

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Energetica e Nucleare

A.A. 2022/2023

Sessione di Laurea: Marzo 2023

Tesi di Laurea Magistrale

***Transizione energetica nel settore ferroviario: valutazione degli  
impatti ambientali e del consumo di energia mediante LCA  
comparativa di treni a idrogeno, elettrici e diesel***



## Politecnico di Torino

Relatore:

Prof. Andrea Carpignano

Correlatore:

Prof. Raffaella Gerboni

Candidata:

Diletta Tatonetti

## Abstract

La decarbonizzazione del settore ferroviario ha portato allo sviluppo di nuovi tipi di propulsione, al fine di sostituire treni diesel con treni a idrogeno nel caso in cui sia impossibile, per motivi economici o strutturali, elettrificare le linee ferroviarie. Il treno a idrogeno fa riferimento ad un progetto reale e prevede una carrozza adibita alla sola propulsione.

È noto che il vantaggio dell'utilizzo dell'idrogeno è quello di non emettere durante la fase operativa; pertanto, l'obiettivo è stato quello di indagare quali siano gli impatti ambientali durante tutto il ciclo di vita del treno a idrogeno, unitamente alla comparazione con treni elettrici e diesel. L'analisi LCA è il mezzo attraverso cui si è effettuato lo studio: per ogni tipologia di treno si sono analizzati gli impatti, attenționando il Global Warming Potential (GWP100).

Dall'analisi è emerso che il treno diesel è quello che presenta il risultato più elevato, pari a 0.097 kg CO<sub>2-eq</sub>/p\*km, seguito dal treno a idrogeno con produzione da SMR (Steam Methane Reformer) con un valore pari a 0.034 kg CO<sub>2-eq</sub>/p\*km. Quest'ultimo valore è paragonabile sia alle emissioni di un elettrotreno, pari a 0.033 kg CO<sub>2-eq</sub>/p\*km, che allo scenario SMR prodotto da green mix, pari a 0.032 kg CO<sub>2-eq</sub>/p\*km. La soluzione più vantaggiosa in termini di impatto ambientale è la produzione di idrogeno da elettrolisi utilizzando il 70% di energia elettrica da rete e il 30% di energia green, a cui consegue un'emissione di 0.02 kg CO<sub>2-eq</sub>/p\*km

Si conferma che, in tutti e tre i casi, la fase più impattante è quella relativa all'uso: da ciò si deduce, nel caso delle nuove tecnologie, la necessità di migliorare la catena di approvvigionamento dei vettori energetici.

## Sommario

Abstract.....	2
1. Introduzione .....	5
1.1 Contesto.....	5
1.2 Obiettivi.....	6
1.3 Struttura.....	7
2. Tecnologie dei treni.....	8
2.1 Tecnologia del treno ad idrogeno .....	8
2.1.1 Progetti nel mondo .....	8
2.1.2 Descrizione del funzionamento di un treno a idrogeno .....	12
2.2 Tecnologia dei treni elettrici e diesel .....	17
3. Metodologia dell'analisi del ciclo di vita .....	20
3.1 LCA e LCT .....	20
3.2 Normative LCA .....	20
3.2.1 Definizione degli obiettivi e ambiti .....	21
3.2.2 Analisi di inventario .....	22
3.2.3 Analisi degli impatti (LCIA).....	23
3.2.4 Interpretazione e miglioramento .....	23
4. Applicazione dell'LCA ai treni a idrogeno, elettrico e diesel.....	24
4.1 Introduzione al caso studio .....	24
4.2 Obiettivo e ambito .....	24
4.2.1 Unità funzionale.....	25
4.2.2 Confini del sistema.....	25
4.2.3 Tipo di dati.....	29
4.2.4 Allocazione .....	29
4.2.5 Categorie di impatto selezionate .....	29

4.3	Analisi di inventario .....	30
4.3.1	Produzione dei treni .....	30
4.3.2	Fase di uso .....	47
4.3.3	Risultati delle analisi di inventario .....	53
4.4	Valutazione degli impatti .....	64
4.4.1	Risultati impatti ambientali .....	68
4.4.2	Valutazione degli impatti ambientali Produzione treno idrogeno .....	68
4.4.3	Valutazione degli impatti ambientali fase di uso dei treni .....	73
4.5	Interpretazione dei risultati .....	98
4.5.1	Produzione del treno a idrogeno .....	98
4.5.2	Confronto tra le diverse tipologie di treno .....	98
5.	Conclusioni .....	105
6.	Bibliografia .....	107

# 1. Introduzione

## 1.1 Contesto

Il riscaldamento globale è uno dei principali problemi che ci si ritrova ad affrontare nel panorama odierno e futuro. Esso ha avuto un ruolo decisivo nelle scelte relative al settore energetico, che ormai si muove prioritariamente verso una sola direzione: la transizione ecologica, la cui parola chiave è *decarbonizzazione*.

Uno dei mezzi per raggiungere tale obiettivo è l'idrogeno che, grazie ad una densità energetica maggiore rispetto a quella dei combustibili fossili, risulta essere una valida opzione per trasformare o accumulare energia, con una possibile riduzione di emissione di inquinanti.

L'idrogeno come vettore energetico ha suscitato particolare interesse nel settore ferroviario: i treni a idrogeno possono essere, infatti, un'alternativa all'utilizzo dei motori diesel poiché possono circolare su linee ferroviarie già esistenti. I treni diesel spesso circolano su linee non adatte all'elettrificazione, a causa di limiti strutturali, come la presenza di gallerie a ridotta altezza.

Negli ultimi anni sono stati portati avanti diversi progetti con l'obiettivo di realizzare i primi treni a idrogeno, che, come prodotto di scarto, emettono solo acqua, ma che, in fasi diverse da quella operativa, causano un certo impatto ambientale; quest'ultimo è valutabile mediante un'analisi del ciclo di vita (LCA).

Non essendo ancora esistente, in letteratura, una LCA di un treno a idrogeno, lo studio avrà quest'ultimo come fine, unitamente ad una comparazione con la tecnologia ad oggi presente sul mercato.

## 1.2 Obiettivi

Questo studio è ispirato ad un progetto reale che prevede la conversione di un treno elettrico regionale in uno a idrogeno, che consiste nell'aggiunta, nella parte centrale, di una carrozza propulsiva a idrogeno.

L'obiettivo è quello di valutare l'impatto ambientale nelle fasi di costruzione e di uso di diversi tipi di propulsione ferroviaria per evidenziare se e in quali casi una soluzione sia più ambientalmente sostenibile di un'altra. Si è scelto di svolgere un'analisi di LCA di un treno a idrogeno, di un treno elettrico e di un treno diesel e compararne i risultati. A tale scopo è stato utilizzato il software OpenLCA versione 1.10.3 e il database è Ecoinvent 3.8.

Si procede, perciò, a valutare l'impatto ambientale, sull'uomo e sul consumo delle risorse delle diverse tipologie di treno grazie all'analisi dei componenti, che variano in funzione della propulsione considerata.

L'analisi del ciclo di vita è un'opportunità per individuare quali sono i processi e i componenti più impattanti, che non si limita alla sola fase di uso ma che riesce a fornire un quadro più completo, considerando anche le fasi di estrazione e produzione.

Il principale focus è stato fatto sul cambiamento climatico, ma sono stati analizzati anche altri impatti, quali la tossicità, l'eutrofizzazione, l'acidificazione, lo sfruttamento delle risorse, il consumo del suolo, lo strato di ozono e l'ossidazione fotochimica.

### 1.3 Struttura

Lo studio si sviluppa principalmente in cinque fasi e ognuna di esse è riportata in uno dei capitoli che seguono:

- Il capitolo 2 indaga il livello di sviluppo attuale della tecnologia dei treni a idrogeno, in particolare quali sono i progetti nel mondo e come si realizza la propulsione del treno a idrogeno. Viene, inoltre, illustrato il funzionamento dei treni elettrici e diesel.
- Il capitolo 3 descrive cos'è una LCA, definendo le fasi che la caratterizzano e come applicarla al contesto
- Il capitolo 4 è il cuore del lavoro, dove vengono creati i flussi da implementare su openLCA per le tre tipologie di treno (elettrico, diesel e idrogeno). Vengono analizzati i materiali ed annesse provenienze, le lavorazioni che subiscono, i vettori energetici necessari alla loro produzione. Verrà esaminata anche la fase d'uso, per cui è stato necessario stimare i consumi e verranno analizzati i risultati a livello di impatto ambientale e consumi per i vari treni ma soprattutto in ottica comparativa.
- Il capitolo 5 contiene i commenti ai risultati e vengono tratte conclusioni e proposti possibili miglioramenti futuri.

## 2. Tecnologie dei treni

### 2.1 Tecnologia del treno ad idrogeno

#### 2.1.1 Progetti nel mondo

Nel panorama odierno risulta fondamentale il passaggio dall'utilizzo di mezzi di trasporto a combustibili fossili a mezzi di trasporto che impattino meno a livello ambientale; nel caso dei treni ciò si traduce in una tendenza nella sostituzione di treni diesel con treni elettrici o a idrogeno.

L'elettrificazione delle linee ferroviarie non è sempre possibile a causa di problemi tecnici ed economici, in particolare per quelle definite "complementari", cioè linee per lo più a singolo binario, costruite originariamente per connettere città di piccole e medie dimensioni e contesti suburbani [1].

I treni a idrogeno si propongono come una soluzione ambientalmente sostenibile e in grado di operare, ad alta efficienza energetica, anche su linee non elettrificate.

In diversi Paesi, il numero di treni diesel attualmente in circolazione è ancora elevato: in Germania, ad esempio, si contano più di 4000 vetture. [2]

È proprio la Germania che, nel piano aggiornato ad aprile 2022, presenta un progetto per lo sviluppo accelerato delle energie rinnovabili, con l'obiettivo di raggiungere una quota dell'80% del mix elettrico entro il 2030 e rispondere alla doppia emergenza climatica e della crisi con la Russia. Difatti, tali eventi hanno portato alla consapevolezza della necessità di una sempre maggiore indipendenza energetica, raggiungibile anche attraverso strategie quali la destinazione del 2% del territorio all'installazione di turbine eoliche e la messa a disposizione di nuove superfici demaniali per pannelli solari, oltre ad una semplificazione delle procedure autorizzative. [3]

Ciò conduce, inoltre, alla riduzione dell'utilizzo di mezzi di trasporto di tipo diesel, a favore delle nuove tecnologie: la Germania ha, infatti, siglato due contratti per treni regionali alimentati a celle a combustibile a idrogeno con l'azienda francese Alstom, pioniera nello sviluppo di treni a idrogeno.

La consapevolezza di un simile scenario, ha portato molti Paesi europei a muoversi nella stessa direzione; ad oggi Alstom ha siglato quattro contratti per i treni a idrogeno:

- il primo, in Germania, per 14 treni Coradia iLint nella regione della Bassa Sassonia;
- il secondo, in Germania, per 27 treni Coradia iLint nell'area metropolitana di Francoforte;
- il terzo, in Italia, per 6 treni a idrogeno Coradia Steam da utilizzare nella regione Lombardia, con l'eventuale aggiunta di altri 8 veicoli;
- il quarto, in Francia, prevede 12 treni a idrogeno Coradia Polyvalent condivisi tra 4 diverse regioni del Paese.

Inoltre, il Coradia iLint è stato testato con successo in Austria, Paesi Bassi, Polonia e Svezia. [2]

#### *Germania - Coradia iLint*

Il Coradia iLint è il primo treno alimentato a idrogeno sviluppato da Alstom per il mercato tedesco. È stato presentato per la prima volta nel 2016, a Berlino, durante l'InnoTrans, mentre i test con i passeggeri sono stati effettuati dal 2018 al 2020.

Il 15 settembre 2022, il Coradia iLint è stato il primo treno a idrogeno a percorrere con successo 1175 km senza necessità di rifornimento dei serbatoi di idrogeno, raggiungendo una velocità massima di 140 km/h.

È stato, inoltre, premiato con il 2022 German Sustainability Award, riconoscimento assegnato a soluzioni tecniche e sociali particolarmente efficaci nel promuovere la trasformazione verso prodotti, produzione e consumi sostenibili [2].

Esso è un treno regionale, con propulsione basata sul Coradia Lint 54, che prevede la sostituzione dei componenti diesel con celle a combustibile di tipo PEM e che vede come prodotto di scarto solo vapore acqueo e condensa. Oltre alla conversione in energia pulita, vanta un accumulo flessibile di energia in batterie e una gestione intelligente della potenza motrice e dell'energia disponibile.

L'idrogeno, stoccato a 350 bar all'interno dei serbatoi posizionati sul tetto, alimenta lo stack di celle a combustibile, che guidano la trazione; nel caso in cui quest'ultima non fosse necessaria, l'energia viene immagazzinata in batterie agli ioni di litio e viene fornita

nei momenti di richiesta, ad esempio in fase di accelerazione. Tale meccanismo permette di razionalizzare il consumo di carburante.

Il rifornimento viene effettuato nello stabilimento Linde di Bremervörde, che contiene sessantaquattro serbatoi ad alta pressione (500 bar) per una capacità totale di 1800 kg, sei compressori a idrogeno e due pompe del combustibile. Oltre a non emettere inquinanti in fase operativa, 1 kg di idrogeno permette di sostituire 4.5 litri di combustibile diesel, grazie alla sua elevata densità energetica, pari a 120 MJ/kg. L'obiettivo futuro sarà quello di produrre idrogeno in loco tramite elettrolisi, utilizzando elettricità prodotta in modo rigenerativo.

In Figura 1 è riportato il modello del Coradia iLint, con annessi componenti.

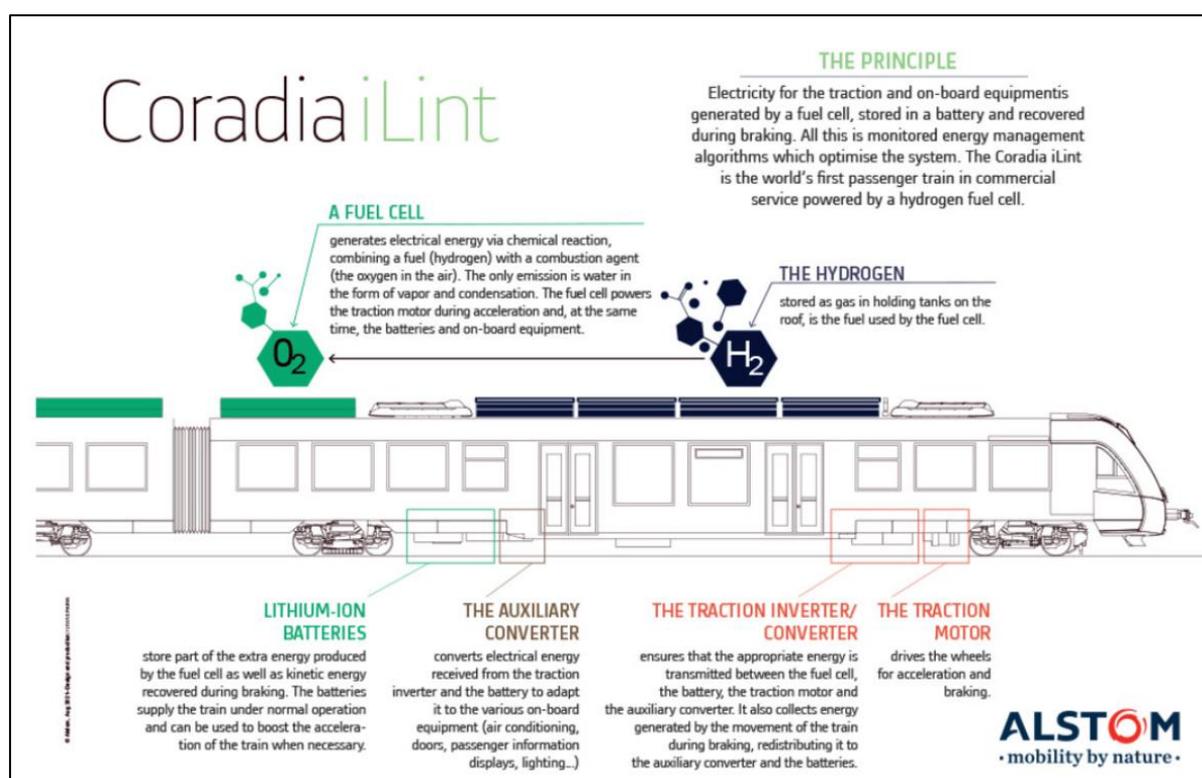


Figura 1- Coradia iLint e descrizione componenti principali [4]

### *Regno Unito*

In Gran Bretagna è stato stipulato, nel 2022, un accordo tra Alstom ed Eversholt Rail, finalizzato a progettare, costruire, commissionare e mantenere una flotta di dieci treni ibridi a idrogeno con tre carrozze, realizzati a partire dagli ultimi progressi della piattaforma Alstom Aventra. Le due aziende si propongono come sostenitrici del processo di transizione ecologica a supporto della decisione del governo britannico e scozzese di decarbonizzare il settore ferroviario.

Il progetto “Breeze” aveva già visto la collaborazione delle due aziende in merito alla conversione dei treni esistenti a trazione elettrica in mezzi a idrogeno, nelle linee suburbane. [5]

Non sono però, questi, i primi progetti che vedono l’implementazione di tale innovazione: nel 2019, infatti, è stato presentato il progetto HydroFLEX al Rail Live 2019, nato dalla collaborazione tra il Birmingham Centre for Railway Research and Education e la società ferroviaria Porterbrook Leasing Co. Esso consiste nella modifica di una Class 319 Electric Multiple Unit con un una serie di elementi, tra cui fuel cell stack, una batteria di trazione, un sistema di controllo a 24V e serbatoi di idrogeno da montare in una delle carrozze. [6]

### *Francia - Coradia Polyvalent*

Le regioni Auvergne-Rhône-Alpes, Bourgogne-Franche-Comté, Grand Est e Occitanie, lanciano la prima commessa in assoluto di treni elettrici-idrogeno in Francia.

SNFC Voyageurs, per conto delle quattro regioni, ha ordinato da Alstom i primi 12 treni bimodali elettrici-idrogeno della gamma Coradia Polyvalent, per un totale di 190 milioni di euro. Tale accordo è fondamentale per realizzare il piano “Idrogeno” lanciato dal Paese nel a giugno 2018, oltre ad essere in linea con il programma PLANETER SNCF Voyageurs, volto a ridurre l’impatto ambientale causato dalla mobilità regionale.

Il treno bimodale elettrico-idrogeno Coradia Polyvalent soddisfa i requisiti della rete ferroviaria mista e ha un’autonomia di 600 km su tratte non elettrificate. È formato da 4 vetture ed è lungo 72 m, offrendo una capacità totale di 218 posti a pari prestazioni dinamiche e comfort dei treni che andranno a sostituire (elettrici-Diesel). [7]

Il progetto H2iseO nasce dall'accordo tra Ferrovie Nord Milano, Trenord e Alstom; esso consiste nella realizzazione di una Hydrogen Valley, nei dintorni della linea ferroviaria Brescia - Iseo – Edolo con tre principali obiettivi [8]:

- sviluppo di un distretto economico e industriale basato sull'idrogeno, partendo dalle applicazioni sulla mobilità;
- sviluppo di un distretto geografico basato sull'idrogeno, per abilitare e supportare la conversione energetica dell'area
- decarbonizzazione totale dei principali componenti del trasporto pubblico locale .

È previsto, entro il 2023, l'arrivo di sei elettrotreni alimentati a idrogeno e la realizzazione di un primo impianto di produzione di idrogeno nella stazione di Iseo. In una seconda fase si prevede l'arrivo di altri otto elettrotreni in modo da sostituire tutti i veicoli diesel; tale passaggio comporterà la realizzazione associata di uno o due impianti per la produzione di idrogeno nella zona di Brescia e/o di Edolo entro il 2025. Tale produzione permetterà, in ultima istanza, di alimentare anche altri veicoli oltre il treno, a partire dalla mobilità pubblica e dai 40 autobus gestiti in Valcamonica da FMN Autoservizi. [8]

### 2.1.2 Descrizione del funzionamento di un treno a idrogeno

Nel paragrafo 2.1.1 in cui viene descritto il Coradia iLint è già stata riportata un'immagine (Figura 1) rappresentativa del veicolo e dei suoi principali componenti, che verranno ora descritti in dettaglio per comprendere meglio il funzionamento di tale tecnologia, di cui è riportata una schematizzazione in Figura 2.

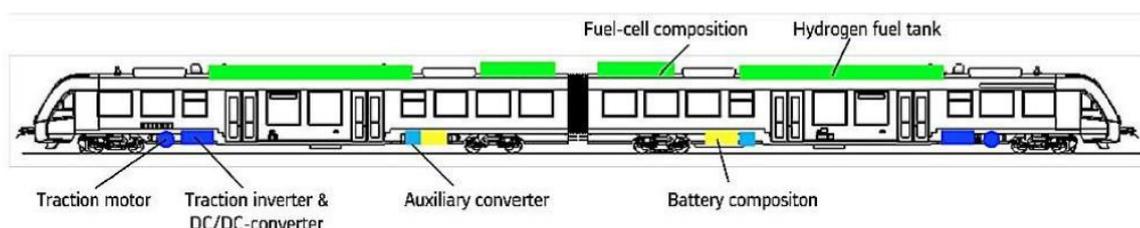


Figura 2- Schematizzazione treno Coradia iLint con annessi componenti principali [9]

È importante specificare che l'assetto del Coradia iLint è diverso rispetto a quello previsto nel progetto H2iseO; pertanto, si analizzeranno i componenti individuati in Figura 2 ma verranno fatte considerazioni relative al caso riferito al progetto italiano.

Tale variazione dell'asset è legata all'impossibilità di far circolare treni come quello tedesco sulle ferrovie italiane come conseguenza del limite infrastrutturale: non possono essere superate le 18 tonnellate per asse, ed è quindi richiesta una diversa struttura del mezzo.

Analizzeremo, di seguito, i componenti principali presenti su un treno a idrogeno.

#### *Celle a combustibile*

Le celle a combustibile sono l'elemento che genera energia per la trazione nei treni a idrogeno. In tale studio si sono considerate celle a combustibile di tipo PEM, cioè costituite da anodo e catodo, fra cui è interposta una membrana polimerica di Nafion (elettrolita).

Il vantaggio più importante del PEMFC rispetto ad altri dispositivi di conversione dell'energia è che la cella genera, attraverso una reazione chimica, elettricità con un'alta densità di potenza, oltre ad avviarsi rapidamente. È, inoltre, utilizzata per diverse applicazioni industriali, dato che consente di lavorare a basse temperature (nel range 80 - 200 °C).

Si tratta di un sistema elettrochimico, rappresentato in Figura 3, che, a partire da idrogeno e ossigeno, genera elettricità e acqua come sottoprodotto.

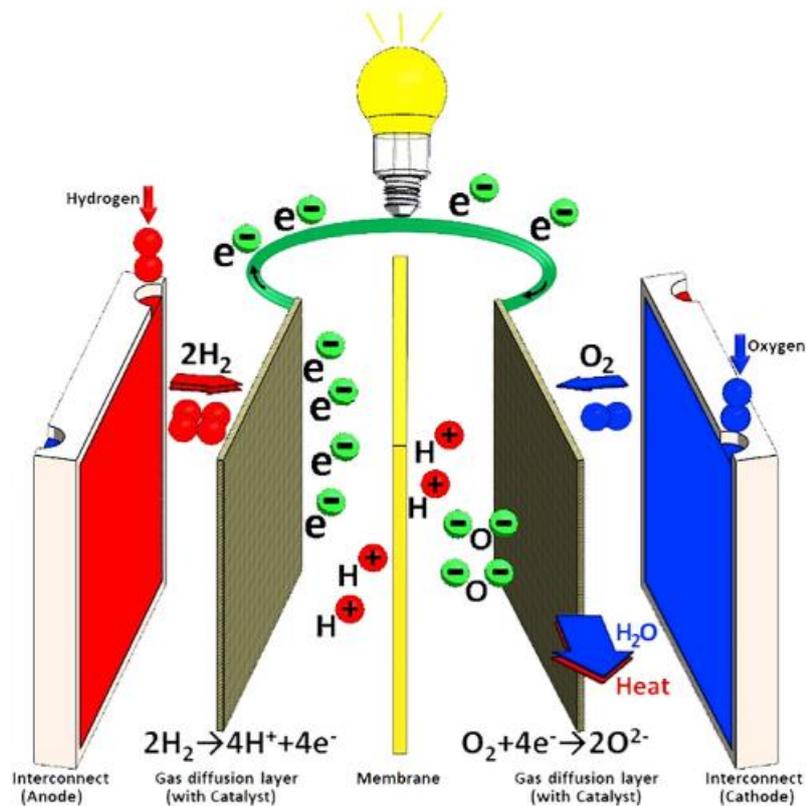
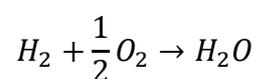
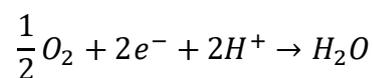
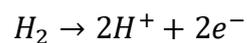


Figura 3- Cella a combustibile di tipo PEM, componenti e funzionamento [10]

Si osserva come l'anodo sia alimentato con idrogeno gassoso, mentre l'ossigeno (proveniente dall'aria) alimenta il catodo.

L'idrogeno che entra nell'anodo, negativo, si divide in ioni  $H^+$  ed elettroni  $e^-$ ; gli ioni  $H^+$  passano attraverso la membrana polimerica e, raggiungendo il catodo positivo, reagiscono con l'ossigeno e gli elettroni passati attraverso un circuito esterno, producendo acqua. Tale processo è riassumibile, da un punto di vista chimico, mediante le formule che seguono [10]:



Tali celle, però, sono caratterizzate da un voltaggio non sufficiente ad erogare la potenza richiesta; per tale motivo si utilizzano degli *stack di celle a combustibile*, cioè vengono poste in serie e bloccate alle due estremità con degli “end plates”.

Il numero di stack è pari a quattro, in modo da erogare una potenza pari a 1100 kW. Quando tale potenza non è utilizzata perché non necessaria alla trazione, viene immagazzinata all'interno delle batterie.

### *Batterie*

Le batterie sono necessarie per coprire i picchi di richiesta per la trazione e per accumulare energia durante sovrapproduzione, in modo da ottimizzare il consumo di energia. Quando tali batterie sono cariche, la potenza richiesta alla PEMFC è ridotta in modo che garantisca la sola alimentazione del sistema ausiliario.

Per quanto riguarda invece le frenate, il sistema freno rigenerativo permette di recuperare energia elettrica a partire dall'energia cinetica del veicolo, alimentando le batterie e gli ausiliari.

Le batterie scelte nel caso in esame sono di tipo NCM (Nickel, Cobalto e Manganese) 611 (rapporto tra i componenti presenti). Sono installate otto batterie, ognuna da 100 kWh, per un peso totale di 880 kg.

### *Serbatoi*

Le celle a combustibile sono alimentate da idrogeno ed è pertanto necessario che esso sia stoccato all'interno di serbatoi posizionati sul veicolo. Questi ultimi devono essere molto resistenti in quanto devono sopportare pressioni molto elevate, dato che l'idrogeno è stoccato a 350 bar.

Sono utilizzati serbatoi di tipo IV, composti in fibra di carbonio e resina, rivestiti internamente da un polimero. L'utilizzo di tali materiali li rendono più leggeri e sicuri rispetto a quelli tradizionali in acciaio.

Nel progetto H2iseO è prevista la presenza di 56 serbatoi di capienza 5.6 kg l'uno, a 350 bar, collocati all'interno della Power Car.

I serbatoi trasporteranno circa 300 kg e impiegheranno circa 25-30 min per riempirsi.

### *Produzione idrogeno*

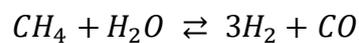
L'idrogeno, non essendo disponibile in forma elementare in natura, deve essere prodotto a partire da altri composti presenti.

Due sono i metodi utilizzati per produrre H<sub>2</sub>:

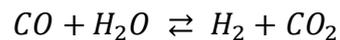
- Steam Reforming, ricavato a partire da idrocarburi
- Elettrolisi dell'acqua

Il progetto H2iseO prevede la creazione di un impianto di Steam Methane Reforming (SMR) nelle vicinanze della ferrovia proprietà di Trenord, che permetta non solo la produzione di idrogeno da metano ma anche di cattura di CO<sub>2</sub>. Il metodo SMR consiste sostanzialmente in due fasi:

- La fase di SMR, in cui viene iniettato vapore a circa 800°C nel reattore in modo che il metano reagisca, secondo l'equazione



- La fase di Water Gas Shift (WGS), serve per rimuovere la CO derivante dal processo precedente, essendo una sostanza pericolosa; segue l'equazione



È prevista poi, in una seconda fase del progetto, che la produzione avvenga per mezzo di elettrolizzatori, solitamente di tipo PEMEC, alimentati primariamente con fonti rinnovabili, in modo da ridurre le emissioni. Il processo consiste nel separare ossigeno e idrogeno fornendo energia elettrica all'acqua.

## 2.2 Tecnologia dei treni elettrici e diesel

I treni elettrici e diesel presentano delle consistenti analogie in termini di struttura; a variare è la trazione e, di conseguenza, i componenti presenti al loro interno.

Il treno è un veicolo azionato dalla movimentazione degli assi causata dalla presenza di motori elettrici posti sui carrelli motore, la cui collocazione dipende dalla struttura del mezzo analizzato.

Nella trazione diesel, la generazione è ad opera di un motore diesel; la presenza di un alternatore permette la trasformazione di energia meccanica in energia elettrica alternata (AC). La corrente prodotta entra all'interno di un raddrizzatore, che la trasforma in corrente continua. Viene poi ritrasformata, tramite inverter, nuovamente in corrente alternata, essendo i motori elettrici di tipo asincrono.

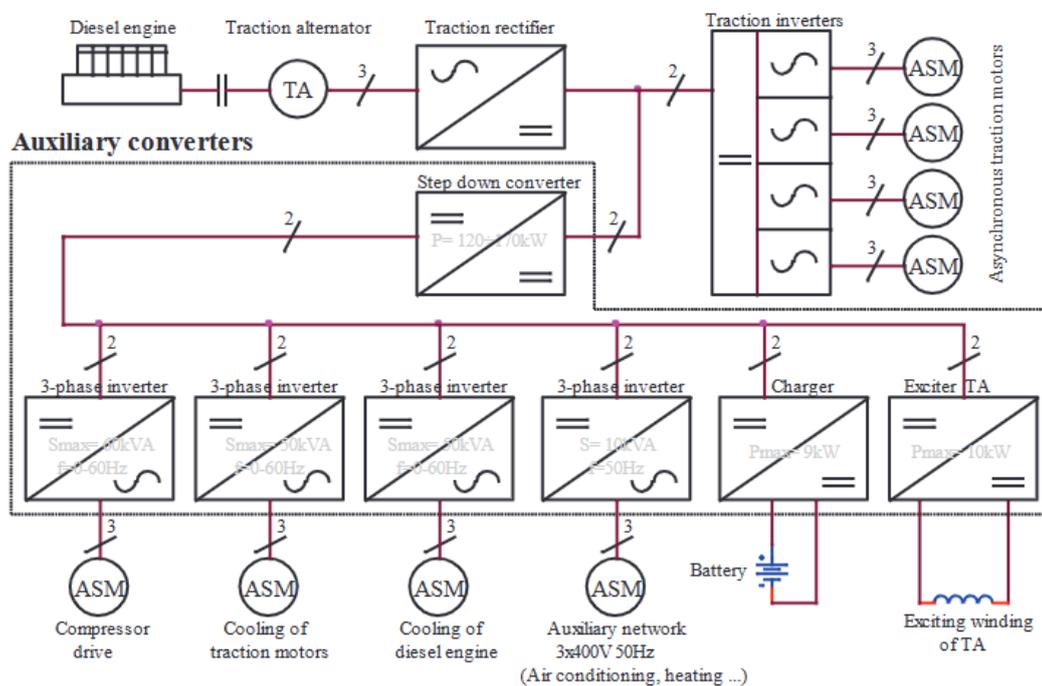


Figura 4- Schematizzazione del funzionamento di un treno diesel: trazione e alimentazione degli ausiliari [11]

Si osserva come sia presente anche un circuito parallelo a quello di alimentazione dei motori asincroni per la trazione. Esso è denominato "Auxiliary converters" e fornisce energia elettrica ai sistemi di raffreddamento dei motori diesel ed elettrici, fluisce nella batteria di accumulo, va ad alimentare il trasformatore e si occupa anche del "Auxiliary

network”, cioè di tutto il sistema che adempie al raffreddamento, riscaldamento, illuminazione delle carrozze al fine di mantenere una condizione di comfort per i passeggeri.

Trovano largo impiego nel campo del trasporto di merci ma anche per il trasporto passeggeri in caso di linee non elettrificate.

Nella trazione elettrica, invece, non c'è produzione di energia elettrica all'interno della locomotiva, ma essa viene prelevata da rete per mezzo di un pantografo. Lo schema è analogo a quello in Figura 4, a differenza del fatto che al posto del motore e dell'alternatore c'è prelievo da rete. È, inoltre, necessaria la presenza di un trasformatore che permetta di ottenere il voltaggio desiderato nella fase operativa.

Non tutte le linee elettriche sono dimensionate per lo stesso voltaggio: a meno delle nuove linee ad alta velocità, mentre in Italia le reti trasportano corrente a 3 kV in corrente continua (CC), in Germania e in Svizzera le reti sono a 15 kV in corrente alternata (AC).  
[12]

Il circuito “auxiliary converters” raffigurato in Figura 4 è analogo per entrambe le alimentazioni a meno degli utilizzatori che fanno parte del sistema motore diesel.

In particolare, nel caso studio esaminato, si fa riferimento ai soli treni regionali; tale informazione è rilevante per comprendere al meglio la configurazione e la struttura degli oggetti studio.

I treni regionali elettrici attualmente in uso, infatti, sono “Elettrotreni”, cioè non prevedono una locomotiva a monte che traina i vagoni. Essi, infatti, presentano propulsione elettrica con trazione distribuita, generalmente a marcia reversibile, a composizione bloccata eventualmente articolata, cioè composta da rotabili che condividono punti di appoggio sui binari (carrelli/assi), rendendo le casse attigue interdipendenti. Solitamente i rotabili creano composti articolati attraverso carrelli Jakobs (comuni a due casse contigue, i quali possono essere solo portanti o anche motore), oppure con sistema Talgo.

La trazione distribuita, elemento discriminante di questo tipo di treno rispetto a un normale treno a trazione anteriore o posteriore tramite locomotiva elettrica, viene

solitamente realizzata tramite un numero variabile di assi motorizzati ripartiti lungo il convoglio. Ciò rappresenta un notevole vantaggio perché va a ridurre il carico assiale, in quanto i componenti destinati alla trazione non si concentrano sui soli assi della locomotiva. Tale proprietà è estremamente importante in relazione all'infrastruttura ferroviaria italiana, che ha il limite in termini di carico assiale di 18 tonnellate/asse.

La formula del convoglio a trazione distribuita è oltremodo vantaggiosa nel caso di servizi vicinali in quanto, essendo basso il carico rimorchiato rispetto alle persone trasportate e, eventualmente, di bassa frequentazione, la presenza di un locomotore sarebbe non giustificata data la scarsa necessità di potenza di traino.

Uno degli svantaggi di tale configurazione è la scarsa versatilità, a causa delle composizioni bloccate, e una manutenzione più complessa rispetto ad una singola locomotiva essendo i componenti di trazione distribuiti.

Esistono anche dei convogli che utilizzano due locomotive elettriche poste una in testa e l'altra in coda, simultaneamente attive nel trainare e spingere le carrozze non motrici tra esse interposte. Essi vengono classificati come elettrotreni ma in realtà si tratta di un convoglio in doppia trazione simmetrica (DTS), e risulta meno efficace nella riduzione del carico assiale.

I treni regionali diesel, invece, denominati autotreni o *Diesel Multiple Unit* (DMU), sono dotati di due unità di trazione a motore Diesel, poste alle estremità, e un'unità intermedia rimorchiata. Sono, analogamente agli elettrotreni, composti da carrozze motrici e rimorchiate, di regola non scomponibili, e senza locomotiva.

## 3. Metodologia dell'analisi del ciclo di vita

### 3.1 LCA e LCT

Il Life Cycle Assessment (Valutazione del Ciclo di Vita) rappresenta il principale strumento operativo del "Life Cycle Thinking" (LCT). [13]

Per LCT si intende andare oltre il tradizionale focus sul sito di produzione e sui processi produttivi per includere gli impatti ambientali, sociali ed economici di un prodotto durante il suo intero ciclo di vita. Gli obiettivi principali sono ridurre l'uso delle risorse e le emissioni di un prodotto nell'ambiente, nonché migliorare le sue prestazioni socioeconomiche attraverso il suo ciclo di vita. Ciò può facilitare i collegamenti tra le dimensioni economica, sociale e ambientale all'interno di un'organizzazione e attraverso la sua intera catena del valore.

L'LCA è una procedura oggettiva per valutare gli impatti ambientali e il consumo di energia dovuti a un processo o ad una attività. La valutazione viene effettuata identificando l'energia e i materiali consumati e gli impatti ambientali.

Tale valutazione include tutte le fasi dell'intero ciclo di vita del processo/attività/prodotto, inclusa l'estrazione e il trattamento dei materiali grezzi, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso e lo smaltimento finale.

La rilevanza di tale tecnica risiede principalmente nel suo approccio innovativo che consiste nel valutare tutte le fasi di un processo produttivo come correlate e dipendenti.

### 3.2 Normative LCA

A livello internazionale la metodologia LCA è regolamentata dalla ISO 14040, facente parte della serie 14000 che contiene una famiglia di norme, standard e strumenti per la gestione ambientale.

Secondo la ISO 14040 uno studio di valutazione del ciclo di vita prevede [13]:

- la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione dell'analisi - ISO 14041

- la compilazione di un inventario degli input e degli output di un determinato sistema, in termini di materiali, energia ed emissioni- ISO 14041
- la valutazione del potenziale impatto ambientale correlato agli input e output- ISO 14042
- l'interpretazione dei risultati e proposte di miglioramento- ISO 14043

Queste quattro fasi sono rappresentate in Figura 5 e verranno poi analizzate nei paragrafi che seguono.

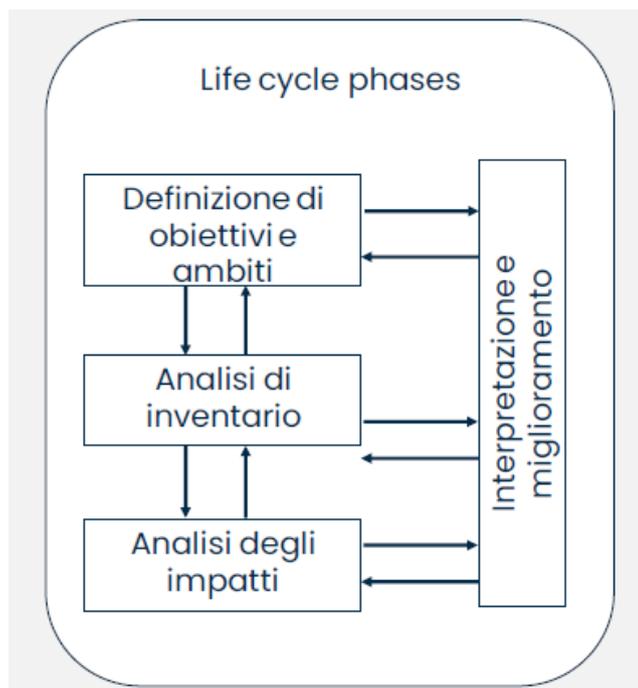


Figura 5- Fasi della Life Cycle Assessment [14]

### 3.2.1 Definizione degli obiettivi e ambiti

Gli obiettivi e gli ambiti dello studio devono essere chiaramente definiti e coerenti con l'applicazione prevista.

Gli obiettivi servono ad indicare qual è la finalità dello studio, mentre per gli ambiti devono essere definiti:

- Unità funzionale: parametro di standardizzazione arbitrario utilizzato per descrivere i risultati finali. Ha lo scopo di fornire un riferimento rispetto al quale

inputs e outputs sono normalizzati (in senso matematico). Ciò implica che tale parametro deve essere definito e misurabile

- Confini del sistema: servono a determinare quali unità di processo sono incluse nell'LCA e quali no, giustificando le decisioni prese. È di notevole rilevanza in quanto può cambiare sensibilmente il risultato di un'LCA
- Cut-off: se si decide di omettere alcuni processi o input/output si sta applicando una regola di cut-off, che è importante definire. Un esempio è quello di escludere un flusso se esso non contribuisce per più di una definita percentuale (es. 1%)
- Metodi per LCIA e tipi di impatto: occorre indicare quali impatti, indicatori e modelli di caratterizzazione si intende utilizzare per LCIA
- Tipi e fonti dei dati: possono essere dati misurati, calcolati o stimati
- Requisiti di qualità dei dati: essi si dividono in primari, se sono raccolti direttamente presso i siti produttivi e quindi sono molto specifici, e secondari, se derivano da fonti diverse (es. letteratura, database, brevetti...)
- Considerazioni di revisione critica: nel caso fosse necessaria, va indicato chi la farà e che esperienza ha. Può essere sia interna che esterna.

### 3.2.2 Analisi di inventario

È la fase in cui vengono raccolti i dati, processati e messi in relazione secondo quanto definito nella prima fase. L'output della fase è una serie di tabelle di dati di input e di output dal product system normalizzati all'unità funzionale.

Dopo aver realizzato un flowchart, cioè una rappresentazione grafica del sistema considerato e dei confini dello stesso, l'analisi si sviluppa in tre step [14]:

- 1) Raccolta dei dati: di tipo quantitativo e qualitativo. Essi vanno calcolati e/o stimati per ciascun unit process. Di notevole rilevanza sono i database, in quanto sono fonti ricche di dati; tra tutti Ecoinvent è quello più completo e utilizzato in commercio
- 2) Calcoli
- 3) Allocazione: serve per valutare quale quota dei flussi in input e quante delle emissioni in output vanno attribuite a ciascun co-prodotto

Tutti i flussi vengono, poi, normalizzati mediante l'unità funzionale.

### 3.2.3 Analisi degli impatti (LCIA)

Il Life Cycle Impact Assessment è il passo in cui si trasformano i risultati dell'inventario in esiti possibili sull'ambiente e sull'uomo. Anch'essa si sviluppa su più fasi [14]:

- 1) Scelta delle categorie di impatto
- 2) Classificazione: si associa a ciascun impatto il tipo di emissione che lo causa
- 3) Caratterizzazione: vengono calcolati gli impatti utilizzando fattori caratteristici
- 4) Normalizzazione
- 5) Pesatura

Le fasi 4 e 5 sono facoltative.

### 3.2.4 Interpretazione e miglioramento

La parte più importante risiede nell'interpretazione dei risultati, che permette poi di capire su cosa agire e proporre dei miglioramenti, oppure dei punti da approfondire.

I risultati dell'LCIA vengono analizzati mediante analisi di sensitività e di incertezze. L'obiettivo è quello di andare a valutare quanto i metodi di raccolta dati, le assunzioni, i cut-off, ecc... utilizzati nelle fasi precedenti possano aver influenzato i risultati è [14].

A tale scopo, dopo aver identificato gli aspetti impattanti, possono essere effettuati dei controlli di:

- Completezza, per assicurarsi che tutte le informazioni e i dati importanti siano stati considerati
- Sensitività, per assicurarsi dell'affidabilità dei risultati ottenuti in base a variazioni dei metodi utilizzati
- Consistenza, per assicurarsi che le assunzioni fatte e i metodi utilizzati siano coerenti con gli scopi dello studio.

In ultima istanza vengono tratte le conclusioni.

## 4. Applicazione dell’LCA ai treni a idrogeno, elettrico e diesel

### 4.1 Introduzione al caso studio

Il treno a idrogeno analizzato fa riferimento a quello riguardante il progetto H2iseO. In particolare, si tratta della conversione di un elettrotreno, che comporta l’aggiunta del vagone a idrogeno, che assolve alla funzione propulsiva.

Il veicolo viaggerà su una tratta lunga 103 km; si tratta di un binario semplice non elettrificato, che quindi garantisce la sola circolazione di veicoli diesel.

### 4.2 Obiettivo e ambito

L'idrogeno si profila come una soluzione per l'utilizzo di veicoli che consentano di ridurre le emissioni durante la fase di uso; non esiste, però, un'analisi che vada ad osservare gli impatti durante il ciclo di vita, “dalla culla alla tomba”.

Questo studio è quindi volto ad effettuare una LCA che non solo metta in evidenza quali sono i processi/componenti meno sostenibili relativi ad un treno a idrogeno, ma che, in chiave comparativa, permetta di analizzare i risultati rispetto agli impatti causati da tecnologie tradizionali.

In particolare, in uno studio precedente svolto presso il Politecnico di Torino, “*Analisi del ciclo di vita del sistema propulsivo di un treno a idrogeno*” [9], è già stata effettuata una LCA della carrozza propulsiva a idrogeno (Power car), prendendo spunto dal progetto H2iseO. È necessario, quindi, analizzare tutti i componenti che costituiscono il treno per effettuare una LCA completa.

Per quanto riguarda, invece, i treni elettrici e diesel, sono stati modellati in modo tale da poter essere il più possibile paragonabili al treno a idrogeno; ciò si traduce nell’aver scelto un elettrotreno con quattro vagoni capace di trasportare almeno lo stesso numero di passeggeri, e nell’aver simulato un autotreno secondo lo stesso criterio. Difatti, nonostante l’unità funzionale scelta (passeggero-km) consenta di effettuare un paragone a prescindere da quanto i treni siano simili a livello costruttivo o per numero di passeggeri

trasportabili, è importante considerare che se la domanda dei passeggeri risultasse elevata, un treno troppo piccolo comporterebbe trasportare quello stesso numero di passeggeri con due treni che lavorano a carico molto basso. Ciò si tradurrebbe nell'attribuire maggiori consumi per passeggero.

#### 4.2.1 Unità funzionale

L'unità funzionale è un parametro di standardizzazione che permette di descrivere i risultati finali. In questo caso l'unità funzionale scelta è il passeggero-chilometro, cioè si valutano le quantità di energia e materia spese e le emissioni generate per il trasporto di un passeggero per un km, tenendo conto di tutte le fasi del ciclo di vita.

#### 4.2.2 Confini del sistema

I confini del sistema servono per delimitare gli input e gli output che il sistema stesso scambia con l'ambiente.

Per quanto riguarda i treni elettrici e diesel si sono stimate, da dati in letteratura, le materie prime e i relativi quantitativi di cui sono costituiti; invece, per i vettori energetici relativi agli assemblaggi e alla manutenzione sono stati utilizzati i valori inseriti nel flusso di Ecoinvent riferiti alla produzione di un treno elettrico regionale svizzero.

Sono inclusi anche i trasporti relativi a materiali provenienti da aree geografiche diverse da quelle relative al confine italiano.

Se si va ad osservare l'alimentazione per la fase d'uso, l'elettricità considerata è quella relativa alla rete elettrica italiana generata dal mix energetico caratteristico del Paese, mentre per il diesel si è considerata l'attività di mercato europeo a meno della Svizzera, che include quindi anche le importazioni del prodotto e il trasporto verso il consumatore, incluse le perdite.

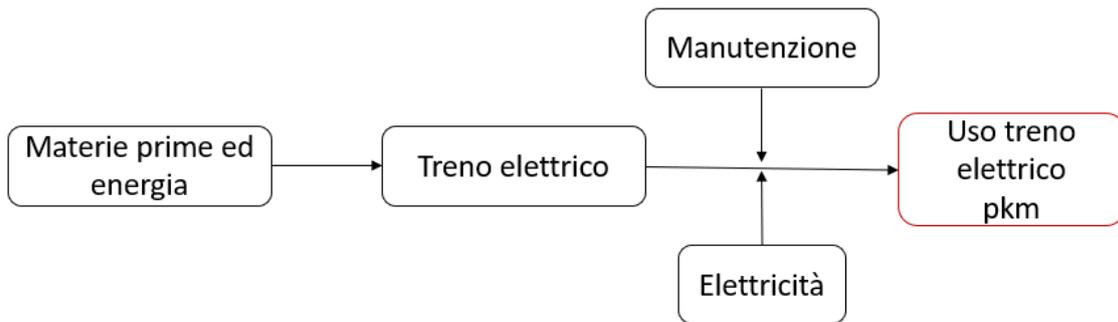


Figura 6- Rappresentazione dei confini del sistema del treno elettrico

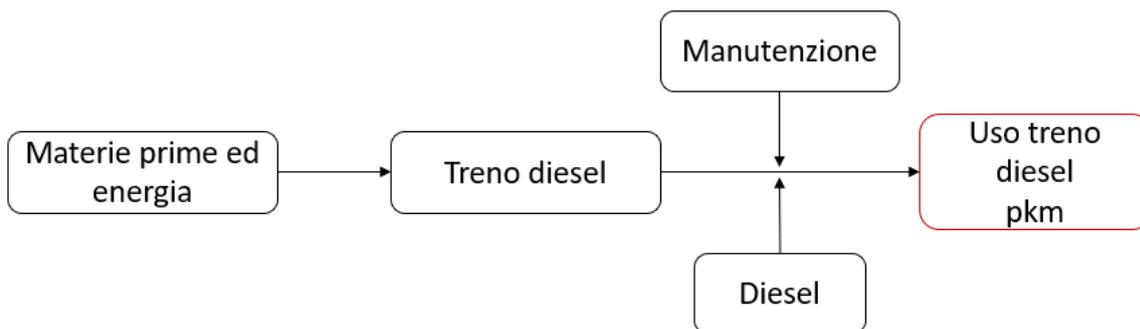


Figura 7- Rappresentazione dei confini del sistema del treno diesel

Per quanto riguarda il treno a idrogeno si è fatto riferimento, per la sua costruzione, a due processi principali, che sono la produzione della carrozza propulsiva e del treno a idrogeno senza carrozza propulsiva. Mentre per il secondo sono stati utilizzati gli stessi dati dei treni elettrico e diesel, per la carrozza propulsiva sono stati esaminati i componenti principali che la costituiscono [9]. Si è deciso di modellare quattro processi corrispondenti ai quattro componenti principali, ovvero la produzione di Stack PEMFC, batterie, serbatoi di idrogeno e carrozzeria.

Le valutazioni in merito ai trasporti dei materiali e alla manutenzione sono le stesse fatte per i treni elettrico e diesel.

Per quanto riguarda la produzione di idrogeno per la fase di uso, 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 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 [9].

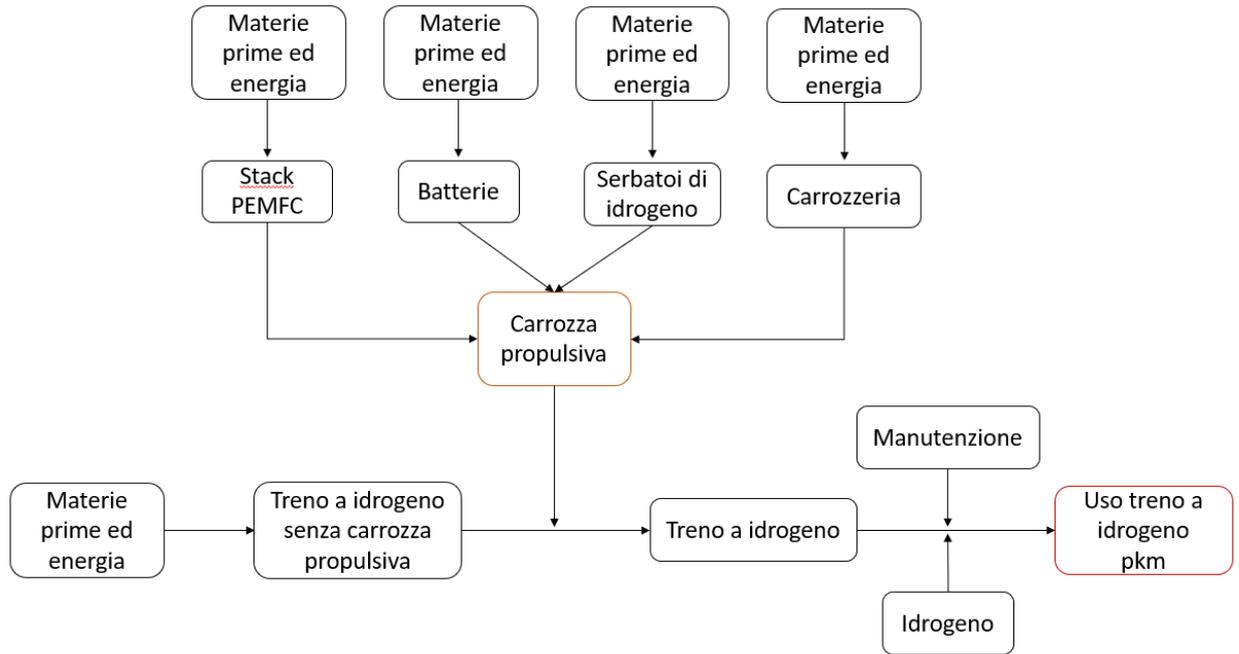


Figura 8- Rappresentazione dei confini del sistema del treno a idrogeno

In particolare, sono stati analizzati tre scenari per la fase di uso del treno a idrogeno, differenziati in funzione della produzione del combustibile: due scenari SMR e uno per elettrolisi.

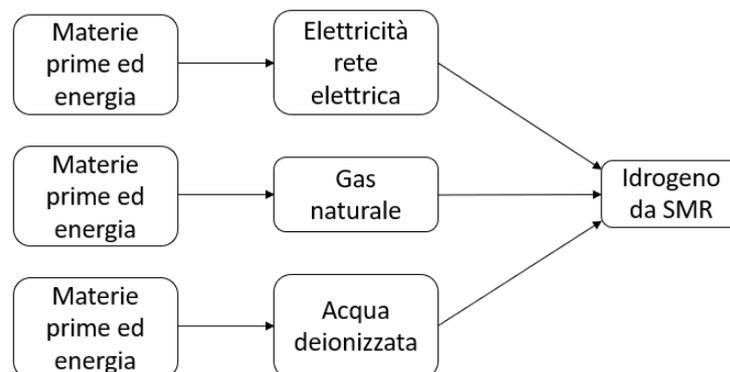


Figura 9- Confini del sistema produzione di idrogeno a partire da SMR, utilizzando energia elettrica da rete

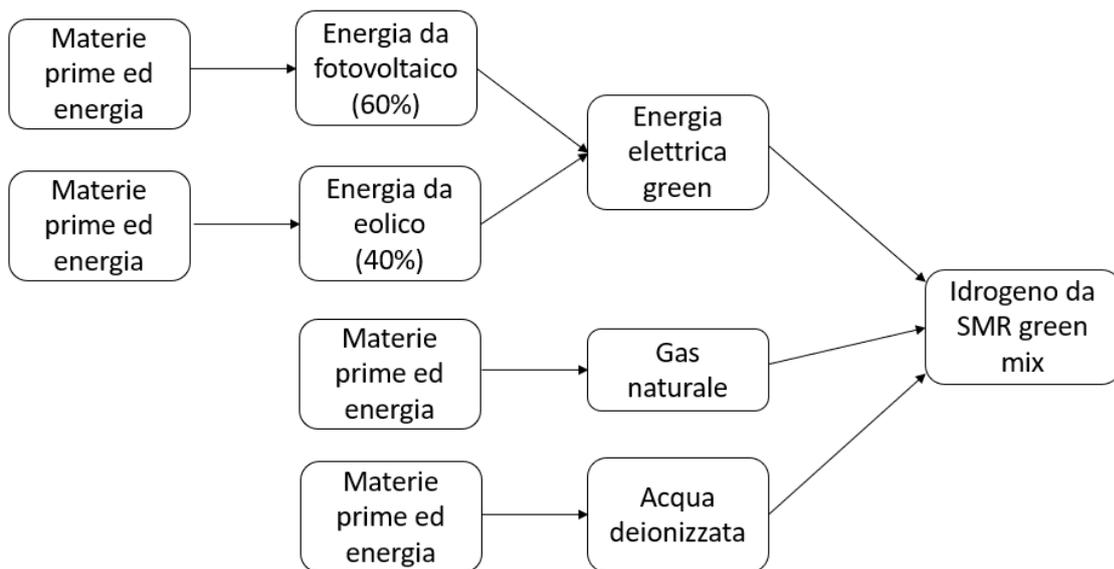


Figura 10- Confini del sistema produzione di idrogeno a partire da SMR, utilizzando energia elettrica proveniente da green mix

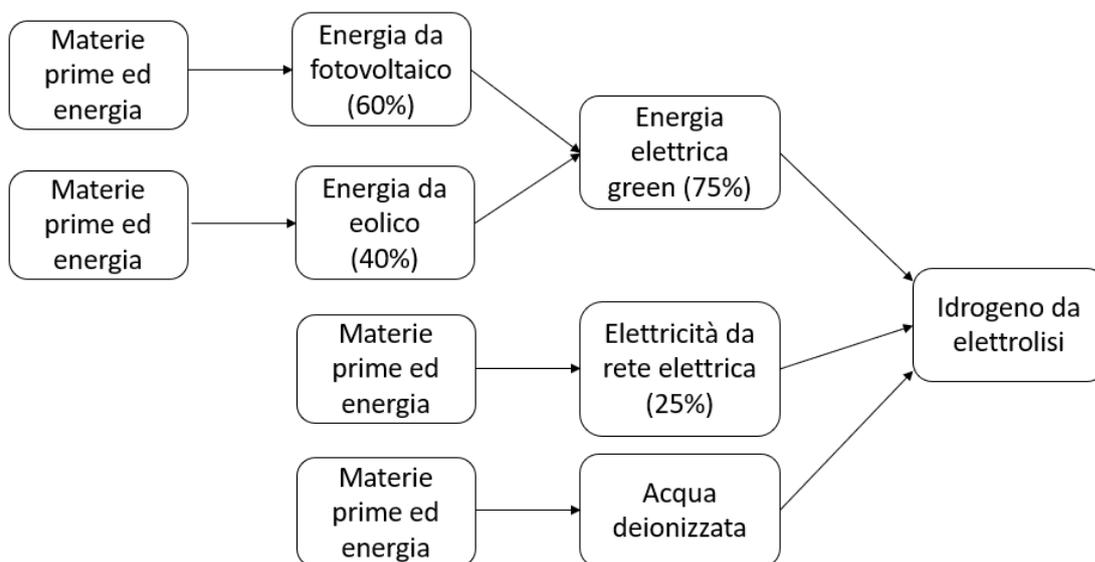


Figura 11- Confini del sistema produzione di idrogeno a partire da elettrolisi, utilizzando energia elettrica da rete (25%) ed energia elettrica proveniente da green mix (75%)

In tutti e tre i casi si è scelto di non considerare le infrastrutture ferroviarie né le stazioni di rifornimento.

Inoltre, la fase di fine vita è stata esclusa dallo studio, sia perché l'impatto generato da essa non è rilevante rispetto alla fase di uso [9], sia perché la gran parte dei materiali che

costituiscono i treni sono riciclabili, e tale spesa è già stata in parte affrontata andando a considerare alluminio riciclato in input.

#### 4.2.3 Tipo 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.

I dati considerati nel caso studio sono prevalentemente di tipo primario e secondario: dov'è stato possibile considerare dati da letteratura o relativi a progetti esistenti, ad esempio le informazioni pubblicate in merito al progetto H2iseo a cui ci si è ispirati per il treno a idrogeno, sono stati utilizzati questi, mentre in altri casi si è fatto riferimento a valori già inseriti nel database Ecoinvent versione 3.8.

Sono state, inoltre, effettuate delle stime in merito alle distanze che percorrono alcuni materiali per essere importati e ai tipi di lavorazione che subiscono.

#### 4.2.4 Allocazione

Le allocazioni vengono effettuate ogni qual volta vi sono in output più prodotti utili da gestire; l'obiettivo è quello di valutare quale quota dei flussi in input e quante delle emissioni in output vanno attribuite a ciascun co-prodotto. In questo caso, non essendo questi ultimi presenti, non sarà necessario valutare le allocazioni.

#### 4.2.5 Categorie di impatto selezionate

La scelta delle categorie di impatto è la fase in cui si osserva come i risultati dell'inventario si traducono in effetti sull'ambiente e sull'uomo.

Per effettuare tali considerazioni si sono utilizzati due metodi di analisi degli impatti:

- Il metodo ei-EF v3.0, di cui si sono osservate principalmente cinque categorie: acidificazione, cambiamento climatico, ecotossicità, eutrofizzazione terrestre e formazione fotochimica dell'ozono;
- Il metodo Cumulative Energy Demand, per analizzare i consumi energetici annessi alle varie categorie.

#### 4.3 Analisi di inventario

Lo studio è stato sviluppato sostanzialmente su due fasi: la fase di produzione del treno e la fase di uso.

La ricerca si è focalizzata principalmente sul capire quali fossero i materiali costituenti dei treni, in particolare cercando di comprendere quali fossero i flussi disponibili dal database di Ecoinvent, come riadattarli al caso in esame o, eventualmente, i tipi di flussi da creare.

##### 4.3.1 Produzione dei treni

Svolgere un'analisi comparativa comporta andare a studiare, in funzione della tipologia di treno, quali sono i componenti che lo costituiscono e, di conseguenza, i processi di produzione individuati nei vari casi.

In tale studio si vanno a ricondurre tutte le tipologie di treno ad un generico modello riportato in Figura 12, che presenta quattro vagoni.

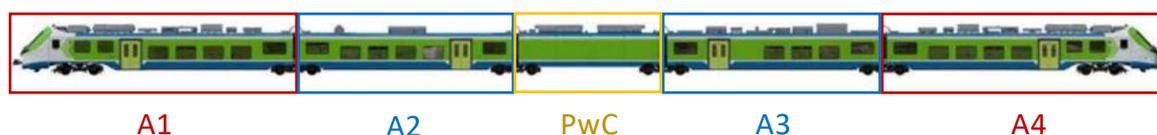


Figura 12- Schematizzazione del treno di riferimento

Analizzando nel dettaglio la Figura 12, si osserva che le carrozze di testa e di coda (A1 e A4) hanno una lunghezza maggiore delle altre: esse, infatti, includono delle lamiere di

acciaio nelle parti più esterne per far sì che, in caso di incidenti, gli urti vengano attutiti. Nel caso di treni diesel è al loro interno che vengono collocati i motori diesel.

Tutte le carrozze di tipo “A” sono adibite al trasporto passeggeri, e la loro dimensione, nonché struttura dell’involucro, è analoga per tutte le tipologie considerate. A variare sono le configurazioni interne in base alla destinazione d’uso, ad esempio se ci sono più posti a sedere o più aree portabiciclette.

Mentre per l’elettrotreno i componenti di trazione sono distribuiti lungo le carrozze, nel caso del treno a idrogeno i componenti di tipo “A” sono *solo* vagoni passeggeri; la differenza risiede nell’aggiunta dell’elemento propulsivo **PwC**, ovvero della Power Car.

Molti degli elementi, quindi, risultano comuni e in funzione di tale considerazione è stata realizzata la Tabella 1, in cui vengono indicati quali componenti sono comuni ai vari veicoli su rotaia esaminati.

*Tabella 1- Componenti considerati per la simulazione delle tre tipologie di treno esaminate*

<b>Componenti</b>	<b>Treno idrogeno</b>	<b>Treno elettrico</b>	<b>Treno diesel</b>
<b>Carrello motore</b>	✓	✓	✓
<b>Carrello portante</b>	✓	✓	✓
<b>Carrozza A2(= A3)</b>	✓	✓	✓
<b>Carrozza A1(=A4)</b>	✓	✓	✓
<b>Power car</b>	✓	X	X
<b>Motore diesel</b>	X	X	✓

Tale “spacchettamento”, unitamente al confronto effettuato, sarà utile nella fase di simulazione del processo produttivo del treno a idrogeno.

#### *4.3.1.1 Produzione treno elettrico*

Nel caso dell’elettrotreno è già presente un flusso modellato su Ecoinvent.

Il processo è denominato “*train production, passenger, regional | train, passenger, regional | Cutoff, S*” e fa riferimento ad un treno regionale svizzero, il “Kolibri”. Quest’ultimo è caratterizzato da un peso totale di 171 t e offre 271 posti; il carico medio è del 17% (46 passeggeri). Le prestazioni annue del veicolo-chilometro sono 150 000 vkm e, ipotizzando una durata di vita pari a 40 anni, ne conseguono una prestazione chilometrica totale pari a 6 000 000 vkm e una prestazione di trasporto per la vita utile pari a 276 000 000 pkm (passeggero-chilometro). Le stime per il consumo di energia per l'industria manifatturiera sono tratte da Frischknecht (1996) [15], ipotizzando un consumo di elettricità e di olio combustibile leggero rispettivamente di 2,7 MJ/kg di materiale e 3,8 MJ/kg di materiale. [16].

I dati della composizione del materiale e del consumo di energia si basano su studi di letteratura e sulla comunicazione orale con un esperto di un'azienda.

Il dataset è stato estrapolato dall'anno 2000 all'anno di calcolo (2021) ed è riportato di seguito nella Figura 13.

Inputs			
Flow	Amount	Unit	
F <sub>e</sub> alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state	1280.00000	kg	
F <sub>e</sub> aluminium, cast alloy	3200.00000	kg	
F <sub>e</sub> aluminium, wrought alloy	6800.00000	kg	
F <sub>e</sub> copper, cathode	7000.00000	kg	
F <sub>e</sub> electricity, medium voltage	1.28000E5	kWh	
F <sub>e</sub> flat glass, uncoated	7230.00000	kg	
F <sub>e</sub> glued laminated timber, MUF-glue	4.33500	m3	
F <sub>e</sub> glued laminated timber, PUR-glue	4.33500	m3	
F <sub>e</sub> heat, district or industrial, other than natural gas	1.80000E5	MJ	
F <sub>e</sub> lead	1450.00000	kg	
F <sub>e</sub> polyethylene, high density, granulate	1.30000E4	kg	
F <sub>e</sub> reinforcing steel	1.14000E5	kg	
F <sub>e</sub> stone wool, packed	1280.00000	kg	
Outputs			
Flow	Amount	Unit	Costs/Reven...
F <sub>e</sub> train, passenger, regional	1.00000	Item(s)	1.96920E5 ...
F <sub>e</sub> used train, passenger, regional	1.00000	Item(s)	

Figura 13- Flusso implementato su Ecoinvent per la produzione di un treno elettrico regionale svizzero

Tali dati verranno utilizzati in seguito quando non è stato possibile stimare i valori di tali inputs.

Per l'elettrotreno del caso studio si sono stimati i materiali che lo compongono grazie ad una ricerca in letteratura. In particolare, è emerso che i due materiali predominanti sono l'acciaio (circa pari al 45%, non considerando la quota dell'inox) e l'alluminio (circa il 35%) che costituiscono l'involucro esterno e i carrelli motori e portanti.

Stimato un peso totale di circa 130 t [17] per un elettrotreno composto da quattro carrozze, si sono riportati in Tabella 2 i materiali che lo compongono, quanto pesano in termini percentuali sul totale e il loro peso espresso in chilogrammi.

*Tabella 2- Percentuali e rispettivi chili di materiali considerati per la produzione di un elettrotreno*

<b>Materiale</b>	<b>%</b>	<b>kg</b>
<b>Acciaio</b>	45	58 500
<b>Acciaio inox</b>	7	9 100
<b>Ghisa</b>	0.5	650
<b>Alluminio</b>	35	45 500
<b>Rame</b>	3	3 900
<b>Ottone</b>	0.1	130
<b>Vetri</b>	2.5	3 250
<b>Termoplastici + termoindurenti</b>	3	3 900
<b>Gomma</b>	1.5	1950
<b>Colla sigillante</b>	0.2	260
<b>Lana minerale</b>	0.1	130
<b>Fluidi</b>	<2%	2353
<b>Compositi</b>		
<b>Materiali organici modificati</b>		
<b>Altri materiali</b>		
<b>TOT</b>	<b>100%</b>	<b>130 000</b>

Dall'analisi sono stati trascurati i fluidi, i materiali organici modificati, i compositi e "altri materiali", che, oltre a non essere noti, hanno un peso poco rilevante sul totale. Questi difatti, assieme all'ottone anch'esso trascurato, costituiscono l'1.8% del peso totale del treno, stimato pari a 130 t.

I flussi relativi al calore e l'elettricità consumati per assemblare il treno sono considerati, in valore, pari a quelli implementati nel Kolibri; a variare sono i providers, che, nel caso di energia elettrica (medium voltage) si è scelta quella prodotta in Italia, mentre il calore si ipotizza generato da gas naturale e non da fonti diverse da esso.

Sono state, inoltre, effettuate le seguenti considerazioni:

- L'alluminio utilizzato è in larga parte riciclato, essendo riutilizzabile al 100% mantenendo invariate le sue proprietà; tale quota è definita per mezzo di un parametro "R1", mentre la parte di alluminio primaria (non riciclata), pari a (1-R1), è stata considerata come "*cast alloy*". La lavorazione a cui la totalità del materiale è sottoposto è la laminazione, "*sheet rolling*"
- I vetri, ipotizzati prodotti in Francia, arrivano nel sito di assemblaggio a Savigliano trasportati su gomma, percorrendo circa 600 km
- L'acciaio, sia inox che basso legato, è prodotto in Polonia e viene trasportato fino a Savigliano su rotaia, per circa 1500 km. L'acciaio inox, indicato come "*steel, chromium steel 18/8*", essendo utilizzato per questioni strutturali nelle carrozze, è considerato sottoposto al processo di lavorazione "*hot rolled*", input che già include la quantità di materiale necessario. L'acciaio basso legato, invece, subisce trattamenti in funzione dei campi di applicazione. Infatti, circa 15500 kg sono utilizzati per le lamiere nella parte più estrema delle carrozze A1 e A4, al fine di attutire gli urti; tale quantità è sottoposta al solo processo "*steel, low-alloyed, hot rolled*". La restante parte, circa 39000 kg, è sottoposta a due processi: "*forging*" e "*section bar rolling*", necessari per la realizzazione dei componenti costituenti i carrelli motore e portanti. Tali inputs di lavorazione non includono, però, la quantità di materiale lavorato, che viene, quindi, inserito come "*steel, low-alloyed*".

- Tutti i providers, quando possibile, sono stati considerati relativi alla produzione in Europa, “RER”. Se impossibilitati a tale scelta, si è proceduto con la selezione di paesi nel continente europeo (Svizzera) o con mercati globali (“market, GLO”).

Tale processo, denominato “Produzione del treno elettrico”, è riportato in Figura 14.

▼ Inputs		
Flow	Amount	Unit
F <sub>€</sub> aluminium scrap, new	45500*R1	kg
F <sub>€</sub> aluminium, cast alloy	45500*(1-R1)	kg
F <sub>€</sub> brass	130.00000	kg
F <sub>€</sub> cast iron	650.00000	kg
F <sub>€</sub> copper, cathode	3900.00000	kg
F <sub>€</sub> electricity, medium voltage	1.28000E5	kWh
F <sub>€</sub> flat glass, uncoated	3250.00000	kg
F <sub>€</sub> forging, steel	4.09500E4	kg
F <sub>€</sub> glass wool mat	130.00000	kg
F <sub>€</sub> heat, district or industrial, natural gas	1.80000E5	MJ
F <sub>€</sub> polyethylene, high density, granulate	3900.00000	kg
F <sub>€</sub> section bar rolling, steel	4.09500E4	kg
F <sub>€</sub> sheet rolling, aluminium	4.55000E4	kg
F <sub>€</sub> steel, chromium steel 18/8, hot rolled	9100.00000	kg
F <sub>€</sub> steel, low-alloyed	5.85000E4	kg
F <sub>€</sub> steel, low-alloyed, hot rolled	1.75500E4	kg
F <sub>€</sub> synthetic rubber	260.00000	kg
F <sub>€</sub> transport, freight train	67.600*1500	t*km
F <sub>€</sub> transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5	3.250*600	t*km
▼ Outputs		
Flow	Amount	Unit
F <sub>€</sub> <b>Treno elettrico</b>	<b>1.00000</b>	<b>Item(s)</b>

Figura 14- Processo di produzione del treno elettrico modellato su OpenLCA

#### 4.3.1.2 Produzione treno diesel

Il flusso riferito alla produzione del treno diesel è stato realizzato tenendo in considerazione l’analogia che sussiste con il treno elettrico: come già visto nel paragrafo 2.2, la grande differenza tra i due risiede nella provenienza dell’energia elettrica. In questo caso, infatti, non essendoci prelievo da rete elettrica, si ha bisogno di un generatore che

produca corrente. Si è quindi considerato, nel processo, il treno elettrico integrato con un motore diesel.

I treni regionali diesel odierni, ad esempio quello di tipo Swing prodotto da Alstom e facente parte della nuova flotta di treni regionali, sono di tipo DMU (Diesel Multiple Unit): non richiedono una locomotiva separata, cioè che si occupi della sola trazione, ma i motori sono incorporati in una o più carrozze.

Osservando nello specifico un treno ATR 220, modello soprannominato da Trenitalia "Swing", si osserva che è costituito da 3 vagoni, per una lunghezza totale di 56 m e una massa di 110 t, e conta 158 posti a sedere totali. Sono presenti due motori, ognuno di potenza 380 kW, per un totale di 760 kW. La peculiarità della nuova flotta regionale, che include sia treni diesel che elettrici, è il rispetto dei parametri costruttivi dei vagoni in termini di dimensione dell'involucro della carrozza; a variare sono gli asset interni che mutano in funzione dell'organizzazione del numero di posti a sedere e degli ingombri dei componenti per la trazione.

Essendo, quindi, le carrozze A1, A2 e A4 (Figura 12) delle stesse dimensioni nei casi diesel ed elettrico, si è scelto di utilizzare gli stessi dati forniti per il treno elettrico. È importante, però, considerare che il treno di riferimento elettrico conta quattro carrozze mentre l'ATR 220 ne conta tre. Per poter, quindi, procedere come indicato è necessario aggiungere una carrozza, l'A3, che comporterà un numero di passeggeri aggiuntivi ipotizzati pari a 52, per un totale di 210 passeggeri. Di conseguenza verrà simulato questo treno fittizio che avrà un peso totale stimato di circa 137 t, dato dalla somma del treno base da 110 t [17] e una carrozza di circa 27 t, e che quindi erogherà una potenza superiore, stimata pari a circa 1000 kW. Tale potenza sarà erogata da due motori, posti nei vagoni A1 e A4, ognuno di potenza pari a 500 kW. Nel modello, però, ne verrà simulato uno equivalente di potenza pari 1000 kW.

Il flusso disponibile nel database è un motore a combustione interna riferito ad una Golf A4, che può erogare circa 100 kW ed ha un peso di 275 kg. Da schede tecniche riferite a motori attualmente in commercio, si è visto che un motore da 235 kW ha un peso di 530 kg. Si è quindi proporzionato, per difetto, il peso in funzione della potenza scelta (1000 kW), per un risultato di circa 2250 kg.

▼ Inputs		
Flow	Amount	Unit
F <sub>g</sub> internal combustion engine, passenger car	2250.00000	kg
F <sub>g</sub> Treno elettrico	1.00000	Item(s)
▼ Outputs		
Flow	Amount	Unit
F <sub>g</sub> Treno diesel	1.00000	Item(s)

Figura 15- Processo di produzione del treno diesel modellato su OpenLCA

#### 4.3.1.3 Produzione treno a idrogeno

Uno dei punti cardini di tale studio è proprio la modellazione ai fini dell'implementazione del flusso su openLCA della produzione del treno a idrogeno.

Diversamente dagli altri due casi precedentemente analizzati, c'è l'aggiunta, nella zona centrale, della Power Car (carrozza propulsiva). Tale aggiunta implica la presenza di un carrello portante in più rispetto alla configurazione di riferimento.

Devono, quindi, essere creati due nuovi processi: "Produzione del carrello portante" e "Produzione della Power Car", che saranno poi integrativi del processo "Produzione treno elettrico", per realizzare il flusso "Produzione treno a idrogeno".

#### Produzione carrello portante

I carrelli intermedi, definiti portanti, sono quelli di collegamento tra i vari vagoni. Seguono la versione costruttiva di tipo Jacob e sono formati dai seguenti gruppi principali:

- telaio, costituito da due longheroni laterali collegati da due traverse tubolari
- tamponi laterali, volti a limitare gli spostamenti laterali della cassa
- asta di trazione montata lungo la mezzeria longitudinale del carrello e collegata ad una delle estremità della struttura cassa

- due gruppi di sospensione secondaria di tipo pneumatico, con due cuscini pneumatici e due ammortizzatori laterali
- quattro sospensioni primarie composte da bracci oscillanti con elastomeri di collegamento al telaio, sedi per ammortizzatori verticali e molle elicoidali poste sopra ciascuna boccola
- due sale montate, ciascuna composta da assile e due ruote monoblocco con dischi freno
- quattro boccole esterne dotate di cuscinetti a rulli
- gruppo frenante, uno per ciascuna ruota (freno pneumatico a dischi con relative pinze freno)

È assente la trave portante e l'interfaccia sospensioni secondarie-cassa è costituita da una piastra posta sopra la molla d'aria.

Il carrello portante è per la gran parte costituito da acciaio che viene lavorato in funzione dei tipi di componenti che si vogliono ottenere. Si è, pertanto, considerata la presenza di pochi chili di gomma che costituiscono i cuscini pneumatici *“synthetic rubber”*, mentre la restante parte è stata simulata come *“steel, low-alloyed”*. Si sono considerati, per tale materiale, due tipi di processi di lavorazione presenti sul database Ecoinvent:

- *“forging steel”*, che consiste nel processo di forgiatura,
- *“section bar rolling, steel”* che consiste nella produzione di barre in acciaio

Stimato il peso totale del carrello portante, pari a circa 6400 kg, si riportano in Figura 16 i pesi attribuiti ai due tipi di materiale ed annessi processi di lavorazione.

▼ Inputs		
Flow	Amount	Unit
F <sub>g</sub> forging, steel	6380.00000	kg
F <sub>g</sub> section bar rolling, steel	6380.00000	kg
F <sub>g</sub> steel, low-alloyed	6380.00000	kg
F <sub>g</sub> synthetic rubber	20.00000	kg
F <sub>g</sub> transport, freight train	6.380*1500	t*km
▼ Outputs		
Flow	Amount	Unit
F <sub>g</sub> Carrello portante	1.00000	Item(s)

Figura 16- Processo di produzione carrello portante modellato su OpenLCA

L'output di tale processo sarà "Carrello portante", misurato in items. Si è scelto, come provider, la produzione in Europa (RER) dove possibile; diversamente, ad esempio nel caso del *forging steel*, si è scelto "market for forging, steel | forging, steel | Cutoff, S – GLO".

Anche in questo caso si è considerato acciaio importato dalla Polonia, con trasporto su rotaia.

#### *Produzione Power Car*

Nel capitolo 2 sono già stati elencati i componenti di cui è costituita la Power Car.

Tale analisi si collega allo studio "Analisi del ciclo di vita del sistema propulsivo di un treno a idrogeno" [9] portato avanti dal Politecnico di Torino in cui è stata effettuata una LCA della carrozza propulsiva.

Il processo "Produzione della carrozza" prevede l'assemblaggio di tutti i flussi creati per i vari componenti di cui è costituito, unitamente ai trasporti dei materiali quando necessario considerarli.

Verranno riportati, in maniera sintetica, i principali processi creati.

### **1. Processo di produzione di uno stack PEMFC 1110 kW con BOP.**

I dati primari di tale processo sono riportati nella Tabella 3.

Tabella 3- Caratteristiche Stack PEMFC

Dati	Valori	Unità di misura
Numero	4	items
Potenza	1110	kW totali
Peso	2000	kg totali

Si è considerato uno stack da 1110 kW di potenza netta invece che quattro stack da 280 kW, a cui corrispondono un numero di celle totali pari a 8880.

La produzione di una singola cella, il cui processo è denominato “Processo di produzione di una cella PEMFC” [9], è riportata in Figura 17.

▼ Inputs		
Flow	Amount	Unit
F Bipolar plates, graphite composite material	148.90000	g
F Catalyst	0.01880	g
F Catalyzed membrane	1.97-0.0188	g
F electricity, low voltage	0.58+0.05	kWh
F electricity, low voltage	0.04000	kWh
F End plates	37.70000	g
F Gas diffusion layer	23.00000	g
F Gasket	5.20000	g
▼ Outputs		
Flow	Amount	Unit
F PEMFC, single cell	1.00000	Item(s)

Figura 17- Produzione di una della PEMFC modellato su OpenLCA

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 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”.

▼ Inputs		
Flow	Amount	Unit
F: air compressor, screw-type compressor, 4kW	1.90000	Item(s)
F: air filter, in exhaust air valve	13.90000	Item(s)
F: aluminium oxide, metallurgical	97.10000	kg
F: aluminium, wrought alloy	152.60000	kg
F: fan, for power supply unit, desktop computer	34.70000	kg
F: Polytetrafluoroethylene	4.20000	kg
F: pump, 40W	486.00000	Item(s)
F: steel, chromium steel 18/8	25.00000	kg

▼ Outputs		
Flow	Amount	Unit
F: <b>BOP 1110 kW fuel cell stack</b>	<b>1.00000</b>	<b>Item(s)</b>

Figura 18-Produzione BOP per stack PEMFC 1110 kW modellato su OpenLCA

▼ Inputs		
Flow	Amount	Unit
F: aluminium scrap, post-consumer, prepared for melting	0.9*522	kg
F: BOP 1110 kW fuel cell stack	1.00000	Item(s)
F: PEMFC, single cell	8880.00000	Item(s)

▼ Outputs		
Flow	Amount	Unit
F: <b>Stack Pemfc 1110 kW+BOP</b>	<b>1.00000</b>	<b>Item(s)</b>

Figura 19- Produzione stack PEMFC 1110kW+BOP modellato su OpenLCA

## 2. Processo di produzione della batteria agli ioni di litio di tipo NCM.

Le batterie scelte sono agli ioni di litio di tipo NCM, ovvero con nichel, cobalto e manganese che compongono il catodo. Questo tipo di batteria viene molto utilizzata per le automobili elettriche grazie alla sua elevata densità energetica.

Tabella 4- Caratteristiche batterie

Dati	Valori	Unità di misura
Numero	8	items
Capacità di ogni batteria	100	kWh
Peso	1100	kg

▼ Inputs		
Flow	Amount	Unit
F <sub>2</sub> acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer	21.00000	kg
F <sub>2</sub> aluminium scrap, post-consumer, prepared for melting	0.9*253.13	kg
F <sub>2</sub> aluminium, wrought alloy	198.1+55	kg
F <sub>2</sub> copper, anode	94.50000	kg
F <sub>2</sub> dimethyl carbonate	59.80000	kg
F <sub>2</sub> electricity, medium voltage	7200.00000	MJ
F <sub>2</sub> electronic component, active, unspecified	13.30000	kg
F <sub>2</sub> electronic component, passive, unspecified	13.30000	kg
F <sub>2</sub> ethylene carbonate	131.30000	kg
F <sub>2</sub> graphite, battery grade	168.10000	kg
F <sub>2</sub> heat, from steam, in chemical industry	3400.00000	MJ
F <sub>2</sub> lithium hexafluorophosphate	12.50000	kg
F <sub>2</sub> NCM active material	294.00000	kg
F <sub>2</sub> polypropylene, granulate	16.70000	kg
F <sub>2</sub> propylene glycol, liquid	17.60000	kg
F <sub>2</sub> steel, chromium steel 18/8	11.00000	kg
F <sub>2</sub> Thermal insulation	3.30000	kg
F <sub>2</sub> Water, unspecified natural origin	3390/994	m3
▼ Outputs		
Flow	Amount	Unit
F <sub>2</sub> NCM battery 100 kWh	1.00000	Item(s)

Figura 20- Processo di produzione batteria NMC da 100 kWh modellato su OpenLCA

### 3. Carrozzeria

La carrozza propulsiva richiede, rispetto a quelle classiche in alluminio, un involucro più resistente che ospiti e protegga tutti i componenti destinati alla propulsione.

Difatti, è stato stimato che i componenti principali siano acciaio basso legato R 450 e R 355, con aggiunta di alluminio per le pareti esterne.

I componenti principali sono stati definiti come riportato in Figura 21.

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

Figura 21- Componenti carrozzeria della Power Car

Dopo aver definito le lavorazioni dei materiali per i vari componenti, tali flussi sono stati inseriti in input a creare il processo denominato “Produzione della carrozzeria” ed annessi trasporti.

▼ Inputs		
Flow	Amount	Unit
F <sub>2</sub> aluminium scrap, post-consumer, prepared for melting	0.9*680	kg
F <sub>2</sub> Barre e Irrigidimenti	1.00000	Item(s)
F <sub>2</sub> Carrelli carrozza	1.00000	Item(s)
F <sub>2</sub> Pareti corridoio carrozza	1.00000	Item(s)
F <sub>2</sub> Pareti esterne carrozza	1.00000	Item(s)
F <sub>2</sub> Pavimento carrozza	1.00000	Item(s)
F <sub>2</sub> Terminali carrozza	1.00000	Item(s)
F <sub>2</sub> Tetto carrozza	1.00000	Item(s)
F <sub>2</sub> welding, gas, steel	144.00000	m
▼ Outputs		
Flow	Amount	Unit
F <sub>2</sub> Carrozzeria	<b>1.00000</b>	<b>Item(s)</b>

Figura 22- Processo di produzione della carrozzeria modellato su OpenLCA

#### 4. Serbatoi

I serbatoi hanno il compito di stoccare l'idrogeno e consentirne il trasporto sicuro. Sono stati considerati serbatoi ad alta pressione di tipo IV, cioè rivestiti con un polimero 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.

Il serbatoio modellato pesa 93 kg e ha una capacità di 5.6 kg di idrogeno; la pressione operativa è di 350 bar e con liner in polietilene ad alta densità.

È riportato, in Figura 23, il processo denominato "Produzione Serbatoio di tipo IV"

▼ Inputs		
Flow	Amount	Unit
F <sub>2</sub> aluminium scrap, post-consumer, prepared for melting	0.9*7.09	kg
F <sub>2</sub> aluminium, wrought alloy	7.09000	kg
F <sub>2</sub> carbon fibre reinforced plastic, injection moulded	19.78000	kg
F <sub>2</sub> electricity, medium voltage	12.87000	MJ
F <sub>2</sub> epoxy resin, liquid	29.67000	kg
F <sub>2</sub> glass fibre	5.60000	kg
F <sub>2</sub> polyethylene, high density, granulate	10.26000	kg
F <sub>2</sub> polyurethane, flexible foam	4.67000	kg
F <sub>2</sub> steel, chromium steel 18/8	10.64000	kg
▼ Outputs		
Flow	Amount	Unit
F <sub>2</sub> <b>Hydrogen tank type IV</b>	<b>1.00000</b>	<b>Item(s)</b>

Figura 23- Processo di produzione serbatoio idrogeno modellato su OpenLCA

A seguito della modellazione di questi quattro componenti, si è modellata la carrozza per mezzo di un flusso denominato “Produzione della carrozza” e che ha come output “1 carrozza”.

Esso include, oltre alle quantità necessarie dei componenti, i trasporti fino al luogo di assemblaggio del treno.

Lo stack PEMFC è stato considerato prodotto ad Aix-en-Provence dalla Helion Hydrogen Power che è stata acquisita da Alstom e trasportato tramite camion. 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 si è individuata l'azienda NPROXX 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, 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".

Inputs		
Flow	Amount	Unit
F <sub>2</sub> Carrozzeria	1.00000	Item(s)
F <sub>2</sub> Hydrogen tank type IV	56.00000	Item(s)
F <sub>2</sub> NCM battery 100 kWh	8.00000	Item(s)
F <sub>2</sub> Stack Pemfc 1110 kW+BOP	1.00000	Item(s)
F <sub>2</sub> transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5	2.411*330	t*km
F <sub>2</sub> transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5	5.208*1000	t*km
F <sub>2</sub> transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5	7.332*1500	t*km
F <sub>2</sub> transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5	8.8*1200	t*km
F <sub>2</sub> transport, freight, sea, container ship	8.8*19116	t*km
Outputs		
Flow	Amount	Unit
F <sub>2</sub> Carrozzeria	1.00000	Item(s)

Figura 24- Processo di produzione della carrozza modellato su Open LCA

#### 4.3.2 Fase di uso

La fase di uso dei treni è il mezzo che ci permette di valutare l'impatto delle tre soluzioni nel momento del loro funzionamento.

Ai fini del confronto è stato necessario riportare le analisi ad un unico riferimento, un flusso che consiste nel trasporto di un passeggero per un chilometro; entra in gioco, quindi, l'unità funzionale precedentemente definita come "passeggero-km".

È stato necessario, però, definire preliminarmente alcuni parametri necessari ai calcoli dei valori utili in questa fase.

In prima istanza si è calcolato il carico medio dei passeggeri che percorrono la tratta esaminata durante il ciclo di vita dei treni.

La linea Brescia-Iseo-Edolo viene servita da Regio-Express, treni che possono ospitare massimo 427 persone. Dal Programma Regionale Mobilità e Trasporti della regione Lombardia del 2016 si è ricavato il carico medio.

Dalla Figura 25 si osserva che il numero medio di viaggiatori della Regio Express è pari a 312; ciò implica un carico medio stimato pari al rapporto  $\frac{312}{427} = 0.73$ , cioè del 73% rispetto al valore nominale.

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

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

<sup>(2)</sup> Valore medio

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

Figura 25- Numero di corse e passeggeri relativi alla linea Brescia-Iseo-Edolo

Essendo l'unità funzionale il "passeggero-km", vengono riportati in Tabella 5 i valori utili per normalizzare i dati per i diversi treni.

Le valutazioni per i tre casi esaminati sono state fatte a parità di vita utile e chilometri percorsi, in quanto si tratta di tre modelli del tutto analoghi in termini costruttivi a meno del tipo di propulsione.

Tabella 5- Calcolo dei p\*km per le tre tipologie di treno

Dati	Treno elettrico	Treno diesel	Treno a idrogeno
Anni di vita	25	25	25
Lunghezza di una tratta [km]	103	103	103
Numero di tratte al giorno	4	4	4
Giorni di funzionamento a settimana	6	6	6
Giorni di funzionamento annuali	312	312	312
Chilometri percorsi durante la vita utile [km]	3 210 600	3 210 600	3 210 600
Passeggeri, carico massimo (numero di sedili)	321	210	250
Passeggeri, carico pari al 73%	235	154	183
[p*km]	<b>755 196 000</b>	<b>494 894 400</b>	<b>588 088 800</b>

I valori indicati come p\*km verranno poi utilizzati per riproporzionare gli input nella fase di uso. Essi sono stati calcolati come:

$$[p \cdot km] = \text{Passeggeri, carico 73\%} \cdot \text{Chilometri percorsi durante la vita utile}$$

I dati in input al processo di uso, i cui valori dipendono dal tipo di treno, sono tre:

- Treno
- Manutenzione
- Consumi

L'obiettivo è quello di andare a valutare qual è la quota di questi input in relazione al trasporto di un passeggero per un chilometro. Mentre il processo produzione è già noto

dal calcolo fatto precedentemente, le quote di manutenzione e consumi devono essere stimate.

Per quanto riguarda la manutenzione, il suo valore è stato stimato andando ad indagare il processo *“transport, passenger train, regional | transport, passenger train | Cutoff, U”*, che consiste nella fase di uso di un treno elettrico svizzero, circolante sulle ferrovie svizzere. Il flusso, denominato *“maintenance, train, passenger, regional”*, ha come unità di misura *“Items”*, dove 1 Items = 1 intervento manutentivo.

Il valore di manutenzione inserito nel processo di riferimento è pari a  $2.9314 \cdot 10^{-9}$  Items/p·km; esso verrà poi modellato nei casi in esame applicando la formula che segue:

$$\text{Manutenzione} \left[ \frac{\text{item}}{p \cdot \text{km}} \right] = 2.9314 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{46}{\text{passeggeri ,carico 73\%}} \cdot \frac{25}{40}$$

dove:

- Il rapporto  $\frac{25}{40}$  è derivante dal fatto che il treno di riferimento ha una vita utile stimata di 40 anni, a fronte dei 25 anni dei treni oggetto di studio
- Il rapporto  $\frac{46}{\text{passeggeri ,carico 73\%}}$  è derivante dal fatto che l'occupazione nel treno di riferimento è di 46 persone, mentre nei casi esaminati ci si discosta notevolmente da tale valore.

Per quanto riguarda i consumi, invece, si è fatto riferimento a tre diversi studi:

- nel caso dell'elettrica, il valore considerato proviene da uno studio portato avanti dal Politecnico di Milano volto ad analizzare l'impronta di carbonio di EXPO 2015 [18]. Esso è il risultato di una media dei valori di treni passeggeri tradizionali urbani, regionali e a lunga distanza
- nel caso del diesel si è fatto riferimento al Railway Handbook 2012, Energy Consumption and CO<sub>2</sub> Emissions [19], che riporta un valore di circa 1170 KJ/p\*km, come illustrati in Figura 26.

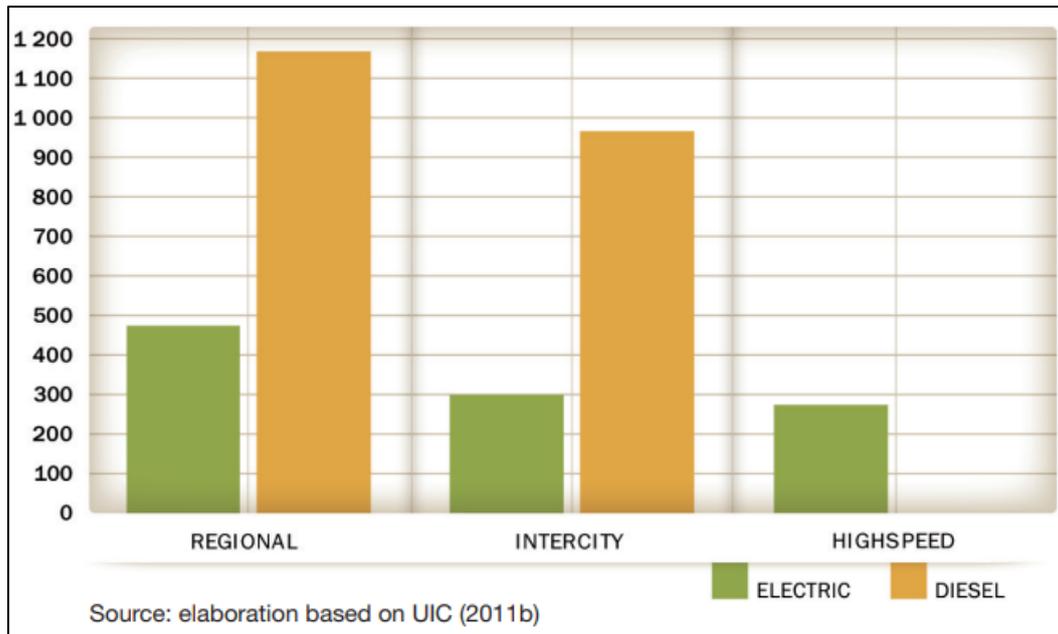


Figura 26- Consumo in kJ/p\*km per le varie tipologie di treno

Considerando un PCI del diesel pari a 44.4 MJ/kg, si ottiene il valore riportato in Tabella 6.

- nel caso dell'idrogeno si è considerato il valore calcolato nell'LCA della carrozza propulsiva [9]. Esso è stato calcolato a partire da un'informazione rilasciata da Alstom nel webinar "Energy for Motion" del Politecnico di Milano, che afferma che un pieno consente di percorrere 600 km

Tabella 6- Consumi riferiti a p\*km per le tre tipologie di treno

	Consumi	Unità di misura
<b>Energia elettrica</b>	0.08	$\frac{kWh}{p \cdot km}$
<b>Diesel</b>	0.02635	$\frac{kg_{diesel}}{p \cdot km}$
<b>Idrogeno</b>	0.00273	$\frac{kg_{H2}}{p \cdot km}$

Come si osserva in Tabella 6, i consumi sono già riferiti all'unità funzionale, mentre gli altri due input, cioè treno e manutenzione, devono essere divisi per passeggero-km, calcolati in Tabella 5.

Si ottengono, quindi, i seguenti processi di fase d'uso per i diversi treni.

Inputs/Outputs: Uso treno elettrico		
▼ Inputs		
Flow	Amount	Unit
F <sub>e</sub> electricity, medium voltage	0.08000	kWh
F <sub>e</sub> maintenance, train, passenger, regional	3.59000E-10	Item(s)
F <sub>e</sub> Treno elettrico	1.32416E-9	Item(s)
▼ Outputs		
Flow	Amount	Unit
F <sub>e</sub> <b>Uso treno elettrico</b>	<b>1.00000</b>	<b>p*km</b>

Figura 27- Uso del treno elettrico modellato su Open LCA

▼ Inputs		
Flow	Amount	Unit
F <sub>e</sub> diesel	0.02635	kg
F <sub>e</sub> maintenance, train, passenger, regional	5.47000E-10	Item(s)
F <sub>e</sub> Treno diesel	2.02063E-9	Item(s)

Figura 28- INPUTS Uso del treno diesel modellato su Open LCA

Outputs			
Flow	Category	Amount	Unit
Acetaldehyde	Emission to air/unspecified	3.15425E-6	kg
Ammonia	Emission to air/unspecified	3.76581E-7	kg
Benzene	Emission to air/unspecified	2.26303E-7	kg
Cadmium	Emission to air/unspecified	2.79732E-10	kg
Cadmium	Emission to soil/unspecified	1.33845E-10	kg
Cadmium, ion	Emission to water/unspecified	1.33845E-10	kg
Carbon dioxide, fossil	Emission to air/unspecified	0.08319	kg
Carbon monoxide, fossil	Emission to air/unspecified	0.00024	kg
Chromium	Emission to air/unspecified	1.75419E-9	kg
Chromium	Emission to soil/unspecified	6.38336E-10	kg
Chromium VI	Emission to air/unspecified	2.63464E-12	kg
Chromium, ion	Emission to water/unspecified	6.38336E-10	kg
Copper	Emission to air/unspecified	7.42498E-8	kg
Copper	Emission to soil/unspecified	8.95737E-9	kg
Copper, ion	Emission to water/unspecified	8.95737E-9	kg
Dinitrogen monoxide	Emission to air/unspecified	9.95606E-7	kg
Formaldehyde	Emission to air/unspecified	5.79777E-6	kg
Lead	Emission to air/unspecified	2.12844E-9	kg
Lead	Emission to soil/unspecified	5.50826E-9	kg
Lead	Emission to water/unspecified	5.50826E-9	kg
Mercury	Emission to air/unspecified	5.26920E-13	kg
Methane, fossil	Emission to air/unspecified	1.69725E-6	kg
Nickel	Emission to air/unspecified	2.21965E-9	kg
Nickel	Emission to soil/unspecified	1.72971E-9	kg
Nickel, ion	Emission to water/unspecified	1.72971E-9	kg
Nitrogen oxides	Emission to air/unspecified	0.00097	kg
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air/unspecified	5.63991E-5	kg
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	Emission to air/unspecified	3.01265E-11	kg
Particulates, < 2.5 um	Emission to air/unspecified	3.34517E-5	kg
Particulates, > 10 um	Emission to air/unspecified	4.26591E-6	kg
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	Emission to air/unspecified	4.63866E-6	kg
Selenium	Emission to air/unspecified	2.63464E-10	kg
Sulfur dioxide	Emission to air/unspecified	2.63464E-6	kg
Toluene	Emission to air/unspecified	1.18103E-6	kg
<b>Usa treno diesel</b>		<b>1.00000</b>	<b>p*km</b>
Xylene	Emission to air/unspecified	5.65753E-7	kg
Zinc	Emission to air/unspecified	5.61340E-8	kg
Zinc	Emission to soil/unspecified	3.78005E-7	kg
Zinc, ion	Emission to water/unspecified	3.78005E-7	kg

Figura 29- OUTPUTS Uso del treno diesel modellato su Open LCA

Per il calcolo delle emissioni derivanti dalla combustione nel treno diesel si è fatto riferimento al processo “transport, regular bus | transport, regular bus | Cutoff, S”, essendo i valori già riferiti all’unità funzionale passeggero-km. I valori del database sono stati riproporzionati considerando la differenza di consumo del combustibile.

P Inputs/Outputs: Uso treno idrogeno		
<div style="background-color: #e6f2ff; padding: 2px;"> <b>Inputs</b> </div>		
Flow	Amount	Unit
F <sub>g</sub> hydrogen, gaseous	0.00273	kg
F <sub>g</sub> maintenance, train, passenger, regional	4.61000E-10	Item(s)
F <sub>g</sub> Treno idrogeno	1.70042E-9	Item(s)
<div style="background-color: #e6f2ff; padding: 2px;"> <b>Outputs</b> </div>		
Flow	Amount	Unit
F <sub>g</sub> <b>Uso treno idrogeno</b>	<b>1.00000</b>	<b>p*km</b>

Figura 30- Uso treno a idrogeno modellato su Open LCA

#### 4.3.3 Risultati delle analisi di inventario

Nella fase di compilazione dell'inventario vengono analizzati gli input e gli output riferiti all'unità funzionale scelta (p\*km), tenendo conto delle fasi di vita analizzate nel sistema. Sono presenti tutti i flussi elementari scambiati tra il sistema e l'ambiente esterno; in particolare si sono considerati gli input e gli output a meno di quelli <1% del totale.

Le emissioni analizzate, invece, sono quelle che risultano più rilevanti in termini di impatto ambientale: CO<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, fosfati e particolato.

Verranno riportati, di seguito, i risultati delle analisi di inventario sia per la fase di produzione del treno a idrogeno, sia per la fase di uso di tutte le tipologie di treno esaminate.

##### 4.3.3.1 Produzione del treno a idrogeno

Tabella 7- Primi venti flussi in input nel processo di produzione del treno a idrogeno, organizzati secondo la colonna "Result" in ordine decrescente

Flow	Category	Sub-category	Unit	Result
<b>Water, turbine use, unspecified natural origin</b>	Resource	in water	m <sup>3</sup> /pkm	0.011
<b>Gangue, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	0.002
<b>Coal, hard, unspecified, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	3.9E-04
<b>Iron, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	2.1E-4
<b>Gravel, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	1.8E-4

<b>Shale, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	1.7E-04
<b>Gas, natural, in ground</b>	Resource	in ground	m <sup>3</sup> /pkm	1.5E-04
<b>Calcite, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	9.41E-05
<b>Water, cooling, unspecified natural origin</b>	Resource	in water	m <sup>3</sup> /pkm	7.23E-05
<b>Coal, brown, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	7.19E-05
<b>Oil, crude, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	6.56E-05
<b>Gangue, bauxite, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	2.87E-05
<b>Sand, unspecified, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	2.56E-05
<b>Clay, unspecified, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	1.27E-05
<b>Sodium chloride, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	1.22E-05
<b>Sulfur, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	1.14E-05
<b>Copper, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	9.6E-06
<b>Nickel, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	7.51E-06
<b>Water, river</b>	Resource	in water	m <sup>3</sup> /pkm	6.27E-06
<b>Water, unspecified natural origin</b>	Resource	in water	m <sup>3</sup> /pkm	5.38E-06

Tra i materiali maggiormente impiegati risultano la ganga, la ghiaia, lo scisto, e la calcite riconducibili principalmente all'estrazione dei materiali.

*Tabella 8- Emissioni causate dal processo di produzione del treno a idrogeno, organizzati secondo la colonna "Result" in ordine decrescente*

<b>Flow</b>	<b>Category</b>	<b>Sub-category</b>	<b>Unit</b>	<b>Result</b>
<b>Carbon dioxide, fossil</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	6.8E-04
<b>Carbon dioxide, fossil</b>	Emission to air	high population density	kg/pkm	2.7E-04
<b>Carbon dioxide, fossil</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	2.6E-04
<b>Carbon dioxide, non-fossil</b>	Emission to air	high population density	kg/pkm	4.72E-05
<b>Carbon dioxide, non-fossil</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	1.24E-05
<b>Sulfur dioxide</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	8.27E-06
<b>Carbon dioxide, fossil</b>	Emission to air	low population density, long-term	kg/pkm	6.66E-06
<b>Carbon monoxide, fossil</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	3.9E-06
<b>Phosphate</b>	Emission to water	ground water, long-term	kg/pkm	3.01E-06
<b>Carbon dioxide, non-fossil</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	2.63E-06

<b>Particulates, &gt; 10 um</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	2.19E-06
<b>Carbon dioxide, from soil or biomass stock</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	1.74E-06
<b>Nitrogen oxides</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	1.73E-06
<b>Nitrogen oxides</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	1.51E-06
<b>Carbon monoxide, fossil</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	1.26E-06
<b>Particulates, &lt; 2.5 um</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	1.07E-06
<b>Sulfur dioxide</b>	Emission to air	high population density	kg/pkm	1.06E-06
<b>Particulates, &gt; 2.5 um, and &lt; 10um</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	1.02E-06
<b>Carbon monoxide, fossil</b>	Emission to air	low population density, long-term	kg/pkm	7.28E-07
<b>Nitrogen oxides</b>	Emission to air	high population density	kg/pkm	5.71E-07

Le emissioni principali sono quelle dovute alle emissioni di CO<sub>2</sub>, causate principalmente dalla produzione e lavorazione legate all'acciaio e alla produzione di componenti come la batteria.

#### 4.3.3.2 Fase di uso

Come nel caso della produzione del treno a idrogeno, in tutti i casi esaminati i materiali maggiormente impiegati risultano la ganga, la ghiaia, lo scisto, e la calcite riconducibili principalmente all'estrazione dei materiali.

Le emissioni, invece, risultano principalmente legati alla produzione e/o utilizzo dei vettori energetici necessari per la fase di uso.

Di seguito verranno riportati i risultati ottenuti per i vari oggetti di studio.

#### Treno elettrico

Tabella 9- Primi venti flussi in input nel processo di uso del treno elettrico, organizzati secondo la colonna "Result" in ordine decrescente

<b>Flow</b>	<b>Category</b>	<b>Sub-category</b>	<b>Unit</b>	<b>Result</b>
<b>Water, turbine use, unspecified natural origin</b>	Resource	in water	m <sup>3</sup> /pkm	0.433

Gas, natural, in ground	Resource	in ground	m <sup>3</sup> /pkm	0.008
Coal, hard, unspecified, in ground	Resource	in ground	kg/pkm	0.005
Water, cooling, unspecified natural origin	Resource	in water	m <sup>3</sup> /pkm	0.003
Shale, in ground	Resource	in ground	kg/pkm	0.002
Gangue, in ground	Resource	in ground	kg/pkm	0.002
Gravel, in ground	Resource	in ground	kg/pkm	0.002
Coal, brown, in ground	Resource	in ground	kg/pkm	0.001
Oil, crude, in ground	Resource	in ground	kg/pkm	9E-04
Calcite, in ground	Resource	in ground	kg/pkm	4E-04
Iron, in ground	Resource	in ground	kg/pkm	3E-04
Sand, unspecified, in ground	Resource	in ground	kg/pkm	2E-04
Water, river	Resource	in water	m <sup>3</sup> /pkm	9.19E-05
Clay, unspecified, in ground	Resource	in ground	kg/pkm	5.94E-05
Gangue, bauxite, in ground	Resource	in ground	kg/pkm	5.58E-05
Gas, mine, off-gas, process, coal mining	Resource	in ground	m <sup>3</sup> /pkm	4.92E-05
Granite, in ground	Resource	in ground	kg/pkm	3E-05
Water, well, in ground	Resource	in water	m <sup>3</sup> /pkm	1.47E-05
Barium, in ground	Resource	in ground	kg/pkm	9.48E-06
Water, unspecified natural origin	Resource	in water	m <sup>3</sup> /pkm	9.25E-06

Tabella 10- Emissioni causate dal processo di uso del treno elettrico organizzati secondo la colonna "Result" in ordine decrescente

Flow	Category	Sub-category	Unit	Result
Carbon dioxide, fossil	Emission to air	low population density	kg/pkm	0.024
Carbon dioxide, fossil	Emission to air	high population density	kg/pkm	0.004
Carbon dioxide, non-fossil	Emission to air	low population density	kg/pkm	2.4E-03
Carbon dioxide, non-fossil	Emission to air	high population density	kg/pkm	0.002
Carbon dioxide, fossil	Emission to air	unspecified	kg/pkm	0.001
Sulfur dioxide	Emission to air	low population density	kg/pkm	6.03E-05
Nitrogen oxides	Emission to air	low population density	kg/pkm	3.33E-05
Phosphate	Emission to water	ground water, long-term	kg/pkm	2.1E-05
Carbon monoxide, fossil	Emission to air	high population density	kg/pkm	2.06E-05
Sulfur dioxide	Emission to air	high population density	kg/pkm	1.99E-05

<b>Nitrogen oxides</b>	Emission to air	high population density	kg/pkm	1.44E-05
<b>Particulates, &gt; 10 um</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	1.37E-05
<b>Carbon dioxide, non-fossil</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	7.63E-06
<b>Carbon monoxide, fossil</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	7.27E-06
<b>Carbon monoxide, fossil</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	6.66E-06
<b>Nitrogen oxides</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	6.26E-06
<b>Particulates, &gt; 10 um</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	5.74E-06
<b>Carbon dioxide, from soil or biomass stock</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	4.8E-06
<b>Particulates, &lt; 2.5 um</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	4.49E-06
<b>Phosphate</b>	Emission to water	ground water	kg/pkm	2.66E-06

## Treno diesel

Tabella 11- Primi venti flussi in input nel processo di uso del treno diesel, organizzati secondo la colonna "Result" in ordine decrescente

<b>Flow</b>	<b>Category</b>	<b>Sub-category</b>	<b>Unit</b>	<b>Result</b>
<b>Oil, crude, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	0.029
<b>Water, turbine use, unspecified natural origin</b>	Resource	in water	m <sup>3</sup> /pkm	0.023
<b>Gangue, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	0.002
<b>Gas, natural, in ground</b>	Resource	in ground	m <sup>3</sup> /pkm	1.4E-03
<b>Gravel, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	1.03E-03
<b>Coal, hard, unspecified, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	8.7E-04
<b>Iron, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	4E-04
<b>Shale, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	3.9E-04
<b>Water, cooling, unspecified natural origin</b>	Resource	in water	m <sup>3</sup> /pkm	3.9E-04
<b>Calcite, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	3.2E-04
<b>Coal, brown, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	2.2E-04
<b>Sand, unspecified, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	1.3E-04
<b>Clay, unspecified, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	1.2E-04
<b>Barium, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	1.1E-04
<b>Water, unspecified natural origin</b>	Resource	in water	m <sup>3</sup> /pkm	7.96E-05
<b>Gangue, bauxite, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	5.03E-05
<b>Granite, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	2.63E-05
<b>Water, salt, sole</b>	Resource	in water	m <sup>3</sup> /pkm	1.79E-05
<b>Sodium chloride, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	1.75E-05

<b>Clay, bentonite, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	1.14E-05
-----------------------------------	----------	-----------	--------	----------

Tabella 12- Emissioni causate dal processo di uso del treno diesel organizzati secondo la colonna "Result" in ordine decrescente

Flow	Category	Sub-category	Unit	Result
<b>Carbon dioxide, fossil</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	0.089
<b>Carbon dioxide, fossil</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	0.005
<b>Nitrogen oxides</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	0.001
<b>Carbon dioxide, fossil</b>	Emission to air	high population density	kg/pkm	7E-04
<b>Carbon monoxide, fossil</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	3E-04
<b>Carbon dioxide, non-fossil</b>	Emission to air	high population density	kg/pkm	2E-04
<b>Sulfur dioxide</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	6.35E-05
<b>Nitrogen oxides</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	3.83E-05
<b>Particulates, &lt; 2.5 um</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	3.51E-05
<b>Sulfur dioxide</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	3.25E-05
<b>Carbon dioxide, non-fossil</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	2.52E-05
<b>Carbon dioxide, non-fossil</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	1.41E-05
<b>Carbon monoxide, fossil</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	1.21E-05
<b>Particulates, &gt; 10 um</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	1.06E-05
<b>Carbon dioxide, from soil or biomass stock</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	5.39E-06
<b>Particulates, &gt; 2.5 um, and &lt; 10um</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	5.32E-06
<b>Particulates, &gt; 10 um</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	4.78E-06
<b>Phosphate</b>	Emission to water	ground water, long-term	kg/pkm	4.63E-06
<b>Particulates, &lt; 2.5 um</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	3.96E-06
<b>Sulfur dioxide</b>	Emission to air	high population density	kg/pkm	2.91E-06

#### Treno a idrogeno – Scenario SMR

Tabella 13- Primi venti flussi in input nel processo di uso del treno a idrogeno, scenario SMR, organizzati secondo la colonna "Result" in ordine decrescente

Flow	Category	Sub-category	Unit	Result
<b>Water, turbine use, unspecified natural origin</b>	Resource	in water	m <sup>3</sup> /pkm	0.03039
<b>Gas, natural, in ground</b>	Resource	in ground	m <sup>3</sup> /pkm	0.01538
<b>Gangue, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	0.00213

<b>Coal, hard, unspecified, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	0.00076
<b>Gravel, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	0.00069
<b>Iron, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	0.00033
<b>Shale, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	0.00029
<b>Water, cooling, unspecified natural origin</b>	Resource	in water	m <sup>3</sup> /pkm	0.00022
<b>Sand, unspecified, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	0.00022
<b>Oil, crude, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	0.00016
<b>Calcite, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	0.00016
<b>Coal, brown, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	0.00015
<b>Water, river</b>	Resource	in water	m <sup>3</sup> /pkm	4.31E-05
<b>Water, well, in ground</b>	Resource	in water	m <sup>3</sup> /pkm	3.94E-05
<b>Gangue, bauxite, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	3.62E-05
<b>Sodium chloride, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	2.66E-05
<b>Clay, unspecified, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	2.32E-05
<b>Sulfur, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	1.15E-05
<b>Barium, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	1.08E-05
<b>Copper, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	9.97E-06

Tabella 14- Emissioni causate dal processo di uso del treno a idrogeno, scenario SMR, organizzati secondo la colonna "Result" in ordine decrescente

<b>Flow</b>	<b>Category</b>	<b>Sub-category</b>	<b>Unit</b>	<b>Result</b>
<b>Carbon dioxide, fossil</b>	Emission to air	high population density	kg/pkm	0.026095
<b>Carbon dioxide, fossil</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	0.002914
<b>Carbon dioxide, fossil</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	0.00048
<b>Carbon dioxide, non-fossil</b>	Emission to air	high population density	kg/pkm	0.00015
<b>Carbon dioxide, non-fossil</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	0.000109
<b>Sulfur dioxide</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	2.44E-05
<b>Nitrogen oxides</b>	Emission to air	high population density	kg/pkm	1.03E-05
<b>Nitrogen oxides</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	6.88E-06
<b>Carbon dioxide, non-fossil</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	6.82E-06
<b>Carbon dioxide, fossil</b>	Emission to air	low population density, long-term	kg/pkm	6.7E-06
<b>Carbon monoxide, fossil</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	6.4E-06

<b>Phosphate</b>	Emission to water	ground water, long-term	kg/pkm	4.46E-06
<b>Carbon monoxide, fossil</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	4.1E-06
<b>Particulates, &gt; 10 um</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	3.65E-06
<b>Carbon monoxide, fossil</b>	Emission to air	high population density	kg/pkm	3.4E-06
<b>Carbon dioxide, from soil or biomass stock</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	3.2E-06
<b>Nitrogen oxides</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	2.71E-06
<b>Sulfur dioxide</b>	Emission to air	high population density	kg/pkm	2.12E-06
<b>Particulates, &lt; 2.5 um</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	1.78E-06
<b>Particulates, &gt; 2.5 um, and &lt; 10um</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	1.47E-06

#### Treno a idrogeno – Scenario SMR green mix

Tabella 15- Primi venti flussi in input nel processo di uso del treno a idrogeno, scenario SMR green mix, organizzati secondo la colonna "Result" in ordine decrescente

<b>Flow</b>	<b>Category</b>	<b>Sub-category</b>	<b>Unit</b>	<b>Result</b>
<b>Water, turbine use, unspecified natural origin</b>	Resource	in water	m <sup>3</sup> /pkm	0.016
<b>Gas, natural, in ground</b>	Resource	in ground	m <sup>3</sup> /pkm	0.015
<b>Gangue, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	0.002
<b>Gravel, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	6.73E-04
<b>Coal, hard, unspecified, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	6.04E-04
<b>Iron, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	3.3E-04
<b>Shale, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	2.30E-04
<b>Sand, unspecified, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	2.26E-04
<b>Calcite, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	1.58E-04
<b>Oil, crude, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	1.39E-04
<b>Water, cooling, unspecified natural origin</b>	Resource	in water	m <sup>3</sup> /pkm	1.25E-04
<b>Coal, brown, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	1.23E-04
<b>Gangue, bauxite, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	5.46E-05
<b>Water, river</b>	Resource	in water	m <sup>3</sup> /pkm	4.01E-05
<b>Water, well, in ground</b>	Resource	in water	m <sup>3</sup> /pkm	3.92E-05
<b>Sodium chloride, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	2.85E-05
<b>Clay, unspecified, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	2.28E-05
<b>Sulfur, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	1.16E-05
<b>Barium, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	1.04E-05

<b>Copper, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	1.01E-05
--------------------------	----------	-----------	--------	----------

Tabella 16- Emissioni causate dal processo di uso del treno a idrogeno, scenario SMR green mix, organizzati secondo la colonna "Result" in ordine decrescente

<b>Flow</b>	<b>Category</b>	<b>Sub-category</b>	<b>Unit</b>	<b>Result</b>
<b>Carbon dioxide, fossil</b>	Emission to air	high population density	kg/pkm	0.026
<b>Carbon dioxide, fossil</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	0.002
<b>Carbon dioxide, fossil</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	4.8E-04
<b>Carbon dioxide, non-fossil</b>	Emission to air	high population density	kg/pkm	7.83E-05
<b>Sulfur dioxide</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	2.26E-05
<b>Carbon dioxide, non-fossil</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	1.87E-05
<b>Nitrogen oxides</b>	Emission to air	high population density	kg/pkm	9.8E-06
<b>Carbon dioxide, non-fossil</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	6.95E-06
<b>Carbon dioxide, fossil</b>	Emission to air	low population density, long-term	kg/pkm	6.7E-06
<b>Carbon monoxide, fossil</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	6.57E-06
<b>Nitrogen oxides</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	5.86E-06
<b>Carbon monoxide, fossil</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	3.97E-06
<b>Phosphate</b>	Emission to water	ground water, long-term	kg/pkm	3.92E-06
<b>Particulates, &gt; 10 um</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	3.38E-06
<b>Carbon dioxide, from soil or biomass stock</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	3.34E-06
<b>Carbon monoxide, fossil</b>	Emission to air	high population density	kg/pkm	2.66E-06
<b>Nitrogen oxides</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	2.61E-06
<b>Particulates, &lt; 2.5 um</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	1.74E-06
<b>Particulates, &gt; 2.5 um, and &lt; 10um</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	1.49E-06
<b>Sulfur dioxide</b>	Emission to air	high population density	kg/pkm	1.47E-06
<b>Carbon dioxide, fossil</b>	Emission to air	high population density	kg/pkm	0.02596

<b>Carbon dioxide, fossil</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	0.002111
-------------------------------	-----------------	------------------------	--------	----------

## Treno a idrogeno – Scenario Elettrolisi

Tabella 17- Primi venti flussi in input nel processo di uso del treno a idrogeno, scenario elettrolisi, organizzati secondo la colonna "Result" in ordine decrescente

Flow	Category	Sub-category	Unit	Result
<b>Water, turbine use, unspecified natural origin</b>	Resource	in water	m <sup>3</sup> /pkm	0.292
<b>Gangue, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	0.005
<b>Coal, hard, unspecified, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	0.004
<b>Gas, natural, in ground</b>	Resource	in ground	m <sup>3</sup> /pkm	0.004
<b>Gravel, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	0.003
<b>Water, cooling, unspecified natural origin</b>	Resource	in water	m <sup>3</sup> /pkm	0.002
<b>Shale, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	0.002
<b>Coal, brown, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	9.5E-04
<b>Oil, crude, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	8.3E-04
<b>Gangue, bauxite, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	8E-04
<b>Iron, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	6.6E-04
<b>Calcite, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	6.2E-04
<b>Sand, unspecified, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	5.7E-04
<b>Sodium chloride, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	1.1E-04
<b>Clay, unspecified, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	1E-04
<b>Water, river</b>	Resource	in water	m <sup>3</sup> /pkm	8.87E-05
<b>Aluminium, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	7.57E-05
<b>Granite, in ground</b>	Resource	in ground	kg/pkm	6.7E-05
<b>Water, well, in ground</b>	Resource	in water	m <sup>3</sup> /pkm	4.96E-05
<b>Gas, mine, off-gas, process, coal mining</b>	Resource	in ground	m <sup>3</sup> /pkm	3.89E-05

Tabella 18- Emissioni causate dal processo di uso del treno a idrogeno, scenario elettrolisi, organizzati secondo la colonna "Result" in ordine decrescente

Flow	Category	Sub-category	Unit	Result
<b>Carbon dioxide, fossil</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	0.015
<b>Carbon dioxide, fossil</b>	Emission to air	high population density	kg/pkm	0.003
<b>Carbon dioxide, fossil</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	1.5E-03
<b>Carbon dioxide, non-fossil</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	1.2E-03
<b>Carbon dioxide, non-fossil</b>	Emission to air	high population density	kg/pkm	1.1E-03

<b>Sulfur dioxide</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	4.88E-05
<b>Nitrogen oxides</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	2.52E-05
<b>Carbon dioxide, non-fossil</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	2.12E-05
<b>Phosphate</b>	Emission to water	ground water, long-term	kg/pkm	1.99E-05
<b>Carbon monoxide, fossil</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	1.94E-05
<b>Particulates, &gt; 10 um</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	1.61E-05
<b>Carbon dioxide, from soil or biomass stock</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	1.47E-05
<b>Sulfur dioxide</b>	Emission to air	high population density	kg/pkm	1.35E-05
<b>Carbon monoxide, fossil</b>	Emission to air	high population density	kg/pkm	1.13E-05
<b>Nitrogen oxides</b>	Emission to air	high population density	kg/pkm	8.99E-06
<b>Nitrogen oxides</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	8.53E-06
<b>Carbon monoxide, fossil</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	7.49E-06
<b>Particulates, &lt; 2.5 um</b>	Emission to air	low population density	kg/pkm	6.95E-06
<b>Carbon dioxide, fossil</b>	Emission to air	low population density, long-term	kg/pkm	6.89E-06
<b>Particulates, &gt; 10 um</b>	Emission to air	unspecified	kg/pkm	4.17E-06

#### 4.4 Valutazione degli impatti

Nella terza fase vengono esaminati gli impatti dei flussi materiali ed energetici dell'inventario per mezzo di determinati parametri ambientali. In particolare, si procede con:

- Selezione delle categorie di impatto, degli indicatori di categoria e dei modelli di caratterizzazione
- Classificazione: assegnazione dei risultati di inventario alle categorie di impatto
- Caratterizzazione: calcolo dei risultati in termini di indicatori di categoria, dove per ogni sostanza viene calcolato il valore impattante equivalente, espresso nell'unità di misura della categoria

Tale fase è, in breve, riassunta nell'immagine riportata di seguito.

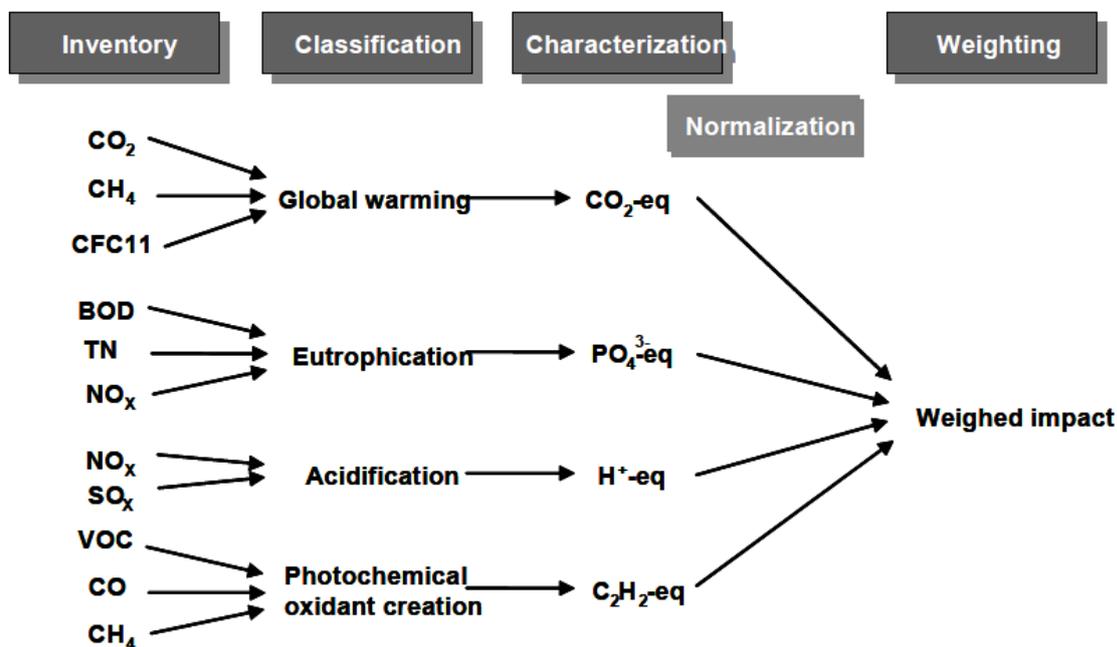


Figura 31- Rappresentazione delle fasi di valutazione degli impatti del ciclo di vita [9]

In particolare, per la fase di caratterizzazione, vengono definite alcune unità di misura; esse determinano come verranno calcolati i *valori impattanti equivalenti* per ogni sostanza.

Esistono diversi metodi per effettuare una LCIA; in questo caso è stato scelto il metodo denominato "ei-EF v3.0". Quest'ultimo include diverse categorie di impatto, che sono:

- Acidificazione: causata principalmente dalle anidridi di zolfo (SO<sub>x</sub>), comporta la combinazione di queste con molecole di acqua presenti nell'atmosfera andando a formare, ad esempio, acido solforico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) che, depositandosi sulle superfici, può modificare la composizione di acque superficiali e suolo. Sostanzialmente, l'emissione di particolari sostanze nell'ambiente può provocare il rilascio di ioni H<sup>+</sup>, abbassando il pH di acque dolci e suolo e provocando conseguenze negative per gli organismi viventi. Tale impatto è misurato in mol H<sup>+</sup><sub>eq</sub>;
- Cambiamento climatico: espresso come GWP100, ovvero *Global Warming Potential* su un periodo temporale di 100 anni, rappresenta i kg di CO<sub>2-eq</sub> dei gas climalteranti, ovvero che provocano un innalzamento innaturale della temperatura. Questi ultimi non permettono alla componente della radiazione solare che viene riflessa di superare gli strati atmosferici, intrappolando e riflettendo la radiazione infrarossa nuovamente verso la superficie. Sono presenti due categorie oltre quella globale, cioè quella riferita all'utilizzo di fonti fossili e quella riferita a "land use and land use change", cioè all'utilizzo di un suolo o alla variazione dell'utilizzo dello stesso;
- Ecotossicità: misura la tossicità di ecosistemi marini, di acqua dolce e terrestri. Sono riportate tre categorie (inorganics, metal e organics) che sommate forniscono il valore generale. L'unità tossica comparativa per gli impatti di ecotossicità acquatica (CTU<sub>e</sub>, dove CTU sta per *Comparative Toxic units*) esprime la stima della frazione di specie potenzialmente interessate (PAF) integrata nel tempo e nel volume del compartimento di acqua dolce, per unità di massa della sostanza chimica emessa.
- Risorse energetiche: non rinnovabili (combustibili fossili), potenziale di esaurimento abiotico, misurate in MJ, potere calorifico netto
- Eutrofizzazione: il rilascio di sostanze nell'acqua come fosforo e azoto incrementa la crescita di organismi viventi, principalmente alghe. Se tali elementi vengono rilasciati nell'ambiente in maniera cospicua vengono ridotti i fattori limitanti alla proliferazione delle alghe le quali, assorbendo ossigeno, portano ad uno

sbilanciamento dell'ecosistema. Sono presenti tre categorie (freshwater, marine e terrestrial), ognuna con una specifica unità di misura (rispettivamente kg PO<sub>4</sub>-eq, kg N<sub>eq</sub>, mol N<sub>eq</sub>)

- Tossicità: riferita all'uomo, può essere di tipo cancerogeno e non, con ulteriore specifica se legata a sostanze organiche, inorganiche o metalli. Il fattore di caratterizzazione degli impatti sulla tossicità per l'uomo è espresso in unità tossiche comparative (CTU h), ovvero la stima dell'aumento della morbilità (numero di casi di malattia registrati durante un determinato periodo) nella popolazione umana totale, per unità di massa di una sostanza chimica emessa;
- Radiazioni ionizzanti: indica il danno potenziale all'uomo e alla natura generato dall'emissione di radionuclidi. Si misura in "kg U<sub>eq235</sub>", uranio-235 equivalente.
- Uso del suolo: fa riferimento all'indice di qualità del suolo, valore adimensionale che si riferisce alla condizione del suolo in base alla sua capacità di svolgere servizi ecosistemici che soddisfano le esigenze della vita umana e non umana;
- Risorse materiali: metalli/minerali, potenziale di esaurimento abiotico, misurato in kg Sb eq. Questa categoria fa riferimento alla salute umana e dell'ecosistema che viene influenzata dall'estrazione di minerali e combustibili fossili come input del sistema;
- Formazione di particolato: valuta l'impatto sulla salute umana misurando l'incidenza delle malattie (disease incidence);
- Formazione fotochimica dell'ozono: si riferisce all'aumento della concentrazione di ozono troposferico, zona in cui risulta tossico per l'uomo. Esso 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 (SO<sub>2</sub>), ossido di azoto (NO), ammonio e NMVOC (Composti Organici Volatili Non Metanici). Si misura in "kg NMVOC<sub>eq</sub>".
- Consumo di acqua: potenziale di deprivazione degli utenti (consumo di acqua ponderato per la deprivazione) per area in un bacino idrografico, dopo che la domanda degli esseri umani e degli ecosistemi acquatici è stata soddisfatta. Contribuiscono solo i fattori del consumo di acqua blu, dove il consumo è definito come la differenza tra il prelievo e il rilascio di acqua blu. Pertanto, l'acqua verde,

l'acqua fossile, l'acqua di mare e l'acqua piovana non devono essere caratterizzate con questo set. È misurato in  $m^3_{\text{world eq. deprived}}$ .

Si è utilizzato anche un altro metodo per l'LCIA, denominato Cumulative Energy Demand, che permette di avere una panoramica chiara dei consumi energetici dei vari product system e dei processi che li generano. In particolare, gli impatti valutati sono distinti in funzione del tipo di fonte:

- Non rinnovabile, fossili
- Non rinnovabile, biomassa
- Non rinnovabile, nucleare
- Rinnovabile, biomassa
- Rinnovabile, eolico, solare, geotermico

Essi sono tutti espressi in MJ.

Nel paragrafo 4.4.1 verranno riportati i risultati riferiti all'unità funzionale ( $p \cdot km$ ) per i tre tipi di treno, con annessi i diversi scenari quando presenti, seguendo la procedura di analisi precedentemente indicata.

#### 4.4.1 Risultati impatti ambientali

Come indicato nel paragrafo 4.4, in tale sezione verranno riportate le tabelle riferite ai risultati per le varie categorie di impatto, con focus sulle categorie indicate nel paragrafo 4.2.5 calcolate mediante il metodo ei-EF v3.0; verranno anche riportati i consumi energetici calcolati mediante il metodo Cumulative Energy Demand.

#### 4.4.2 Valutazione degli impatti ambientali Produzione treno idrogeno

Tabella 19- Risultati per le diverse categorie di impatto, produzione treno a idrogeno

<b>Impact category</b>	<b>Reference unit</b>	<b>Result</b>
<b>acidification - accumulated exceedance (ae)</b>	mol H <sup>+</sup> -Eq/pkm	1.62E-05
<b>climate change - global warming potential (GWP100)</b>	kg CO <sub>2</sub> -Eq/pkm	1.41E-03
<b>climate change: biogenic - global warming potential (GWP100)</b>	kg CO <sub>2</sub> -Eq/pkm	4.75E-06
<b>climate change: fossil - global warming potential (GWP100)</b>	kg CO <sub>2</sub> -Eq/pkm	1.40E-03
<b>climate change: land use and land use change - global warming potential (GWP100)</b>	kg CO <sub>2</sub> -Eq/pkm	1.77E-06
<b>ecotoxicity: freshwater - comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)</b>	CTUe/pkm	1.15E-01
<b>ecotoxicity: freshwater, inorganics - comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)</b>	CTUe/pkm	1.29E-02
<b>ecotoxicity: freshwater, metals - comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)</b>	CTUe/pkm	1.02E-01
<b>ecotoxicity: freshwater, organics - comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)</b>	CTUe/pkm	5.90E-04
<b>energy resources: non-renewable - abiotic depletion potential (ADP): fossil fuels</b>	MJ, net calorific value/pkm	1.80E-02
<b>eutrophication: freshwater - fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P)</b>	kg PO <sub>4</sub> -Eq/pkm	1.11E-06
<b>eutrophication: marine - fraction of nutrients reaching marine end compartment (N)</b>	kg N-Eq/pkm	1.71E-06
<b>eutrophication: terrestrial - accumulated exceedance (AE)</b>	mol N-Eq/pkm	1.89E-05
<b>human toxicity: carcinogenic - comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	6.69E-12
<b>human toxicity: carcinogenic, metals - comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	5.04E-12
<b>human toxicity: carcinogenic, organics - comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	1.66E-12

human toxicity: non-carcinogenic - comparative toxic unit for human (CTUh)	CTU/pkmh	1.01E-10
human toxicity: non-carcinogenic, inorganics - comparative toxic unit for human (CTUh)	CTUh/pkm	8.66E-12
human toxicity: non-carcinogenic, metals - comparative toxic unit for human (CTUh)	CTUh/pkm	8.90E-11
human toxicity: non-carcinogenic, organics - comparative toxic unit for human (CTUh)	CTUh/pkm	3.99E-12
ionising radiation: human health - human exposure efficiency relative to u235	kBq U235-Eq/pkm	1.30E-04
land use - soil quality index	dimensionless/pkm	6.65E-03
material resources: metals/minerals - abiotic depletion potential (ADP): elements (ultimate reserves)	kg Sb-Eq/pkm	2.25E-07
ozone depletion - ozone depletion potential (ODP)	kg CFC-11-Eq/pkm	3.03E-10
particulate matter formation - impact on human health	disease incidence/pkm	9.82E-11
photochemical ozone formation: human health - tropospheric ozone concentration increase	kg NMVOC-Eq/pkm	6.24E-06
water use - user deprivation potential (deprivation-weighted water consumption)	m3 world eq. deprived/pkm	6.96E-04

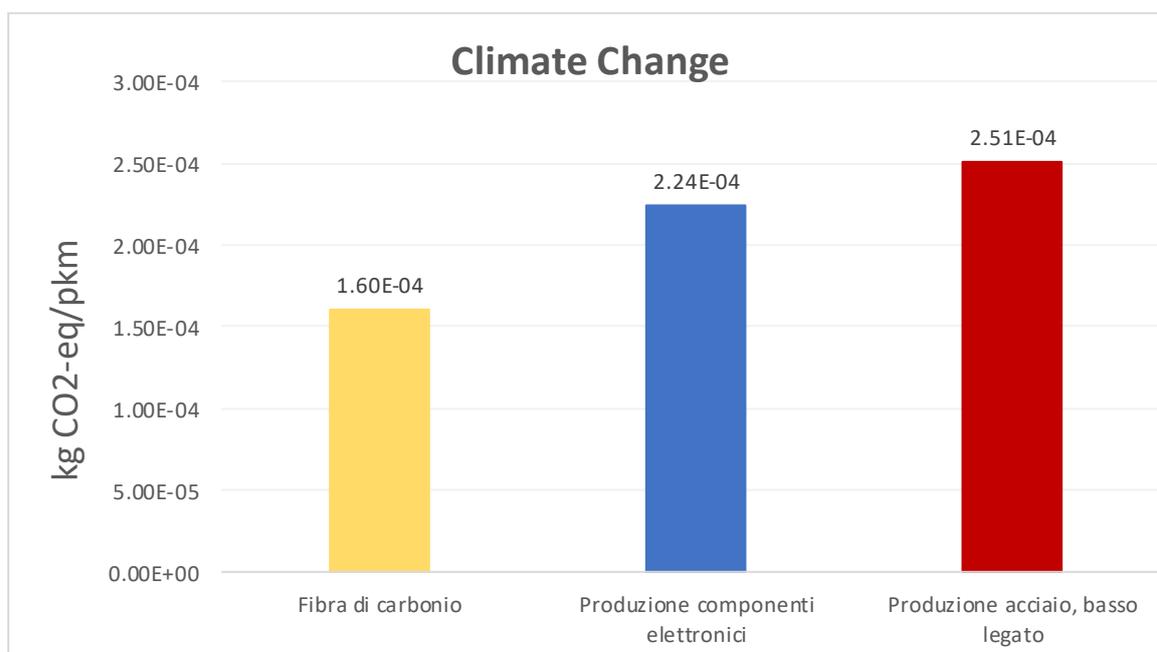


Figura 32- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita al Climate Change secondo i tre principali processi che la generano, produzione treno a idrogeno

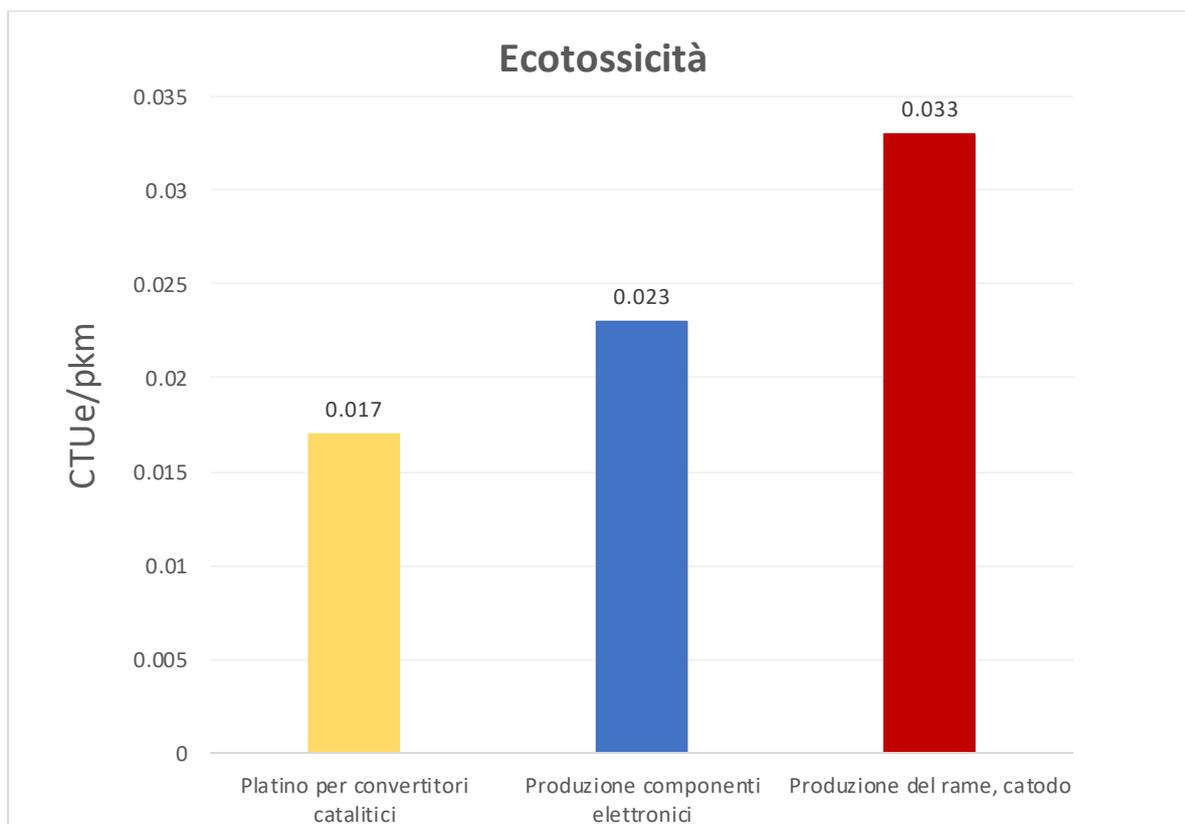


Figura 33- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita all'**Ecotossicità** secondo i tre principali processi che la generano, produzione treno a idrogeno

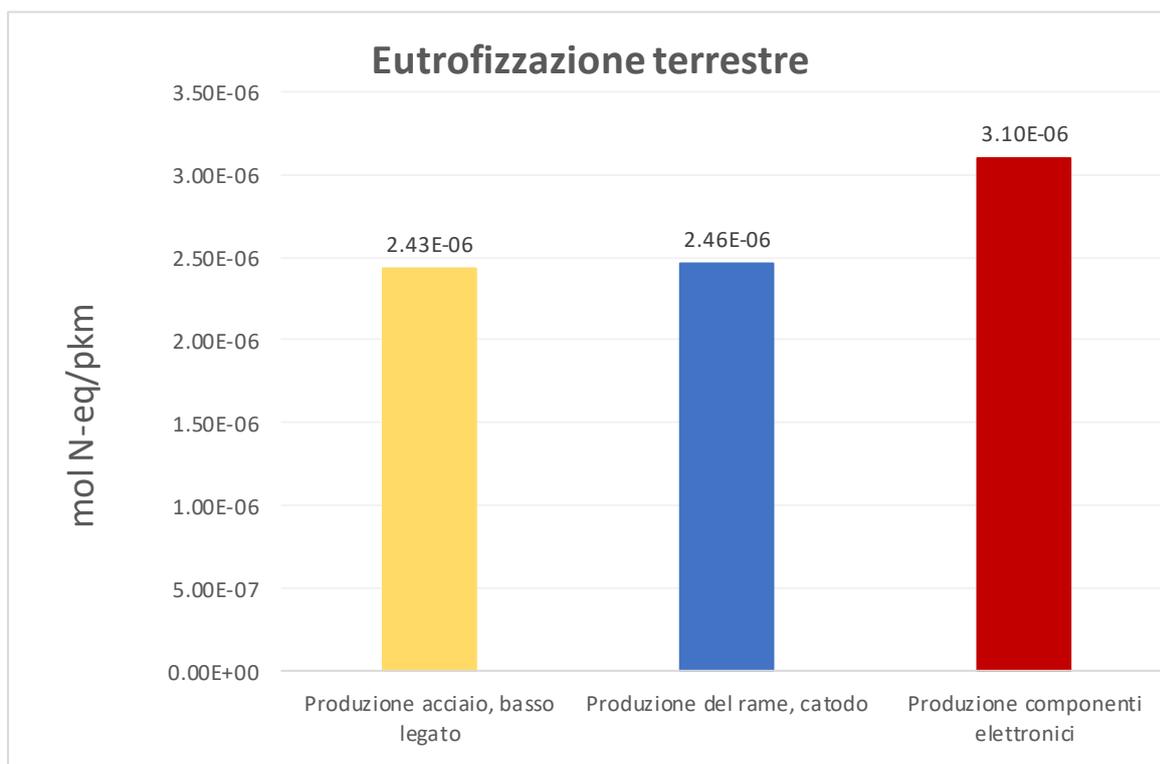


Figura 34- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita all'**Eutrofizzazione terrestre** secondo i tre principali processi che la generano, produzione treno a idrogeno

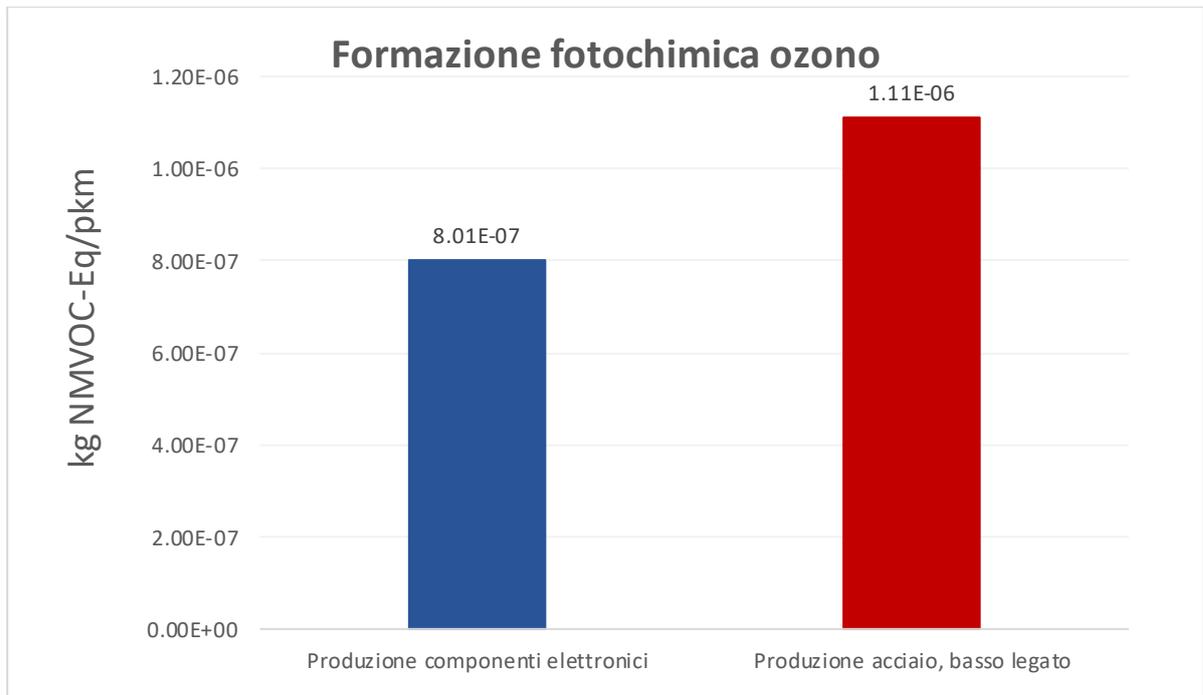


Figura 35- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita alla **Formazione fotochimica dell'ozono** secondo i due principali processi che la generano, produzione treno a idrogeno

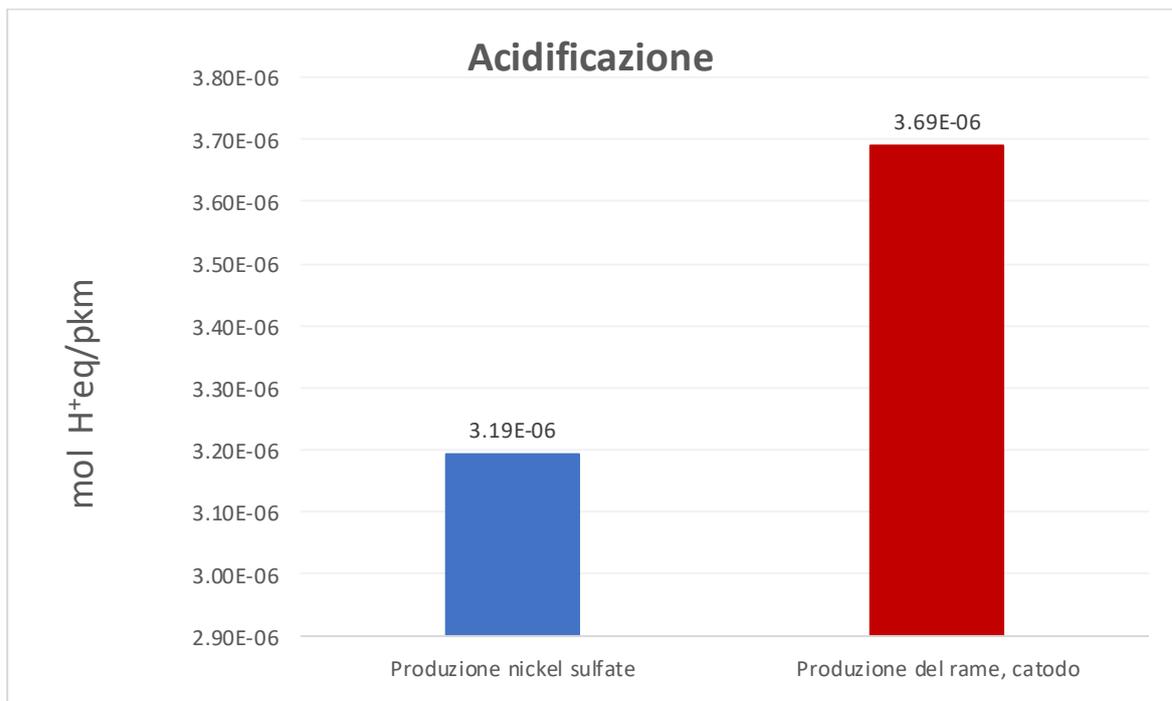


Figura 36- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita all'**Acidificazione** secondo i due principali processi che la generano, produzione treno a idrogeno

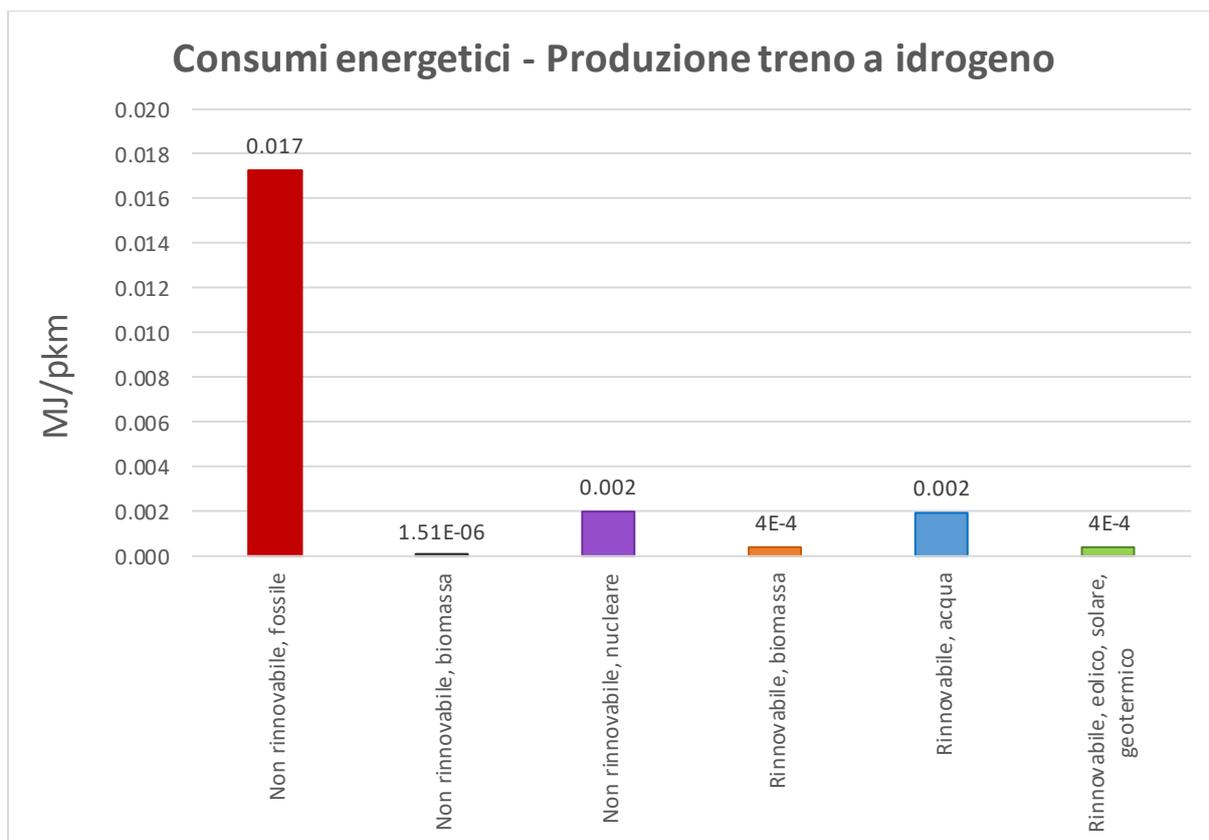


Figura 37- Consumi energetici, produzione treno a idrogeno

La quota preponderante di consumo energetico proviene da fonti fossili. I processi che maggiormente sono responsabili di tali impatti sono quelli legati alla produzione e alla lavorazione dell'acciaio, alla produzione delle batterie e dei serbatoi (circa il 40%), e al consumo di energia elettrica prelevata da rete italiana utilizzata per l'assemblaggio del treno.

#### 4.4.3 Valutazione degli impatti ambientali fase di uso dei treni

##### 4.4.3.1 Treno elettrico

Tabella 20- Risultati per le diverse categorie di impatto, uso treno elettrico

<b>Impact category</b>	<b>Reference unit</b>	<b>Result</b>
<b>acidification - accumulated exceedance (ae)</b>	mol H <sup>+</sup> -Eq/pkm	1.53E-04
<b>climate change - global warming potential (GWP100)</b>	kg CO <sub>2</sub> -Eq/pkm	0.033
<b>climate change: biogenic - global warming potential (GWP100)</b>	kg CO <sub>2</sub> -Eq/pkm	4.66E-04
<b>climate change: fossil - global warming potential (GWP100)</b>	kg CO <sub>2</sub> -Eq/pkm	0.032
<b>climate change: land use and land use change - global warming potential (GWP100)</b>	kg CO <sub>2</sub> -Eq/pkm	4.96E-06
<b>ecotoxicity: freshwater - comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)</b>	CTUe/pkm	0.361
<b>ecotoxicity: freshwater, inorganics - comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)</b>	CTUe/pkm	0.036
<b>ecotoxicity: freshwater, metals - comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)</b>	CTUe/pkm	0.322
<b>ecotoxicity: freshwater, organics - comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)</b>	CTUe/pkm	0.003
<b>energy resources: non-renewable - abiotic depletion potential (ADP): fossil fuels</b>	MJ, net calorific value/pkm	0.496
<b>eutrophication: freshwater - fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P)</b>	kg PO <sub>4</sub> -Eq/pkm	7.81E-06
<b>eutrophication: marine - fraction of nutrients reaching marine end compartment (N)</b>	kg N-Eq/pkm	2.33E-05
<b>eutrophication: terrestrial - accumulated exceedance (AE)</b>	mol N-Eq/pkm	2.57E-04
<b>human toxicity: carcinogenic - comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	1.13E-11
<b>human toxicity: carcinogenic, metals - comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	7.28E-12
<b>human toxicity: carcinogenic, organics - comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	4.06E-12
<b>human toxicity: non-carcinogenic - comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTU/pkmh	2.62E-10
<b>human toxicity: non-carcinogenic, inorganics - comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	4.64E-11
<b>human toxicity: non-carcinogenic, metals - comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	2.11E-10
<b>human toxicity: non-carcinogenic, organics - comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	8.77E-12
<b>ionising radiation: human health - human exposure efficiency relative to u235</b>	kBq U235-Eq/pkm	4.5E-03
<b>land use - soil quality index</b>	dimensionless/pkm	0.089

<b>material resources: metals/minerals - abiotic depletion potential (ADP): elements (ultimate reserves)</b>	kg Sb-Eq/pkm	1.48E-07
<b>ozone depletion - ozone depletion potential (ODP)</b>	kg CFC-11-Eq/pkm	4.44E-09
<b>particulate matter formation - impact on human health</b>	disease incidence/pkm	6.02-10
<b>photochemical ozone formation: human health - tropospheric ozone concentration increase</b>	kg NMVOC-Eq/pkm	7.25E-05
<b>water use - user deprivation potential (deprivation-weighted water consumption)</b>	m3 world eq. deprived/pkm	0.018

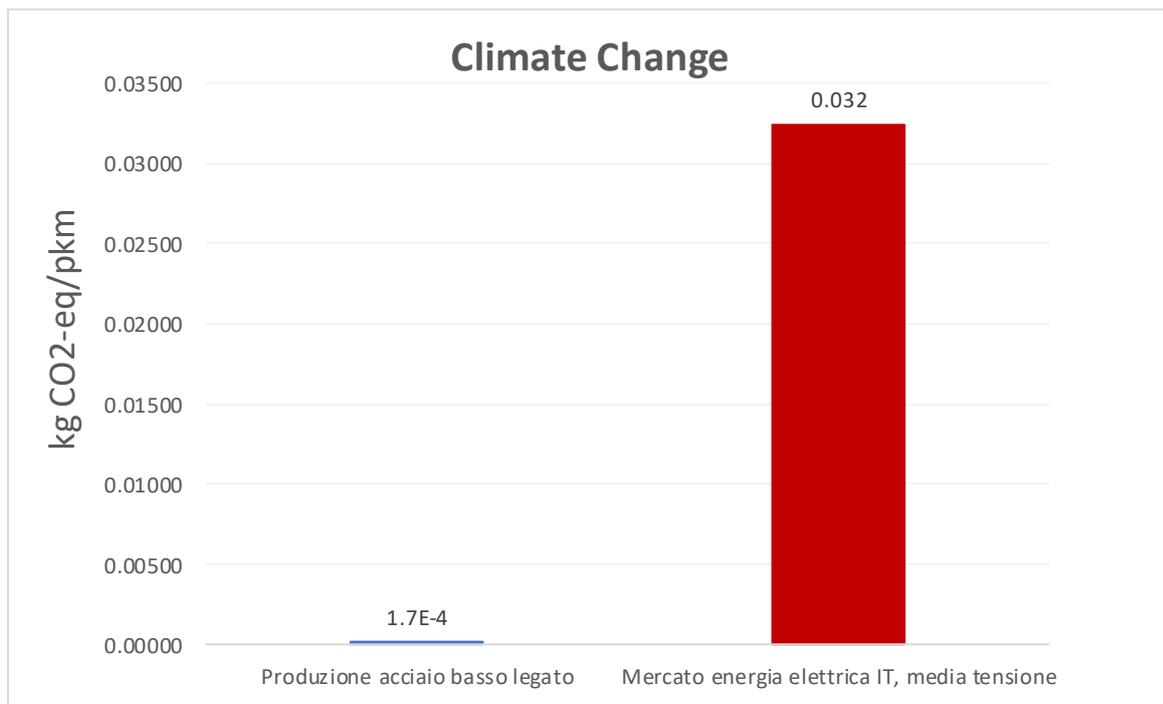


Figura 38- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita al Climate Change secondo i due principali processi che la generano, treno elettrico

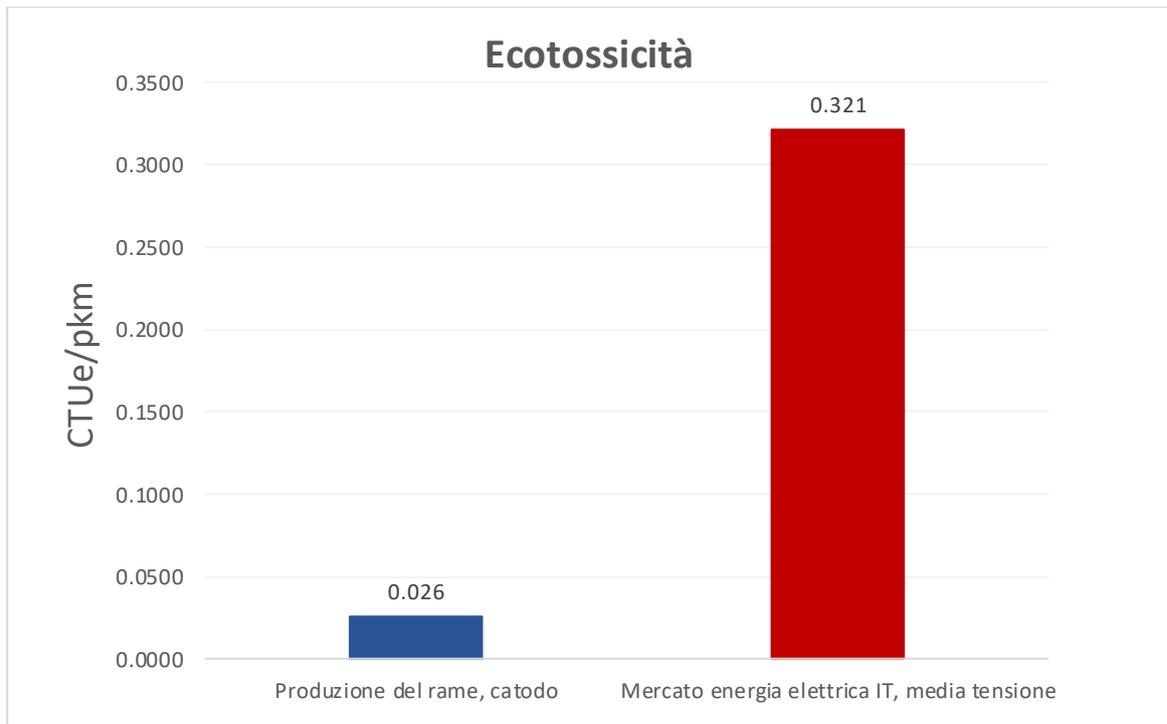


Figura 39- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita all'**Ecotossicità** secondo i due principali processi che la generano, treno elettrico

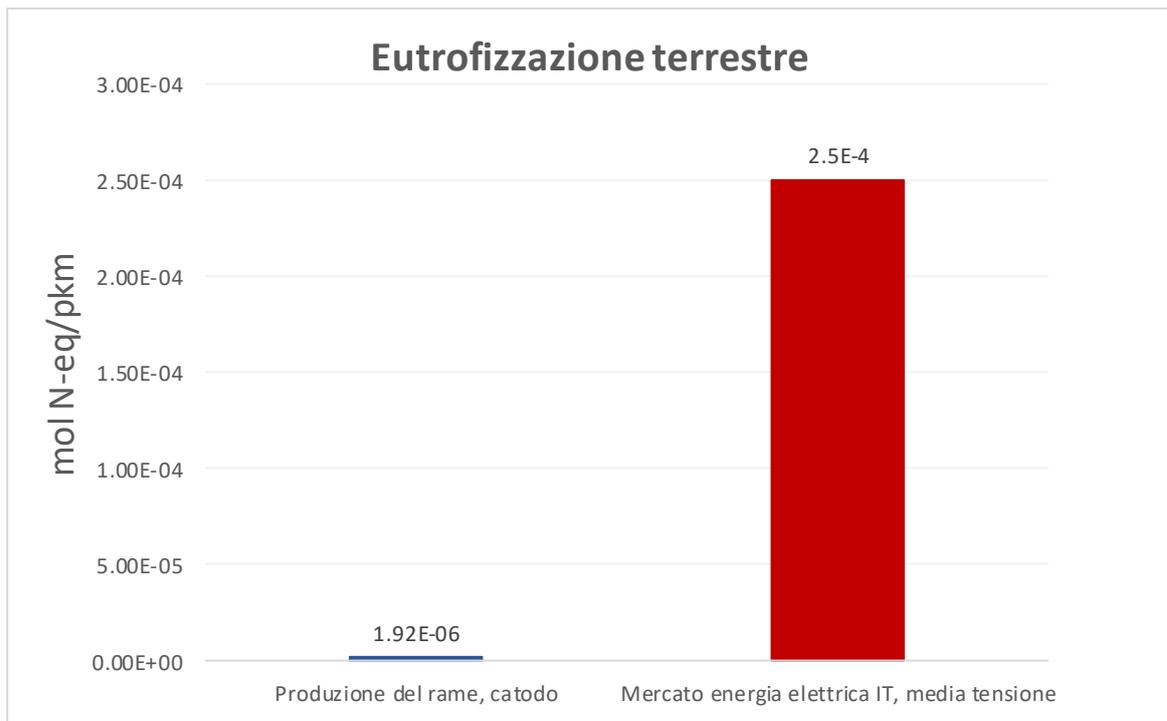


Figura 40- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita all'**Eutrofizzazione terrestre** secondo i due principali processi che la generano, treno elettrico

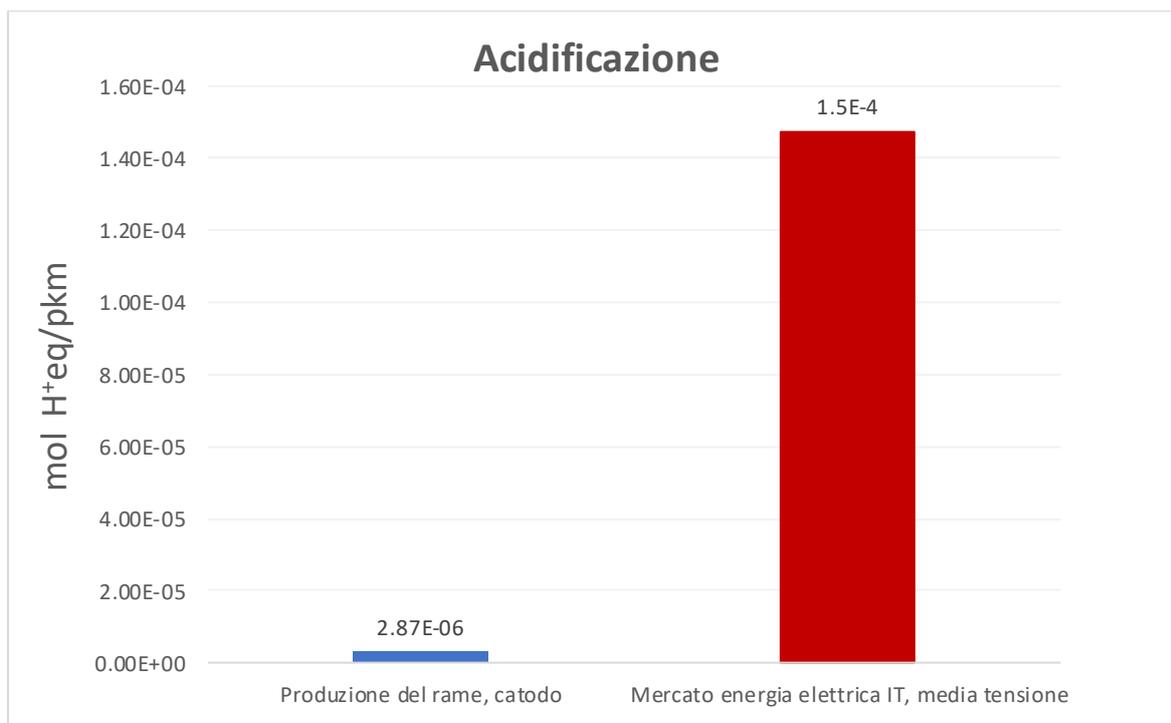


Figura 41- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita all'Acidificazione secondo i due principali processi che la generano, treno elettrico

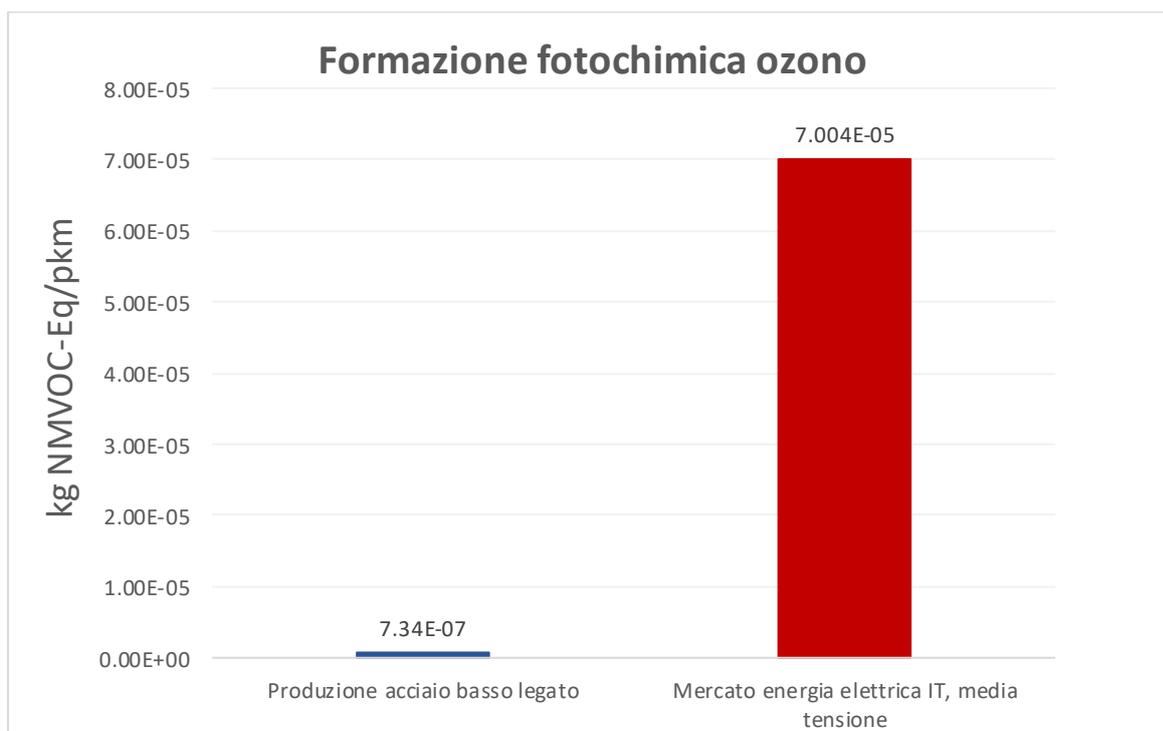


Figura 42- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita alla **Formazione fotochimica dell'ozono** secondo i due principali processi che la generano, treno elettrico

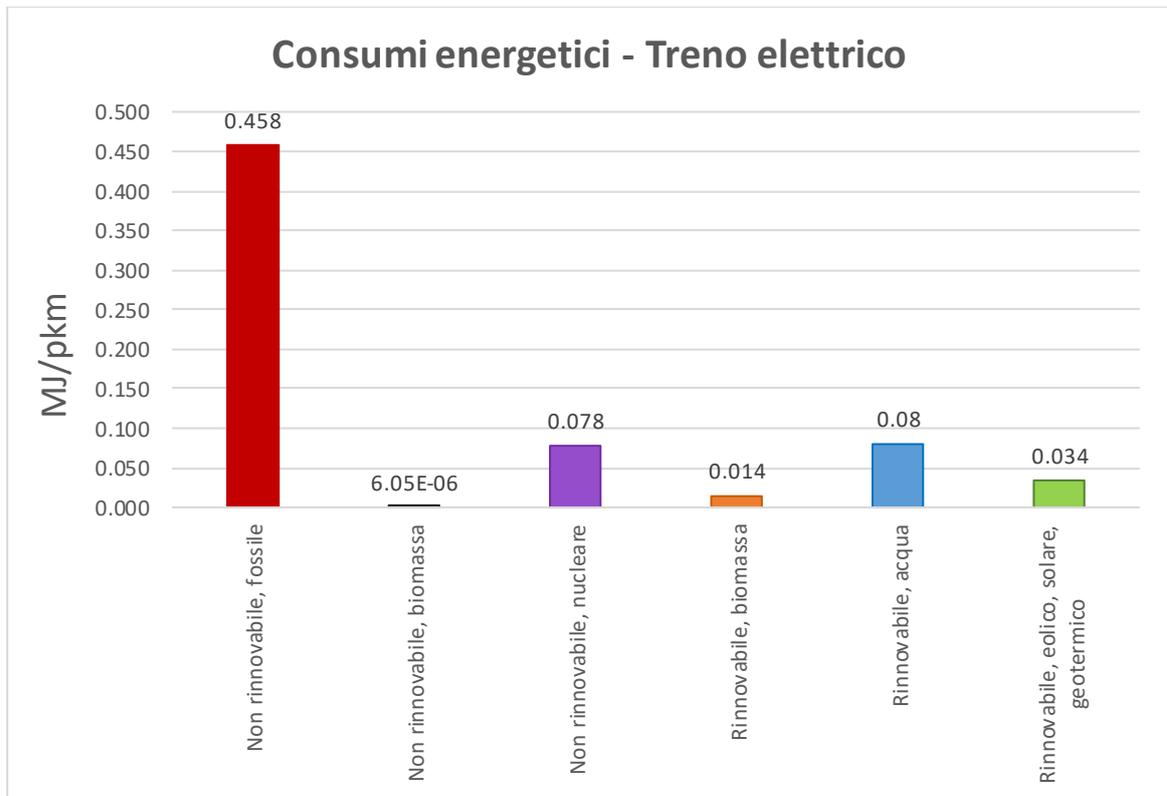


Figura 43- Consumi energetici, treno elettrico

La quasi totalità dei consumi energetici riportati in Figura 43, pari a 0.664 MJ/pkm, è causata dalla produzione di energia elettrica utilizzata nella fase operativa del treno.

#### 4.4.3.2 Treno diesel

Tabella 21- Risultati per le diverse categorie di impatto, uso treno diesel

Impact category	Reference unit	Result
acidification – accumulated exceedance (ae)	mol H <sup>+</sup> -Eq/pkm	9E-04
climate change – global warming potential (GWP100)	kg CO <sub>2</sub> -Eq/pkm	0.098
climate change: biogenic – global warming potential (GWP100)	kg CO <sub>2</sub> -Eq/pkm	1.28E-05
climate change: fossil – global warming potential (GWP100)	kg CO <sub>2</sub> -Eq/pkm	0.098
climate change: land use and land use change – global warming potential (GWP100)	kg CO <sub>2</sub> -Eq/pkm	5.52E-06
ecotoxicity: freshwater – comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)	CTUe/pkm	0.774
ecotoxicity: freshwater, inorganics – comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)	CTUe/pkm	0.233
ecotoxicity: freshwater, metals – comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)	CTUe/pkm	0.453
ecotoxicity: freshwater, organics – comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)	CTUe/pkm	0.089
energy resources: non-renewable – abiotic depletion potential (ADP): fossil fuels	MJ, net calorific value/pkm	1.312
eutrophication: freshwater – fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P)	kg PO <sub>4</sub> -Eq/pkm	1.7E-06
eutrophication: marine – fraction of nutrients reaching marine end compartment (N)	kg N-Eq/pkm	4E-04
eutrophication: terrestrial – accumulated exceedance (AE)	mol N-Eq/pkm	0.004
human toxicity: carcinogenic – comparative toxic unit for human (CTUh)	CTUh/pkm	8.88E-11
human toxicity: carcinogenic, metals – comparative toxic unit for human (CTUh)	CTUh/pkm	8.08E-12
human toxicity: carcinogenic, organics – comparative toxic unit for human (CTUh)	CTUh/pkm	8.07E-11
human toxicity: non-carcinogenic – comparative toxic unit for human (CTUh)	CTU/pkmh	5.66E-10
human toxicity: non-carcinogenic, inorganics – comparative toxic unit for human (CTUh)	CTUh/pkm	3.25E-10
human toxicity: non-carcinogenic, metals – comparative toxic unit for human (CTUh)	CTUh/pkm	2.27E-10
human toxicity: non-carcinogenic, organics – comparative toxic unit for human (CTUh)	CTUh/pkm	1.61E-11
ionizing radiation: human health – human exposure efficiency relative to u235	kBq U235-Eq/pkm	0.006
land use – soil quality index	dimensionless/pkm	0.174

<b>material resources: metals/minerals – abiotic depletion potential (ADP): elements (ultimate reserves)</b>	kg Sb-Eq/pkm	1.38E-07
<b>ozone depletion – ozone depletion potential (ODP)</b>	kg CFC-11-Eq/pkm	2.21E-08
<b>particulate matter formation – impact on human health</b>	disease incidence/pkm	1.07E-08
<b>photochemical ozone formation: human health – tropospheric ozone concentration increase</b>	kg NMVOC-Eq/pkm	0.001
<b>water use – user deprivation potential (deprivation-weighted water consumption)</b>	m3 world eq. deprived/pkm	0.002

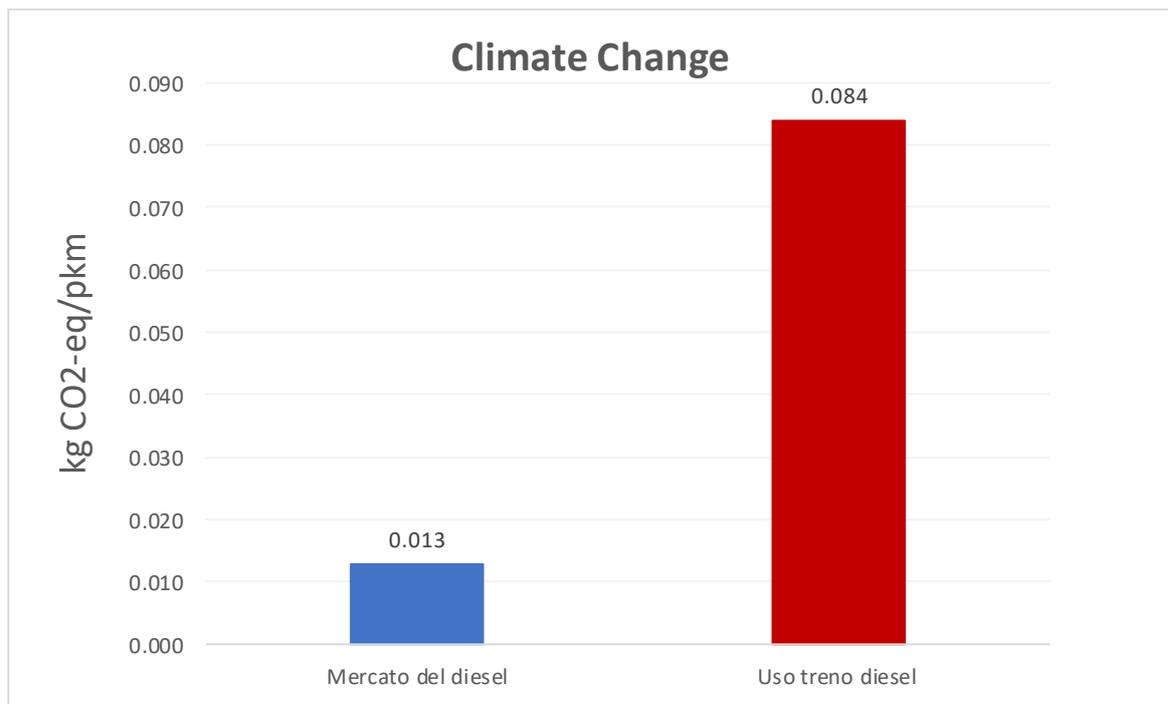


Figura 44- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita al Climate Change secondo i due principali processi che la generano, treno diesel

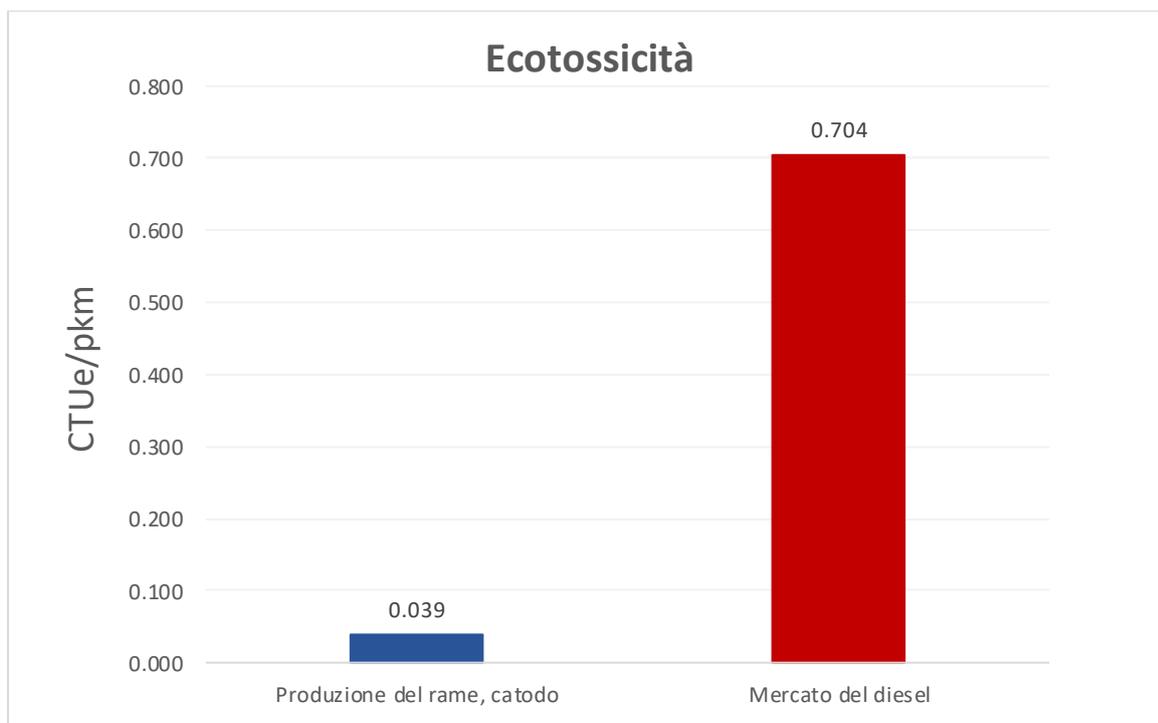


Figura 45- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita all'**Ecotossicità** secondo i due principali processi che la generano, treno diesel

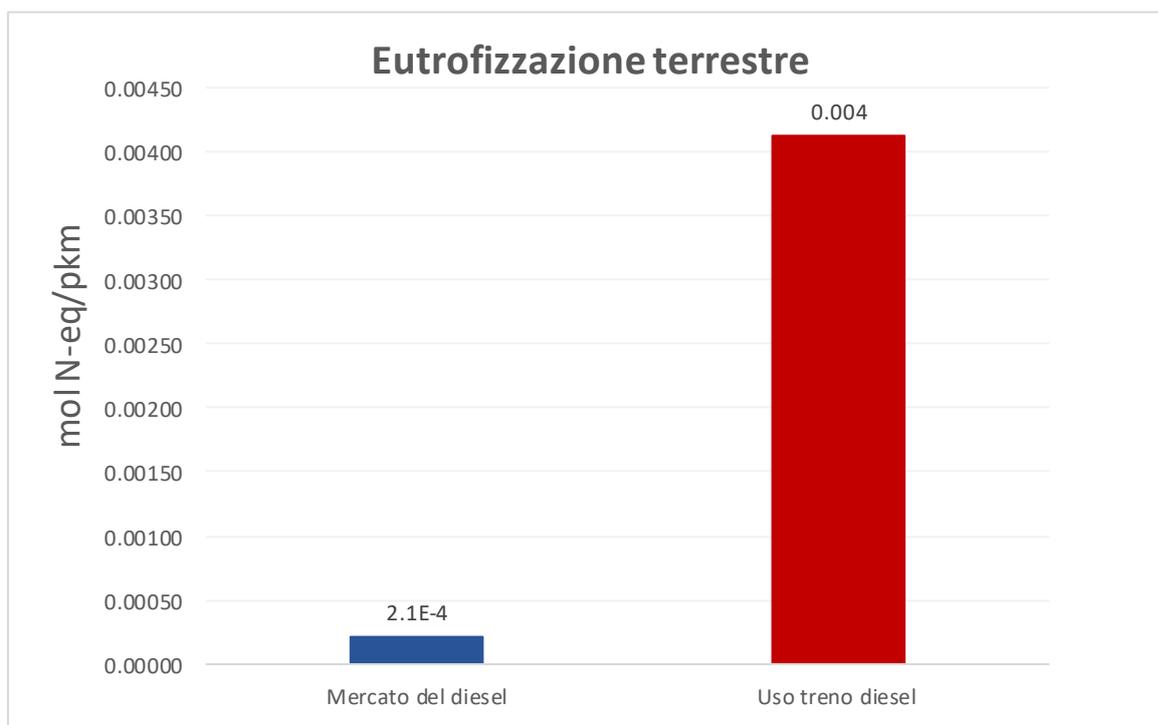


Figura 46- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita all'**Eutrofizzazione terrestre** secondo i due principali processi che la generano, treno diesel

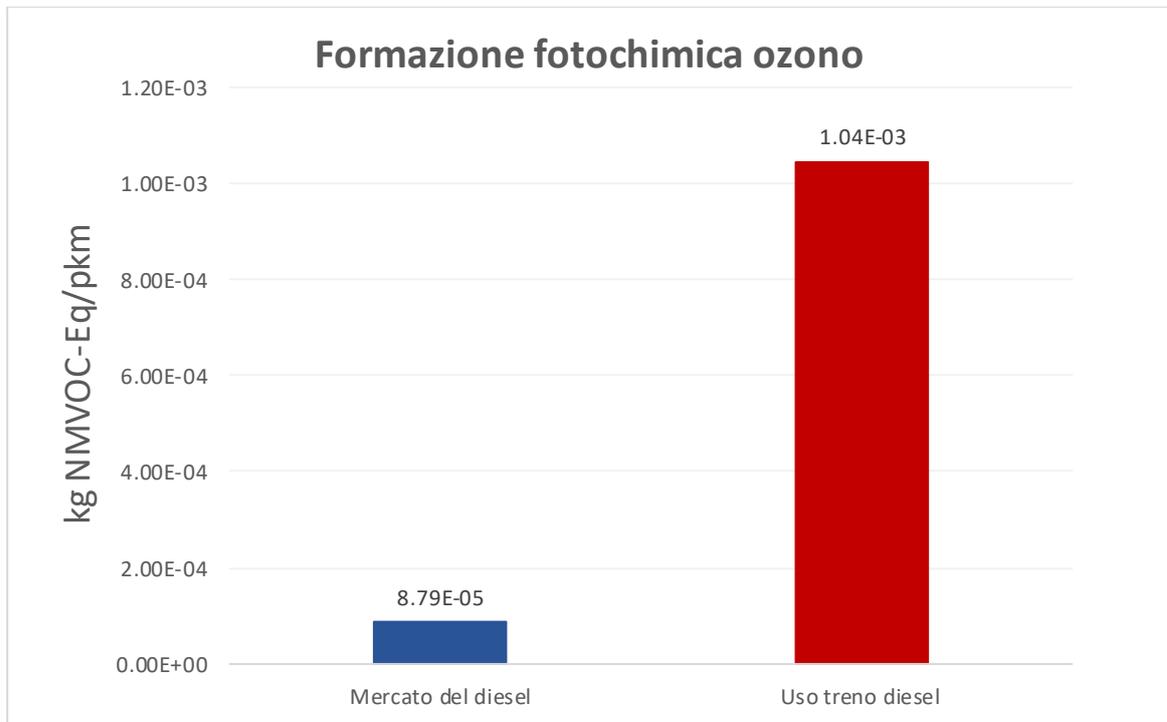


Figura 47- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita alla **Formazione fotochimica dell'ozono** secondo i due principali processi che la generano, treno diesel

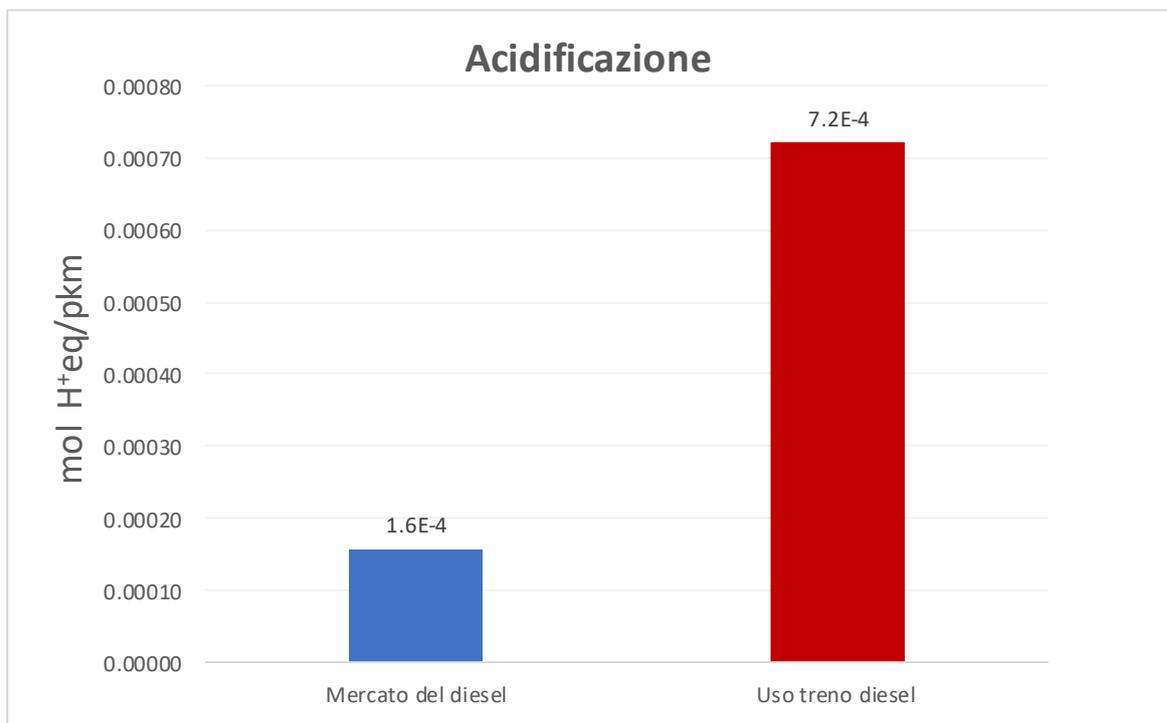


Figura 48- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita all'**Acidificazione** secondo i due principali processi che la generano, treno diesel

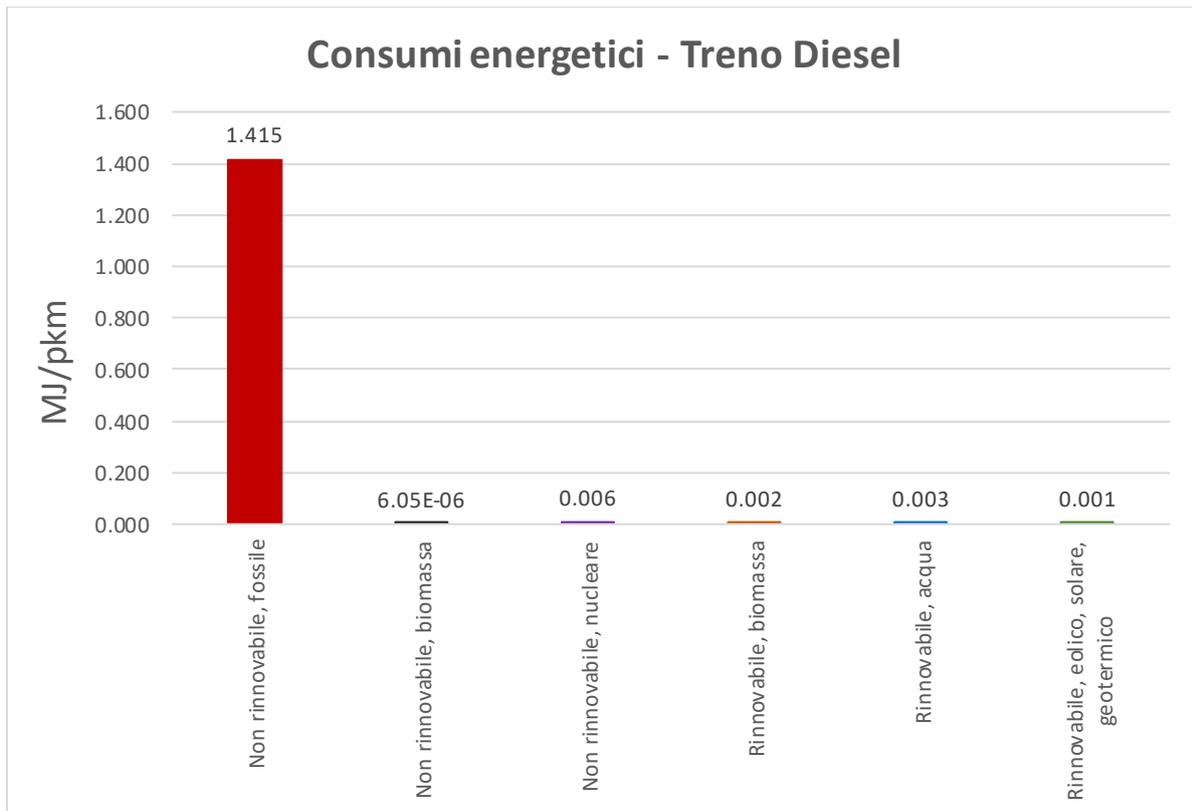


Figura 49- Consumi energetici, treno diesel

I valori riportati in Figura 49 sono, come nel caso del treno elettrico, attribuibili quasi del tutto al vettore energetico utilizzato in fase operativa (in particolare al processo mercato del diesel), per un totale di 1.427 MJ/pkm consumati.

#### 4.4.3.3 Treno a idrogeno

##### Scenario SMR

Tabella 22- Risultati per le diverse categorie di impatto, uso treno a idrogeno, scenario SMR

<b>Impact category</b>	<b>Reference unit</b>	<b>Result</b>
<b>acidification – accumulated exceedance (ae)</b>	mol H <sup>+</sup> -Eq/pkm	5.15E-05
<b>climate change – global warming potential (GWP100)</b>	kg CO <sub>2</sub> -Eq/pkm	0.034
<b>climate change: biogenic – global warming potential (GWP100)</b>	kg CO <sub>2</sub> -Eq/pkm	3.16E-05
<b>climate change: fossil – global warming potential (GWP100)</b>	kg CO <sub>2</sub> -Eq/pkm	0.034
<b>climate change: land use and land use change – global warming potential (GWP100)</b>	kg CO <sub>2</sub> -Eq/pkm	3.35E-06
<b>ecotoxicity: freshwater – comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)</b>	CTUe/pkm	0.273
<b>ecotoxicity: freshwater, inorganics – comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)</b>	CTUe/pkm	0.031
<b>ecotoxicity: freshwater, metals – comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)</b>	CTUe/pkm	0.241
<b>ecotoxicity: freshwater, organics – comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)</b>	CTUe/pkm	0.001
<b>energy resources: non-renewable – abiotic depletion potential (ADP): fossil fuels</b>	MJ, net calorific value/pkm	0.559
<b>eutrophication: freshwater – fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P)</b>	kg PO <sub>4</sub> -Eq/pkm	1.64E-06
<b>eutrophication: marine – fraction of nutrients reaching marine end compartment (N)</b>	kg N-Eq/pkm	8.14E-06
<b>eutrophication: terrestrial – accumulated exceedance (AE)</b>	mol N-Eq/pkm	8.87E-05
<b>human toxicity: carcinogenic – comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	8.7E-12
<b>human toxicity: carcinogenic, metals – comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	6.04E-12
<b>human toxicity: carcinogenic, organics – comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	2.664E-12
<b>human toxicity: non-carcinogenic – comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTU/pkmmh	1.32E-10
<b>human toxicity: non-carcinogenic, inorganics – comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	1.96E-11
<b>human toxicity: non-carcinogenic, metals – comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	1.08E-10
<b>human toxicity: non-carcinogenic, organics – comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	9.42E-12

ionizing radiation: human health – human exposure efficiency relative to u235	kBq U235-Eq/pkm	3.69E-04
land use – soil quality index	dimensionless/pkm	0.024
material resources: metals/minerals – abiotic depletion potential (ADP): elements (ultimate reserves)	kg Sb-Eq/pkm	2.32E-07
ozone depletion – ozone depletion potential (ODP)	kg CFC-11-Eq/pkm	7.73E-09
particulate matter formation – impact on human health	disease incidence/pkm	2.02E-10
photochemical ozone formation: human health – tropospheric ozone concentration increase	kg NMVOC-Eq/pkm	3.56E-05
water use – user deprivation potential (deprivation-weighted water consumption)	m3 world eq. deprived/pkm	0.002

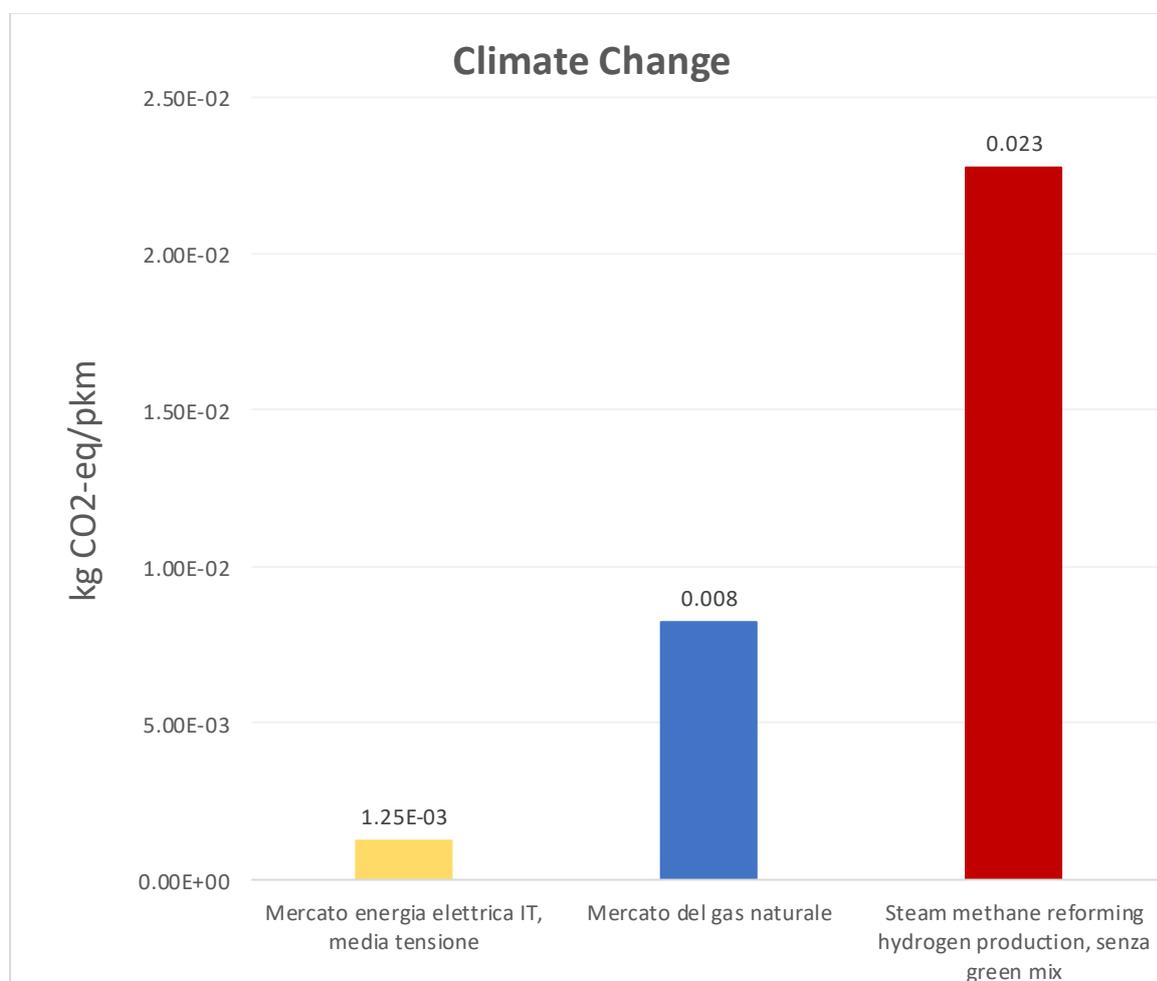


Figura 50- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita al **Climate Change** secondo i tre principali processi che la generano, treno a idrogeno scenario SMR

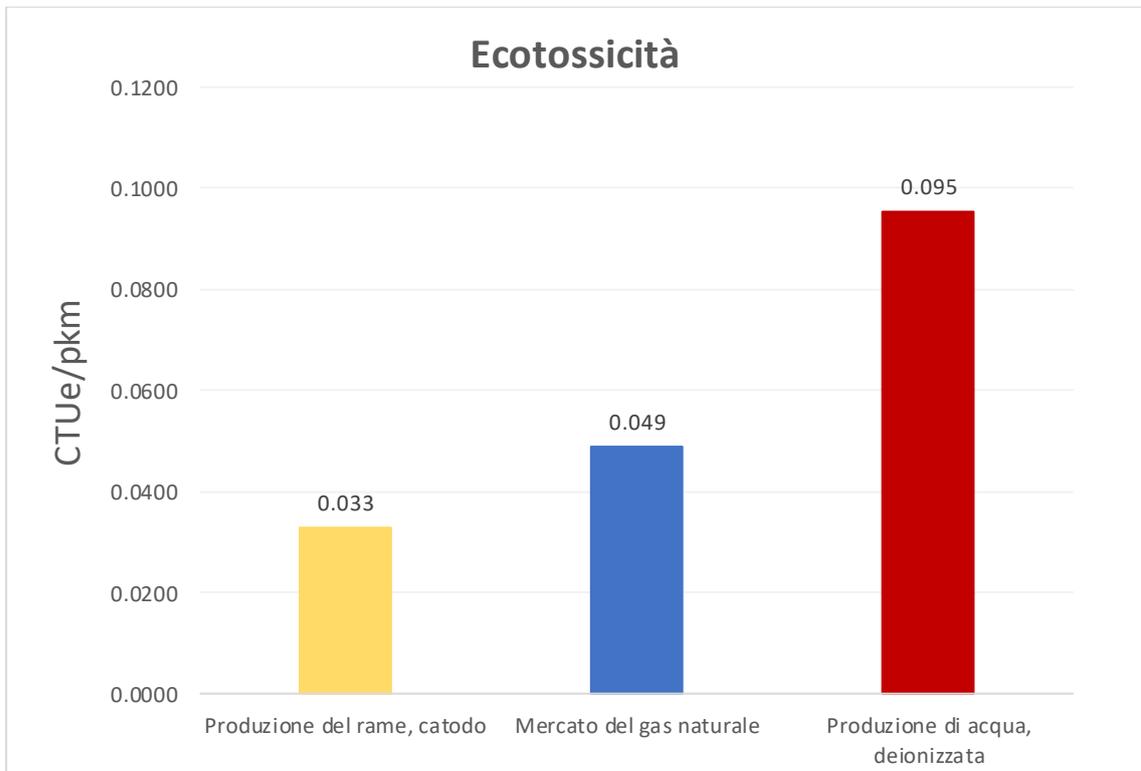


Figura 51- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita all'**Ecotossicità** secondo i tre principali processi che la generano, treno a idrogeno scenario SMR

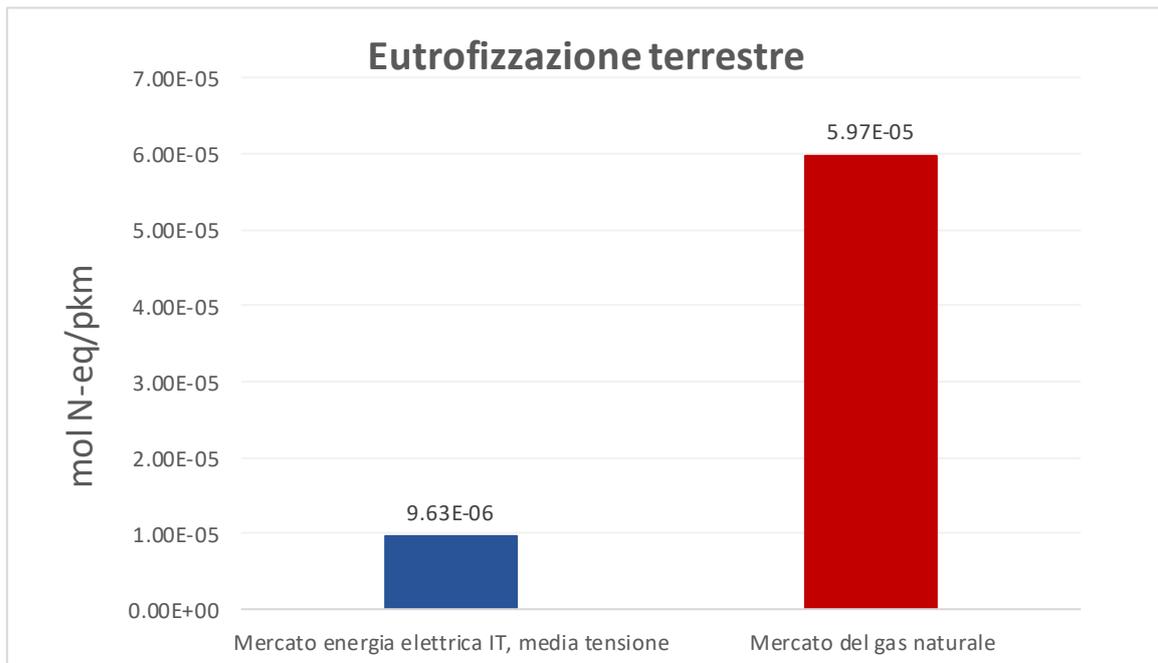


Figura 52- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita all'**Eutrofizzazione terrestre** secondo i due principali processi che la generano, treno a idrogeno scenario SMR

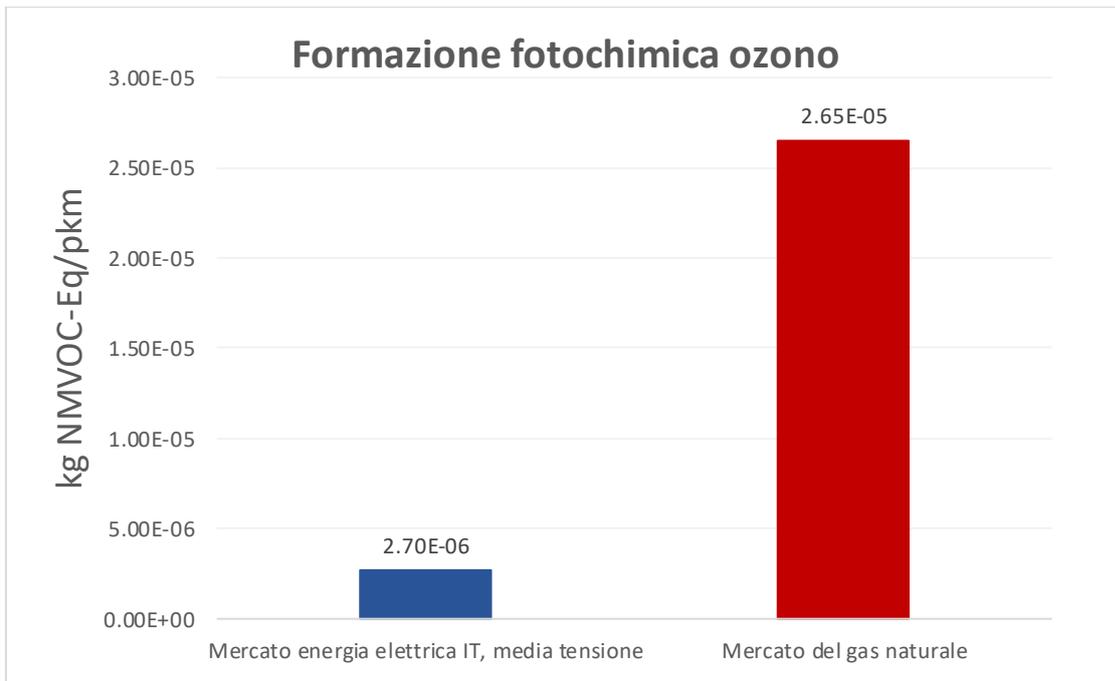


Figura 53- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita alla **Formazione fotochimica dell'ozono** secondo i due principali processi che la generano, treno a idrogeno scenario SMR

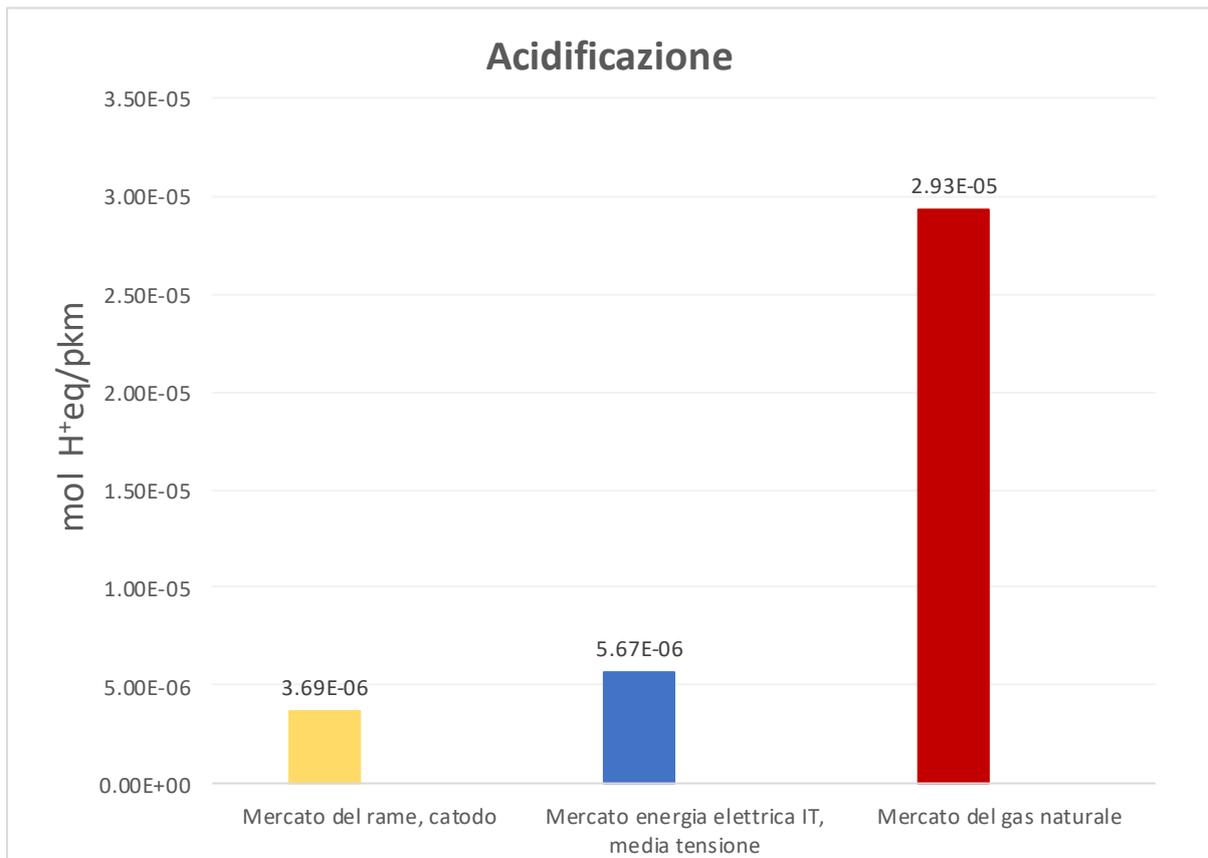
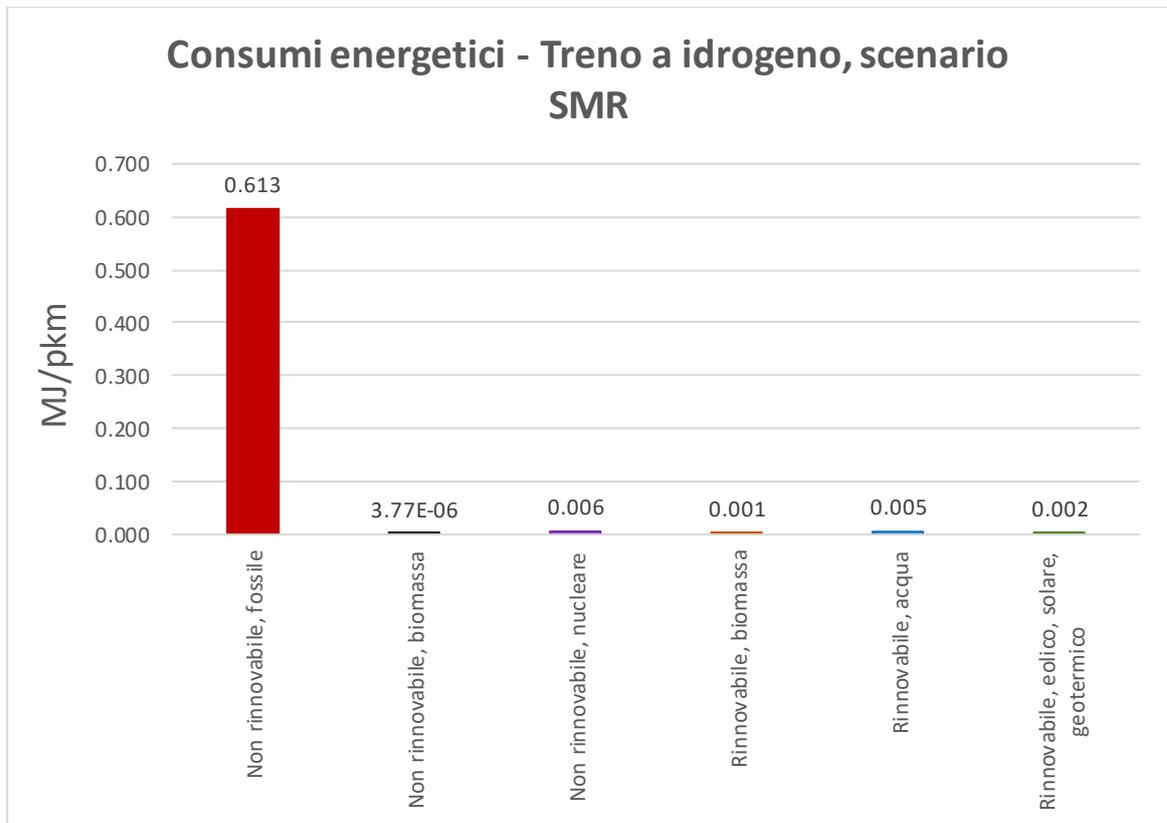


Figura 54- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita all'**Acidificazione** secondo i principali processi che la generano, treno a idrogeno scenario SMR



*Figura 55- Consumi energetici, treno a idrogeno, scenario SMR*

Nello scenario SMR la quasi totalità dei consumi è attribuibile al fatto che l'idrogeno è ottenuto a partire da metano e utilizzando energia elettrica da rete nazionale italiana. Ciò si traduce nel fatto che su un totale di 0.627 MJ/pkm circa 0.613 MJ/pkm (Figura 55) sono prodotti da fonti fossili.

Scenario SMR Green mix

Tabella 23- Risultati per le diverse categorie di impatto, uso treno a idrogeno, scenario SMR Green mix

<b>Impact category</b>	<b>Reference unit</b>	<b>Result</b>
<b>acidification – accumulated exceedance (ae)</b>	mol H <sup>+</sup> -Eq/pkm	4.69E-05
<b>climate change – global warming potential (GWP100)</b>	kg CO <sub>2</sub> -Eq/pkm	0.033
<b>climate change: biogenic – global warming potential (GWP100)</b>	kg CO <sub>2</sub> -Eq/pkm	1.47E-05
<b>climate change: fossil – global warming potential (GWP100)</b>	kg CO <sub>2</sub> -Eq/pkm	0.033
<b>climate change: land use and land use change – global warming potential (GWP100)</b>	kg CO <sub>2</sub> -Eq/pkm	3.48E-06
<b>ecotoxicity: freshwater – comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)</b>	CTUe/pkm	0.267
<b>ecotoxicity: freshwater, inorganics – comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)</b>	CTUe/pkm	0.031
<b>ecotoxicity: freshwater, metals – comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)</b>	CTUe/pkm	0.235
<b>ecotoxicity: freshwater, organics – comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)</b>	CTUe/pkm	0.001
<b>energy resources: non-renewable – abiotic depletion potential (ADP): fossil fuels</b>	MJ, net calorific value/pkm	0.542
<b>eutrophication: freshwater – fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P)</b>	kg PO <sub>4</sub> -Eq/pkm	1.44E-06
<b>eutrophication: marine – fraction of nutrients reaching marine end compartment (N)</b>	kg N-Eq/pkm	7.47E-06
<b>eutrophication: terrestrial – accumulated exceedance (AE)</b>	mol N-Eq/pkm	8.11E-05
<b>human toxicity: carcinogenic – comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	8.74E-12
<b>human toxicity: carcinogenic, metals – comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	6.08E-12
<b>human toxicity: carcinogenic, organics – comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	2.66E-12
<b>human toxicity: non-carcinogenic – comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTU/pkmmh	1.31E-10
<b>human toxicity: non-carcinogenic, inorganics – comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	1.87E-11
<b>human toxicity: non-carcinogenic, metals – comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	1.08E-10
<b>human toxicity: non-carcinogenic, organics – comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	9.34E-12
<b>88onizing radiation: human health – human exposure efficiency relative to u235</b>	kBq U235-Eq/pkm	2.1E-04
<b>land use – soil quality index</b>	dimensionless/pkm	0.041

<b>material resources: metals/minerals – abiotic depletion potential (ADP): elements (ultimate reserves)</b>	kg Sb-Eq/pkm	2.38E-07
<b>ozone depletion – ozone depletion potential (ODP)</b>	kg CFC-11-Eq/pkm	7.58E-09
<b>particulate matter formation – impact on human health</b>	disease incidence/pkm	1.93E-10
<b>photochemical ozone formation: human health – tropospheric ozone concentration increase</b>	kg NMVOC-Eq/pkm	3.36E-05
<b>water use – user deprivation potential (deprivation-weighted water consumption)</b>	m3 world eq. deprived/pkm	0.001

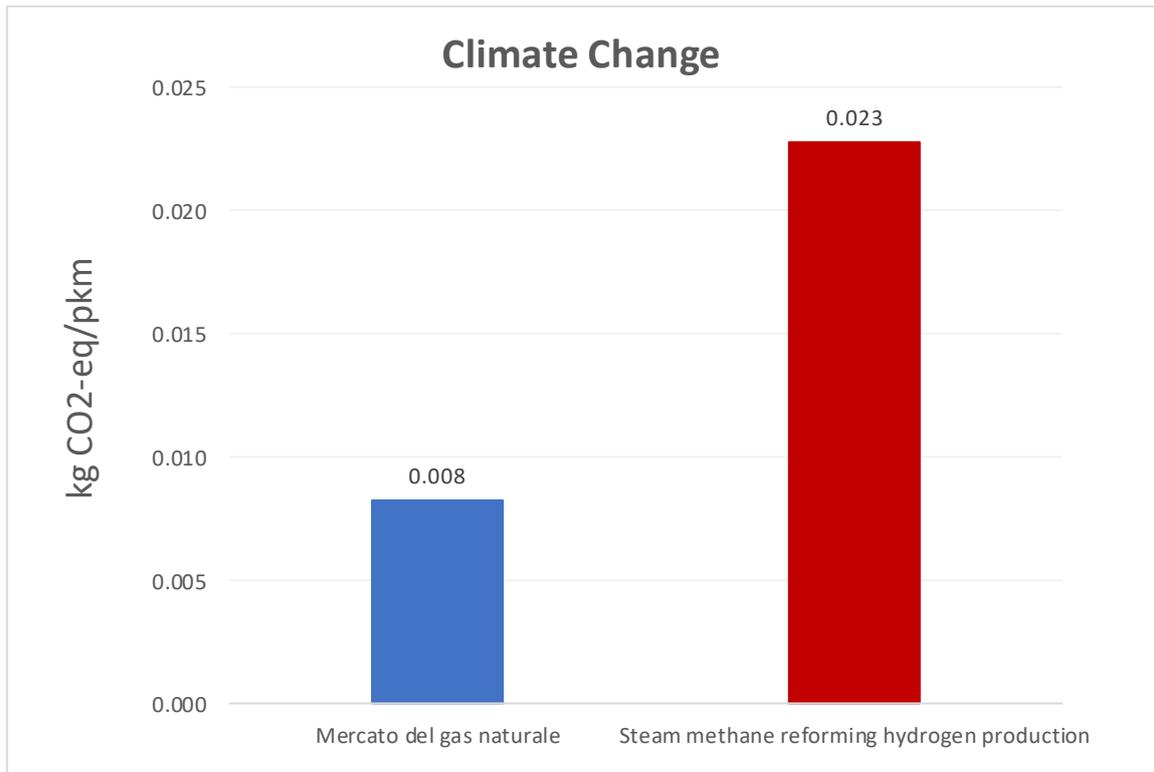


Figura 56- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita al Climate Change secondo i due principali processi che la generano, treno a idrogeno scenario SMR green mix

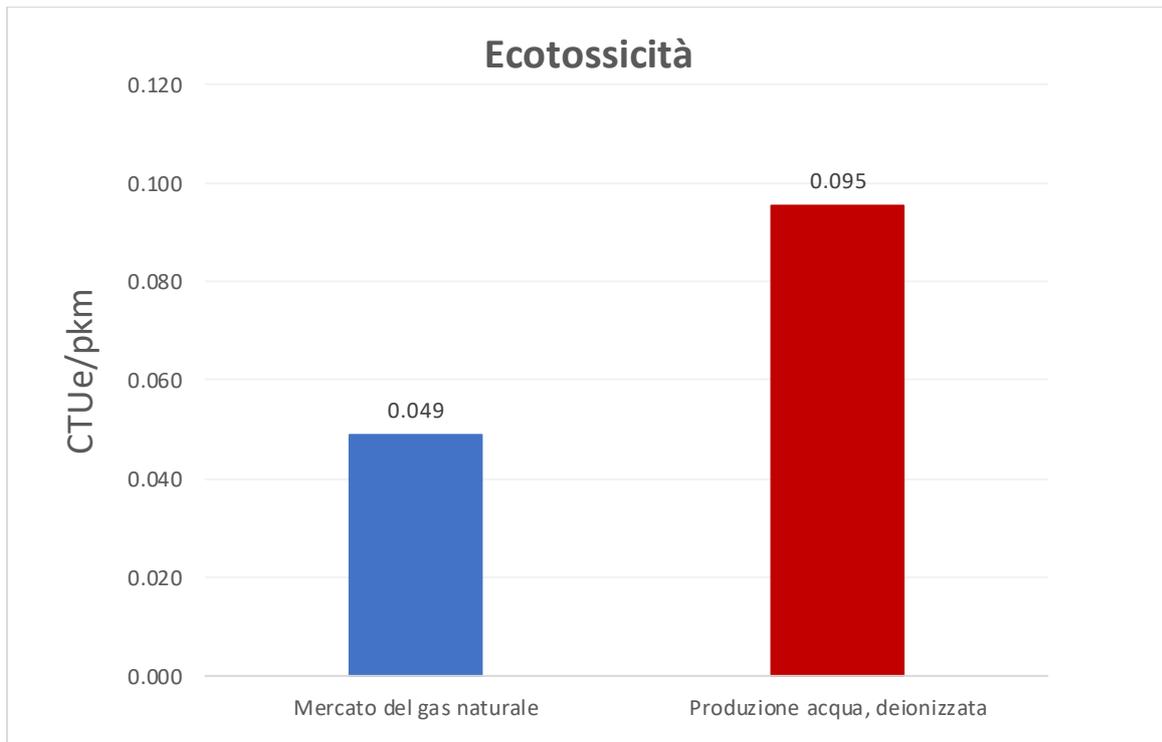


Figura 57- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita all'**Ecotossicità** secondo i due principali processi che la generano, treno a idrogeno scenario SMR green mix

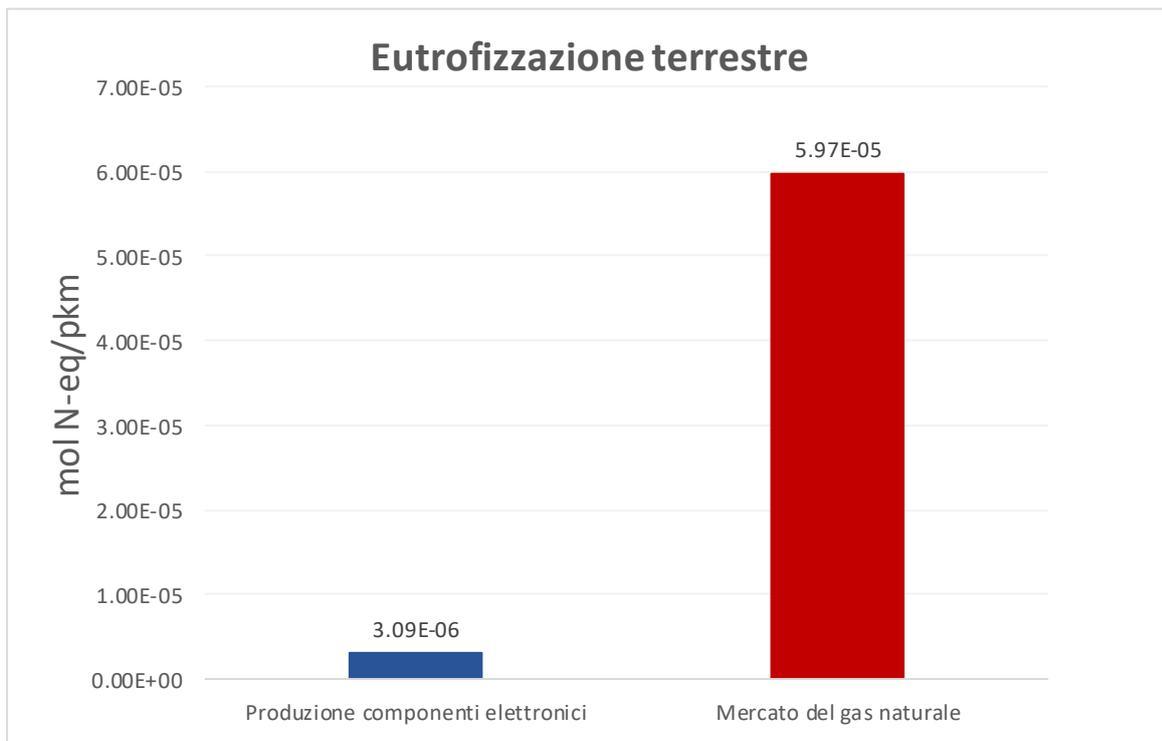


Figura 58- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita all'**Eutrofizzazione terrestre** secondo i due principali processi che la generano, treno a idrogeno scenario SMR green mix



Figura 59- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita alla **Formazione fotochimica dell'ozono** secondo i due principali processi che la generano, treno a idrogeno scenario SMR green mix

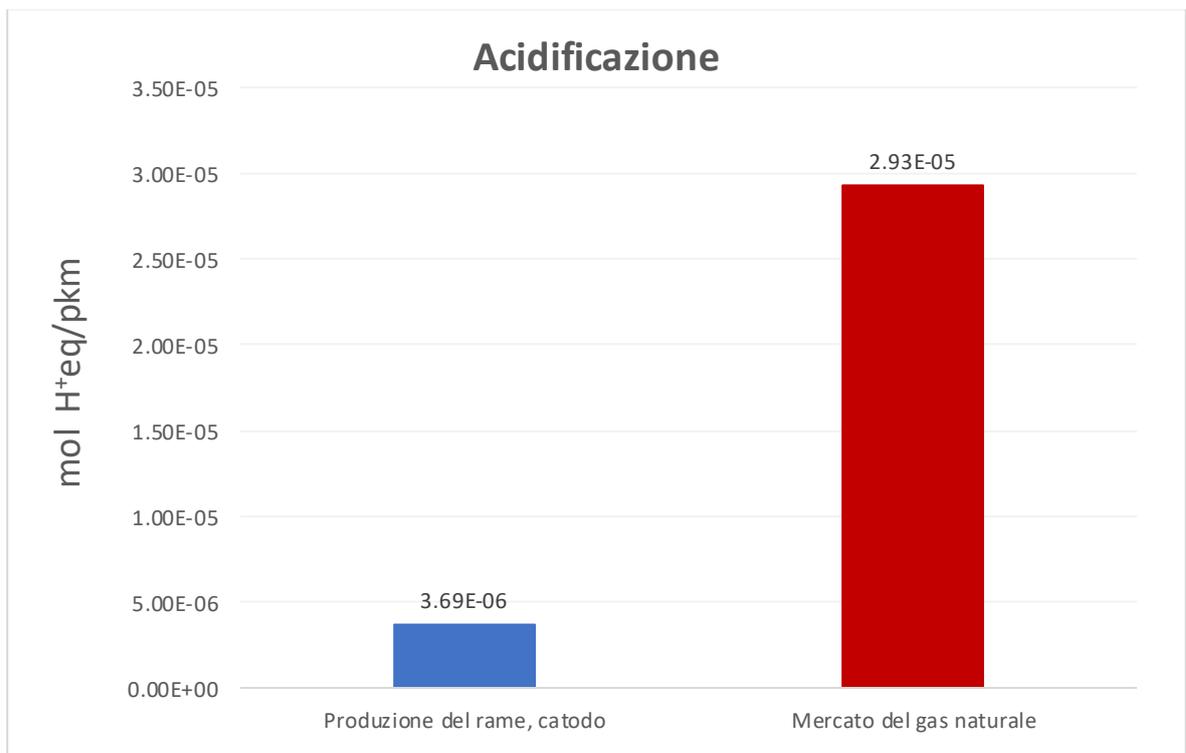


Figura 60- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita all'**Acidificazione** secondo i due principali processi che la generano, treno a idrogeno scenario SMR green mix

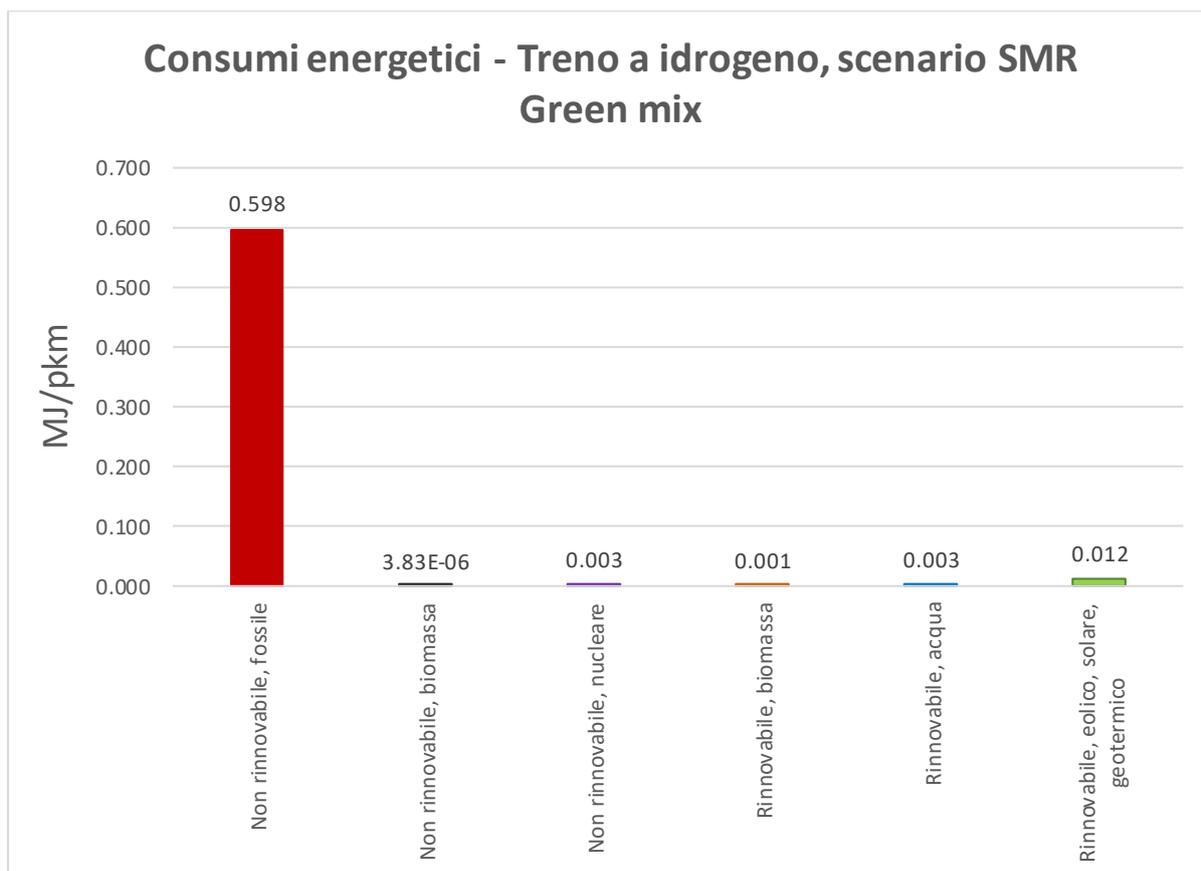


Figura 61- Consumi energetici, treno a idrogeno, scenario SMR Green mix

Nello scenario SMR Green mix i consumi riportati in Figura 61 mostrano come, nonostante la totalità dell'energia elettrica consumata durante la fase di Steam Methane Reforming sia green, i consumi siano quasi tutti di tipo fossile. Questa è una conseguenza del fatto che il principale processo che causa tale impatto è proprio in mercato del gas naturale, quantità che risulta invariata rispetto allo scenario SMR, con utilizzo di energia elettrica prelevata da rete nazionale.

## Scenario Elettrolisi

Tabella 24- Risultati per le diverse categorie di impatto, uso treno a idrogeno, scenario elettrolisi

<b>Impact category</b>	<b>Reference unit</b>	<b>Result</b>
<b>acidification - accumulated exceedance (ae)</b>	mol H <sup>+</sup> -Eq/pkm	1E-04
<b>climate change - global warming potential (GWP100)</b>	kg CO <sub>2</sub> -Eq/pkm	0.0224
<b>climate change: biogenic - global warming potential (GWP100)</b>	kg CO <sub>2</sub> -Eq/pkm	2E-04
<b>climate change: fossil - global warming potential (GWP100)</b>	kg CO <sub>2</sub> -Eq/pkm	0.022
<b>climate change: land use and land use change - global warming potential (GWP100)</b>	kg CO <sub>2</sub> -Eq/pkm	1.46E-05
<b>ecotoxicity: freshwater - comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)</b>	CTUe/pkm	0.568
<b>ecotoxicity: freshwater, inorganics - comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)</b>	CTUe/pkm	0.059
<b>ecotoxicity: freshwater, metals - comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)</b>	CTUe/pkm	0.505
<b>ecotoxicity: freshwater, organics - comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)</b>	CTUe/pkm	0.004
<b>energy resources: non-renewable - abiotic depletion potential (ADP): fossil fuels</b>	MJ, net calorific value/pkm	0.317
<b>eutrophication: freshwater - fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P)</b>	kg PO <sub>4</sub> -Eq/pkm	7.42E-06
<b>eutrophication: marine - fraction of nutrients reaching marine end compartment (N)</b>	kg N-Eq/pkm	1.93E-05
<b>eutrophication: terrestrial - accumulated exceedance (AE)</b>	mol N-Eq/pkm	0.0002
<b>human toxicity: carcinogenic - comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	2.23E-11
<b>human toxicity: carcinogenic, metals - comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	1.5E-11
<b>human toxicity: carcinogenic, organics - comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	7.37E-12
<b>human toxicity: non-carcinogenic - comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTU/pkmh	4.59E-10
<b>human toxicity: non-carcinogenic, inorganics - comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	5.92E-11
<b>human toxicity: non-carcinogenic, metals - comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	3.89E-10
<b>human toxicity: non-carcinogenic, organics - comparative toxic unit for human (CTUh)</b>	CTUh/pkm	1.35E-11
<b>ionising radiation: human health - human exposure efficiency relative to u235</b>	kBq U235-Eq/pkm	0.003
<b>land use - soil quality index</b>	dimensionless/pkm	0.812

<b>material resources: metals/minerals - abiotic depletion potential (ADP): elements (ultimate reserves)</b>	kg Sb-Eq/pkm	5.79E-07
<b>ozone depletion - ozone depletion potential (ODP)</b>	kg CFC-11-Eq/pkm	2.99E-09
<b>particulate matter formation - impact on human health</b>	disease incidence/pkm	7.96E-10
<b>photochemical ozone formation: human health - tropospheric ozone concentration increase</b>	kg NMVOC-Eq/pkm	6.26E-05
<b>water use - user deprivation potential (deprivation-weighted water consumption)</b>	m3 world eq. deprived/pkm	0.016

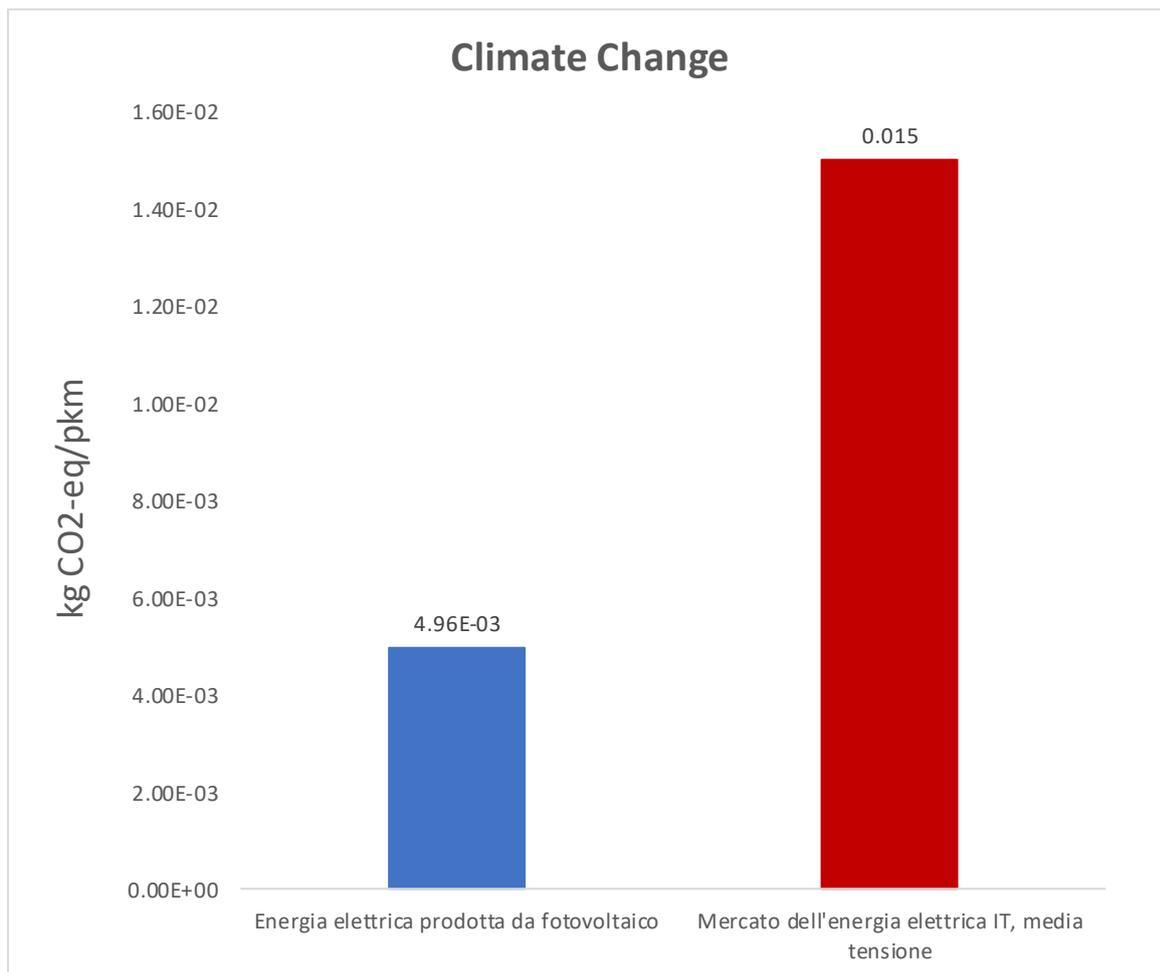


Figura 62- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita al **Climate Change** secondo i due principali processi che la generano, treno a idrogeno scenario Elettrolisi

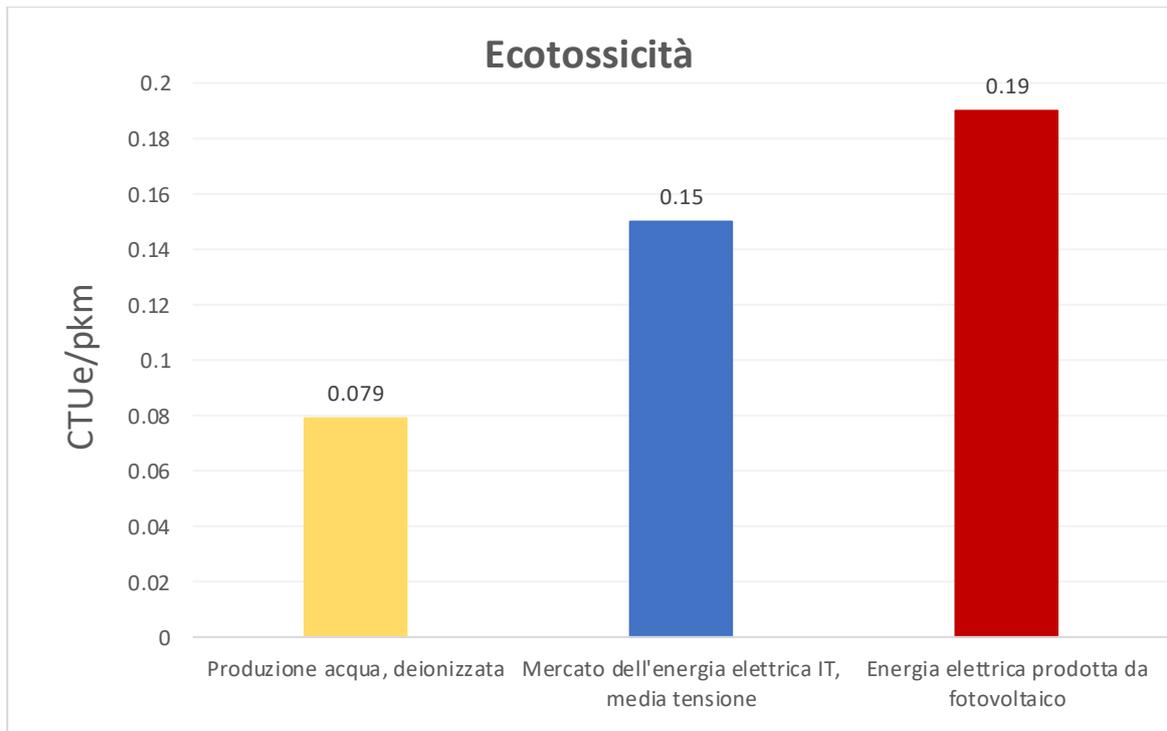


Figura 63- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita all'**Ecotossicità** secondo i tre principali processi che la generano, treno a idrogeno scenario Elettrolisi

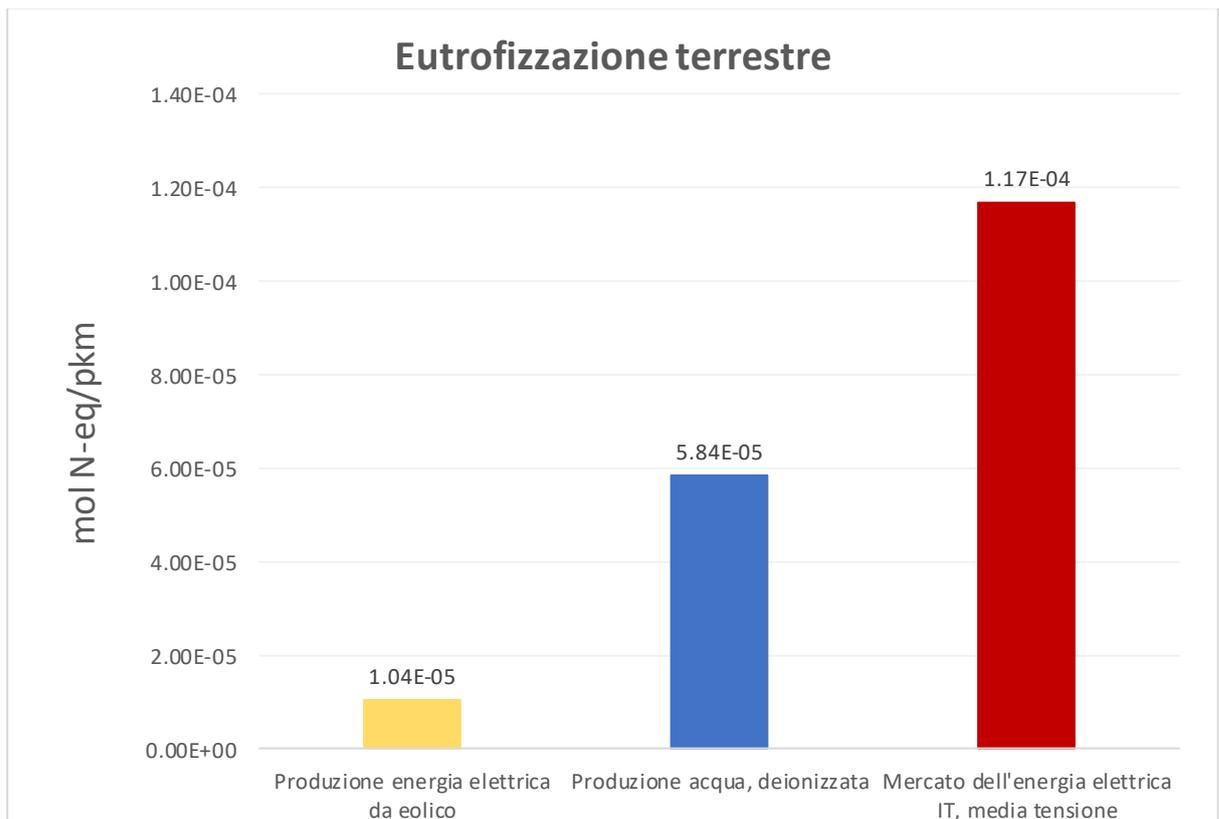


Figura 64- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita all'**Eutrofizzazione** secondo i tre principali processi che la generano, treno a idrogeno scenario Elettrolisi

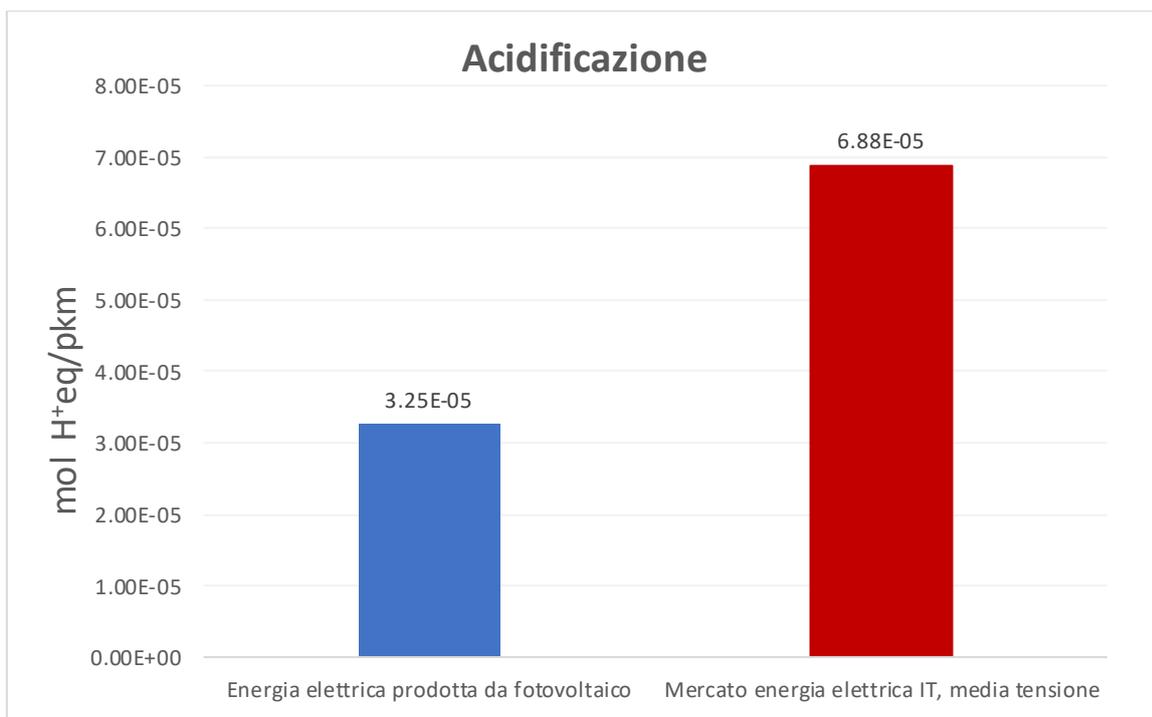


Figura 65- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita all'**Acidificazione** secondo i due principali processi che la generano, treno a idrogeno scenario Elettrolisi

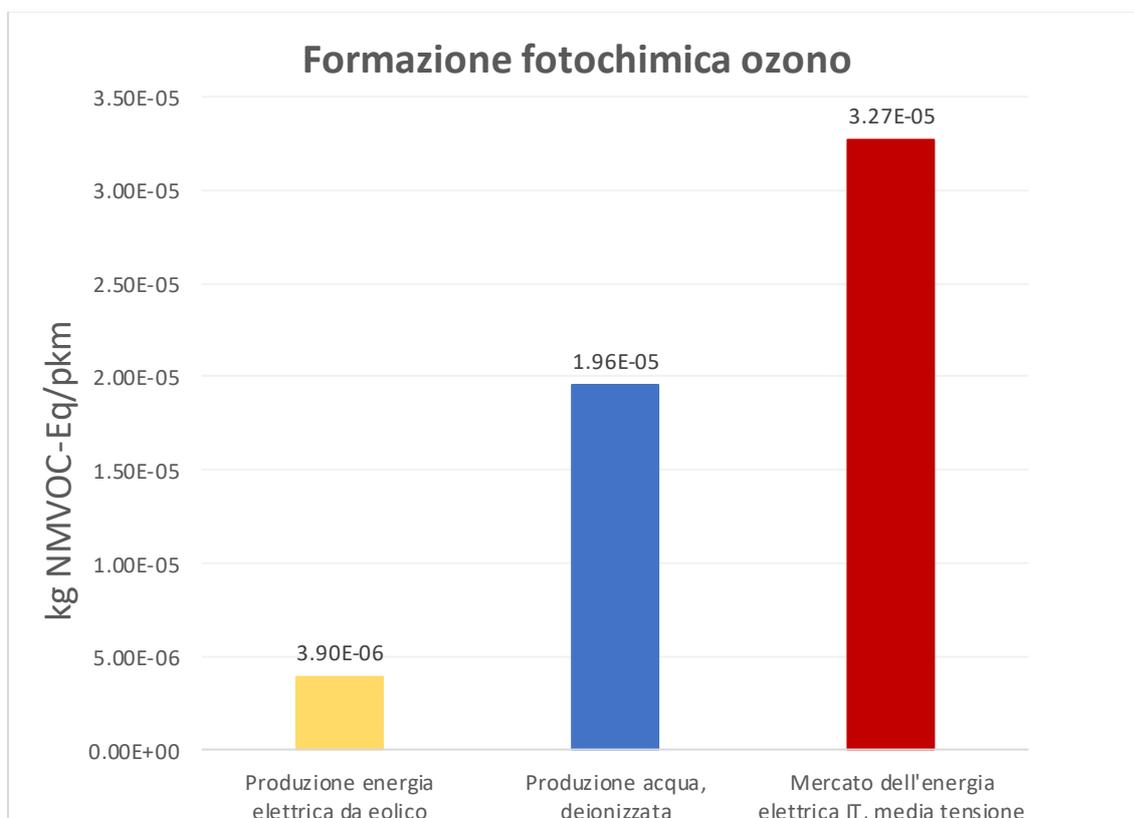


Figura 66- Scomposizione delle emissioni della categoria di impatto riferita alla **Formazione fotochimica dell'ozono** secondo i tre principali processi che la generano, treno a idrogeno scenario Elettrolisi

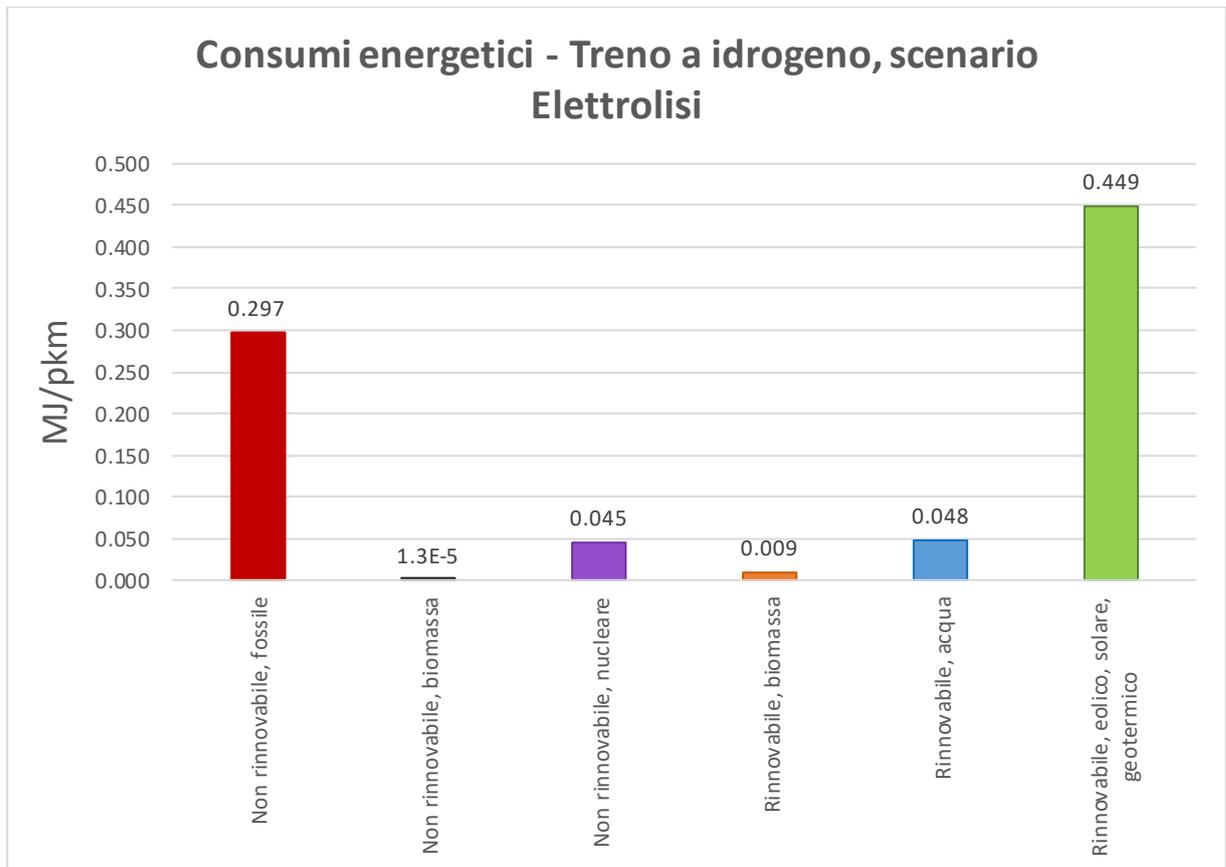


Figura 67- Consumi energetici, treno a idrogeno, scenario Elettrolisi

Nella Figura 67 si osserva come l'energia prodotta a partire da fonti fossili sia estremamente inferiore rispetto agli altri casi; ciò è dovuto principalmente al non utilizzo di metano per la fase di SMR. Una parte di energia elettrica (25%) è, però, prelevata da rete, mentre la restante parte è prodotta da un mix green di energia fotovoltaica (60%) ed eolica (40%). Questo spiega l'aumento di energia prodotta da fonti rinnovabili e la presenza di 0.297 MJ/pkm di energia prodotta da fonti non rinnovabili di tipo fossile.

## 4.5 Interpretazione dei risultati

### 4.5.1 Produzione del treno a idrogeno

La valutazione degli impatti della sola produzione del treno a idrogeno ha dimostrato che i processi più impattanti sono la produzione di acciaio, principale responsabile delle emissioni che riguardano le categorie Climate Change e Formazione fotochimica dell'ozono, la produzione di componenti elettronici, utilizzati nelle batterie, in particolare per il Global Warming e l'eutrofizzazione terrestre, e la produzione di rame per l'ecotossicità e l'acidificazione.

Dal focus sui consumi energetici si osserva come ci sia un ampio consumo di combustibili fossili nella fase di produzione. Tale consumo, che è causa di emissioni, è principalmente generato dalla produzione di batterie e di serbatoi, seguito dalle lavorazioni dell'acciaio e dal consumo di energia elettrica in fase di assemblaggio.

### 4.5.2 Confronto tra le diverse tipologie di treno

L'analisi delle tre tipologie di treno, con annessi scenari nel caso del treno a idrogeno, si è limitata alla fase di produzione e alla fase di uso: non è stata considerata la fase di fine vita. Nella fase di uso sono stati inclusi i consumi dei vettori energetici e i dati relativi alla manutenzione.

Tabella 25- Comparazione dei risultati per le varie categorie di impatto

<b>Impact category</b>	<b>Treno elettrico</b>	<b>Treno diesel</b>	<b>Treno a idrogeno scenario SMR</b>	<b>Treno a idrogeno scenario SMR green mix</b>	<b>Treno a idrogeno scenario elettrolisi</b>
<b>acidification - accumulated exceedance (mol H<sup>+</sup>-Eq/pkm)</b>	1.5E-04	9E-04	5.15E-05	4.69E-05	1.2E-04
<b>climate change - global warming potential (GWP100) (kg CO<sub>2</sub>-Eq/pkm)</b>	0.033	0.098	0.034	0.032	0.022

<b>climate change: biogenic - global warming potential (GWP100) (kg CO<sub>2</sub>-Eq/pkm)</b>	4.7E-04	1.28E-05	3.17E-05	1.47E-05	2.5E-04
<b>climate change: fossil - global warming potential (GWP100) (kg CO<sub>2</sub>-Eq/pkm)</b>	0.032	0.098	0.034	0.033	0.022
<b>climate change: land use and land use change - global warming potential (GWP100) (kg CO<sub>2</sub>-Eq/pkm)</b>	4.96E-06	5.52E-06	3E-06	3.48E-06	1.46E-05
<b>ecotoxicity: freshwater - comparative toxic unit for ecosystems (CTUe/pkm)</b>	0.361	0.774	0.273	0.267	0.568
<b>ecotoxicity: freshwater, inorganics - comparative toxic unit for ecosystems (CTUe/pkm)</b>	0.036	0.233	0.031	0.031	0.059
<b>ecotoxicity: freshwater, metals - comparative toxic unit for ecosystems (CTUe/pkm)</b>	0.322	0.453	0.241	0.235	0.505
<b>ecotoxicity: freshwater, organics - comparative toxic unit for ecosystems (CTUe/pkm)</b>	0.003	0.087	0.001	0.001	0.004
<b>energy resources: non-renewable - abiotic depletion potential (ADP): fossil fuels (MJ, net calorific value/pkm)</b>	0.496	1.312	0.559	0.542	0.317
<b>eutrophication: freshwater - fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (kg PO<sub>4</sub>-Eq/pkm)</b>	7.81E-06	1.70E-06	1.65E-06	1.44E-06	7.42E-06
<b>eutrophication: marine - fraction of nutrients reaching marine end compartment (kg N-Eq/pkm)</b>	2.33E-05	0.0004	8.14E-06	7.47E-06	1.93E-05
<b>eutrophication: terrestrial - accumulated exceedance (mol N-Eq/pkm)</b>	2.57E-04	0.004	8.87E-05	8.11E-05	2E-04

<b>human toxicity: carcinogenic - comparative toxic unit for human (CTUh/pkm)</b>	1.13E-11	8.88E-11	8.70E-12	8.74E-12	2.23E-11
<b>human toxicity: carcinogenic, metals - comparative toxic unit for human (CTUh/pkm)</b>	7.28E-12	8.08E-12	6.04E-12	6.08E-12	1.50E-11
<b>human toxicity: carcinogenic, organics - comparative toxic unit for human (CTUh/pkm)</b>	4.07E-12	8.07E-11	2.66E-12	2.66E-12	7.37E-12
<b>human toxicity: non-carcinogenic - comparative toxic unit for human (CTUh/pkm)</b>	2.62E-10	5.66E-10	1.32E-10	1.31E-10	4.59E-10
<b>human toxicity: non-carcinogenic, inorganics - comparative toxic unit for human (CTUh/pkm)</b>	4.64E-11	3.25E-10	1.95E-11	1.87E-11	5.92E-11
<b>human toxicity: non-carcinogenic, metals - comparative toxic unit for human (CTUh/pkm)</b>	2.11E-10	2.27E-10	1.08E-10	1.08E-10	3.89E-10
<b>human toxicity: non-carcinogenic, organics - comparative toxic unit for human (CTUh/pkm)</b>	8.77E-12	1.61E-11	9.42E-12	9.34E-12	1.35E-11
<b>ionising radiation: human health - human exposure efficiency relative to u235 (kBq U235-Eq/pkm)</b>	4.49E-03	0.006	3.7E-04	2.1E-04	2.67E-03
<b>land use - soil quality index (dimensionless/pkm)</b>	0.089	0.174	0.024	0.041	0.812
<b>material resources: metals/minerals - abiotic depletion potential (ADP): elements (ultimate reserves) (kg Sb-Eq/pkm)</b>	1.48E-07	1.4E-07	2.32E-07	2.38E-07	5.79E-07
<b>ozone depletion - ozone depletion potential (ODP) (kg CFC-11-Eq/pkm)</b>	4.44E-09	2.2E-08	7.73E-09	7.58E-09	2.99E-09
<b>particulate matter formation - impact on human health (disease incidence/pkm)</b>	6.02E-10	1.1E-08	2.02E-10	1.93E-10	7.96E-10

<b>photochemical ozone formation: human health - tropospheric ozone concentration increase (kg NMVOC-Eq/pkm)</b>	7.25E-05	0.001	3.56E-05	3.36E-05	6.26E-05
<b>water use - user deprivation potential (deprivation-weighted water consumption) (m3 world eq. Deprived/pkm)</b>	0.018	0.002	0.002	0.001	0.016

Nella Tabella 25 sono stati riportati i valori per tutte le categorie di impatto nei diversi casi esaminati. Facendo un focus sulle categorie evidenziate, si osserva che il treno diesel è indubbiamente il modello più impattante; in particolare, nel caso del Global Warming, si ottiene un valore circa tre volte superiore agli altri (Figura 68). Tale risultato è conseguenza delle emissioni dovute all'uso del diesel in fase operativa, considerando che la fase di produzione del mezzo e la manutenzione comportano dei contributi irrilevanti se confrontati con esso. Anche le altre categorie presentano elevati valori da imputare all'uso di tale combustibile.

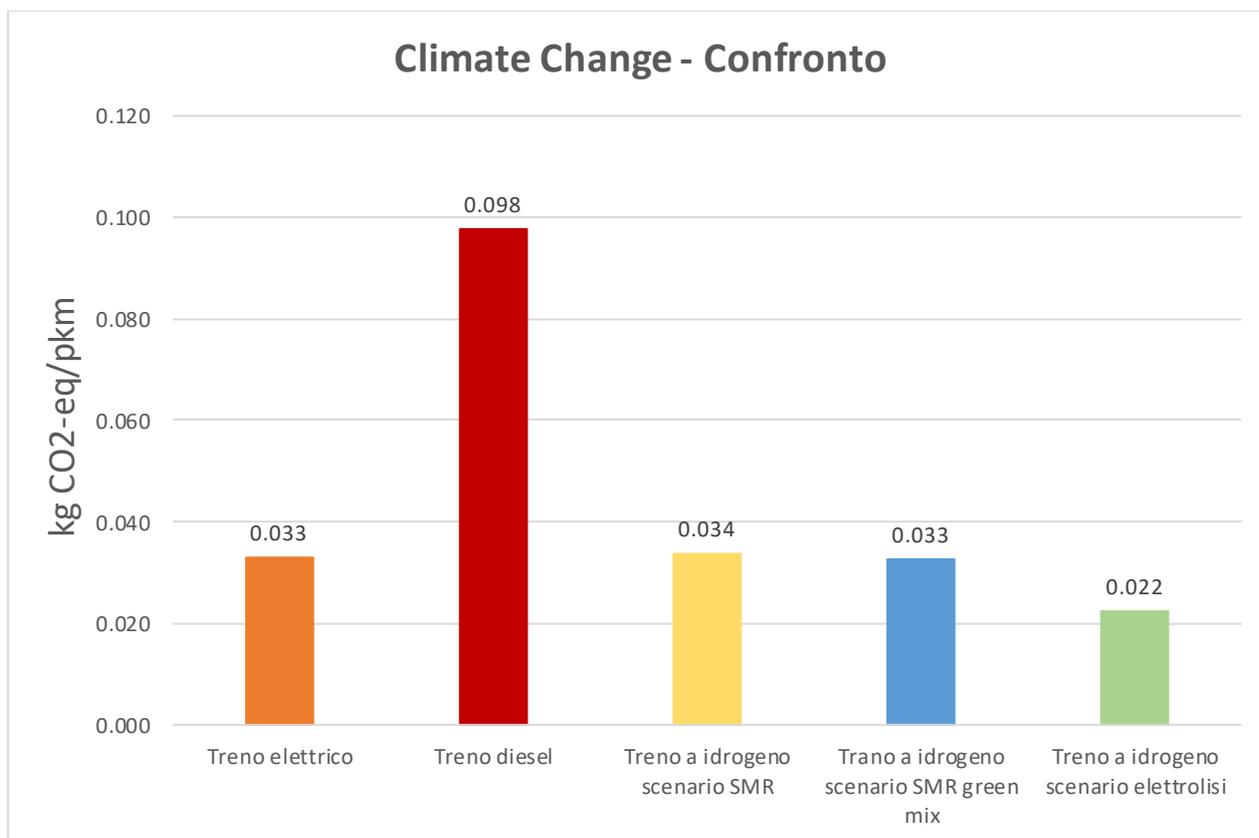


Figura 68- Confronto della categoria di impatto Climate Change per le varie tipologie di treno

Osservando a Figura 68, si nota come il treno elettrico e il treno a idrogeno nei due scenari SMR abbiano più o meno lo stesso valore di emissioni in termini di kg di CO<sub>2</sub>-eq/pkm.

Tale risultato è conseguenza del fatto che nel caso del treno elettrico le emissioni sono dovute alla rete elettrica italiana che utilizza in larga parte energia prodotta da combustibili fossili, ma nel caso dello Steam Methane Reforming si ha diretta produzione di CO<sub>2</sub>. Difatti, si osserva che nello scenario green mix, dove viene utilizzata energia 100% rinnovabile prodotta al 60% da fotovoltaico e 40% da eolico, il valore di emissioni diminuisce in maniera irrisoria rispetto al caso in cui il processo di SMR avvenga utilizzando energia da rete.

Se si osservano, però, le altre categorie di impatto, confrontando sempre le tre tipologie di treno prima citate, si nota che la tecnologia a idrogeno è vantaggiosa, in alcuni casi discostandosi anche di un ordine di grandezza rispetto ai valori riferiti al treno elettrico. Tali scostamenti sono conseguenza del non prelievo di energia elettrica da rete nella fase operativa; nel caso del treno a idrogeno la maggior parte degli impatti sono dovuti al

mercato del gas naturale, che rappresenta il mix di consumo del prodotto in Italia incluse tutte le attività a monte della filiera. Una quota parte comune è invece data dalla costruzione del treno che presenta al suo interno quantitativi di rame, posto all'interno dei motori elettrici e di altri componenti elettronici, che è responsabile di diversi tipi di emissione.

Lo scenario che appare più vantaggioso per la categoria Climate Change è indubbiamente la produzione di idrogeno mediante elettrolisi, dove si è considerata energia elettrica da rete (25%) e la restante parte energia elettrica prodotta dal mix green (60% fotovoltaico e 40% eolico). In tale configurazione, diversamente dallo SMR green mix, un mix energetico rinnovabile influenza notevolmente i risultati: se si considerasse energia prodotta al 100% dal green mix, si arriverebbe ad un valore pari a 0.009 kg CO<sub>2</sub>-eq/pkm, cioè le emissioni dimezzerebbero.

Tale miglioramento è, però, accompagnato da un peggioramento nelle altre categorie di impatto se confrontato con gli altri scenari a idrogeno. Questo risultato è imputabile sia all'utilizzo di energia da rete elettrica sia all'utilizzo di energia prodotta da fotovoltaico, che presenta elevati livelli soprattutto in merito all'ecotossicità, arrivando a superare il valore dell'elettrico, in quanto presenta al suo interno metalli come silicio, alluminio e rame.

Si è analizzato cosa sarebbe successo in caso di elettrolisi prodotta da sola energia green, per capire se, a meno delle percentuali di impatti causate da prelievo da rete elettrica, si ottenga comunque un risultato soddisfacente anche sulle altre categorie di impatto.

*Tabella 26- Confronto tra scenario elettrolisi 75% green mix e 100%*

<b>Impact category</b>	<b>Scenario Elettrolisi</b>	
	<b>75% green mix</b>	<b>100% green mix</b>
<b>acidification - accumulated exceedance (mol H<sup>+</sup>-Eq/pkm)</b>	1.2E-04	6.69E-05
<b>climate change - global warming potential (GWP100) (kg CO<sub>2</sub>-Eq/pkm)</b>	0.022	0.009

<b>ecotoxicity: freshwater - comparative toxic unit for ecosystems (CTUe/pkm)</b>	0.568	0.493
<b>eutrophication: terrestrial - accumulated exceedance (mol N-Eq/pkm)</b>	2E-04	1.1E-04
<b>photochemical ozone formation: human health - tropospheric ozone concentration increase (kg NMVOC-Eq/pkm)</b>	6.26E-05	3.77E-05

Si osserva come complessivamente, eliminando la quota da rete elettrica, si ottenga un miglioramento, fino ad ottenere valori confrontabili con il metodo SMR, ma con il notevole beneficio dell'ulteriore riduzione di emissioni di CO<sub>2</sub>-eq/pkm.

## 5. Conclusioni

Questo studio è finalizzato a valutare gli impatti di un treno a idrogeno, soprattutto in chiave comparativa con le tecnologie ad oggi presenti sul mercato. Tale confronto è stato possibile andando ad utilizzare l'unità funzionale passeggero-km.

Inspirandosi ad un progetto reale, si è modellato il treno a idrogeno, unitamente ai treni diesel ed elettrico a partire da dati disponibili in letteratura. L'analisi ha coinvolto le fasi di produzione e di uso, non considerando quella di smaltimento. Sono stati, quindi, considerati l'estrazione delle materie prime, i consumi energetici, il trasporto e assemblaggio, oltre che la manutenzione e i consumi nella fase di uso, considerando una vita utile di 25 anni.

Sono state effettuate cinque analisi, due che riguardano i treni elettrico e diesel e le restanti tre riferite a diversi scenari di produzione del combustibile per il treno a idrogeno: due considerando lo Steam Methane Reforming, in cui la piccola quota di elettricità utilizzata proviene da rete oppure è prodotta al 100% da fonti rinnovabili, e l'altro considerando l'elettrolisi.

È stato compilato inizialmente, per i vari casi, un inventario in cui sono presenti i flussi in ingresso e in uscita, in particolare quelli più rilevanti, riferendo tutte le quantità all'unità funzionale.

Si è poi proceduto con la valutazione degli impatti. Osservando nello specifico la sola produzione del treno a idrogeno, si è visto che i processi più impattanti sono quelli relativi ai materiali come acciaio e rame, o alla produzione di componenti elettronici di cui è costituita la batteria. Essi, infatti, sono anche processi che richiedono grosse quantità di energia e sono spesso realizzati in paesi con elettricità prodotta prevalentemente da fonte fossile.

Valutando, invece, le fasi di uso, è emerso che il treno diesel è quello più impattante sotto ogni punto di vista, mentre il treno elettrico e quello a idrogeno nei due scenari SMR appaiono confrontabili nei risultati se si osserva il Climate Change. Per le altre categorie, invece, risulta vantaggioso il treno a idrogeno; ciò è una conseguenza del fatto che, a

differenza dell'elettrico i cui valori sono in funzione del mix dell'energia elettrica, lo scenario di SMR dipende prevalentemente dal gas. Difatti ciò implica che l'utilizzo di energia con mix green per lo SMR non comporta un vantaggio rilevante in termini di emissioni poiché si tratta di una piccola quota di consumo.

Se si produce idrogeno da elettrolisi, invece, si osserva una grande variazione in termini di Climate Change pari a 0.0224 kg CO<sub>2</sub>-eq/pkm, ma un aumento dei valori nelle restanti categorie. Ciò è dovuto alla scelta di utilizzare il 25% di energia elettrica da rete e il restante 75% da un mix green (60% fotovoltaico e 40% eolico); questo implica che alle emissioni causate dalla rete elettrica si aggiungono gli impatti causati dalla fabbricazione dei pannelli fotovoltaici e delle pale eoliche.

Si è osservato che, però, se l'elettrolisi è realizzata solo con energia 100% green, tutti i valori si riducono rispetto al caso in cui la percentuale di elettricità da fonte green sia pari al 75%, ottenendo un risultato soddisfacente: in particolare il GWP scende a 0.0092 kg CO<sub>2</sub>/pkm.

Confrontando tale scenario anche con la produzione di idrogeno da SMR, si osserva una diminuzione in termini di kg CO<sub>2</sub>/pkm di circa 3.5 volte, ma i valori nelle altre categorie di impatto si mantengono al di sopra, confermando che, nonostante ci sia un beneficio nella produzione di energia elettrica green, la realizzazione delle tecnologie che ne consentono la produzione determina impatti meno vantaggiosi in categorie diverse dal Climate Change.

In conclusione, prediligere l'utilizzo di fonti rinnovabili per la produzione di idrogeno, unitamente ad un miglioramento nella produzione dei componenti più impattanti (ad esempio che vengano prodotti in luoghi in cui i vettori energetici siano più green), è la chiave per rendere l'idrogeno un combustibile adatto e protagonista nella decarbonizzazione del settore ferroviario. È osservabile però, anche solo considerando la tecnologia a idrogeno più impattante (SMR senza green mix), quanto questa sia conveniente in termini di emissioni rispetto al treno diesel, rendendo così, tale tecnologia, già competitiva.

## 6. Bibliografia

[1] G. D'Ovidio et al., (2017) *Analisi preliminare di tecnologie avanzate per applicazioni di treni leggeri ad idrogeno nelle tratte sub-urbane non elettrificate*, *Ingegneria ferroviaria*, 11, p. 865

[2] Alstom, (2022) Press-releases-news “Anteprima mondiale: 14 Coradia iLint inizieranno il servizio passeggeri sulla prima rotta 100% a idrogeno” (disponibile al link <https://www.alstom.com/it/press-releases-news/2022/8/anteprima-mondiale-14-coradia-ilint-inizieranno-il-servizio-passeggeri>)

[3] Il Sole 24 ORE, (2022) *Germania: governo presenta progetto per sviluppo accelerato rinnovabili* (disponibile al link: [https://www.ilsole24ore.com/radiocor/nRC\\_06.04.2022\\_17.07\\_52910529](https://www.ilsole24ore.com/radiocor/nRC_06.04.2022_17.07_52910529))

[4] Alstom, (2023), Alstom Coradia iLint- the world's 1<sup>st</sup> hydrogen powered train (disponibile al link: <https://www.alstom.com/solutions/rolling-stock/alstom-coradia-ilint-worlds-1st-hydrogen-powered-train>)

[5] Alstom (2021), Press-releases-news “Alstom fornirà la prima flotta di treni a idrogeno della Gran Bretagna - Electric Motor News” (disponibile al link: <https://www.alstom.com/it/press-releases-news/2021/11/alstom-ed-everholt-rail-firmano-un-accordo-la-prima-flotta-di-treni>)

[6] C. Calvert et al., (2021) Concept development and testing of the UK's first hydrogen-hybrid train (HydroFLEX), *Railway Engineering Science* volume 29, pages 248–257, doi:10.1007/s40534-021-00256-9

[7] Alstom (2021), Press-releases-news “Prima commessa di treni a idrogeno in Francia: una tappa storica verso la mobilità sostenibile” (disponibile al link: <https://www.alstom.com/it/press-releases-news/2021/4/prima-commessa-di-treni-idrogeno-francia-una-tappa-storica-verso-la>)

[8] FNM, FERROVIENORD, TRENORD, “H2iseO Hydrogen Valley” (disponibile al link: [https://www.fnmgroup.it/h2iseo\\_hydrogen\\_valley/](https://www.fnmgroup.it/h2iseo_hydrogen_valley/))

- [9] A.Russo, *Analisi del ciclo di vita del sistema propulsivo di un treno a idrogeno*, Politecnico di Torino, (2020-2021)
- [10] S. Khosravi, Q.Abbas, K. Reichmann, (2021) *Electrochemical aspects of interconnect materials in PEMFCs*, International Journal of Hydrogen Energy 46, pages 35420-35447, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.105
- [11] J.Ilončiak et al., (2017) *Modular Concept of Auxiliary Converters for Diesel Electric Locomotives*, Procedia Engineering 192, pages 359-364, doi: 10.1016/j.proeng.2017.06.062
- [12] B. Dalla Chiara, (2012) *Engineering and design of railway systems: trains, lines, operation and innovation*
- [13] Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale - LCA (disponibile al link: <https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/certificazioni/ipp/lca>)
- [14] R. Gerboni, Life Cycle Assessment, Slide del corso Valutazione di impatto ambientale e LCA, Politecnico di Torino, 2021-2022
- [15] Frischknecht R., Bollens U., Bosshart S., Ciot M., Ciseri L., Doka G., Dones R., Gantner U. and Hischier R. (1996) *Ökoinventare von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz*
- [16] Spielmann M., (2004) "Life Cycle Inventories of Transport Services - train production, passenger, regional | train, passenger, regional | Cutoff, S- CH", Ecoinvent 3.8, volume 14 (disponibile al link: <https://v38.ecoquery.ecoinvent.org/Details/LCI/20B07437-FB4D-42B2-93A8-E35454AE7CB3/290C1F85-4CC4-4FA1-B0C8-2CB7F4276DCE>)
- [17] *European Union Agency for Railways, ERATV – European Register of Authorised Types of Vehicles* (disponibile al link: <https://eratv.era.europa.eu/Eratv/Home/View/13-041-0001-7-001-001>)
- [18] *Convenzione tra il Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare ed il Politecnico di Milano del 24 marzo 2014 per l’attuazione delle metodologie di calcolo dell’impronta di carbonio e di compensazione delle emissioni di CO2 di EXPO 2015,*

*Politecnico di Milano, Dipartimento di energia*, page 23 (disponibile al link: [https://www.mase.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/impronta\\_ambientale/approfondimento\\_metodologico\\_viaggi.pdf](https://www.mase.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/impronta_ambientale/approfondimento_metodologico_viaggi.pdf))

[19] The OECD/International Energy Agency and the International Union of Railways, (2021) *“Energy Consumption and CO2 Emissions”*, page 34 (disponibile al link [https://uic.org/IMG/pdf/2012\\_uic-iaa\\_railway\\_handbook\\_web\\_high.pdf](https://uic.org/IMG/pdf/2012_uic-iaa_railway_handbook_web_high.pdf))