.
- [23] Mencarelli et al., *Analisi del Ciclo di Vita – Uno strumento di valutazione ambientale per supportare la vostra strategia di business*, Esalex, 2017.
- [24] J. Guinée et al., *Life cycle assessment: Past, Present, and Future*, *Environ. Sci. Technol.* (2011), 45, 90–96.
- [25] Technical Committee ISO/TC 207, *UNI EN ISO 14040:1997: Environmental management - Life cycle assessment – Principles and framework*, 1997.
- [26] Technical Committee ISO/TC 207, *UNI EN ISO 14044:2006: Environmental management - Life cycle assessment – Requirements and guideline*, 2006.
- [27] <https://www.ecoinvent.org/database/buy-a-licence/why-ecoinvent/why-ecoinvent.html>, consultato il 16/09/2021.
- [28] Kun-Mo Lee, Atsushi Inaba, *Life cycle assessment - Best Practices of ISO 14040 Series*, Committee on Trade and Investment, Febbraio 2004.
- [29] ARCA, *Linee guida ARCA per il Life Cycle Assessment*, 8/10/2014.
- [30] <https://www.alstom.com/solutions/rolling-stock/coradia-ilinttm-worlds-1st-hydrogen-powered-train>, consultato il 09/09/2021.
- [31] ISTAT, *Glossario trasporto ferroviario*, anni 2004-2016.

- [32] <https://www.dmove.it/news/treni-idrogeno-italia-iseo>, consultato il 11/10/2021.
- [33] S. Evangelisti et al., *Life cycle assessment of a polymer electrolyte membrane fuel cell system for passenger vehicles*, *Journal of Cleaner Production* 142 (2017), 4339-4335.
- [34] A. Simons e C. Bauer, *A life-cycle perspective on automotive fuel cells*, *Applied Energy* 157 (2015), 884-896.
- [35] L. Usai et al., *Life cycle assessment of fuel cell systems for light duty vehicles, current state-of-the-art and future impacts*, *Journal of Cleaner Production* 280 (2021), 125086.
- [36] O.M De vegt et al., *Comparative environmental life cycle assessment of composite materials*, ECN-I--97-050, dicembre 1997.
- [37] S. Porstmann et al., *A comprehensive comparison of state-of-the-art manufacturing methods for fuel cell bipolar plates including anticipated future industry trends*, *Journal of Manufacturing Processes* 60 (2020), 366-383.
- [38] M.C. Hsiao et al., *Effect of graphite sizes and carbon nanotubes content on flowability of bulk-molding compound and formability of the composite bipolar plate for fuel cell*, *Journal of Power Sources* 195 (2010), 5645-5650.
- [39] A. Nordelöf et al., *Methodological Approaches to End-Of-Life Modelling in Life Cycle Assessments of Lithium-Ion Batteries*, MDPI – Batteries, 2019.
- [40] <https://product-selection.grundfos.com/products/up-ups-series-100-north-america/ups-15-n-north-america/ups-15-35-sfc-59896772?tab=variant-specifications>, consultato il 29/10/2021.
- [41] https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_nickel_manganese_cobalt_oxides, consultato il 22/10/2021.
- [42] <https://lghomebatteryblog.eu/it/ecco-perche-Incm-e-il-materiale-preferibile-per-il-catodo-delle-batterie-agli-ioni-di-litio/>, consultato il 22/10/2021.
- [43] X. Sun et al., *Life cycle assessment of lithium nickel cobalt manganese oxide (NCM) batteries for electric passenger vehicles*, *Journal of Cleaner Production* 273 (2020), 123006.
- [44] <https://it.wikipedia.org/wiki/Polivinilidenfluoruro>, consultato il 21/10/2021.
- [45] <https://www.targray.com/li-ion-battery/anode-materials/binders>, consultato il 21/10/2021.

- [46] <https://www.mueller-ahlhorn.com/6-materials-for-electrical-and-thermal-insulation-of-batteries-and-accumulators/>, consultato il 21/10/2021.
- [47] <https://www.nipponsteel.com/en/product/construction/list-construction/02.html>, consultato il 24/10/2021.
- [48] https://it.wikipedia.org/wiki/Processo_LD, consultato il 24/10/2021.
- [49] https://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-5083-0-H111-Sheet-and-Plate_149.ashx, consultato il 24/10/2021.
- [50] <https://nameplatesdiv.com/how-aluminum-plates-and-sheets-are-made/>, consultato il 14/10/2021.
- [51] H. Barthélémy, *Hydrogen Storage – Industrial Prospectives, Air Liquide*, 75 Quai d’Orsay, Paris, 75007.
- [52] T. Hua et al., *Technical Assessment of Compressed Hydrogen Storage Tank Systems for Automotive Applications*, ANL-10/24, 2010.
- [53] A. Benitez et al., *Ecological assessment of fuel cell electric vehicles with special focus on type IV carbon fiber hydrogen tank*, *Journal of Cleaner Production* 278 (2021), 123277.
- [54] Toray T700S scheda tecnica, 2018.
- [55] <https://www.intechopen.com/chapters/60758>, consultato il 28/10/2021.
- [56] <https://hydronews.it/alstom-internalizza-la-produzione-di-fuel-cell-acquisita-la-societa-connazionale-helion-hydrogen-power/>, consultato il 25/10/2021.
- [57] <https://www.nproxx.com/capabilities/type-4-pressure-vessels/>, consultato il 25/10/2021.
- [58] M. Canesi, *Egemonismo del capitale e autodeterminazione dei popoli*, FrancoAngeli, pag. 221, 2015.
- [59] Regione Lombardia, *Programma Regionale Mobilità e Trasporti*, 2016.
- [60] M. Spielmann et al., *Transport Services – Data v2.0* (2007),ecoinvent report No. 14, 2007.
- [61] R. Gerboni, *Life Cycle Assessment, Slide del corso Localizzazione e Impatto Ambientale dei Sistemi Energetici*, Politecnico di Torino, 2019/2020.
- [62] <http://www.energoclub.org/page/uranio-per-energia-nucleare>, consultato il 10/11/2021.

- [63] Regione Piemonte, *L'energia del legno – Nozioni, concetti e numeri di base*, 2004.
- [64] A.P. Acero et al., *LCIA methods - Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories*, GreenDelta, 2015.
- [65] <https://www.chimicamo.org/tutto-chimica/piogge-acide/>, consultato il 02/11/2021.
- [66] M. Tawalbeh et al., *Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook*, *Science of the Total Environment* 759 (2021) 143528.

7 Allegati

7.1 Allegato 1

MATERIE PRIME				
Name	Category	Sub-category	Amount	Unit
Gangue, in ground	Resource	in ground	8,70E-04	kg
Gravel, in ground	Resource	in ground	5,80E-04	kg
Shale, in ground	Resource	in ground	2,50E-04	kg
Sand, unspecified, in ground	Resource	in ground	2,10E-04	kg
Iron, in ground	Resource	in ground	1,40E-04	kg
Calcite, in ground	Resource	in ground	8,60E-05	kg
Sodium chloride, in ground	Resource	in ground	2,83E-05	kg
Gangue, bauxite, in ground	Resource	in ground	2,24E-05	kg
Clay, unspecified, in ground	Resource	in ground	1,54E-05	kg
Barium, in ground	Resource	in ground	1,11E-05	kg
Sulfur, in ground	Resource	in ground	9,67E-06	kg
Granite, in ground	Resource	in ground	4,93E-06	kg
Metamorphous rock, graphite containing, in ground	Resource	in ground	4,09E-06	kg
Copper, in ground	Resource	in ground	3,97E-06	kg
Silicon, in ground	Resource	in ground	3,35E-06	kg
Magnesite, in ground	Resource	in ground	3,00E-06	kg
Aluminium, in ground	Resource	in ground	2,66E-06	kg
Nickel, in ground	Resource	in ground	2,46E-06	kg
Manganese, in ground	Resource	in ground	2,28E-06	kg
Fluorspar, in ground	Resource	in ground	1,98E-06	kg
Clay, bentonite, in ground	Resource	in ground	1,95E-06	kg
Dolomite, in ground	Resource	in ground	1,68E-06	kg
Gypsum, in ground	Resource	in ground	1,42E-06	kg
Magnesium, in ground	Resource	in ground	9,48E-07	kg
Chromium, in ground	Resource	in ground	9,34E-07	kg
Kaolinite, in ground	Resource	in ground	7,95E-07	kg
Water, unspecified natural origin	Resource	in ground	7,37E-07	m3
Zinc, in ground	Resource	in ground	7,34E-07	kg
Lithium, in ground	Resource	in ground	4,62E-07	kg
Phosphorus, in ground	Resource	in ground	3,30E-07	kg
Titanium, in ground	Resource	in ground	2,69E-07	kg
Colemanite, in ground	Resource	in ground	2,56E-07	kg
Laterite, in ground	Resource	in ground	2,10E-07	kg
Calcium, in ground	Resource	in ground	1,73E-07	kg
Lead, in ground	Resource	in ground	1,61E-07	kg
Basalt, in ground	Resource	in ground	1,48E-07	kg
Sylvite, in ground	Resource	in ground	1,30E-07	kg

Talc, in ground	Resource	in ground	9,97E-08	kg
Carbon, organic, in soil or biomass stock	Resource	in ground	8,11E-08	kg
Cobalt, in ground	Resource	in ground	7,23E-08	kg
Molybdenum, in ground	Resource	in ground	6,31E-08	kg
Fluorine, in ground	Resource	in ground	4,89E-08	kg
Zirconium, in ground	Resource	in ground	4,08E-08	kg
Tin, in ground	Resource	in ground	3,48E-08	kg
Potassium, in ground	Resource	in ground	2,55E-08	kg
Sodium sulphate, various forms, in ground	Resource	in ground	1,49E-08	kg
Silver, in ground	Resource	in ground	8,57E-09	kg
Tantalum, in ground	Resource	in ground	6,18E-09	kg
Selenium, in ground	Resource	in ground	4,97E-09	kg
Chrysotile, in ground	Resource	in ground	4,31E-09	kg
Spodumene, in ground	Resource	in ground	4,11E-09	kg
Cerium, in ground	Resource	in ground	3,37E-09	kg
Lanthanum, in ground	Resource	in ground	2,16E-09	kg
Ulexite, in ground	Resource	in ground	2,10E-09	kg
Gold, in ground	Resource	in ground	1,41E-09	kg
Arsenic, in ground	Resource	in ground	1,33E-09	kg
Sodium nitrate, in ground	Resource	in ground	1,27E-09	kg
Neodymium, in ground	Resource	in ground	1,09E-09	kg
Borax, in ground	Resource	in ground	1,06E-09	kg
Tellurium, in ground	Resource	in ground	9,13E-10	kg
Gallium, in ground	Resource	in ground	6,55E-10	kg
Volume occupied, underground deposit	Resource	in ground	5,60E-10	m3
Anhydrite, in ground	Resource	in ground	4,84E-10	kg
Praseodymium, in ground	Resource	in ground	3,47E-10	kg
Feldspar, in ground	Resource	in ground	2,30E-10	kg
Platinum, in ground	Resource	in ground	2,17E-10	kg
Palladium, in ground	Resource	in ground	2,14E-10	kg
Strontium, in ground	Resource	in ground	1,84E-10	kg
Sodium, in ground	Resource	in ground	9,84E-11	kg
Samarium, in ground	Resource	in ground	8,66E-11	kg
Cadmium, in ground	Resource	in ground	8,46E-11	kg
Perlite, in ground	Resource	in ground	8,40E-11	kg
Olivine, in ground	Resource	in ground	5,12E-11	kg
Gadolinium, in ground	Resource	in ground	4,26E-11	kg
Volume occupied, final repository for low-active radioactive waste	Resource	in ground	3,77E-11	m3
Rhodium, in ground	Resource	in ground	2,97E-11	kg
Diatomite, in ground	Resource	in ground	2,52E-11	kg
Europium, in ground	Resource	in ground	1,68E-11	kg
Yttrium, in ground	Resource	in ground	1,47E-11	kg
Rhenium, in ground	Resource	in ground	6,55E-12	kg
Antimony, in ground	Resource	in ground	5,97E-12	kg

Mercury, in ground	Resource	in ground	4,13E-12	kg
Dysprosium, in ground	Resource	in ground	4,02E-12	kg
Volume occupied, final repository for radioactive waste	Resource	in ground	3,31E-12	m3
Vanadium, in ground	Resource	in ground	3,29E-12	kg
Terbium, in ground	Resource	in ground	2,41E-12	kg
Kieserite, in ground	Resource	in ground	4,40E-15	kg

Tabella 49 – Materie prime risultanti dall'inventario dell'analisi di ciclo di vita della carrozza propulsiva, riferite al passeggero-km.

7.2 Allegato 2

EMISSIONI				
Name	Name	Name	Amount	Unit
Carbon dioxide, fossil	Emission to air	high population density	2,57E-02	kg
Carbon dioxide, fossil	Emission to air	low population density	2,70E-03	kg
Carbon dioxide, fossil	Emission to air	unspecified	2,50E-04	kg
Carbon dioxide, non-fossil	Emission to air	high population density	1,20E-04	kg
Methane, fossil	Emission to air	low population density	1,00E-04	kg
Carbon dioxide, non-fossil	Emission to air	low population density	9,55E-05	kg
Sulfur dioxide	Emission to air	low population density	2,01E-05	kg
Nitrogen oxides	Emission to air	high population density	9,94E-06	kg
Carbon dioxide, fossil	Emission to air	low population density, long-term	6,71E-06	kg
Nitrogen oxides	Emission to air	low population density	6,28E-06	kg
Carbon dioxide, non-fossil	Emission to air	unspecified	4,21E-06	kg
Carbon monoxide, fossil	Emission to air	high population density	3,17E-06	kg
Carbon monoxide, fossil	Emission to air	low population density	3,06E-06	kg
Phosphate	Emission to water	ground water, long-term	2,94E-06	kg
Carbon monoxide, fossil	Emission to air	unspecified	2,60E-06	kg
Carbon dioxide, from soil or biomass stock	Emission to air	low population density	2,14E-06	kg
Particulates, > 10 um	Emission to air	low population density	2,08E-06	kg
Nitrogen oxides	Emission to air	unspecified	1,90E-06	kg
Methane, fossil	Emission to air	unspecified	1,73E-06	kg
Sulfur dioxide	Emission to air	high population density	1,68E-06	kg
Particulates, < 2.5 um	Emission to air	low population density	1,15E-06	kg
Methane, non-fossil	Emission to air	low population density	7,41E-07	kg
Carbon monoxide, fossil	Emission to air	low population density, long-term	6,98E-07	kg
Methane, fossil	Emission to air	high population density	6,53E-07	kg

Sulfur dioxide	Emission to air	unspecified	5,75E-07	kg
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	Emission to air	low population density	4,99E-07	kg
Particulates, > 10 um	Emission to air	unspecified	4,65E-07	kg
Phosphate	Emission to water	ground water	3,40E-07	kg
Carbon monoxide, non-fossil	Emission to air	high population density	1,87E-07	kg
Particulates, < 2.5 um	Emission to air	high population density	1,73E-07	kg
Carbon dioxide, from soil or biomass stock	Emission to air	unspecified	1,73E-07	kg
Particulates, < 2.5 um	Emission to air	unspecified	1,39E-07	kg
Carbon dioxide, to soil or biomass stock	Emission to soil	agricultural	1,17E-07	kg
Sulfur dioxide	Emission to air	low population density, long-term	1,02E-07	kg
Methane, non-fossil	Emission to air	unspecified	7,33E-08	kg
Carbon monoxide, non-fossil	Emission to air	low population density	6,91E-08	kg
Particulates, > 10 um	Emission to air	high population density	6,37E-08	kg
Sulfur oxides	Emission to air	unspecified	5,88E-08	kg
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	Emission to air	high population density	5,87E-08	kg
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	Emission to air	unspecified	4,81E-08	kg
Phosphate	Emission to water	surface water	4,16E-08	kg
Nitrogen oxides	Emission to air	low population density, long-term	3,58E-08	kg
Particulates, > 10 um	Emission to air	low population density, long-term	2,80E-08	kg
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	Emission to air	low population density, long-term	2,09E-08	kg
Particulates, < 2.5 um	Emission to air	low population density, long-term	1,04E-08	kg
Methane, non-fossil	Emission to air	high population density	9,11E-09	kg
Carbon dioxide, to soil or biomass stock	Emission to soil	unspecified	5,18E-09	kg
Sulfur trioxide	Emission to air	high population density	4,92E-09	kg
Sulfur trioxide	Emission to air	unspecified	4,01E-09	kg
Carbon monoxide, from soil or biomass stock	Emission to air	low population density	3,79E-09	kg
Carbon monoxide, non-fossil	Emission to air	unspecified	3,61E-09	kg
Sulfuric acid	Emission to water	surface water	2,07E-09	kg
Carbon dioxide, fossil	Emission to air	lower stratosphere + upper troposphere	1,91E-09	kg
Phosphate	Emission to water	ocean	6,04E-10	kg
Sulfuric acid	Emission to soil	agricultural	4,12E-10	kg
Methane, fossil	Emission to air	low population density, long-term	1,05E-10	kg

Sulfuric acid	Emission to air	unspecified	8,19E-11	kg
Nitrogen oxides	Emission to air	lower stratosphere + upper troposphere	7,59E-11	kg
Methane	Emission to air	high population density	7,96E-12	kg
Carbon monoxide, fossil	Emission to air	lower stratosphere + upper troposphere	1,45E-12	kg
Sulfuric acid	Emission to air	low population density	1,12E-12	kg
Sulfur dioxide	Emission to air	lower stratosphere + upper troposphere	5,16E-13	kg
Sulfuric acid	Emission to air	high population density	4,69E-13	kg
Particulates, < 2.5 um	Emission to air	lower stratosphere + upper troposphere	1,04E-13	kg
Sulfuric acid	Emission to air	low population density, long-term	4,84E-15	kg
Phosphate	Emission to water	unspecified	3,57E-15	kg
Phosphoric acid	Emission to air	low population density	1,06E-16	kg
Phosphoric acid	Emission to air	high population density	4,10E-19	kg

Tabella 50– Emissioni selezionate tra le emissioni risultanti dall'inventario dell'analisi di ciclo di vita della carrozza propulsiva, riferite al passeggero-km.

7.3 Allegato 3

Name	Category	Inventory result	Unit	Impact factor	Unit	Impact result	Unit
ionising radiation - IRP_HE						0.00030	kg U235-Eq
Radon-222	Emission to air / low population density, long-term	0.16093	kBq	0.00114	kg U235-Eq/kBq	0.00018	kg U235-Eq
Carbon-14	Emission to air / low population density	1,11E+00	kBq	1.000.000	kg U235-Eq/kBq	0.00011	kg U235-Eq
Radon-222	Emission to air / low population density	0.00455	kBq	0.00114	kg U235-Eq/kBq	5,20E-01	kg U235-Eq
particulate matter formation - PMFP						1,06E+00	kg PM10-Eq
Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	2,01E+00	kg	0.20000	kg PM10-Eq/kg	4,02E-01	kg PM10-Eq
Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	9,94E-01	kg	0.22000	kg PM10-Eq/kg	2,19E-01	kg PM10-Eq
Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	6,28E-01	kg	0.22000	kg PM10-Eq/kg	1,38E-01	kg PM10-Eq
Particulates, < 2.5 um	Emission to air / low population density	1,15E-01	kg	100.000	kg PM10-Eq/kg	1,15E-01	kg PM10-Eq
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	Emission to air / low population density	4,99E-02	kg	100.000	kg PM10-Eq/kg	4,99E-02	kg PM10-Eq
Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	1,90E-01	kg	0.22000	kg PM10-Eq/kg	4,17E-02	kg PM10-Eq
Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	1,68E-01	kg	0.20000	kg PM10-Eq/kg	3,35E-02	kg PM10-Eq
Particulates, < 2.5 um	Emission to air / high population density	1,73E-02	kg	100.000	kg PM10-Eq/kg	1,73E-02	kg PM10-Eq
Particulates, < 2.5 um	Emission to air / unspecified	1,39E-02	kg	100.000	kg PM10-Eq/kg	1,39E-02	kg PM10-Eq
Sulfur dioxide	Emission to air / unspecified	5,75E-02	kg	0.20000	kg PM10-Eq/kg	1,15E-02	kg PM10-Eq
human toxicity - HTPinf						0.00134	kg 1,4-DCB-Eq
Manganese	Emission to water / ground water, long-term	7,55E-02	kg	70.045.681	kg 1,4-DCB-Eq/kg	0.00053	kg 1,4-DCB-Eq
Barium	Emission to water / ground water, long-term	3,92E-02	kg	41.201.231	kg 1,4-DCB-Eq/kg	0.00016	kg 1,4-DCB-Eq
Arsenic, ion	Emission to water / ground water, long-term	8,82E-04	kg	1,49E+09	kg 1,4-DCB-Eq/kg	0.00013	kg 1,4-DCB-Eq
Arsenic, ion	Emission to water / surface water	4,78E-04	kg	1,49E+09	kg 1,4-DCB-Eq/kg	7,13E+00	kg 1,4-DCB-Eq
Lead	Emission to water / ground water, long-term	2,51E-02	kg	22.037.795	kg 1,4-DCB-Eq/kg	5,53E+00	kg 1,4-DCB-Eq
Phosphorus	Emission to soil / industrial	3,86E-04	kg	945.388.102	kg 1,4-DCB-Eq/kg	3,65E+00	kg 1,4-DCB-Eq
Barium	Emission to water / unspecified	8,59E-03	kg	41.201.231	kg 1,4-DCB-Eq/kg	3,54E+00	kg 1,4-DCB-Eq

Selenium	Emission to water / ground water, long-term	2,92E-04	kg	1,06E+09	kg 1,4-DCB-Eq/kg	3,10E+00	kg 1,4-DCB-Eq
Phosphorus	Emission to soil / agricultural	2,83E-04	kg	943.653.742	kg 1,4-DCB-Eq/kg	2,67E+00	kg 1,4-DCB-Eq
Arsenic, ion	Emission to water / ground water	1,44E-04	kg	1,49E+09	kg 1,4-DCB-Eq/kg	2,15E+00	kg 1,4-DCB-Eq
Vanadium, ion	Emission to water / ground water, long-term	5,21E-03	kg	37.170.700	kg 1,4-DCB-Eq/kg	1,94E+00	kg 1,4-DCB-Eq
Mercury	Emission to water / ground water, long-term	7,59E-05	kg	2,51E+09	kg 1,4-DCB-Eq/kg	1,90E+00	kg 1,4-DCB-Eq
Molybdenum	Emission to water / ground water, long-term	1,11E-03	kg	129.562.498	kg 1,4-DCB-Eq/kg	1,44E+00	kg 1,4-DCB-Eq
Zinc, ion	Emission to water / ground water, long-term	3,93E-02	kg	3.616.120	kg 1,4-DCB-Eq/kg	1,42E+00	kg 1,4-DCB-Eq
natural land transformation - NLTP						5,03E-01	m2
Transformation, from forest, unspecified	Resource / land	3,35E-01	m2	100.000	m2/m2	3,35E-01	m2
Transformation, from seabed, unspecified	Resource / land	1,57E-01	m2	100.000	m2/m2	1,57E-01	m2
Transformation, from forest, intensive	Resource / land	1,41E-01	m2	100.000	m2/m2	1,41E-01	m2
Transformation, from unspecified	Resource / land	7,09E-02	m2	0.40000	m2/m2	2,84E-02	m2
Transformation, from forest, extensive	Resource / land	2,11E-02	m2	100.000	m2/m2	2,11E-02	m2
Transformation, to forest, extensive	Resource / land	1,40E-02	m2	-100.000	m2/m2	-1,40E-02	m2
Transformation, to unspecified	Resource / land	3,77E-02	m2	-0.40000	m2/m2	-1,51E-02	m2
Transformation, to forest, intensive	Resource / land	1,48E-01	m2	-100.000	m2/m2	-1,48E-01	m2
ozone depletion - ODPinf						6,75E-04	kg CFC-11-Eq
Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	Emission to air / low population density	1,03E-04	kg	600.000	kg CFC-11-Eq/kg	6,18E-04	kg CFC-11-Eq
Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	Emission to air / low population density	3,50E-04	kg	0.05000	kg CFC-11-Eq/kg	1,75E-05	kg CFC-11-Eq
Methane, tetrachloro-, R-10	Emission to air / high population density	2,06E-05	kg	0.73000	kg CFC-11-Eq/kg	1,50E-05	kg CFC-11-Eq
Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	Emission to air / low population density	9,63E-07	kg	1.200.000	kg CFC-11-Eq/kg	1,16E-05	kg CFC-11-Eq
Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	Emission to air / high population density	9,21E-06	kg	100.000	kg CFC-11-Eq/kg	9,21E-06	kg CFC-11-Eq
freshwater eutrophication - FEP						1,10E-01	kg P-Eq
Phosphate	Emission to water / ground water, long-term	2,94E-01	kg	0.33000	kg P-Eq/kg	9,69E-02	kg P-Eq
Phosphate	Emission to water / ground water	3,40E-02	kg	0.33000	kg P-Eq/kg	1,12E-02	kg P-Eq
Phosphate	Emission to water / surface water	4,16E-03	kg	0.33000	kg P-Eq/kg	1,37E-03	kg P-Eq
marine eutrophication - MEP						7,40E-01	kg N-Eq
Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	9,94E-01	kg	0.38900	kg N-Eq/kg	3,87E-01	kg N-Eq
Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	6,28E-01	kg	0.38900	kg N-Eq/kg	2,44E-01	kg N-Eq
Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	1,90E-01	kg	0.38900	kg N-Eq/kg	7,38E-02	kg N-Eq
Nitrate	Emission to water / ground water, long-term	7,63E-02	kg	0.22600	kg N-Eq/kg	1,72E-02	kg N-Eq
climate change - GWP100						0,03140	kg CO2-Eq
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / high population density	0.02566	kg	100.000	kg CO2-Eq/kg	0.02566	kg CO2-Eq
Carbon dioxide, fossil	Emission to air / low population density	0.00270	kg	100.000	kg CO2-Eq/kg	0.00270	kg CO2-Eq
Methane, fossil	Emission to air / low population density	0.00010	kg	2.500.000	kg CO2-Eq/kg	0.00261	kg CO2-Eq
fossil depletion - FDP						0,01422	kg oil-Eq
Gas, natural, in ground	Resource / in ground	0.01511	m3	0.91200	kg oil-Eq/m3	0.01378	kg oil-Eq
Coal, hard, unspecified, in ground	Resource / in ground	0.00057	kg	0.45500	kg oil-Eq/kg	0.00026	kg oil-Eq
Oil, crude, in ground	Resource / in ground	0.00013	kg	109.000	kg oil-Eq/kg	0.00014	kg oil-Eq
water depletion - WDP						7,80E+00	m3
Water, river	Resource / in water	3,96E+00	m3	100.000	m3/m3	3,96E+00	m3
Water, well, in ground	Resource / in water	3,82E+00	m3	100.000	m3/m3	3,82E+00	m3
metal depletion - MDP						0,00072	kg Fe-Eq
Manganese, in ground	Resource / in ground	2,28E-01	kg	7.661.443	kg Fe-Eq/kg	0.00017	kg Fe-Eq
Copper, in ground	Resource / in ground	3,97E-01	kg	4.268.864	kg Fe-Eq/kg	0.00017	kg Fe-Eq
Iron, in ground	Resource / in ground	0.00014	kg	100.000	kg Fe-Eq/kg	0.00014	kg Fe-Eq
Gold, in ground	Resource / in ground	1,41E-04	kg	6,99E+09	kg Fe-Eq/kg	9,84E+00	kg Fe-Eq
Tin, in ground	Resource / in ground	3,48E-03	kg	127.131.277	kg Fe-Eq/kg	4,43E+00	kg Fe-Eq
Platinum, in ground	Resource / in ground	2,17E-05	kg	1,63E+10	kg Fe-Eq/kg	3,54E+00	kg Fe-Eq
Nickel, in ground	Resource / in ground	2,46E-01	kg	1.252.775	kg Fe-Eq/kg	3,09E+00	kg Fe-Eq
Chromium, in ground	Resource / in ground	9,34E-02	kg	2.493.226	kg Fe-Eq/kg	2,33E+00	kg Fe-Eq
agricultural land occupation - ALOP						0,00014	m2a
Occupation, forest, intensive	Resource / land	0.00012	m2*a	100.000	m2a/m2*a	0.00012	m2a
Occupation, forest, extensive	Resource / land	1,82E+00	m2*a	100.000	m2a/m2*a	1,82E+00	m2a
terrestrial ecotoxicity - TETPinf						3,60E-02	kg 1,4-DCB-Eq
Cypermethrin	Emission to soil / agricultural	8,62E-07	kg	1,12E+09	kg 1,4-DCB-Eq/kg	9,70E-03	kg 1,4-DCB-Eq
Bromine	Emission to water / unspecified	1,08E-02	kg	0.58756	kg 1,4-DCB-Eq/kg	6,35E-03	kg 1,4-DCB-Eq
Copper	Emission to air / unspecified	9,39E-05	kg	3.293.654	kg 1,4-DCB-Eq/kg	2,19E-03	kg 1,4-DCB-Eq
Barium	Emission to soil / industrial	3,11E-03	kg	0.68696	kg 1,4-DCB-Eq/kg	2,13E-03	kg 1,4-DCB-Eq
Zinc	Emission to soil / industrial	2,60E-04	kg	518.227	kg 1,4-DCB-Eq/kg	1,35E-03	kg 1,4-DCB-Eq
Copper	Emission to soil / industrial	7,53E-05	kg	1.706.818	kg 1,4-DCB-Eq/kg	1,29E-03	kg 1,4-DCB-Eq

Vanadium	Emission to air / high population density	1,71E-04	kg	623.733	kg 1,4-DCB-Eq/kg	1,07E-03	kg 1,4-DCB-Eq
Copper	Emission to air / low population density, long-term	1,86E-04	kg	521.308	kg 1,4-DCB-Eq/kg	9,67E-04	kg 1,4-DCB-Eq
Mercury	Emission to air / low population density	8,29E-06	kg	7.869.591	kg 1,4-DCB-Eq/kg	6,53E-04	kg 1,4-DCB-Eq
Copper	Emission to soil / unspecified	3,42E-05	kg	1.706.818	kg 1,4-DCB-Eq/kg	5,83E-04	kg 1,4-DCB-Eq
Chlorine	Emission to air / high population density	1,32E-03	kg	0.44217	kg 1,4-DCB-Eq/kg	5,83E-04	kg 1,4-DCB-Eq
Titanium	Emission to soil / unspecified	1,51E-04	kg	370.350	kg 1,4-DCB-Eq/kg	5,60E-04	kg 1,4-DCB-Eq
Nickel	Emission to air / low population density, long-term	2,20E-04	kg	252.386	kg 1,4-DCB-Eq/kg	5,55E-04	kg 1,4-DCB-Eq
Copper	Emission to air / high population density	1,53E-05	kg	3.293.654	kg 1,4-DCB-Eq/kg	5,05E-04	kg 1,4-DCB-Eq
Bromine	Emission to water / surface water	7,02E-04	kg	0.58756	kg 1,4-DCB-Eq/kg	4,12E-04	kg 1,4-DCB-Eq
Copper	Emission to air / low population density	6,96E-05	kg	521.308	kg 1,4-DCB-Eq/kg	3,63E-04	kg 1,4-DCB-Eq
urban land occupation - ULOP						4,01E+00	m2a
Occupation, dump site	Resource / land	1,31E+00	m2*a	100.000	m2a/m2*a	1,31E+00	m2a
Occupation, mineral extraction site	Resource / land	1,01E+00	m2*a	100.000	m2a/m2*a	1,01E+00	m2a
Occupation, industrial area	Resource / land	6,29E-01	m2*a	100.000	m2a/m2*a	6,29E-01	m2a
Occupation, traffic area, road network	Resource / land	3,57E-01	m2*a	100.000	m2a/m2*a	3,57E-01	m2a
Occupation, traffic area, rail/road embankment	Resource / land	2,79E-01	m2*a	100.000	m2a/m2*a	2,79E-01	m2a
Occupation, construction site	Resource / land	2,04E-01	m2*a	100.000	m2a/m2*a	2,04E-01	m2a
Occupation, seabed, drilling and mining	Resource / land	1,57E-01	m2*a	100.000	m2a/m2*a	1,57E-01	m2a
Occupation, traffic area, rail network	Resource / land	5,84E-02	m2*a	100.000	m2a/m2*a	5,84E-02	m2a
photochemical oxidant formation - POFP						3,22E+00	kg NMVOC
Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	9,94E-01	kg	100.000	kg NMVOC/kg	9,94E-01	kg NMVOC
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air / low population density	9,03E-01	kg	100.000	kg NMVOC/kg	9,03E-01	kg NMVOC
Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	6,28E-01	kg	100.000	kg NMVOC/kg	6,28E-01	kg NMVOC
Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	1,90E-01	kg	100.000	kg NMVOC/kg	1,90E-01	kg NMVOC
Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	2,01E+00	kg	0.08108	kg NMVOC/kg	1,63E-01	kg NMVOC
Methane, fossil	Emission to air / low population density	0.00010	kg	0.01014	kg NMVOC/kg	1,06E-01	kg NMVOC
Ethane	Emission to air / low population density	2,73E-01	kg	0.20777	kg NMVOC/kg	5,68E-02	kg NMVOC
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air / unspecified	4,20E-02	kg	100.000	kg NMVOC/kg	4,20E-02	kg NMVOC
marine ecotoxicity - METPinf						0.00021	kg 1,4-DCB-Eq
Copper, ion	Emission to water / ground water, long-term	1,60E-01	kg	10.116.701	kg 1,4-DCB-Eq/kg	0.00016	kg 1,4-DCB-Eq
Nickel, ion	Emission to water / ground water, long-term	1,67E-02	kg	9.594.431	kg 1,4-DCB-Eq/kg	1,61E+00	kg 1,4-DCB-Eq
Vanadium, ion	Emission to water / ground water, long-term	5,21E-03	kg	9.468.844	kg 1,4-DCB-Eq/kg	4,94E-01	kg 1,4-DCB-Eq
Silver, ion	Emission to water / ground water, long-term	1,41E-03	kg	32.008.328	kg 1,4-DCB-Eq/kg	4,52E-01	kg 1,4-DCB-Eq
Zinc, ion	Emission to water / ocean	5,89E-03	kg	6.957.824	kg 1,4-DCB-Eq/kg	4,10E-01	kg 1,4-DCB-Eq
Manganese	Emission to water / ground water, long-term	7,55E-02	kg	414.164	kg 1,4-DCB-Eq/kg	3,13E-01	kg 1,4-DCB-Eq
Zinc, ion	Emission to water / ground water, long-term	3,93E-02	kg	600.725	kg 1,4-DCB-Eq/kg	2,36E-01	kg 1,4-DCB-Eq
terrestrial acidification - TAP100						3,31E+00	kg SO2-Eq
Sulfur dioxide	Emission to air / low population density	2,01E+00	kg	100.000	kg SO2-Eq/kg	2,01E+00	kg SO2-Eq
Nitrogen oxides	Emission to air / high population density	9,94E-01	kg	0.56000	kg SO2-Eq/kg	5,56E-01	kg SO2-Eq
Nitrogen oxides	Emission to air / low population density	6,28E-01	kg	0.56000	kg SO2-Eq/kg	3,52E-01	kg SO2-Eq
Sulfur dioxide	Emission to air / high population density	1,68E-01	kg	100.000	kg SO2-Eq/kg	1,68E-01	kg SO2-Eq
Nitrogen oxides	Emission to air / unspecified	1,90E-01	kg	0.56000	kg SO2-Eq/kg	1,06E-01	kg SO2-Eq
Sulfur dioxide	Emission to air / unspecified	5,75E-02	kg	100.000	kg SO2-Eq/kg	5,75E-02	kg SO2-Eq
freshwater ecotoxicity - FETPinf						0.00023	kg 1,4-DCB-Eq
Copper, ion	Emission to water / ground water, long-term	1,60E-01	kg	11.771.938	kg 1,4-DCB-Eq/kg	0.00019	kg 1,4-DCB-Eq
Nickel, ion	Emission to water / ground water, long-term	1,67E-02	kg	9.843.514	kg 1,4-DCB-Eq/kg	1,65E+00	kg 1,4-DCB-Eq
Silver, ion	Emission to water / ground water, long-term	1,41E-03	kg	39.712.145	kg 1,4-DCB-Eq/kg	5,60E-01	kg 1,4-DCB-Eq
Vanadium, ion	Emission to water / ground water, long-term	5,21E-03	kg	9.559.801	kg 1,4-DCB-Eq/kg	4,99E-01	kg 1,4-DCB-Eq
Bromine	Emission to water / unspecified	1,08E-02	kg	3.373.066	kg 1,4-DCB-Eq/kg	3,64E-01	kg 1,4-DCB-Eq
Manganese	Emission to water / ground water, long-term	7,55E-02	kg	441.167	kg 1,4-DCB-Eq/kg	3,33E-01	kg 1,4-DCB-Eq
Zinc, ion	Emission to water / ground water, long-term	3,93E-02	kg	751.632	kg 1,4-DCB-Eq/kg	2,95E-01	kg 1,4-DCB-Eq

Tabella 51 – Valutazione degli impatti del ciclo di vita della carrozza propulsiva del treno a idrogeno nello scenario di base, riportando i flussi che contribuiscono maggiormente a ogni categoria di impatto.

7.4 Allegato 4

Name	Category	Impact result	Unit
ionising radiation - IRP_HE		0.00030	kg U235-Eq
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - IT	351:Electric power generation, transmission and distribution / 3510:Electric power generation, transmission and distribution	0.00016	kg U235-Eq
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, S - IT	352:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains / 3520:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains	6,52E+00	kg U235-Eq
electronic component production, active, unspecified electronic component, active, unspecified Cutoff, S - GLO	261:Manufacture of electronic components and boards / 2610:Manufacture of electronic components and boards	2,53E+00	kg U235-Eq
carbon fibre reinforced plastic, injection moulded carbon fibre reinforced plastic, injection moulded Cutoff, S - GLO	222:Manufacture of plastics products / 2220:Manufacture of plastics products	1,28E+00	kg U235-Eq
nickel sulfate production nickel sulfate Cutoff, S - GLO	201:Manufacture of basic chemicals, fertilizers and nitrogen compounds, plastics and synthetic rubber in primary forms / 2011:Manufacture of basic chemicals	7,07E-01	kg U235-Eq
cobalt production nickel sulfate Cutoff, S - GLO	072:Mining of non-ferrous metal ores / 0729:Mining of other non-ferrous metal ores	3,18E-01	kg U235-Eq
particulate matter formation - PMFP		1,06E+00	kg PM10-Eq
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, S - IT	352:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains / 3520:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains	6,77E-01	kg PM10-Eq
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - IT	351:Electric power generation, transmission and distribution / 3510:Electric power generation, transmission and distribution	1,40E-01	kg PM10-Eq
nickel sulfate production nickel sulfate Cutoff, S - GLO	201:Manufacture of basic chemicals, fertilizers and nitrogen compounds, plastics and synthetic rubber in primary forms / 2011:Manufacture of basic chemicals	5,49E-02	kg PM10-Eq
electronic component production, active, unspecified electronic component, active, unspecified Cutoff, S - GLO	261:Manufacture of electronic components and boards / 2610:Manufacture of electronic components and boards	5,17E-02	kg PM10-Eq
carbon fibre reinforced plastic, injection moulded carbon fibre reinforced plastic, injection moulded Cutoff, S - GLO	222:Manufacture of plastics products / 2220:Manufacture of plastics products	3,43E-02	kg PM10-Eq
platinum to generic market for metal catalyst for catalytic converter metal catalyst for catalytic converter Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals / 2420:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals	2,45E-02	kg PM10-Eq
human toxicity - HTPinf		0.00134	kg 1,4-DCB-Eq
electronic component production, active, unspecified electronic component, active, unspecified Cutoff, S - GLO	261:Manufacture of electronic components and boards / 2610:Manufacture of electronic components and boards	0.00035	kg 1,4-DCB-Eq
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, S - IT	352:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains / 3520:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains	0.00027	kg 1,4-DCB-Eq
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - IT	351:Electric power generation, transmission and distribution / 3510:Electric power generation, transmission and distribution	0.00026	kg 1,4-DCB-Eq
smelting of copper concentrate, sulfide ore copper, anode Cutoff, S - CN	242:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals / 2420:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals	0.00010	kg 1,4-DCB-Eq

platinum to generic market for metal catalyst for catalytic converter metal catalyst for catalytic converter Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals / 2420:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals	7,36E+00	kg 1,4-DCB-Eq
carbon fibre reinforced plastic, injection moulded carbon fibre reinforced plastic, injection moulded Cutoff, S - GLO	222:Manufacture of plastics products / 2220:Manufacture of plastics products	5,18E+00	kg 1,4-DCB-Eq
nickel sulfate production nickel sulfate Cutoff, S - GLO	201:Manufacture of basic chemicals, fertilizers and nitrogen compounds, plastics and synthetic rubber in primary forms / 2011:Manufacture of basic chemicals	5,05E+00	kg 1,4-DCB-Eq
electronic component production, passive, unspecified electronic component, passive, unspecified Cutoff, S - GLO	261:Manufacture of electronic components and boards / 2610:Manufacture of electronic components and boards	3,21E+00	kg 1,4-DCB-Eq
pump production, 40W pump, 40W Cutoff, S - CH	281:Manufacture of general-purpose machinery / 2812:Manufacture of fluid power equipment	1,92E+00	kg 1,4-DCB-Eq
natural land transformation - NLTP		5,03E-01	m2
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, S - IT	352:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains / 3520:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains	4,72E-01	m2
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - IT	351:Electric power generation, transmission and distribution / 3510:Electric power generation, transmission and distribution	1,73E-02	m2
ozone depletion - ODPinf		6,75E-04	kg CFC-11-Eq
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, S - IT	352:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains / 3520:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains	6,29E-04	kg CFC-11-Eq
tetrafluoroethylene production tetrafluoroethylene Cutoff, S - RER	201:Manufacture of basic chemicals, fertilizers and nitrogen compounds, plastics and synthetic rubber in primary forms / 2013:Manufacture of plastics and synthetic rubber in primary forms	2,36E-05	kg CFC-11-Eq
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - IT	351:Electric power generation, transmission and distribution / 3510:Electric power generation, transmission and distribution	1,62E-05	kg CFC-11-Eq
freshwater eutrophication - FEP		1,10E-01	kg P-Eq
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - IT	351:Electric power generation, transmission and distribution / 3510:Electric power generation, transmission and distribution	3,02E-02	kg P-Eq
electronic component production, active, unspecified electronic component, active, unspecified Cutoff, S - GLO	261:Manufacture of electronic components and boards / 2610:Manufacture of electronic components and boards	2,76E-02	kg P-Eq
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, S - IT	352:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains / 3520:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains	2,38E-02	kg P-Eq
carbon fibre reinforced plastic, injection moulded carbon fibre reinforced plastic, injection moulded Cutoff, S - GLO	222:Manufacture of plastics products / 2220:Manufacture of plastics products	5,68E-03	kg P-Eq
smelting of copper concentrate, sulfide ore copper, anode Cutoff, S - CN	242:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals / 2420:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals	5,11E-03	kg P-Eq
nickel sulfate production nickel sulfate Cutoff, S - GLO	201:Manufacture of basic chemicals, fertilizers and nitrogen compounds, plastics and synthetic rubber in primary forms / 2011:Manufacture of basic chemicals	2,50E-03	kg P-Eq

platinum to generic market for metal catalyst for catalytic converter metal catalyst for catalytic converter Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals / 2420:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals	2,50E-03	kg P-Eq
electronic component production, passive, unspecified electronic component, passive, unspecified Cutoff, S - GLO	261:Manufacture of electronic components and boards / 2610:Manufacture of electronic components and boards	2,26E-03	kg P-Eq
pump production, 40W pump, 40W Cutoff, S - CH	281:Manufacture of general-purpose machinery / 2812:Manufacture of fluid power equipment	1,14E-03	kg P-Eq
marine eutrophication - MEP		7,40E-01	kg N-Eq
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, S - IT	352:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains / 3520:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains	5,44E-01	kg N-Eq
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - IT	351:Electric power generation, transmission and distribution / 3510:Electric power generation, transmission and distribution	9,55E-02	kg N-Eq
electronic component production, active, unspecified electronic component, active, unspecified Cutoff, S - GLO	261:Manufacture of electronic components and boards / 2610:Manufacture of electronic components and boards	2,71E-02	kg N-Eq
carbon fibre reinforced plastic, injection moulded carbon fibre reinforced plastic, injection moulded Cutoff, S - GLO	222:Manufacture of plastics products / 2220:Manufacture of plastics products	1,45E-02	kg N-Eq
platinum to generic market for metal catalyst for catalytic converter metal catalyst for catalytic converter Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals / 2420:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals	1,13E-02	kg N-Eq
climate change - GWP100		0.03140	kg CO2-Eq
Steam methane reforming hydrogen production, senza green mix	USO DELLA CARROZZA	0.02249	kg CO2-Eq
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, S - IT	352:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains / 3520:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains	0.00690	kg CO2-Eq
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - IT	351:Electric power generation, transmission and distribution / 3510:Electric power generation, transmission and distribution	0.00133	kg CO2-Eq
fossil depletion - FDP		0.01422	kg oil-Eq
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, S - IT	352:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains / 3520:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains	0.01355	kg oil-Eq
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - IT	351:Electric power generation, transmission and distribution / 3510:Electric power generation, transmission and distribution	0.00046	kg oil-Eq
water depletion - WDP		7,80E+00	m3
water production, deionised water, deionised Cutoff, S - Europe without Switzerland	360:Water collection, treatment and supply / 3600:Water collection, treatment and supply	6,57E+00	m3
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - IT	351:Electric power generation, transmission and distribution / 3510:Electric power generation, transmission and distribution	4,33E-01	m3
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, S - IT	352:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains / 3520:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains	3,23E-01	m3
electronic component production, active, unspecified electronic component, active, unspecified Cutoff, S - GLO	261:Manufacture of electronic components and boards / 2610:Manufacture of electronic components and boards	2,22E-01	m3
metal depletion - MDP		0.00072	kg Fe-Eq
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, S - IT	352:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains /	0.00019	kg Fe-Eq

	3520:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains		
electronic component production, active, unspecified electronic component, active, unspecified Cutoff, S - GLO	261:Manufacture of electronic components and boards / 2610:Manufacture of electronic components and boards	0.00013	kg Fe-Eq
nickel sulfate production nickel sulfate Cutoff, S - GLO	201:Manufacture of basic chemicals, fertilizers and nitrogen compounds, plastics and synthetic rubber in primary forms / 2011:Manufacture of basic chemicals	9,71E+00	kg Fe-Eq
smelting of copper concentrate, sulfide ore copper, anode Cutoff, S - CN	242:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals / 2420:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals	5,74E+00	kg Fe-Eq
manganese sulfate production manganese sulfate Cutoff, S - GLO	201:Manufacture of basic chemicals, fertilizers and nitrogen compounds, plastics and synthetic rubber in primary forms / 2011:Manufacture of basic chemicals	5,13E+00	kg Fe-Eq
platinum to generic market for metal catalyst for catalytic converter metal catalyst for catalytic converter Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals / 2420:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals	3,51E+00	kg Fe-Eq
cobalt production nickel sulfate Cutoff, S - GLO	072:Mining of non-ferrous metal ores / 0729:Mining of other non-ferrous metal ores	3,24E+00	kg Fe-Eq
steel production, converter, low-alloyed steel, low-alloyed Cutoff, S - RER	241:Manufacture of basic iron and steel / 2410:Manufacture of basic iron and steel	2,20E+00	kg Fe-Eq
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - IT	351:Electric power generation, transmission and distribution / 3510:Electric power generation, transmission and distribution	2,09E+00	kg Fe-Eq
electronic component production, passive, unspecified electronic component, passive, unspecified Cutoff, S - GLO	261:Manufacture of electronic components and boards / 2610:Manufacture of electronic components and boards	1,90E+00	kg Fe-Eq
pump production, 40W pump, 40W Cutoff, S - CH	281:Manufacture of general-purpose machinery / 2812:Manufacture of fluid power equipment	1,57E+00	kg Fe-Eq
steel production, electric, chromium steel 18/8 steel, chromium steel 18/8 Cutoff, S - RER	241:Manufacture of basic iron and steel / 2410:Manufacture of basic iron and steel	9,12E-01	kg Fe-Eq
agricultural land occupation - ALOP		0.00014	m2a
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - IT	351:Electric power generation, transmission and distribution / 3510:Electric power generation, transmission and distribution	7,45E+00	m2a
maintenance, train, passenger, regional maintenance, train, passenger, regional Cutoff, S - CH	331:Repair of fabricated metal products, machinery and equipment / 3315:Repair of transport equipment, except motor vehicles	2,63E+00	m2a
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, S - IT	352:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains / 3520:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains	1,46E+00	m2a
carbon fibre reinforced plastic, injection moulded carbon fibre reinforced plastic, injection moulded Cutoff, S - GLO	222:Manufacture of plastics products / 2220:Manufacture of plastics products	1,12E+00	m2a
electronic component production, active, unspecified electronic component, active, unspecified Cutoff, S - GLO	261:Manufacture of electronic components and boards / 2610:Manufacture of electronic components and boards	6,76E-01	m2a
terrestrial ecotoxicity - TETPinf		3,60E-02	kg 1,4-DCB-Eq
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, S - IT	352:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains / 3520:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains	2,13E-02	kg 1,4-DCB-Eq
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - IT	351:Electric power generation, transmission and distribution / 3510:Electric power generation, transmission and distribution	3,59E-03	kg 1,4-DCB-Eq

nickel sulfate production nickel sulfate Cutoff, S - GLO	201:Manufacture of basic chemicals, fertilizers and nitrogen compounds, plastics and synthetic rubber in primary forms / 2011:Manufacture of basic chemicals	2,93E-03	kg 1,4-DCB-Eq
electronic component production, active, unspecified electronic component, active, unspecified Cutoff, S - GLO	261:Manufacture of electronic components and boards / 2610:Manufacture of electronic components and boards	1,80E-03	kg 1,4-DCB-Eq
treatment of used Li-ion battery, pyrometallurgical treatment used Li-ion battery Cutoff, S - GLO	383:Materials recovery / 3830:Materials recovery	8,61E-04	kg 1,4-DCB-Eq
carbon fibre reinforced plastic, injection moulded carbon fibre reinforced plastic, injection moulded Cutoff, S - GLO	222:Manufacture of plastics products / 2220:Manufacture of plastics products	7,32E-04	kg 1,4-DCB-Eq
cobalt production nickel sulfate Cutoff, S - GLO	072:Mining of non-ferrous metal ores / 0729:Mining of other non-ferrous metal ores	6,07E-04	kg 1,4-DCB-Eq
maintenance, train, passenger, regional maintenance, train, passenger, regional Cutoff, S - CH	331:Repair of fabricated metal products, machinery and equipment / 3315:Repair of transport equipment, except motor vehicles	5,68E-04	kg 1,4-DCB-Eq
section bar rolling, steel section bar rolling, steel Cutoff, S - RER	241:Manufacture of basic iron and steel / 2410:Manufacture of basic iron and steel	5,19E-04	kg 1,4-DCB-Eq
lithium hexafluorophosphate production lithium hexafluorophosphate Cutoff, S - CN	201:Manufacture of basic chemicals, fertilizers and nitrogen compounds, plastics and synthetic rubber in primary forms / 2011:Manufacture of basic chemicals	4,29E-04	kg 1,4-DCB-Eq
water production, deionised water, deionised Cutoff, S - Europe without Switzerland	360:Water collection, treatment and supply / 3600:Water collection, treatment and supply	3,99E-04	kg 1,4-DCB-Eq
transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Cutoff, S - RER	492:Other land transport / 4923:Freight transport by road	3,75E-04	kg 1,4-DCB-Eq
urban land occupation - ULOP		4,01E+00	m2a
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, S - IT	352:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains / 3520:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains	1,72E+00	m2a
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - IT	351:Electric power generation, transmission and distribution / 3510:Electric power generation, transmission and distribution	5,90E-01	m2a
electronic component production, active, unspecified electronic component, active, unspecified Cutoff, S - GLO	261:Manufacture of electronic components and boards / 2610:Manufacture of electronic components and boards	5,67E-01	m2a
smelting of copper concentrate, sulfide ore copper, anode Cutoff, S - CN	242:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals / 2420:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals	2,62E-01	m2a
carbon fibre reinforced plastic, injection moulded carbon fibre reinforced plastic, injection moulded Cutoff, S - GLO	222:Manufacture of plastics products / 2220:Manufacture of plastics products	1,20E-01	m2a
nickel sulfate production nickel sulfate Cutoff, S - GLO	201:Manufacture of basic chemicals, fertilizers and nitrogen compounds, plastics and synthetic rubber in primary forms / 2011:Manufacture of basic chemicals	1,08E-01	m2a
electronic component production, passive, unspecified electronic component, passive, unspecified Cutoff, S - GLO	261:Manufacture of electronic components and boards / 2610:Manufacture of electronic components and boards	8,11E-02	m2a
platinum to generic market for metal catalyst for catalytic converter metal catalyst for catalytic converter Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals / 2420:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals	6,71E-02	m2a
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - CN-CSG	351:Electric power generation, transmission and distribution / 3510:Electric power generation, transmission and distribution	4,82E-02	m2a

pump production, 40W pump, 40W Cutoff, S - CH	281:Manufacture of general-purpose machinery / 2812:Manufacture of fluid power equipment	4,51E-02	m2a
water production, deionised water, deionised Cutoff, S - Europe without Switzerland	360:Water collection, treatment and supply / 3600:Water collection, treatment and supply	4,25E-02	m2a
transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Cutoff, S - RER	492:Other land transport / 4923:Freight transport by road	4,25E-02	m2a
maintenance, train, passenger, regional maintenance, train, passenger, regional Cutoff, S - CH	331:Repair of fabricated metal products, machinery and equipment / 3315:Repair of transport equipment, except motor vehicles	4,17E-02	m2a
photochemical oxidant formation - POFP		3,22E+00	kg NMVOC
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, S - IT	352:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains / 3520:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains	2,61E+00	kg NMVOC
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - IT	351:Electric power generation, transmission and distribution / 3510:Electric power generation, transmission and distribution	2,94E-01	kg NMVOC
electronic component production, active, unspecified electronic component, active, unspecified Cutoff, S - GLO	261:Manufacture of electronic components and boards / 2610:Manufacture of electronic components and boards	7,32E-02	kg NMVOC
carbon fibre reinforced plastic, injection moulded carbon fibre reinforced plastic, injection moulded Cutoff, S - GLO	222:Manufacture of plastics products / 2220:Manufacture of plastics products	4,33E-02	kg NMVOC
nickel sulfate production nickel sulfate Cutoff, S - GLO	201:Manufacture of basic chemicals, fertilizers and nitrogen compounds, plastics and synthetic rubber in primary forms / 2011:Manufacture of basic chemicals	4,08E-02	kg NMVOC
platinum to generic market for metal catalyst for catalytic converter metal catalyst for catalytic converter Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals / 2420:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals	3,99E-02	kg NMVOC
marine ecotoxicity - METPinf		0.00021	kg 1,4-DCB-Eq
electronic component production, active, unspecified electronic component, active, unspecified Cutoff, S - GLO	261:Manufacture of electronic components and boards / 2610:Manufacture of electronic components and boards	5,88E+00	kg 1,4-DCB-Eq
treatment of aluminium scrap, post-consumer, by collecting, sorting, cleaning, pressing aluminium scrap, post-consumer, prepared for melting Cutoff, S - RER	383:Materials recovery / 3830:Materials recovery	4,48E+00	kg 1,4-DCB-Eq
smelting of copper concentrate, sulfide ore copper, anode Cutoff, S - CN	242:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals / 2420:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals	2,24E+00	kg 1,4-DCB-Eq
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, S - IT	352:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains / 3520:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains	1,76E+00	kg 1,4-DCB-Eq
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - IT	351:Electric power generation, transmission and distribution / 3510:Electric power generation, transmission and distribution	1,63E+00	kg 1,4-DCB-Eq
nickel sulfate production nickel sulfate Cutoff, S - GLO	201:Manufacture of basic chemicals, fertilizers and nitrogen compounds, plastics and synthetic rubber in primary forms / 2011:Manufacture of basic chemicals	1,30E+00	kg 1,4-DCB-Eq
electronic component production, passive, unspecified electronic component, passive, unspecified Cutoff, S - GLO	261:Manufacture of electronic components and boards / 2610:Manufacture of electronic components and boards	5,93E-01	kg 1,4-DCB-Eq
treatment of aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling, at remelter aluminium, wrought alloy Cutoff, S - RER	242:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals / 2420:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals	5,21E-01	kg 1,4-DCB-Eq

platinum to generic market for metal catalyst for catalytic converter metal catalyst for catalytic converter Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals / 2420:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals	4,88E-01	kg 1,4-DCB-Eq
pump production, 40W pump, 40W Cutoff, S - CH	281:Manufacture of general-purpose machinery / 2812:Manufacture of fluid power equipment	4,43E-01	kg 1,4-DCB-Eq
carbon fibre reinforced plastic, injection moulded carbon fibre reinforced plastic, injection moulded Cutoff, S - GLO	222:Manufacture of plastics products / 2220:Manufacture of plastics products	3,15E-01	kg 1,4-DCB-Eq
aluminium alloy production, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - RER	242:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals / 2420:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals	2,26E-01	kg 1,4-DCB-Eq
terrestrial acidification - TAP100		3,31E+00	kg SO2-Eq
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, S - IT	352:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains / 3520:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains	2,19E+00	kg SO2-Eq
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - IT	351:Electric power generation, transmission and distribution / 3510:Electric power generation, transmission and distribution	4,57E-01	kg SO2-Eq
nickel sulfate production nickel sulfate Cutoff, S - GLO	201:Manufacture of basic chemicals, fertilizers and nitrogen compounds, plastics and synthetic rubber in primary forms / 2011:Manufacture of basic chemicals	2,48E-01	kg SO2-Eq
platinum to generic market for metal catalyst for catalytic converter metal catalyst for catalytic converter Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals / 2420:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals	1,06E-01	kg SO2-Eq
electronic component production, active, unspecified electronic component, active, unspecified Cutoff, S - GLO	261:Manufacture of electronic components and boards / 2610:Manufacture of electronic components and boards	9,20E-02	kg SO2-Eq
carbon fibre reinforced plastic, injection moulded carbon fibre reinforced plastic, injection moulded Cutoff, S - GLO	222:Manufacture of plastics products / 2220:Manufacture of plastics products	6,87E-02	kg SO2-Eq
freshwater ecotoxicity - FETPinf		0.00023	kg 1,4-DCB-Eq
electronic component production, active, unspecified electronic component, active, unspecified Cutoff, S - GLO	261:Manufacture of electronic components and boards / 2610:Manufacture of electronic components and boards	6,55E+00	kg 1,4-DCB-Eq
treatment of aluminium scrap, post-consumer, by collecting, sorting, cleaning, pressing aluminium scrap, post-consumer, prepared for melting Cutoff, S - RER	383:Materials recovery / 3830:Materials recovery	5,21E+00	kg 1,4-DCB-Eq
smelting of copper concentrate, sulfide ore copper, anode Cutoff, S - CN	242:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals / 2420:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals	2,57E+00	kg 1,4-DCB-Eq
market for natural gas, high pressure natural gas, high pressure Cutoff, S - IT	352:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains / 3520:Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains	1,82E+00	kg 1,4-DCB-Eq
market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, S - IT	351:Electric power generation, transmission and distribution / 3510:Electric power generation, transmission and distribution	1,82E+00	kg 1,4-DCB-Eq
nickel sulfate production nickel sulfate Cutoff, S - GLO	201:Manufacture of basic chemicals, fertilizers and nitrogen compounds, plastics and synthetic rubber in primary forms / 2011:Manufacture of basic chemicals	1,32E+00	kg 1,4-DCB-Eq
electronic component production, passive, unspecified electronic component, passive, unspecified Cutoff, S - GLO	261:Manufacture of electronic components and boards / 2610:Manufacture of electronic components and boards	6,45E-01	kg 1,4-DCB-Eq

treatment of aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling, at remelter aluminium, wrought alloy Cutoff, S - RER	242:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals / 2420:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals	6,06E-01	kg 1,4-DCB-Eq
platinum to generic market for metal catalyst for catalytic converter metal catalyst for catalytic converter Cutoff, S - GLO	242:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals / 2420:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals	5,62E-01	kg 1,4-DCB-Eq
pump production, 40W pump, 40W Cutoff, S - CH	281:Manufacture of general-purpose machinery / 2812:Manufacture of fluid power equipment	5,06E-01	kg 1,4-DCB-Eq
carbon fibre reinforced plastic, injection moulded carbon fibre reinforced plastic, injection moulded Cutoff, S - GLO	222:Manufacture of plastics products / 2220:Manufacture of plastics products	3,58E-01	kg 1,4-DCB-Eq
aluminium alloy production, AlMg3 aluminium alloy, AlMg3 Cutoff, S - RER	242:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals / 2420:Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals	2,62E-01	kg 1,4-DCB-Eq

Tabella 52 – Valutazione degli impatti del ciclo di vita della carrozza propulsiva del treno a idrogeno nello scenario di base, riportando i processi che contribuiscono maggiormente a ogni categoria di impatto.