



Guida aLIFEca

Corso aperto virtuale di valutazione del ciclo di vita nel settore automobilistico



**Cofinanziato
dall'Unione europea**

Finanziato dall'Unione europea. Le opinioni espresse appartengono, tuttavia, al solo o ai soli autori e non riflettono necessariamente le opinioni dell'Unione europea o dell'Agenzia esecutiva europea per l'istruzione e la cultura (EACEA). Né l'Unione europea né l'EACEA possono esserne ritenute responsabili.

1. INTRODUZIONE

1.INTRODUZIONE.....	1
1.1 Cos'è La Valutazione Del Ciclo Di Vita (LCA)?.....	2
1.2 A Chi Si Rivolge Il Mooc aLIFEca?.....	3
1.3 Cosa Occorre Sapere Prima Di Iniziare Il Corso Mooc aLIFEca?	3
1.4 Cosa Insegna E Cosa Offre Il Mooc aLIFEca?.....	4
1.5 Quadro Di Valutazione E Certificazione	7

Il settore dei trasporti è responsabile di un terzo del consumo finale di energia nei paesi membri dell'Agenzia Europea dell'Ambiente, e di più di un quinto delle emissioni di gas serra (GHG)¹. I trasporti sono anche responsabili di gran parte dell'inquinamento atmosferico urbano. Sono infatti il principale fattore a impatto negativo sulla salute umana e rappresentano una causa diretta del riscaldamento globale. Un fattore determinante nella riduzione delle emissioni di gas serra è il tipo di carburante utilizzato nei trasporti². La letteratura sull'argomento individua diversi metodi utilizzati per la valutazione degli aspetti ambientali, che possono essere applicati anche all'industria automobilistica. L'LCA inquadra l'impatto ambientale dell'intero ciclo di vita del veicolo, a partire dalla fase di produzione (compresa la fabbricazione dei materiali per la produzione del veicolo, l'assemblaggio dello stesso e la produzione di carburante), passando per la fase di funzionamento (compresa la combustione del carburante e la manutenzione del veicolo), fino alla fine del ciclo di vita (smaltimento del mezzo, compresi il riciclaggio e la rottamazione)^{3,4}.

1.1 COS'È LA VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA (LCA)?

L'LCA è la tecnica più solida e matura esistente che prende in considerazione la dimensione ambientale di prodotti e tecnologie. Si tratta infatti di una metodologia utilizzata per identificare, caratterizzare e valutare l'impatto ambientale dell'intero ciclo di vita di un prodotto, dall'estrazione delle materie prime ("culla") allo smaltimento finale ("tomba"). L'LCA consente di confrontare gli aspetti di diversi prodotti e soluzioni tecnologiche che possono avere un impatto sull'ambiente, e di scegliere i prodotti o le soluzioni che hanno il minore impatto ambientale durante il loro ciclo di vita.

I governi di tutto il mondo si trovano ad affrontare la transizione verso la mobilità sostenibile e le energie rinnovabili. Il passaggio alla mobilità verde determina una

¹ Rievaj V, Synák F. Does electric car produce emissions? Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2017; 94: 187-197

² Libro bianco sui trasporti, 2011. Tabella di marcia verso uno spazio unico europeo dei trasporti - Per una politica dei trasporti competitiva e sostenibile. Commissione europea Bruxelles, 28.3.2011, Bruxelles, Belgio. COM(2011) 144 definitivo.

³ Burchart-Korol D., Jursova S., Folęga P., Korol J., Pustejovska P., Blaut A. Environmental life cycle assessment of electric vehicles in Poland and the Czech Republic, Journal of Cleaner Production 2018, 202, pagg. 476-487

⁴ Moro A., Helmens E., A new hybrid method for reducing the gap between WTW and LCA in the carbon footprint assessment of electric vehicles, The International Journal of Life Cycle Assessment. 2017, vol. 22, numero 1, pag. 4

trasformazione senza precedenti dell'industria automobilistica e una ristrutturazione complessiva dell'ecosistema. Vengono creati nuovi posti di lavoro per sostituire quelli persi nell'industria dei combustibili fossili, per i quali sarà necessario personale qualificato. Le competenze analitiche e la consapevolezza ambientale diventeranno aspetti essenziali per distinguersi in qualità di dipendenti o candidati in tutte le posizioni qualificate nel settore automobilistico e in tutti i tipi di settori e servizi correlati. La valutazione del ciclo di vita (LCA) è quindi un metodo accurato utile per misurare gli impatti ambientali del settore automobilistico. La sostenibilità è una delle priorità fondamentali della catena di fornitura automobilistica.

1.2 A CHI SI RIVOLGE IL MOOC ALIFECA?

Il corso è rivolto a tutti coloro che sono interessati all'LCA, all'industria automobilistica e alla transizione della stessa verso le tecnologie verdi non fossili. Si rivolge in particolare agli studenti delle scuole secondarie di primo e secondo grado, potenziali futuri lavoratori "verdi" nel settore automobilistico. Inoltre, il MOOC aLIFEca può risultare utile ai manager e agli ingegneri che si occupano di tematiche legate alla sostenibilità e allo sviluppo di prodotti futuri. Non meno importanti sono gli imprenditori interessati all'innovazione ecosostenibile e i docenti, i formatori e gli insegnanti che potranno utilizzare il corso creato nell'ambito del progetto aLIFEca per corsi di formazione, conferenze e lezioni.

Il MOOC aLIFEca riflette le esigenze dell'industria automobilistica odierna in rapida crescita, nonché le esigenze del gruppo target grazie ai workshop MOOC nazionali organizzati in ogni paese partner. Il feedback ottenuto grazie al gruppo pilota è stato implementato nella formazione. La moderazione del corso durante il workshop nazionale MOOC ha contribuito ad adattarlo al livello di comprensione degli studenti partecipanti.

Il MOOC aLIFEca è stato creato sulla base delle tue esigenze, in linea con le attuali tendenze del mercato del lavoro nel settore automobilistico, e si basa proprio sullo studio dello scenario attuale dell'industria automobilistica (cfr risultato del progetto PR 1.1).

1.3 COSA OCCORRE SAPERE PRIMA DI INIZIARE IL CORSO MOOC ALIFECA?

È necessario avere una conoscenza di base sulla tutela dell'ambiente e della terminologia fondamentale del settore automobilistico. Non è necessaria una conoscenza generale su

veicoli a combustione, veicoli elettrici o veicoli elettrici a celle a combustibile, dal momento che la teoria in materia è inclusa nel corso MOOC aLIFEca stesso e nella Guida aLIFEca. Il corso illustra tutti i dettagli relativi alla valutazione del ciclo di vita e alla sua applicazione al settore automobilistico,

ed è concepito come Massive Online Open Course (MOOC), disponibile gratuitamente ed erogato online. I MOOC rappresentano una modalità di insegnamento e apprendimento innovativa, poiché vengono erogati online e consentono una partecipazione illimitata in tutto il mondo e ad accesso libero tramite il web. I MOOC si avvalgono di un ambiente online e offrono lezioni gratuite e aperte a chiunque si iscriva, indipendentemente da colore della pelle, religione, età, sesso, quadro clinico, nonché da precedenti titoli di studio o qualifiche. Il corso MOOC aLIFEca è aperto a tutti, indipendentemente dal livello di istruzione dei partecipanti, e può essere seguito al proprio ritmo, prendendosi tutto il tempo necessario.

1.4 COSA INSEGNA E COSA OFFRE IL MOOC ALIFECA?

Al termine del corso, avrai acquisito una conoscenza generale sulla valutazione del ciclo di vita. Scoprirai in cosa consiste questo tipo di analisi e come applicarla al settore automobilistico. Sarai consapevole dell'impatto ambientale delle tecnologie di mobilità convenzionali e verdi. E soprattutto grazie all'LCA saprai come confrontare i prodotti, le tecnologie e i servizi in base al loro impatto sull'ambiente. Avrai una marcia in più nella ricerca del lavoro, e di questo gioverà la tua carriera futura.

Il corso è strutturato e ideato sulla base delle esigenze del tuo futuro professionale nel settore automobilistico verde. Il corso è studiato sulla base dei requisiti imposti dal mercato del lavoro automobilistico, in fase di transizione verso la mobilità verde, e riflette pienamente le esigenze di questo settore a beneficio dei lavoratori che vi operano. Il corso nasce dai requisiti imposti dall'industria automobilistica odierna per chi assume ruoli nel campo della sostenibilità, riassunti nel risultato del progetto PR 1.1. Sulla base di questo studio, l'intero corso è stato preparato per essere aggiornato secondo le ultime tendenze e tecnologie di taglio nel settore automobilistico. Il corso MOOC aLIFEca è suddiviso in 5 sezioni: il capitolo 1 "Introduzione", che stai leggendo in questo momento, contenente informazioni generali sul corso e sui prerequisiti per l'iscrizione, e 4 capitoli teorici. Ciascun capitolo è costituito da una sezione teorica che introduce l'argomento seguita da materiale aggiuntivo come casi studio, video, articoli, ecc.

CAPITOLO 2: INTRODUZIONE ALLA SOSTENIBILITÀ E ALL'LCA

Imparerai quali sono gli aspetti fondamentali della sostenibilità e della metodologia LCA. Il capitolo fornisce un solido background teorico sugli argomenti. Imparerai come definire i confini di sistema e quali sono gli approcci utilizzati per farlo. Familiarizzerai con termini quali aspetto ambientale, impatto, categorie d'impatto LCA e impronte ambientali. Ti verranno presentate le quattro fasi principali dell'LCA in modo che tu possa imparare a seguirle. La teoria sarà corroborata da esempi pratici per aiutare gli studenti a inquadrare i concetti da un punto di vista concreto. Il capitolo ti garantisce l'acquisizione delle competenze tecniche fondamentali per il tuo futuro professionale nel mondo dell'LCA, e in particolare all'interno dell'industria automobilistica.

Il capitolo è stato redatto da SPIN 360 srl, una società italiana di consulenza avanzata e innovativa la cui missione generale è quella di sostenere le strategie di innovazione e sviluppo delle imprese e di interi settori industriali nei campi dell'occupazione, della formazione, della sostenibilità e della Responsabilità Sociale d'Impresa, nonché dell'EcoDesign di processi e prodotti e della gestione della catena di fornitura.

CAPITOLO 3: LCA NEL SETTORE AUTOMOBILISTICO: VEICOLI A CARBURANTE CONVENZIONALE

Verranno fornite nozioni teoriche sui motori a combustione interna attraverso la descrizione del loro sviluppo e la spiegazione dei principi di funzionamento degli stessi. I limiti di emissione attualmente consentiti sono indicati alla luce delle normative europee in vigore in materia di emissioni di autovetture, veicoli commerciali leggeri, autocarri e autobus. Nel capitolo vengono illustrati vari metodi di misurazione del consumo di carburante basati su cicli di guida. Il capitolo comprende un caso studio sulla valutazione del ciclo di vita dei veicoli a carburante convenzionale che presenta uno studio comparativo tra ICEV diesel e ICEV a benzina. Infine, le nozioni teoriche sono corredate da esempi di risultati di misurazioni specifiche del consumo e della produzione di gas serra di autovetture, autobus e treni in condizioni reali. Il capitolo garantisce l'acquisizione di competenze tecniche per valutare al meglio i vantaggi o gli svantaggi dell'utilizzo di un particolare mezzo di trasporto (veicolo) sulla base delle sue caratteristiche tecniche e del tipo di carburante. Il capitolo sviluppa competenze e nozioni su come tutelare l'ambiente dal punto di vista del consumo energetico e delle emissioni di gas serra.

Il capitolo è stato redatto dall'Università di Zilina, una delle più importanti istituzioni educative della Slovacchia che vanta una lunga tradizione di studi in campo tecnico e dei

trasporti. L'università è suddivisa in 7 facoltà, tra cui la Facoltà di Funzionamento ed Economia dei Trasporti. Le sue attività si concentrano in particolar modo sullo studio dei trasporti e delle tecnologie operative di tutte le modalità di trasporto. La facoltà è particolarmente attiva nei settori dell'ingegneria, della tecnologia, dell'economia e del commercio.

CAPITOLO 4: LCA NEL SETTORE AUTOMOBILISTICO: VEICOLI A CARBURANTE ALTERNATIVO

Il capitolo riguarda l'utilizzo di carburanti alternativi nel settore automobilistico. Inizialmente presenta un background teorico relativo ai veicoli elettrici, ai veicoli elettrici a celle a combustibile e all'LCA di questi ultimi. Successivamente illustra i dettagli di un modello computazionale in materia di impronta ambientale. Inoltre, il capitolo include casi studio sull'LCA di tali veicoli. Il capitolo presenta l'analisi LCA attraverso casi studio che si avvalgono di dati operativi reali. I risultati che ne emergono dipendono dai diversi mix energetici con cui i veicoli vengono utilizzati. I casi studio presentati riguardano diversi tipi di veicoli a carburante alternativo, come i veicoli elettrici a batteria e i veicoli elettrici a celle a combustibile. L'LCA dei veicoli elettrici a batteria contestualizza l'esempio in Polonia avvalendosi del suo mix energetico. Successivamente viene illustrata l'LCA relativa alla ricarica delle batterie dei veicoli elettrici per ogni paese dell'UE. I veicoli elettrici a celle a combustibile analizzati sfruttano l'idrogeno proveniente dal gas di cokeria, un gas secondario generato nell'industria metallurgica e ricco di idrogeno. Quest'ultimo viene messo a confronto con l'idrogeno proveniente da fonti diverse. Il caso studio finale offre un'analisi comparativa del ciclo di vita dei veicoli a benzina, diesel e a batteria. Acquisirai conoscenze sull'applicazione della valutazione del ciclo di vita LCA nel settore automobilistico, in particolare sull'LCA dei carburanti alternativi.

Il capitolo è stato redatto dalla Silesian University of Technology (SUT), la più antica università tecnica dell'Alta Slesia, una delle più grandi della Polonia e l'unica della Slesia a far parte del prestigioso gruppo delle 10 università migliori della Polonia. La SUT vanta 13 facoltà e 2 istituti, tra cui la Facoltà di Ingegneria dei Trasporti e dell'Aviazione, che si occupa di ricerca e sviluppo nel campo dei carburanti alternativi e dei metodi di valutazione del ciclo di vita ambientale, nonché dello sviluppo di modelli di sostenibilità per i trasporti.

CAPITOLO 5: STRUMENTI PER L'LCA E VALUTAZIONE DELL'IMPATTO AMBIENTALE

Acquisirai conoscenze su diversi database LCI e su diversi strumenti software LCA che possono essere utilizzati per l'analisi LCA. Il capitolo presenta una panoramica degli strumenti software disponibili per l'LCA, andando poi ad analizzare più approfonditamente quelli più comuni come SimaPro, Gabi e Umberto, oltre a citare quelli gratuiti più utilizzati. OpenLCA.

Il capitolo è stato redatto da Scoveco, un'impresa piccola ma con esperienza che aiuta a trasmettere le conoscenze e il know-how direttamente ai soggetti che operano nel settore e a costruire soluzioni innovative. Nei suoi 10 anni di esperienza, l'azienda ha approntato processi, completato numerosi progetti di successo e creato una forte rete. SCOVECO si concentra principalmente sulla consulenza, sulla formazione e sul coaching aziendale nel settore automobilistico, supportando le imprese anche attraverso lo sviluppo di soluzioni informatiche e strumenti propri.

1.5 QUADRO DI VALUTAZIONE E CERTIFICAZIONE

Dopo aver completato con successo il MOOC aLIFEca, lo studente riceverà un certificato o un badge digitale come riconoscimento del livello di competenze raggiunto. Lo schema seguente mostra il sistema di votazione complessivo del MOOC aLIFEca. È possibile ottenere un totale di 100 punti svolgendo vari esercizi nei diversi capitoli. Il capitolo 1 non contiene attività a punti, mentre i capitoli da 2 a 5 ne contengono diverse per un totale di 80 punti. Il restante 20% si ottiene completando tutti i capitoli e svolgendo tutte le attività previste. Una volta terminato il corso, riceverai un certificato che attesta il completamento del MOOC aLIFEca. Il voto minimo per superare il MOOC aLIFEca è del 60%. Coloro che ottengono un esito positivo ricevono un certificato o un badge digitale.

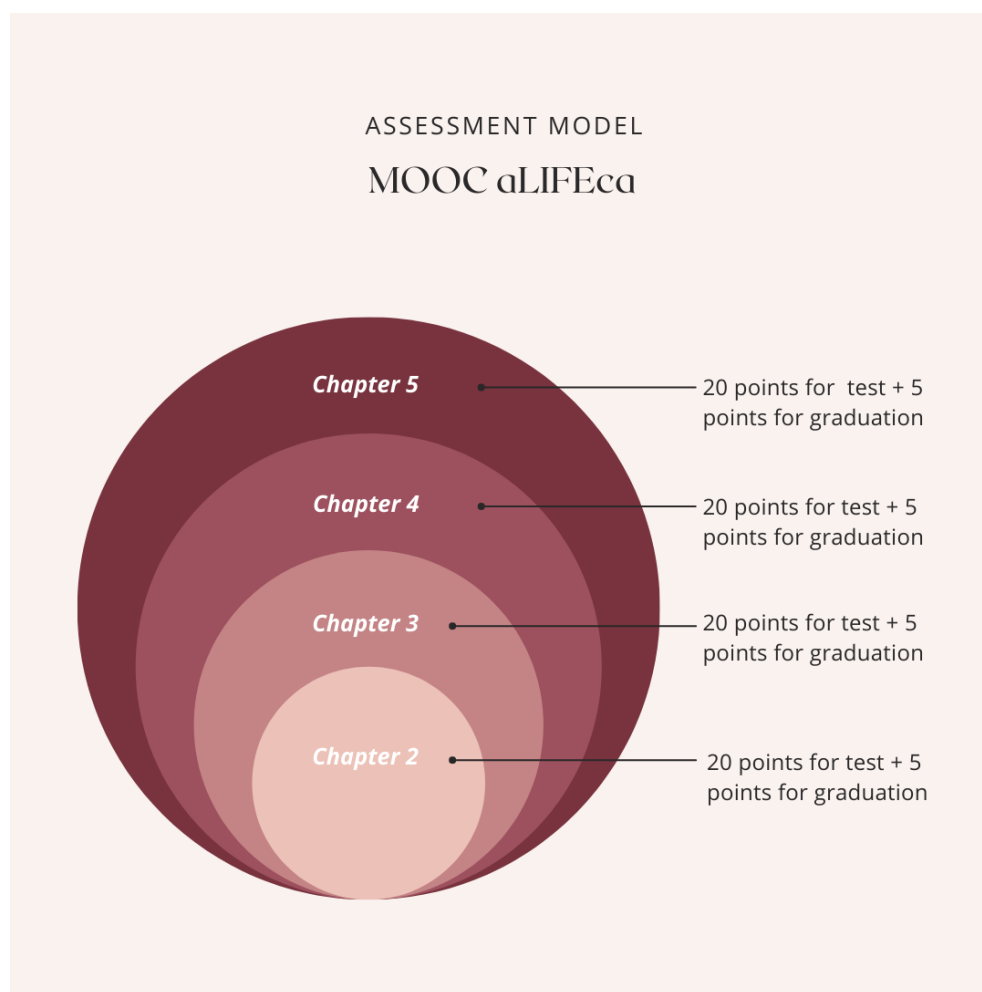


Figura 1: Modello di valutazione della certificazione per il conseguimento del certificato o del badge digitale

CERTIFICATO

Al termine del MOOC aLIFEca, con una votazione minima del 60%, otterrai un certificato che indicherà che hai completato il corso con successo, ma non includerà un voto specifico. Il certificato verrà conferito a nome del consorzio del progetto aLIFEca, indicando l'istituzione che ha erogato il corso.

BADGE DIGITALE

Il badge digitale sarà rilasciato dopo il corso a tutti i partecipanti registrati e verificati che abbiano ottenuto almeno il 60% come voto finale. Questo tipo di riconoscimento includerà il voto ottenuto al termine del MOOC aLIFEca. Il badge digitale potrà essere scaricato dal proprio account studente. Controlla che sul tuo account il nome sia scritto correttamente, poiché comparirà sul certificato finale. Anche in questo caso, sarà emesso a nome del consorzio del progetto aLIFEca.

2. INTRODUZIONE ALLA SOSTENIBILITÀ E ALL'LCA

2. INTRODUZIONE ALLA SOSTENIBILITÀ E ALL'LCA	10
2.1 Inquadramento Della Sostenibilità E Dello Sviluppo Sostenibile	12
2.2 Ambiente, Economia E Società: Verso Un Approccio Olistico	13
2.3 Utilizzo Dell'lca Come Metodologia Per La Valutazione Dell'impatto Ambientale .	19
2.4 Impronte Ambientali	22
2.5confini Del Sistema.....	25
Cradle To Grave.....	27
Cradle To Gate	29
Cradle To Cradle.....	30
Gate To Gate	31
Well To Wheel.....	32
2.6 Fasi LCA.....	32
Obiettivo E Campo Di Applicazione	33
Inventario Del Ciclo Di Vita (Lci).....	34
Valutazione Dell'impatto Del Ciclo Di Vita (Lcia)	35
Interpretazione	38
2.7 Punti Chiave Del Capitolo	40



Tempo di studio

120 minuti



Obiettivi

CONOSCENZE CHE GLI STUDENTI ACQUISIRANNO:

Dopo queste lezioni, gli studenti saranno in grado di:

- Avvalersi di una migliore conoscenza sul tema della sostenibilità e dello sviluppo sostenibile
- Inquadrare meglio le diverse dimensioni della sostenibilità e le implicazioni che ne conseguono
- Comprendere cos'è e come si compone la valutazione del ciclo di vita (LCA), nonché i principali standard LCA di riferimento.

COME IL CAPITOLO LI AIUTERÀ A COMPRENDERE L'ARGOMENTO:

Gli allievi apprenderanno gli aspetti fondamentali della sostenibilità e della metodologia LCA grazie alle solide basi fornite a livello teorico dal corso su questi argomenti. Al contempo, la teoria sarà supportata da esempi pratici per aiutare gli allievi a inquadrare i concetti da una prospettiva più concreta.

QUALI COMPETENZE SVILUPPERÀ IL CAPITOLO:

Il capitolo garantisce l'acquisizione di competenze tecniche che aiuteranno gli studenti nel loro futuro professionale nel campo dell'LCA, e in particolare nell'industria automobilistica.

IN CHE CONTESTO GLI STUDENTI POTRANNO UTILIZZARE QUANTO ACQUISITO:

Gli allievi potranno mettere a frutto le conoscenze acquisite nel loro futuro lavoro nel campo della tutela ambientale e della valutazione dell'impatto ambientale nell'industria automobilistica.



Teoria

2.1 INQUADRAMENTO DELLA SOSTENIBILITÀ E DELLO SVILUPPO SOSTENIBILE

Il termine "sostenibilità" è una delle parole più usate del nostro tempo. Nel XXI secolo questo concetto è diventato poco a poco fulcro di un'enorme attenzione globale, ma il dibattito sulla sostenibilità risale alla fine del XX secolo insieme alla definizione di "sviluppo sostenibile". Il 20 marzo 1987, la Commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo (WCED) pubblicò il Rapporto Brundtland (noto anche come Il nostro futuro comune). Il nome fu dato dalla coordinatrice Gro Harlem Brundtland, che quell'anno era presidente della WCED. Tale documento inquadra, per la prima volta, il concetto di sviluppo sostenibile come:

"Uno sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri"[⁵]

A tale definizione si può aggiungere il significato più generale di sostenibilità, ovvero "capacità di mantenersi in vita senza interruzioni e senza che la propria condizione peggiori". Si tratta di un concetto chiaramente ampio in termini di campi di applicazione: lo sviluppo sostenibile è concepito come l'impegno a soddisfare i bisogni fondamentali di tutti e ad estendere a tutti l'opportunità di soddisfare le proprie aspirazioni a una vita migliore. Non si tratta della sola dimensione ambientale, ma piuttosto di un principio etico che *comprende* anche l'ambiente. Pertanto, all'interno del concetto di sostenibilità e sviluppo sostenibile, possono essere individuate diverse dimensioni.

È già evidente dalla semplice definizione di cui sopra: la sostenibilità è un **fenomeno intrinsecamente complesso**. Capire cos'è la sostenibilità e come perseguirla significa integrare diverse sfere d'azione, ma allo stesso tempo fare attenzione a come tali sfere (o dimensioni) vengono prese in considerazione.

Dal 1987 a oggi, la comunità internazionale si è presa diversi impegni per definire standard, linee guida e obiettivi ambientali volti a perseguire la sostenibilità. Una delle più

⁵ Nazioni Unite, Rapporto della Commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo: Il nostro futuro comune, 1987.

recenti e conosciute è l'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile e i 17 Obiettivi di sviluppo sostenibile (SDGs) adottati dall'Assemblea generale delle Nazioni Unite nel 2015. Con l'obiettivo di non trascurare nessuno, l'Agenda 2030 rappresenta una strategia di sviluppo globale che si concretizza in azioni per le persone, il pianeta, la prosperità, la pace e la collaborazione. L'Agenda 2030 sottolinea con forza la necessità di integrare le diverse sfere della sostenibilità. Esse sono tradizionalmente definite come ambientali, sociali ed economiche, ma l'interrelazione tra di esse genera ancora più sottodimensioni da considerare. Tuttavia, il "come" integrare questa multidimensionalità non è ancora del tutto chiaro, ed è proprio questa difficoltà che spesso porta a inevitabili scelte di compromesso, in cui una dimensione deve essere sacrificata a vantaggio dell'altra.

Pertanto, se vogliamo inquadrare meglio il concetto di sostenibilità, è necessario considerare le seguenti affermazioni:

1. La sostenibilità è la questione più importante che l'uomo deve affrontare
2. La sostenibilità è complessa
3. La sostenibilità è descritta da diversi parametri e indicatori
4. La sostenibilità ha fondamenti scientifici
5. La sostenibilità può essere misurata
6. La sostenibilità non ha nulla a che vedere con gli strumenti di comunicazione e di marketing
7. La sostenibilità non è del tutto compresa dalla maggior parte dei consumatori
8. La sostenibilità deve essere connaturata al sistema o all'attività e non può essere aggiunta a posteriori

2.2 AMBIENTE, ECONOMIA E SOCIETÀ: VERSO UN APPROCCIO OLISTICO

Come affermato in precedenza, l'Agenda 2030 impegna la comunità globale a "raggiungere lo sviluppo sostenibile nelle sue tre dimensioni – economica, sociale e ambientale – in maniera equilibrata e interconnessa" [6]. Questi concetti fanno tuttavia parte del dibattito internazionale da tempo, come dimostra il Vertice mondiale del 2005 [7], a

⁶ Dipartimento degli Affari Economici e Sociali delle Nazioni Unite (2015), Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development <https://sdgs.un.org/2030agenda>, ultimo accesso febbraio 2022

⁷ <https://www.who.int/hiv/universalaccess2010/worldsummit.pdf>

seguito del quale tali dimensioni sono state introdotte in molti standard nazionali e sistemi di certificazione successivi.

Non è infatti possibile raggiungere un determinato livello di sostenibilità ambientale, sociale o economica senza partire almeno da un livello base comune a tutte e tre le forme, in altre parole, senza adottare una visione olistica dello sviluppo sostenibile. (Figura 2)

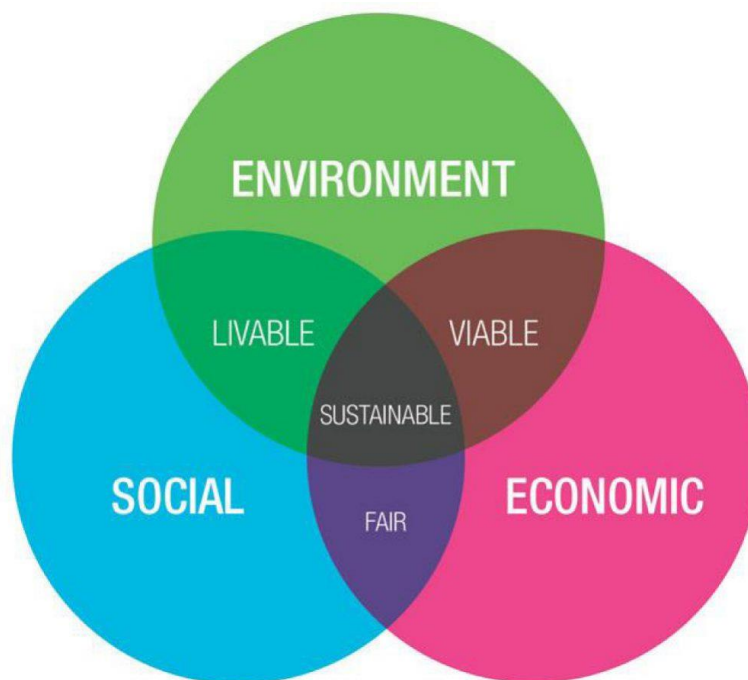


Figura 2: Le tre dimensioni della sostenibilità

ECONOMIA

La misura dell'entità e della salute dell'economia di un paese è comunemente determinata dal prodotto interno lordo (PIL). Il PIL è il valore monetario dei beni e servizi finali prodotti all'interno di un paese in un determinato periodo di tempo (solitamente un anno). Fornisce un'istantanea economica di un paese, che viene utilizzata per stimare le dimensioni di un'economia e il tasso di crescita. Il PIL considera come positive tutte le transazioni, pertanto ne fanno parte anche i danni causati dall'inquinamento, dai disastri naturali, ecc. (ad esempio, se acquisti un'auto il PIL cresce, così come se fai un incidente). Il PIL non fa quindi distinzioni tra le attività che contribuiscono al benessere e quelle che possono ostacolarlo.

Nel corso degli anni sono stati ideati molti indicatori alternativi al PIL: un esempio è il Genuine Progress Indicator (GPI), che misura a livello nazionale la crescita economica e la prosperità. Il GPI si propone di misurare il miglioramento della qualità della vita (che

a volte è in contrasto con la crescita economica, che è invece misurata dal PIL) distinguendo le spese positive (che contribuiscono al benessere, come quelle per beni e servizi) da quelle negative (come i costi generati da criminalità, inquinamento, incidenti stradali). Il GPI prende quindi in considerazione gli aspetti ambientali, da una prospettiva di economia verde o sociale.

Allo stesso modo, il prodotto interno lordo verde (PIL verde) è un indice di crescita economica che tiene conto delle conseguenze ambientali della stessa. Il PIL verde monetizza la perdita di biodiversità e tiene conto dei costi causati dal cambiamento climatico.

La dimensione economica della sostenibilità tiene quindi conto della capacità di sviluppare un sistema economico responsabile che garantisca, ad esempio, un impiego ottimale dell'energia, oltre a fornire incentivi alle imprese e alle altre organizzazioni affinché queste possano aderire alle linee guida in materia di sostenibilità.

SOCIETÀ

La dimensione sociale della sostenibilità tiene conto dei valori che promuovono l'equità e il rispetto dei diritti individuali, puntando all'equilibrio tra le esigenze dei singoli e quelle del gruppo. Oltre alle tematiche più tradizionali della sostenibilità sociale (come la povertà e l'occupazione), la comunità ne ha inclusi di nuovi: l'equità sociale, la diversità, la qualità sociale della vita e la governance integrata, che comprende la responsabilità sociale d'impresa (RSI) e i modelli d'impresa ibridi [8]. Sebbene RSI sia un termine di uso piuttosto comune, l'idea che la responsabilità sociale riguardi tutte le organizzazioni è emersa di recente, nel momento in cui diversi tipi di entità hanno riconosciuto di avere la responsabilità di contribuire allo sviluppo sostenibile e alla sostenibilità [9]. Naturalmente di questo concetto fanno parte il benessere, la qualità della vita e lo sviluppo umano sostenibile, nonché la protezione e la salute umana, la giustizia ambientale, l'accesso all'istruzione, le pari opportunità.

Un parametro che può essere preso in considerazione per una visione più olistica delle tre dimensioni della sostenibilità è la ISO 26000:2010 "Guida alla responsabilità sociale". L'obiettivo della ISO 26000 è quello di aiutare le organizzazioni, indipendentemente dalle loro dimensioni e dalla loro ubicazione, a contribuire allo

⁸ Talan, A., Tyagi, R.D., Surampalli, Rao Y. (2020), "Social Dimensions of Sustainability", DOI: 10.1002/9781119434016.ch9

⁹ https://iso26000.info/wp-content/uploads/2016/03/ISO_Sustainability_brochure.pdf

sviluppo sostenibile [9]. Sebbene si basi sul concetto di responsabilità sociale, la ISO 26000 è sempre più considerata un modo per valutare sia l'impegno di un'organizzazione nei confronti della sostenibilità, sia l'andamento della stessa in generale, dal momento che tocca argomenti e sottorequisiti fondamentali, come spiegato in Figura 3.



Figura 3: Tematiche fondamentali della ISO 26000

AMBIENTE

Il terzo elemento focale è l'ambiente, sebbene rappresenti naturalmente la principale fonte di preoccupazione per il futuro dell'umanità. Sia l'economia che la società sono vincolate dai limiti imposti dagli ecosistemi terrestri. Come già accennato, le questioni ambientali hanno un ruolo preponderante nell'Agenda 2030 e la maggior parte degli obiettivi degli SDGs include riferimenti specifici al legame tra l'ambiente e altre priorità di sviluppo.

In termini più generali, a partire dal 2000, le questioni più urgenti da affrontare nell'ambito della sfera ambientale sono ovviamente il cambiamento climatico, la perdita di biodiversità e l'inquinamento, in particolare quello da plastica, nonché l'impatto umano sull'atmosfera e le risorse idriche e del suolo, e lo studio volto a trovare strategie per utilizzare le risorse naturali senza compromettere l'equilibrio e l'integrità degli ecosistemi.

L'ambiente ha quindi un impatto diretto sugli aspetti economici e sociali dello sviluppo sostenibile e viceversa. La necessità di adottare un approccio olistico che sottolinei l'interconnessione tra le tre dimensioni risulta pertanto ancora più evidente.

Come sottolineato dall'UNESCAP (2015) [10], un approccio potrebbe essere quello di pensare in termini di *capitali multipli*. In questo modello vengono individuate cinque forme di capitale: capitale prodotto, naturale, finanziario, umano e sociale. Uno sviluppo equilibrato garantito dal riconoscimento delle diverse forme di ricchezza nazionale è al centro della sostenibilità. In particolare, il triangolo di Daly fa riferimento alle diverse forme di capitale e riconosce che ognuna di esse contribuisce al benessere umano in modi unici (Figura 4).

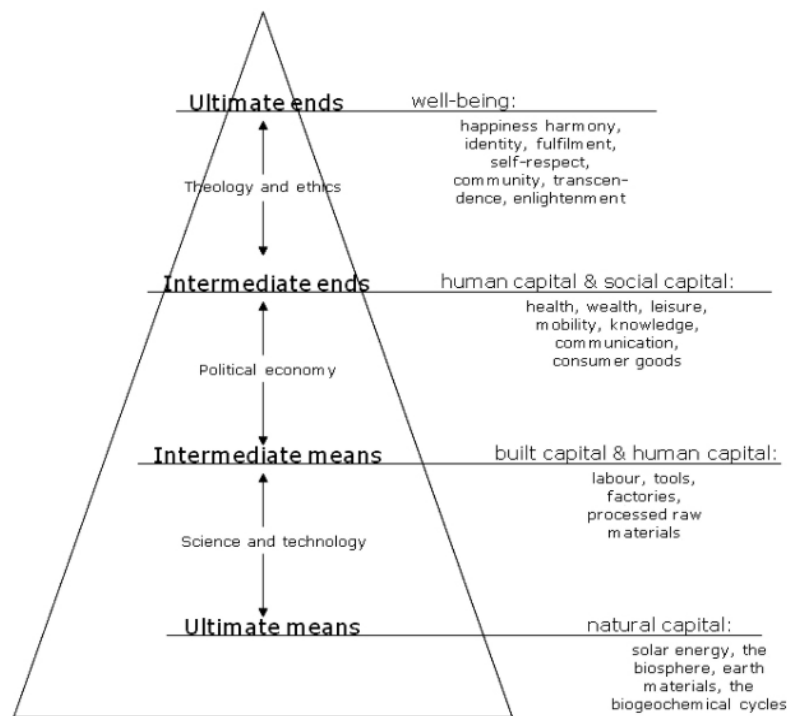


Figura 4: Triangolo di Daly, dal 1973 a Meadows 1998

In questo senso, il capitale naturale costituisce il mezzo di sviluppo definitivo. Senza queste risorse e servizi mancano le fondamenta su cui costruire le società e il benessere umano. Il triangolo di Daly può quindi aiutare a spiegare meglio l'integrazione e il collegamento tra ambiente, economia e società.

¹⁰UNESCAP (2015), "Integrating the three dimensions of sustainable development: a framework and tools".

<https://www.unescap.org/sites/default/files/Integrating%20the%20three%20dimensions%20of%20sustainable%20development%20A%20framework.pdf>

Ai fini di questo studio, il discorso sulla sostenibilità si concentra sul settore automobilistico e, in particolare, sulla spiegazione della valutazione del ciclo di vita (LCA) come metodo accurato per misurare gli impatti *ambientali* del settore automobilistico. La sostenibilità è una delle priorità fondamentali della catena di fornitura automobilistica. Con l'obiettivo di ridurre le emissioni del settore, basandosi su strategie di innovazione coerenti e sull'efficienza globale della catena del valore, sono in atto nuovi sviluppi: alcuni esempi sono le nuove tecnologie di propulsione, il light-weighting e l'uso di materiali riciclati e biomateriali. [11].

Tuttavia, l'obiettivo è naturalmente quello di avere un approccio più integrato alla sostenibilità (ovvero essere in grado di valutare contemporaneamente gli aspetti ambientali, sociali ed economici). Pertanto, se da un lato la dimensione ambientale è compresa e ben consolidata all'interno dell'LCA, dall'altro i metodi e gli strumenti per misurare le dimensioni economica e sociale devono essere rafforzati.

Diversi studi analizzano il concetto di Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) [12], che rappresenta la combinazione di LCA, costo del ciclo di vita (LCC) e Social Life Cycle Assessment (SLCA) e che può essere sintetizzata nella formula:

$$LCSA = LCA + LCC + SLCA$$

L'LCSA integra i seguenti criteri di sostenibilità: L'LCA per gli aspetti ambientali, l'LCC per gli aspetti economici e l'SLCA per gli aspetti sociali. Solo una valutazione completa di queste tre componenti consente di attuare i principi dello sviluppo sostenibile.

¹¹ CLEPA (2021), "Automotive suppliers work towards a carbon-neutral mobility, prioritising both human health and the environment", <https://clepa.eu/mediaroom/clepa-pr-materials-regulations-event-2021/>, ultimo accesso febbraio 2022

¹²Burchart-Korol, D., (2011) „Application of Life Cycle Sustainability Assessment and Socio-Eco-Efficiency Analysis in Comprehensive Evaluation of Sustainable Development“, Journal of Ecology and Health.

2.3 UTILIZZO DELL'LCA COME METODOLOGIA PER LA VALUTAZIONE DELL'IMPATTO AMBIENTALE

Nel paragrafo precedente abbiamo visto che la conservazione dell'ambiente naturale rappresenta un prerequisito dell'efficienza dell'economia e della società.

Avvalendoci della terminologia della ISO 14001 [¹³], possiamo affermare:

- **Ambiente:** il territorio su cui opera l'organizzazione e che comprende l'aria, l'acqua, la terra, le risorse naturali, la fauna, la flora, gli esseri umani e le loro interrelazioni.
- **Aspetto ambientale:** elemento facente parte delle attività, dei prodotti o dei servizi di un'organizzazione che può interagire con l'ambiente.
- **Impatto ambientale:** è un cambiamento sfavorevole o vantaggioso per l'ambiente derivante dagli aspetti ambientali dell'organizzazione.

Un impatto ambientale è quindi il risultato di un aspetto ambientale. Alcuni esempi di aspetti e impatti sono riportati nella Tabella 1:

Tabella 1: esempi di aspetti e impatti ambientali

Aspetto	Impatto
Emissioni di anidride carbonica	Cambiamento climatico (dovuto al riscaldamento globale)
Consumo di petrolio (veicoli)	Esaurimento delle risorse naturali
Scarichi in acqua	Contaminazione delle acque
Emissioni atmosferiche	Contaminazione dell'aria

Secondo la ISO 14001, tutte le organizzazioni sono tenute ad adottare un approccio sistematico per determinare aspetti e impatti: La valutazione del ciclo di vita (LCA) può aiutare a raggiungere tali obiettivi da una prospettiva ambientale.

L'LCA è quindi la tecnica più matura, e prende in considerazione la dimensione ambientale. Si tratta infatti di una metodologia utilizzata per identificare, caratterizzare e

¹³La ISO 14000 identifica una serie di standard tecnici relativi alla gestione ambientale delle organizzazioni, stabiliti dall'International Organization for Standardization (ISO).

valutare l'impatto ambientale dell'intero ciclo di vita di un prodotto, dall'estrazione delle materie prime ("culla") allo smaltimento finale ("tomba"). L'LCA consente di confrontare gli aspetti di diversi prodotti e soluzioni tecnologiche che possono avere un impatto sull'ambiente, e di scegliere i prodotti o le soluzioni che hanno il minore impatto ambientale durante il loro ciclo di vita.

In termini generali, il ciclo di vita di un prodotto è costituito da cinque fasi principali:

1. Estrazione delle materie prime (ovvero le risorse utilizzate)
2. Produzione e lavorazione (compresi assemblaggio e stoccaggio)
3. Trasporto
4. Utilizzo e vendita al dettaglio
5. Fine vita: riutilizzo e riciclo

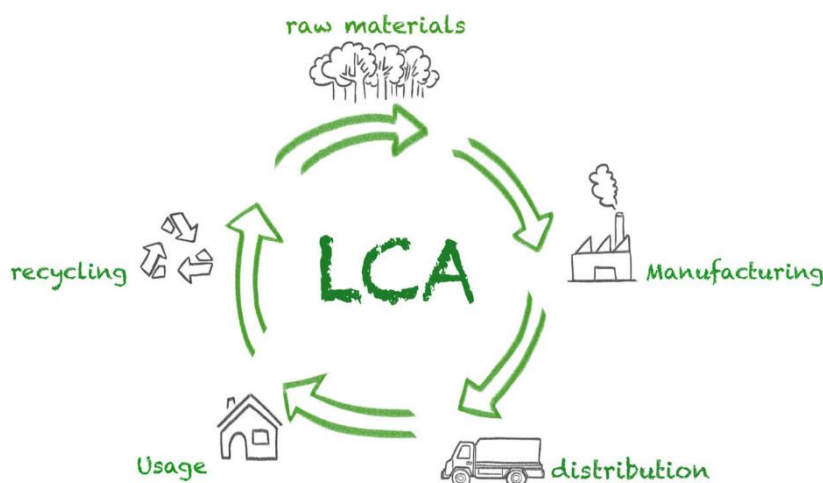


Figura 5: Ciclo LCA

In una prospettiva di sistema, i principali tipi di impatto sono generalmente quelli associati a *input*, *output* e *processi*. Tra i diversi esempi di input, a titolo non esaustivo, possiamo trovare: materie prime, acqua, energia termica, energia elettrica, prodotti chimici, trasporti. Alcuni esempi di output possono essere: prodotti finiti, coprodotti, emissioni di acque reflue nell'acqua, rifiuti riciclati, rifiuti smaltiti. Infine, alcuni esempi di processi possono includere lo stoccaggio, la pulizia, l'assemblaggio e l'imballaggio.

Al fine di identificare i problemi ambientali tipici di numerose industrie, tra cui il settore dei trasporti, il metodo LCA viene utilizzato per valutare il potenziale impatto ambientale di tecnologie e prodotti secondo diverse *categorie* di danno, tra cui le emissioni di gas serra e l'impatto sulla salute umana. L'LCA è una tecnica che, tra le altre sue funzioni, consente di valutare l'influenza sull'ambiente di diverse categorie d'impatto sulla base di dati emersi da indagini, compresa l'emissione di polveri e gas inquinanti. [14]

Una categoria d'impatto è una "serie di problematiche ambientali a cui possono essere attribuiti i risultati dell'analisi dell'inventario del ciclo di vita". Esempi di categorie d'impatto sono: emissioni di gas serra, acidificazione del suolo, eutrofizzazione delle acque, ecotossicità, esaurimento di combustibili fossili e minerali.

Sono diversi i metodi utilizzati per eseguire le analisi del ciclo di vita, tra cui:

- Il metodo ILCD Midpoint consigliato dalla Commissione europea in quanto rappresentativo delle condizioni europee;
- Il metodo IPCC sviluppato dal Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico e utilizzato per valutare l'impatto sulle emissioni di gas serra;
- Il metodo Cumulative Energy Demand che consente di determinare la domanda di energia cumulativa;
- Il metodo IMPACT2002+ che consente di compilare inventari di dati e di classificarli in base a più di una dozzina di categorie intermedie collegate alle quattro categorie di danno principali;
- Il metodo ReCiPe 2008 che rappresenta uno dei modelli di valutazione più completi [15].

L'LCA è oggetto delle norme internazionali *ISO 14040:2006 e ISO 14044: 2006/A e 2: 2020*, che identificano quattro fasi principali dell'LCA, come mostrano Figura 6 e Figura 12:

¹⁴ Burchart-Korol D., (2010): Ocena cyklu życia - nową techniką zarządzania środowiskowego, Wdrażanie nowoczesnych systemów i narzędzi zarządzania procesami technologicznymi. Praca zbiorowa. Pod red. Remigiusza Sosnowskiego, Gliwice: Wydaw. Politechniki Śląskiej, Monografia. num. 267, pagg. 231-242

¹⁵ Burchart-Korol D., Korol J., Czaplicka-Kolarz K.(2016) "Life cycle assessment of heat production from underground coal gasification", International Journal for Life Cycle Assessment, Vol. 21, num. 10, pagg. 1391-1403.

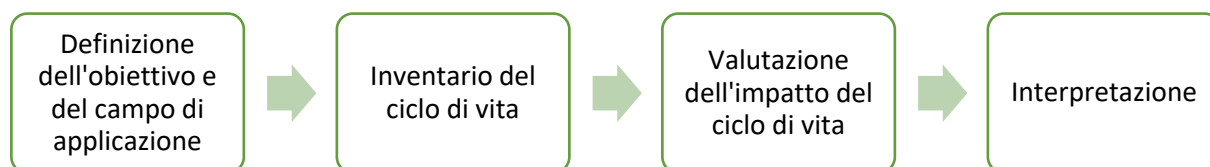


Figura 6: Fasi della valutazione del ciclo di vita

L'utilizzo dell'LCA per la misurazione degli impatti ambientali presenta numerosi vantaggi. L'LCA considera l'intero ciclo di vita del prodotto, a partire dall'estrazione e dall'acquisizione delle materie prime, passando per la produzione di energia e materiali, la fabbricazione e il funzionamento, fino al trattamento o allo smaltimento a fine vita. L'LCA viene utilizzata come mezzo per valutare in modo completo i processi, le scelte dei materiali e i loro effetti sulle emissioni di gas serra nel ciclo di vita e su altre categorie di impatto e danno [16]. I vantaggi includono, tra gli altri:

- Quantificazione dei principali impatti ambientali
- Identificazione delle opportunità di miglioramento degli aspetti ambientali dei prodotti nell'intero ciclo di vita
- Favorire il processo decisionale all'interno di un'organizzazione, poiché è possibile prendere decisioni solo su ciò che è stato effettivamente misurato in precedenza
- Marketing (ad esempio, soddisfare la domanda di prodotti ecologici dei consumatori e consentire loro di conoscere il grado di sostenibilità di un prodotto)
- Conoscere meglio i propri fornitori

Se consideriamo l'LCA applicata all'industria automobilistica, notiamo che rappresenta uno degli strumenti più completi per valutare la trasformazione dell'industria automobilistica e la transizione della stessa dai combustibili fossili convenzionali come il diesel e la benzina a quelli alternativi come il GNC, il GPL, l'elettricità e l'idrogeno. Questo tipo di analisi consente di includere il concetto di ciclo di vita nel processo decisionale, al fine di ottenere un'alternativa sostenibile e circolare.

2.4 IMPRONTE AMBIENTALI

Ai fini della valutazione dell'impatto ambientale, molte industrie fanno riferimento alle **impronte ambientali**. Le impronte ambientali possono essere valutate tramite la

¹⁶ Burchart-Korol D., Jursova S., Folęga P., Pustejovska P., (2020) "Life cycle impact assessment of electric vehicle battery charging in European Union countries", Journal of Cleaner Production, Vol. 257.

tecnica dell'LCA. L'impronta ambientale è un indicatore che si basa su più criteri, utilizzato per misurare le prestazioni ambientali di prodotti e servizi durante il loro ciclo di vita.

Nel 2013 la Commissione europea ha pubblicato una serie di raccomandazioni sull'uso di metodi comuni per la misurazione delle prestazioni ambientali lungo il ciclo di vita dei prodotti e delle organizzazioni: di conseguenza i singoli settori hanno approntato delle linee guida specifiche circa la metodologia di misurazione delle prestazioni ambientali dei prodotti e delle organizzazioni, ufficialmente denominate *PEFCR* (regole di categoria relative all'impronta ambientale di prodotto) e *OEFSR* (regole di settore relative all'impronta ambientale delle organizzazioni). La Commissione europea sta attualmente sviluppando nuove norme per il calcolo dell'impronta ambientale e l'etichettatura dei prodotti. *La raccomandazione della Commissione europea del 9 aprile 2013 relativa all'uso di metodologie comuni per misurare e comunicare le prestazioni ambientali nel corso del ciclo di vita dei prodotti e delle organizzazioni (2013/179/UE)* definisce la metodologia europea proposta per misurare le prestazioni ambientali di prodotti e imprese. Le raccomandazioni CE incoraggiano l'utilizzo del metodo di misurazione dell'impronta ambientale nelle strategie e nei programmi previsti per misurare le prestazioni ambientali nel corso del ciclo di vita di prodotti o imprese. In conformità alla raccomandazione della Commissione europea, per misurare il potenziale impatto ambientale di un prodotto durante suo ciclo di vita viene utilizzato il metodo **Product Environmental Footprint** (PEF), mentre per misurare il potenziale impatto ambientale di un'azienda nel suo ciclo di vita viene utilizzato il metodo **Organisation Environmental Footprint** (OEF).

La valutazione dell'impronta ambientale consiste in diverse fasi: definizione dello scopo e del campo di applicazione dell'analisi, identificazione delle risorse e delle emissioni, valutazione dell'impatto ambientale, interpretazione dei risultati e preparazione di un report. La valutazione dell'impronta ambientale di prodotti e aziende deve essere effettuata in linea con i principi di significatività, completezza, coerenza, accuratezza e trasparenza.

Per quanto riguarda il quadro delle impronte ambientali, l'obiettivo principale dell'Unione europea e dei paesi membri è l'uso efficiente delle risorse naturali limitate e l'eliminazione dei prodotti e delle tecnologie che esercitano un notevole impatto ambientale negativo. La metodologia di valutazione dell'impronta ambientale può diventare parte integrante della legislazione ambientale vincolante, dei sistemi di

gestione ambientale e dei programmi di appalti pubblici verdi, nonché di molte attività e iniziative che contribuiscono allo sviluppo della green economy, come viene comunemente definita; può inoltre diventare anche un elemento importante del processo decisionale nell'ambito della tutela ambientale.

Le impronte ambientali più significative sono:

- Impronta di carbonio (CF)
- Impronta idrica (WF)
- Impronta ecologica (EF)

L'impronta di carbonio è definita come la quantità di emissioni di CO₂ equivalente causate direttamente e indirettamente dalle emissioni di gas serra, o come la quantità totale di gas serra emessa durante l'intero ciclo di vita di un processo o di un prodotto [17]. La CF è espressa come massa equivalente di anidride carbonica per unità funzionale (UF) di un prodotto o servizio (kg CO₂eq/UF). La CF è anche definita come la somma delle emissioni di gas serra prodotte durante il ciclo di vita di un prodotto direttamente o indirettamente da una persona, impresa, prodotto o servizio.

L'impronta idrica (WF) è il volume di acqua dolce consumato nella fabbricazione di un prodotto, misurato durante l'intero processo produttivo. Si tratta di un indicatore multidimensionale da cui risulta la quantità di acqua consumata proveniente da una determinata fonte e la quantità di acqua contaminata da un determinato tipo di inquinamento. Il WF è un indicatore del consumo di acqua potabile e comprende non solo il consumo diretto di acqua ma anche quello indiretto. Si può fare una distinzione tra una componente blu (consumo di acque di superficie e sotterranee), una componente verde (consumo di acqua piovana) e un'impronta della componente grigia (acqua necessaria per assimilare l'inquinamento). L'impronta blu corrisponde al volume di acqua di superficie e sotterranea utilizzata. Il termine impronta verde si riferisce al consumo di acqua piovana, a meno che non venga scaricata, ad esempio, nel sistema di depurazione. Un aumento della quantità di acqua piovana utilizzata per la produzione o il consumo riduce l'impronta blu. Quando viene scaricata nel sistema di depurazione, l'acqua piovana può essere contaminata dalle acque reflue, generando così l'impronta grigia. Anche l'acqua piovana che defluisce dai terreni coltivabili contaminata da pesticidi o fertilizzanti può essere responsabile dell'impronta grigia. L'impronta grigia determina l'entità del

¹⁷ Burmistrz P., Chmielniak T., Czepirski L., Gazda-Grzywacz M.: Carbon footprint of the hydrogen production process utilizing subbituminous coal and lignite gasification. *Journal of Cleaner Production* Vol. 139, 2016, pagg. 858-865.

carico inquinante dell'acqua, che può essere espresso come il volume d'acqua necessario per diluire gli inquinanti che contiene a un livello tale che la loro concentrazione diventi accettabile dal punto di vista ambientale. L'acqua potabile è diventata una delle risorse naturali più rare e ambite, ed è quindi necessario iniziare a valutare quantitativamente il consumo di acqua per poter analizzare i processi o le singole fasi degli stessi in cui il consumo di acqua può essere ridotto.

L'impronta ecologica (EF) definisce l'impatto umano sull'ambiente. Questo indicatore mostra l'ampiezza di un'area bioproduttiva (terre, mari e oceani) necessaria a ottenere le risorse e produrre i beni consumati da chi vi risiede. L'EF è una misura utilizzata per valutare, sia a livello locale che globale, il potenziale rigenerativo della biosfera utilizzata direttamente o indirettamente dalle persone, con riferimento all'entità del potenziale biologico disponibile. L'EF si riferisce all'utilizzo diretto e indiretto della terra come risorsa.

2.5 CONFINI DEL SISTEMA

La delimitazione del sistema nell'LCA fa parte della fase di definizione degli obiettivi e del campo di applicazione descritta nella *norma ISO 14040:2006*.

Il confine del sistema definisce quali processi saranno inclusi o esclusi, e indica quali di questi devono essere compresi nell'analisi di un sistema di prodotto, compreso il fatto che il sistema produca o meno dei coprodotti che devono essere presi in considerazione dall'espansione o dall'assegnazione di risorse del sistema¹⁸.

La definizione dei confini del sistema si basa in parte su una scelta soggettiva effettuata durante la definizione del campo di applicazione, quando i confini vengono inizialmente stabiliti. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** mostra una rappresentazione schematica di un confine di sistema.

¹⁸ Il dettaglio delle fasi dell'LCA è disponibile nel capitolo 2.6 FASI LCA

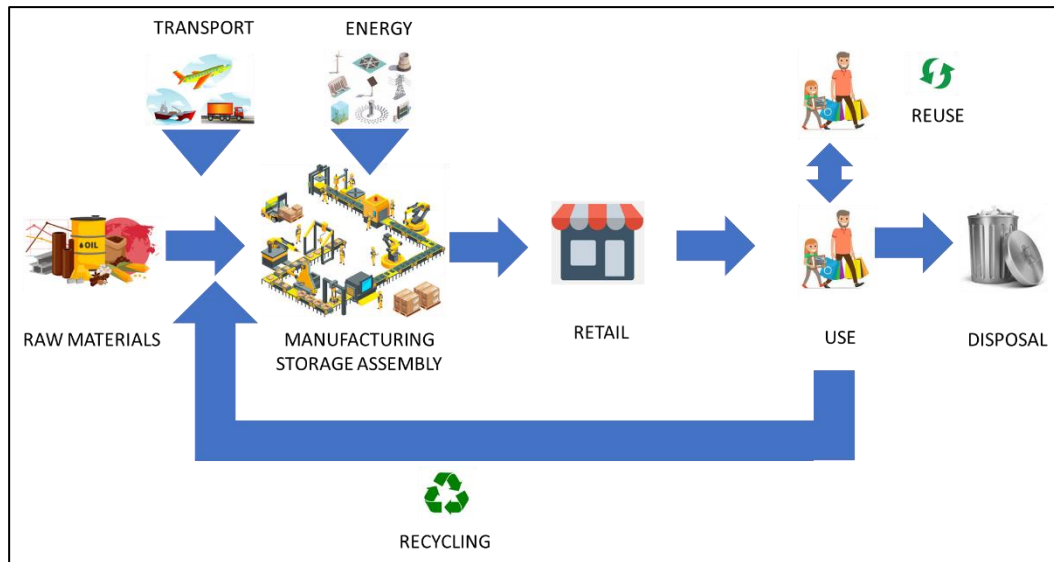


Fig.7 rappresentazione dei confini di un sistema LCA

Possiamo considerare i seguenti confini [19]:

Confini tra sistema tecnologico e natura. Un ciclo di vita inizia solitamente dal punto di estrazione delle materie prime e dai vettori dell'energia ottenuta dalla natura. Le fasi finali consistono normalmente nella generazione di rifiuti e/o nella produzione di calore

Area geografica. La geografia svolge un ruolo fondamentale nella maggior parte degli studi LCA: ad esempio le infrastrutture, come quelle per la produzione di elettricità, la gestione dei rifiuti e i sistemi di trasporto, variano da una regione all'altra. Inoltre, anche la sensibilità degli ecosistemi agli impatti ambientali varia a livello regionale.

Orizzonte temporale. I confini devono essere definiti non solo nello spazio, ma anche nel tempo. In sostanza, gli studi LCA vengono effettuati per valutare gli impatti attuali e prevedere gli scenari futuri. Le limitazioni dei confini temporali sono dati dalle tecnologie coinvolte, dalla durata di vita degli inquinanti, ecc.

Confini tra il ciclo di vita attuale e i cicli di vita correlati di altri sistemi tecnici. La maggior parte delle attività è interconnessa, pertanto le attività stesse devono essere isolate l'una dall'altra per poter essere sottoposte a ulteriori studi. Ad esempio, per la produzione di beni strumentali, è possibile valutare la fattibilità economica di processi nuovi e più rispettosi dell'ambiente rispetto alla tecnologia attualmente in uso. L'interrelazione dei sistemi di prodotto tende a essere molto complessa. Idealmente,

¹⁹ LCA as a Decision Support Tool for the Eco Production of Olive Oil, project web, disponibile all'indirizzo <http://www.ecoil.tuc.gr>, ultimo accesso febbraio 2022.

sarebbe necessario studiare anche i cicli di vita dei prodotti utilizzati per produrre i materiali e il prodotto in esame. Questo però porterebbe a un elenco infinito e complesso di afflussi e deflussi. Di conseguenza, è necessario stabilire limiti e confini per escludere determinati elementi che possono tuttavia alterare il risultato finale dello studio. Quanto più ridotte sono le dimensioni del sistema, tanto più il suo confine è netto; i sistemi di grandi dimensioni possono avere più confini poiché si interfacciano con più sistemi.

Al fine di individuare i confini, può risultare molto utile un diagramma del sistema, così come possono esserlo alcune scelte come la produzione e lo smaltimento dei beni strumentali, nonché i confini definiti dalla natura.

Esistono **quattro** opzioni principali per definire i confini di sistema utilizzati in uno studio LCA, oltre a un approccio “cradle to grave” (dalla culla alla tomba) **specifico** per il settore automobilistico (“Well to Wheel”, dal pozzo alla ruota):

- Cradle to Grave (dalla culla alla tomba)
- Cradle to Gate (dalla culla al cancello)
- Cradle to Cradle (da culla a culla)
- Gate to Gate (da cancello a cancello)
- Well to Wheel (dal pozzo alla ruota)

CRADLE TO GRAVE

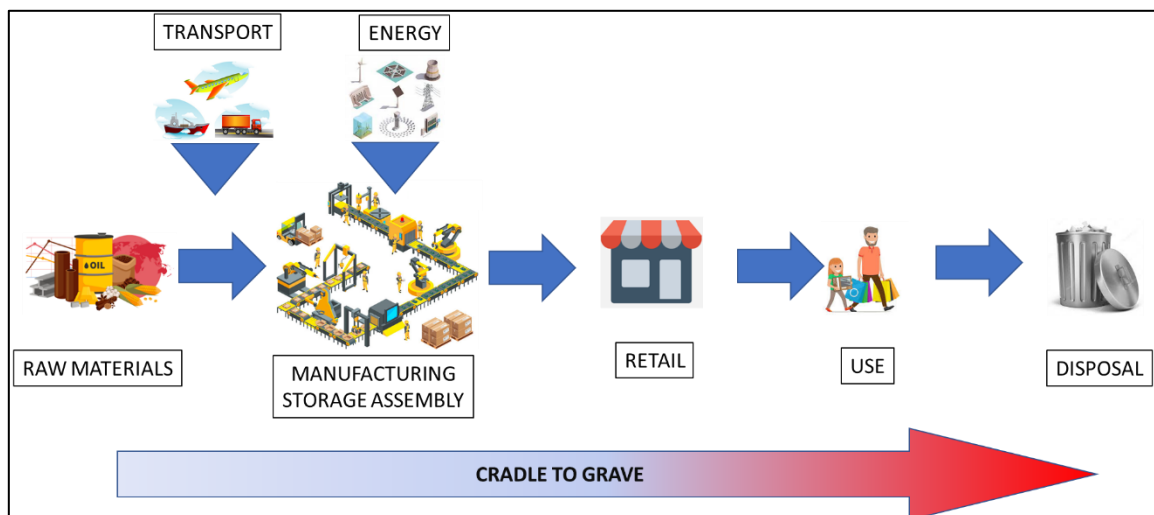


Figura 7: il diagramma Cradle to Grave

Questo confine comprende la catena di produzione dei materiali e dell'energia e tutti i processi che vanno dall'estrazione delle materie prime alla fase di produzione, trasporto e utilizzo, fino al trattamento di fine vita del prodotto.

Il Cradle to Grave è l'"approccio monouso convenzionale", considerato non più sostenibile alla luce degli obiettivi di sviluppo fissati dall'Europa per il 2030 [20]. Gran parte delle emissioni di gas serra è infatti dovuta proprio a questo approccio produttivo, basato sui combustibili fossili. Per essere conformi all'Accordo di Parigi [21] è pertanto necessario un cambiamento radicale dei modelli di produzione.

²⁰ Sustainable Development Goals, https://ec.europa.eu/international-partnerships/sustainable-development-goals_en, marzo 2022

²¹ L'Accordo di Parigi è un trattato internazionale giuridicamente vincolante sul cambiamento climatico. È stato adottato da 196 contraenti alla COP 21 di Parigi, il 12 dicembre 2015 ed è entrato in vigore il 4 novembre 2016.

CRADLE TO GATE

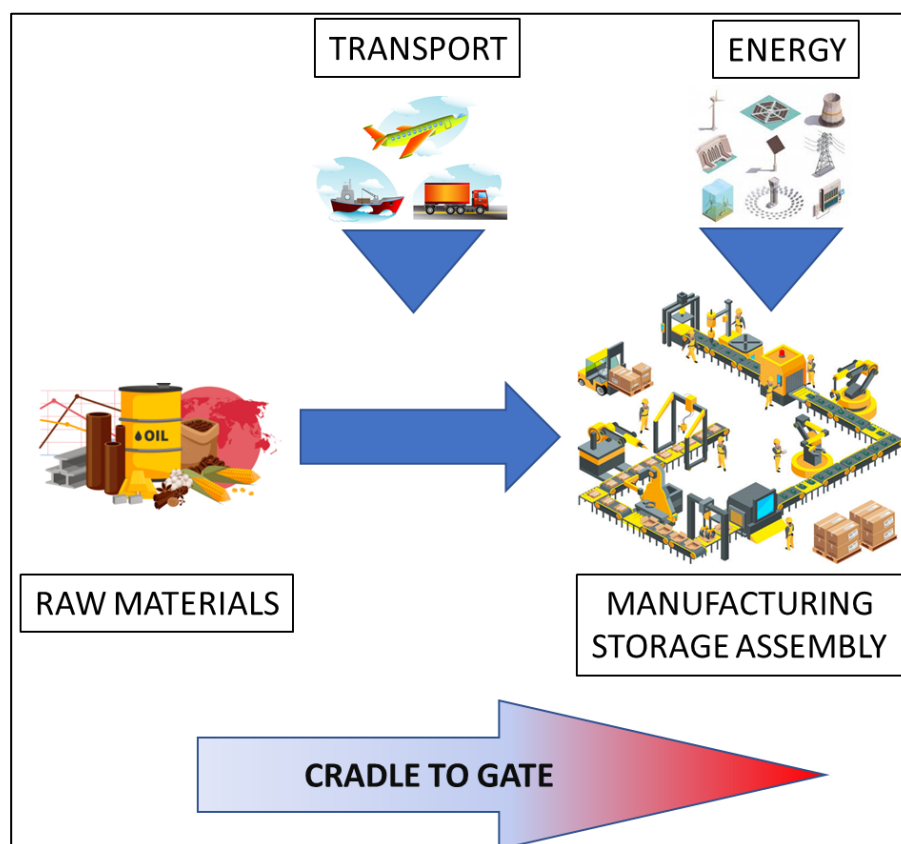


Figura 8: il diagramma Cradle to Gate

Questo confine comprende tutti i processi dall'estrazione delle materie prime fino alla fase di produzione (con "gate" si intende infatti il cancello dello stabilimento di produzione); viene utilizzato per determinare l'impatto ambientale della produzione di un prodotto, escludendo quindi la fase di utilizzo e smaltimento dello stesso. Si tratta di un'analisi parziale, utile nel processo di LCA applicato ai grandi sistemi.

CRADLE TO CRADLE

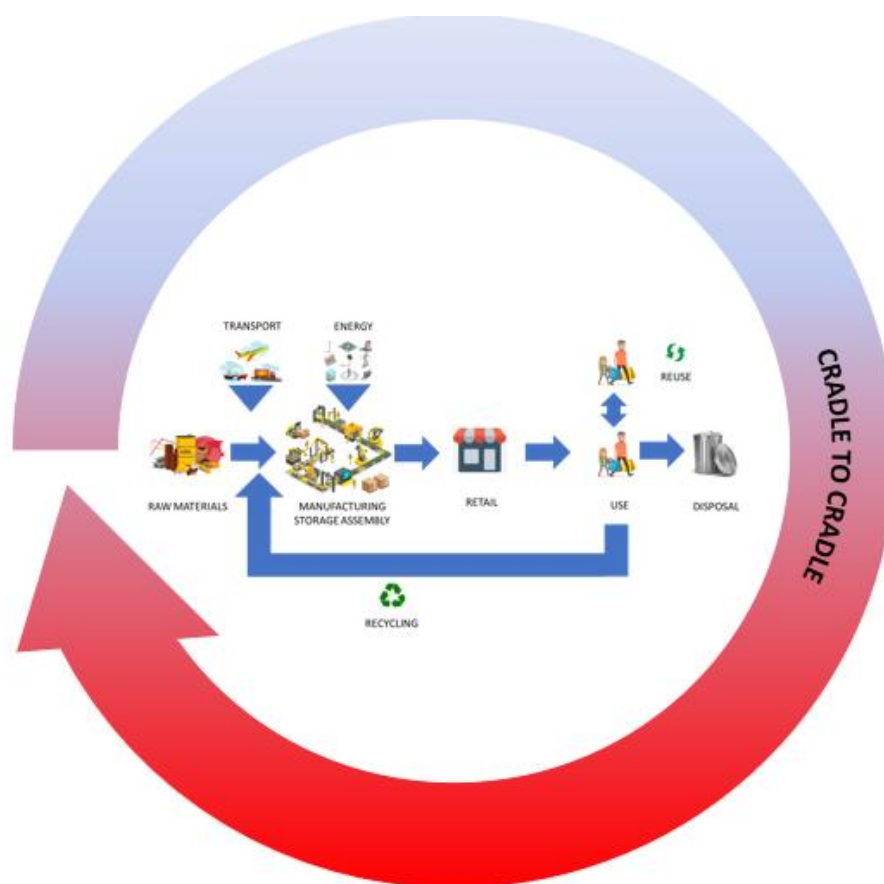


Figura 9: il diagramma Cradle to Cradle

Si tratta di un caso specifico del precedente confine di sistema Cradle to Grave, in cui la fase di trattamento fine vita consiste nel riciclaggio; viene utilizzato per ridurre al minimo l'impatto ambientale dei prodotti impiegando pratiche sostenibili di produzione, funzionamento e smaltimento e mira a incorporare la responsabilità sociale nello sviluppo del prodotto.

L'approccio Cradle to Cradle è uno strumento essenziale dell'economia circolare che consente di generare un'impronta positiva e di trasformare i processi produttivi riducendo al minimo i rifiuti. Gli ideatori dell'approccio Cradle to Cradle sono Michael Braungart e William McDonough ^[22], ed esplorano il confine del processo attraverso tre aspetti fondamentali:

²² "Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things", Michael Braungart e William McDonough, 2002

- Ogni cosa costituisce una risorsa per qualcos'altro: in natura, i rifiuti di un sistema diventano cibo per un altro. Tutto può essere progettato per essere successivamente scomposto e restituito all'ambiente sotto forma di sostanze nutritive, oppure per essere riutilizzato come materia prima per la creazione di nuovi prodotti.
- Utilizzare energia pulita e rinnovabile: gli esseri viventi prosperano grazie all'energia del sole. Allo stesso modo, è possibile realizzare prodotti utilizzando varie forme di energia rinnovabile, a tutela dell'ambiente e della salute.
- Celebrare la diversità: in tutto il mondo la geologia, l'idrologia, la fotosintesi e il ciclo dei nutrienti, adattandosi al luogo in cui si trovano, producono una sorprendente varietà di vita naturale e culturale.

GATE TO GATE

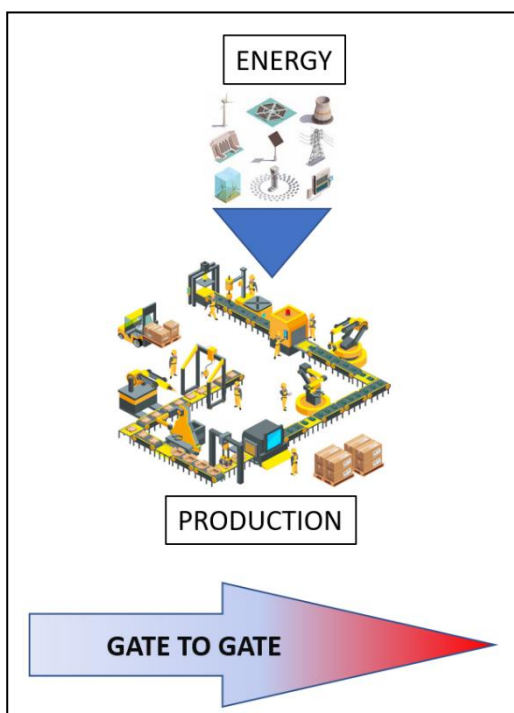


Figura 10: il diagramma Gate to Gate

Questo confine riguarda solo i processi della fase di produzione; viene utilizzato per determinare gli impatti ambientali di una singola fase o processo di produzione.

WELL TO WHEEL

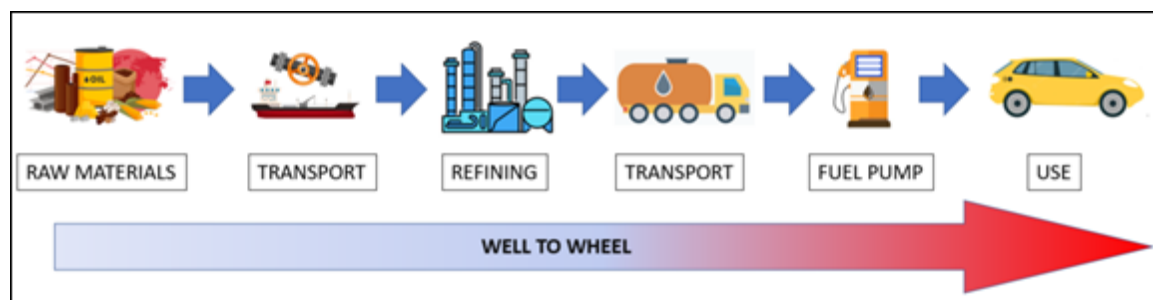


Figura 11: il diagramma Well to Wheel

Si tratta di un confine di sistema specifico utilizzato per valutare il consumo totale di energia (o l'efficienza di conversione dell'energia e l'impatto delle emissioni) di navi, aerei e veicoli a motore, compresa la loro impronta di carbonio (cfr. Figura 11) e i carburanti utilizzati in ciascuna di queste modalità di trasporto, utile per valutare gli impatti dell'uso dei carburanti tramite una valutazione Well to Wheel parallelamente a un tradizionale approccio Cradle to Grave.

2.6 FASI LCA

La valutazione del ciclo di vita è una metodologia che consente di valutare l'impatto ambientale associato a un sistema (prodotto, processo, servizio), attraverso l'analisi di energia e materiali consumati, rifiuti, logistica e trasporto, nonché delle emissioni rilasciate nell'ambiente lungo l'intero ciclo di vita.

Uno studio LCA deve essere strutturato secondo quattro fasi consequenziali ^[23] come indicato nella Figura 12: Obiettivo e campo di applicazione, inventario del ciclo di vita (LCI), valutazione dell'impatto del ciclo di vita (LCIA) e interpretazione.

²³ In conformità alle disposizioni della norma ISO 14040

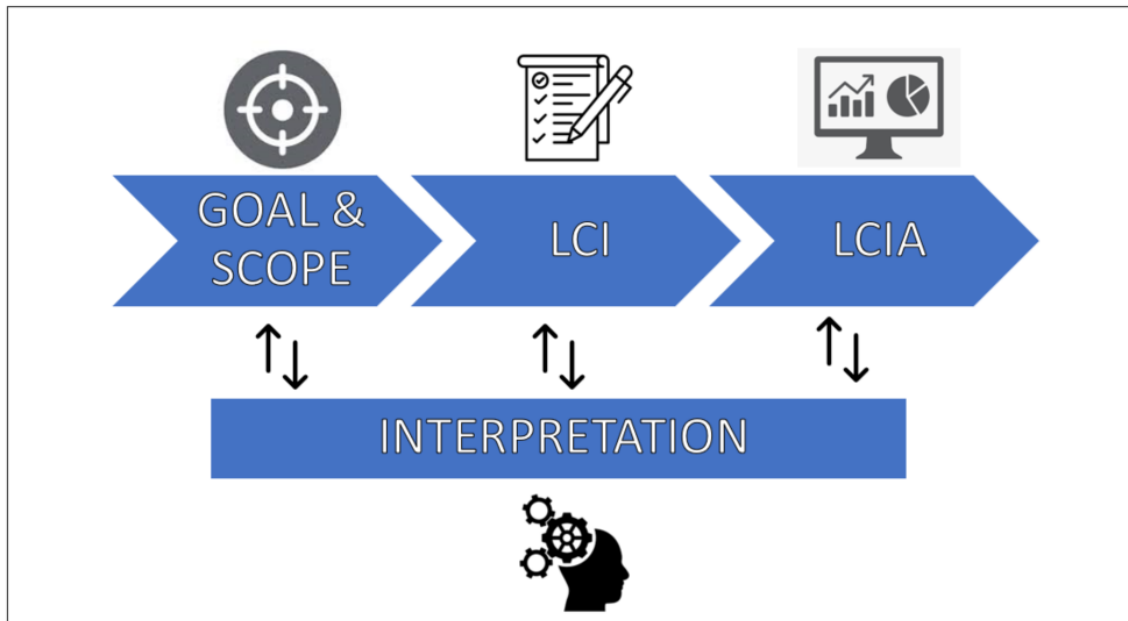


Figura 12: 4 fasi principali dell'LCA

OBIETTIVO E CAMPO DI APPLICAZIONE

La definizione degli obiettivi e dei campi di applicazione è fondamentale poiché grazie a questa fase è possibile **definire l'ambito** dello studio, identificare il **motivo** per cui viene effettuato e descriverne tutte le **caratteristiche**. In questa fase è obbligatorio definire:

- **l'obiettivo dello studio:** l'applicazione a cui è destinato e le ragioni per cui viene realizzato. I diversi approcci si basano su (i) confronto tra prodotti/servizi, (ii) confronto dell'oggetto dello studio con uno standard di riferimento, (iii) pianificazione dei miglioramenti da approntare per un prodotto/servizio esistente o (iv) progettazione di un nuovo prodotto/servizio;
- **l'unità funzionale:** deve essere coerente con l'obiettivo e il campo di applicazione. Si tratta del prodotto, servizio o funzione su cui impostare l'analisi e il confronto con le possibili alternative ([kg] di prodotto, [t] di rifiuti trattati, [kWh] di energia fornita, ...). L'unità funzionale indica l'oggetto di riferimento dello studio LCA in funzione del quale verranno normalizzati tutti i dati di input e output. Secondo la norma ISO 14040, lo scopo principale dell'unità funzionale è fornire un riferimento a cui collegare i flussi in uscita e in entrata ed è un riferimento necessario per garantire la comparabilità dei risultati dell'LCA.

- **i confini del sistema** [²⁴], necessari per definire quali processi saranno inclusi o esclusi dal sistema e per delimitare i processi da includere nell'analisi;
- **le categorie di dati** da raccogliere e analizzare: queste determinano la possibilità di raccogliere i dati stessi sul campo, misurarli, calcolarli, stimarli e ricavarli da database esistenti. Solitamente è possibile suddividere i dati raccolti in tre categorie: (i) *dati primari* (da indagini dirette), (ii) *dati secondari* (tratti dalla letteratura) e (iii) *dati terziari* (da stime e valori medi);
- i requisiti **di qualità dei dati**: devono essere coerenti in termini di copertura temporale, geografica e tecnologica, avere una corretta rappresentatività e riproducibilità e, naturalmente, derivare da una fonte affidabile.

INVENTARIO DEL CICLO DI VITA (LCI)

L'analisi dell'inventario è la fase più delicata e impegnativa di uno studio LCA. È qui che vengono definiti e quantificati i flussi di input e output nel ciclo di vita del sistema, attraverso un modello che lo rappresenta nel modo più affidabile possibile.

Per procedere con l'LCI, è utile adottare una rappresentazione a diagramma di flusso del processo [²⁵] la quale mostra i componenti di un sistema costituito da sequenze di processi (caselle) collegate da flussi di materiali (freccie).

Lo schema più rappresentativo, valido per la maggior parte dei sistemi industriali, serve a identificare i principali processi e interventi ambientali e può essere suddiviso in sette sequenze:

1. **Produzione principale**: questa sequenza evidenzia il processo prioritario di fabbricazione del prodotto; in questa fase sono evidenziate le principali fasi del processo e i principali flussi di materiali.
2. **Produzione secondaria o coprodotto**: questa sequenza si riferisce al processo di fabbricazione che avviene durante la produzione del prodotto principale.
3. **Produzione di materiali ausiliari**: questa fase va ad ampliare il diagramma di flusso del processo con altri processi che compaiono prima, durante e dopo la fabbricazione del prodotto; essa consentirà di analizzare l'estrazione, la

²⁴ cfr capitolo 2.5 CONFINI DEL SISTEMA

²⁵ Un diagramma di flusso rappresenta appunto un flusso di lavoro o un processo .
<https://en.wikipedia.org/wiki/Flowchart>, marzo 2022.

produzione e i componenti delle materie prime, e al contempo mostrerà uso, consumo, riciclo o riutilizzo del prodotto e i processi di gestione dei rifiuti.

4. **Produzione di energia:** questa sequenza riguarda la possibilità di recuperare energia da calore o elettricità.
5. **Consumo energetico:** questa sequenza tiene conto del consumo energetico dovuto ai vari processi.
6. **Trasporto:** questa sequenza riguarda il trasporto utilizzato per spostare il prodotto o il coprodotto e ha come riferimento la quantità di prodotto trasportata per chilometro.
7. **Trattamento dei rifiuti:** riguarda i trattamenti per la lavorazione dei rifiuti e dei materiali ausiliari.

Una volta delineato il processo, è possibile procedere con l'effettiva attività di raccolta dati. Questi saranno di due tipi: quelli relativi ai flussi in ingresso [²⁶](**input**) e quelli corrispondenti alle uscite [²⁷](**output**). I dati raccolti devono essere valutati sulla base di parametri quali l'età dei dati, la tecnologia di riferimento, il processo a cui i dati si riferiscono, i metodi di calcolo utilizzati per ottenere i valori medi.

Una volta raccolti, tutti i dati devono essere categorizzati (materie prime, energia, trasporti, ...) e archiviati in una **tabella di inventario**, passaggio fondamentale per la successiva fase di valutazione dell'impatto (LCIA).

VALUTAZIONE DELL'IMPATTO DEL CICLO DI VITA (LCIA)

Questa fase consente di determinare i potenziali effetti del sistema analizzato sull'ambiente, collegando i dati dell'inventario a specifiche **categorie d'impatto**, come indicato in Tabella 2.

Tabella 2: principali categorie d'impatto ambientale

IMPATTI SULL'ECOSISTEMA	IMPATTI UMANI	RISORSE IN ESAURIMENTO
Piogge acide	Agenti cancerogeni	Combustibile fossile
Cambiamento climatico	Riduzione dell'ozono	Foresta

²⁶ Materiali, trasporti ed energia

²⁷ Prodotti e gas emessi nell'aria, nell'acqua e nel suolo

Eutrofizzazione	Particolato	Acqua dolce
Cambiamento nell'uso del suolo	Smog	Terreni erbosi
Rifiuti solidi	Tossicità	Minerali
Tossicità		Suolo

Queste categorie d'impatto ambientale sono riconducibili a tre grandi settori della tutela ambientale, a loro volta direttamente collegati a tre aree di protezione

- Impatti sugli ecosistemi (ambiente naturale)
- Impatti umani (salute umana)
- Esaurimento delle risorse (in particolare quelle non rinnovabili)

Di conseguenza possono essere individuate le seguenti questioni ambientali:

- Potenziale esaurimento delle materie prime.
- Potenziale esaurimento delle fonti energetiche.
- Potenziale di riscaldamento globale (effetto serra). (GWP: Global Warming Potential).
- Potenziale di riduzione dello strato di ozono. (ODP: Ozone Depletion Potential).
- Ecotossicità dell'acqua e del suolo.
- Potenziale acidificazione. (AP: Acidification Potential).
- Tossicità per l'uomo.
- Eutrofizzazione. (NP: Nutrification Potential).

Le diverse tipologie di impatto possono abbattersi su scala locale, regionale o globale, riguardano diversi settori ambientali con effetti sulla salute umana, e questo viene determinato identificando il contributo del sistema nei confronti di fonti di energia primaria, effetto serra, riduzione dello strato di ozono, acidificazione, eutrofizzazione, smog fotochimico, rifiuti solidi:

ENERGIA PRIMARIA

Questo indicatore considera la domanda di energia primaria per l'intero ciclo di vita del prodotto considerato, tenendo conto, ad esempio, della trasformazione dei materiali

combustibili in elettricità. I materiali combustibili contribuiscono quindi a questo indicatore con il loro contenuto di energia primaria. In questo caso il fattore di caratterizzazione è il potere calorifico del materiale considerato.

EFFETTO SERRA

L'indicatore dell'effetto serra viene calcolato considerando, tra le sostanze emesse nell'aria, quelle che contribuiscono al potenziale di riscaldamento globale del pianeta Terra.

La quantità di massa di ciascuna sostanza, calcolata sull'intero ciclo di vita del prodotto, viene moltiplicata per un coefficiente di peso, chiamato potenziale di riscaldamento globale (GWP). Quindi, sommando i contributi delle varie sostanze, si ottiene il valore aggregato dell'indicatore. Le sostanze che contribuiscono all'effetto serra sono principalmente: CO₂, CH₄, N₂O, CFC, HCFC e HFC. La CO₂ è la sostanza di riferimento per questo indicatore, vale a dire che il suo coefficiente di peso è uguale a 1 e i valori dell'indicatore sono espressi in kg di CO₂ equivalente [kg CO₂].

RIDUZIONE DELLO STRATO DI OZONO

La riduzione dello strato di ozono stratosferico viene calcolata come l'indicatore precedente, ma in riferimento a sostanze diverse (CFC, HCFC) e con un diverso coefficiente di peso, chiamato potenziale di riduzione dell'ozono (ODP, Ozone Depletion Potential). In questo caso la sostanza presa come riferimento è un clorofluorocarburo [CFC-11].

ACIDIFICAZIONE

L'indicatore di acidificazione è collegato alle emissioni nell'aria di particolari sostanze acidificanti, come gli ossidi di azoto [NO_x] e gli ossidi di zolfo [SO_x]. La sostanza di riferimento è l'SO₂ e il coefficiente di peso è chiamato potenziale di acidificazione [AP, Acidification Potential].

EUTROFIZZAZIONE

Questo indicatore valuta l'effetto dell'eutrofizzazione [²⁸]. Le sostanze che contribuiscono al fenomeno dell'eutrofizzazione sono composti a base di fosforo [P] e

²⁸ ovvero l'aumento della concentrazione di nutrienti negli ambienti acquatici

azoto [N]. La sostanza di riferimento è il fosfato (PO_4) e il coefficiente di peso è chiamato potenziale di nitrificazione [NP, Nutrification Potential].

SMOG FOTOCHIMICO

Tutti i composti organici volatili che portano alla formazione fotochimica (in presenza di radiazione solare) di ozono troposferico sono raggruppate sotto il nome di *smog estivo* [29]. Il fattore di caratterizzazione è chiamato potenziale di creazione di ozono fotochimico (POCP, Photochemical Ozone Creation Potential) e la sostanza di riferimento è l'etilene [C_2H_4].

RIFIUTI SOLIDI

L'indicatore in questione raggruppa tutti i rifiuti solidi generati in qualsiasi attività del ciclo di vita di un prodotto, ad esempio durante la produzione di energia elettrica necessaria per un determinato processo, o durante la produzione di lamiere d'acciaio. Non esistono fattori di caratterizzazione per questo indicatore e ogni sostanza viene sommata alle altre semplicemente tenendo conto della quantità emessa in massa.

INTERPRETAZIONE

La fase di interpretazione consente di comprendere il risultato dello studio, contestualizzarlo e individuare possibili aree di **miglioramento** del sistema identificando i componenti a cui apportare modifiche per ridurre l'impatto ambientale dell'intero sistema;

È importante sottolineare che, sebbene la fase di interpretazione sia legata al risultato (finale) dello studio, come indicato in Figura 12, l'interpretazione dei dati è necessaria in ogni fase della metodologia LCA.

Durante l'attività di LCIA è necessario combinare i risultati tecnico-ambientali forniti dall'LCA con tutte le altre informazioni relative al prodotto oggetto di studio; informazioni economico-finanziarie e politico-sociali sul prodotto e informazioni sulla ricettività-soddisfazione dei consumatori e sul consenso dell'opinione pubblica, al fine di trovare un prodotto eco-compatibile o, in altre parole, al fine di prendere una decisione corretta sulla

²⁹ Lo smog viene spesso classificato come smog estivo o smog invernale. Lo smog estivo è associato soprattutto alla formazione fotochimica dell'ozono. Durante i mesi invernali, quando le temperature sono più rigide e le inversioni termiche sono frequenti, aumenta l'utilizzo di carbone e altri combustibili fossili per riscaldare case ed edifici. <https://en.wikipedia.org/wiki/Smog>, marzo 2022

politica di prodotto aziendale e sui programmi ambientali che l'azienda intende sviluppare in futuro.

È importante sottolineare che l'LCA, come tutte le metodologie basate sul confronto, non propone una soluzione assoluta, ma identifica un insieme di alternative tra le quali i decisori sceglieranno la migliore a loro avviso.

Gli obiettivi di questa fase sono i seguenti:

- Traduzione e interpretazione dei risultati.
- Verifica del raggiungimento degli obiettivi dello studio (iterazione), della qualità dei dati e dei limiti del sistema (analisi di sensibilità)
- Confronto delle possibili opzioni.

I risultati devono essere interpretati e rappresentati in modo da averne una percezione facilmente fruibile, cercando anche di delineare scenari diversi da quello considerato.

2.7 PUNTI CHIAVE DEL CAPITOLO



Riassunto

Al termine di questo capitolo, gli studenti comprenderanno i seguenti termini:

- Sostenibilità e sviluppo sostenibile
- Valutazione del ciclo di vita (LCA)
- Aspetto ambientale
- Impatto ambientale
- Input, output e processi
- Categorie d'impatto LCA
- Impronte ambientali
- Confini del sistema: cradle to grave, cradle to gate, cradle to cradle, gate to gate, well to wheel
- Fasi dell'LCA: obiettivo e campo di applicazione, inventario del ciclo di vita (LCI), valutazione dell'impatto del ciclo di vita (LCIA), interpretazione



Domande

- Cosa significano sostenibilità e sviluppo sostenibile?
- Quali sono le diverse dimensioni della sostenibilità e come possono essere descritte?
- Secondo la terminologia della norma ISO 14001, qual è il significato di "ambiente", "aspetto ambientale" e "impatto ambientale"?
- Come definiresti una "categoria d'impatto"?
- Quali sono i principali vantaggi generali dell'utilizzo dell'LCA?
- Confini di sistema: descrivili brevemente
- Fasi dell'LCA: descrivile brevemente

Abbreviazioni

AP - Potenziale di acidificazione

CF- Impronta di carbonio

RSI - Responsabilità sociale d'impresa

EF - Impronta ecologica

UF - Unità funzionale

PIL - Prodotto interno lordo

Emissioni GHG - Emissioni di gas serra

GPI - Genuine Progress Indicator

GWP - Potenziale di riscaldamento globale

LCA - Valutazione del ciclo di vita

LCC - Costo del ciclo di vita

LCI - Inventario del ciclo di vita

LCIA - Valutazione dell'impatto del ciclo di vita

LCSA - Valutazione della sostenibilità del ciclo di vita

NP - Potenziale di nitrificazione

ODP - Potenziale di riduzione dell'ozono

OEF - Organisation Environmental Footprint

PEF- Product Environmental Footprint

SDGs - Obiettivi di sviluppo sostenibile

SLCA - Social Life Cycle Assessment

WCED - Commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo

WF - Impronta idrica

POCP - Potenziale di creazione di ozono fotochimico

3. LCA NEL SETTORE AUTOMOBILISTICO: VEICOLI A CARBURANTE CONVENZIONALE

3. LCA NEL SETTORE AUTOMOBILISTICO: VEICOLI A CARBURANTE CONVENZIONALE.....	42
3.1 Motori A Combustione	44
Sviluppo Dei Motori A Combustione	46
3.2 Standard Europei Sulle Emissioni Dei Veicoli Stradali	50
Regolamenti Sulle Emissioni Delle Autovetture E Dei Veicoli Commerciali Leggeri	51
Regolamenti Sulle Emissioni Di Autocarri E Autobus Pesanti	54
3.3 Metodi Di Misurazione Del Consumo Di Carburante	57
3.4 Valutazione Del Ciclo Di Vita Dei Veicoli A Carburante Convenzionale - Caso Studio	63
Risultati Della Valutazione Dell'impronta Di Carbonio Dei Veicoli A Carburante Convenzionale.....	67
Risultati Della Valutazione Dell'impronta Idrica Dei Veicoli A Carburante Convenzionale.....	68
Risultati Della Valutazione Dell'impronta Delle Risorse Dei Veicoli A Carburante Convenzionale.....	69
3.5 Confronto Tra Trasporto Passeggeri Individuale E Pubblico	70
3.6 Punti Chiave Del Capitolo	81



Tempo di studio

120 minuti



Obiettivi

CONOSCENZE CHE GLI STUDENTI ACQUISIRANNO:

Dopo queste lezioni, gli studenti saranno in grado di:

- Avere una migliore conoscenza sul tema dello sviluppo dei motori a combustione e della valutazione del ciclo di vita dei veicoli a carburante convenzionale
- Inquadrare meglio i diversi principi di funzionamento dei motori a benzina, diesel e a combustione interna alternativi, i metodi di misurazione del consumo di carburante, i fattori determinanti per la valutazione delle diverse impronte dei veicoli con motore a combustione interna e i risultati delle misurazioni reali del consumo energetico e della produzione di gas serra da parte del trasporto privato e pubblico di passeggeri
- Conoscere le norme europee sulle emissioni dei veicoli stradali

COME IL CAPITOLO LI AIUTERÀ A COMPRENDERE L'ARGOMENTO:

In primo luogo, agli studenti verrà presentata una serie di informazioni teoriche sui motori a combustione interna attraverso una descrizione del loro sviluppo e una spiegazione dei principi del loro funzionamento. I limiti di emissione attualmente consentiti, che definiscono gli effetti negativi del funzionamento dei motori a combustione interna, sono indicati dalle normative europee sulle emissioni attualmente in vigore per autovetture, veicoli commerciali leggeri, autocarri e autobus. Gli studenti acquisiranno inoltre conoscenze sui vari metodi di misurazione del consumo di carburante grazie a una descrizione teorica di ciascun metodo integrata da una rappresentazione grafica dei cicli di guida. In seguito le nozioni generali sulla valutazione del ciclo di vita verranno applicate alla

questione dei veicoli a carburante convenzionale: questo fornirà agli studenti conoscenze sull'uso pratico della valutazione del ciclo di vita. Infine, le nozioni teoriche sono corredate da esempi di risultati di misurazioni specifiche del consumo e della produzione di gas serra di autovetture, autobus e treni in condizioni reali.

QUALI COMPETENZE SVILUPPERÀ IL CAPITOLO:

Il capitolo garantisce l'acquisizione di competenze tecniche per valutare al meglio i vantaggi o gli svantaggi dell'utilizzo di un particolare mezzo di trasporto (veicolo) sulla base delle sue caratteristiche tecniche e del tipo di carburante. Il capitolo sviluppa competenze e nozioni su come tutelare l'ambiente dal punto di vista del consumo energetico e delle emissioni di gas serra.

IN CHE CONTESTO GLI STUDENTI POTRANNO UTILIZZARE QUANTO ACQUISITO:

Gli studenti potranno utilizzare le conoscenze acquisite nei processi decisionali, in fase di valutazione della modalità di trasporto e del carburante più appropriati, tenendo conto della tutela ambientale e del mantenimento della mobilità sostenibile.



Teoria

3.1 MOTORI A COMBUSTIONE

Secondo l'Associazione dei costruttori europei di autoveicoli, più della metà delle autovetture europee (55,6%) è alimentata a benzina [30]. La Figura 13 rappresenta una ripartizione delle autovetture utilizzate nell'Unione europea per tipo di carburante. Nella maggior parte dei paesi membri le autovetture con piccoli motori a benzina sono più diffuse rispetto a quelle con motori di medie e grandi dimensioni.

³⁰Associazione dei costruttori europei di autoveicoli (ACEA). Disponibile su <https://www.acea.be>. Ultimo accesso febbraio 2022.

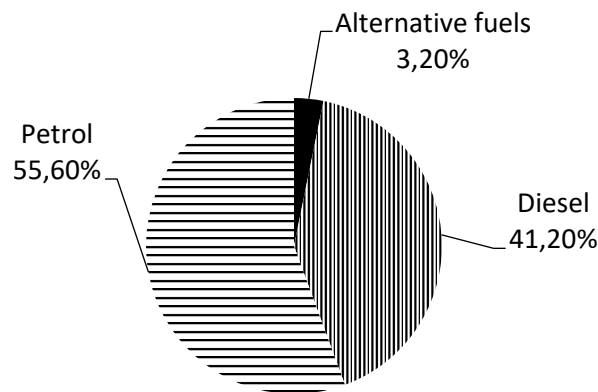


Figura 13: Autovetture utilizzate nell'Unione europea per tipo di carburante [30].

Un motore a combustione interna è un motore che funziona in base al principio della combustione del carburante, ed è pertanto chiamato anche motore termico. Quando il carburante viene bruciato, l'energia chimica si converte in lavoro meccanico. La reazione chimica avviene durante la combustione del motore, che genera energia termica e che, utilizzando il mezzo gassoso adatto, converte la suddetta energia chimica in lavoro meccanico. Il mezzo gassoso utilizza l'energia in due modi: 1. energia potenziale dei motori a combustione interna alternativi (pressione), 2. energia cinetica delle turbine a combustione (velocità attuale del flusso) [31].

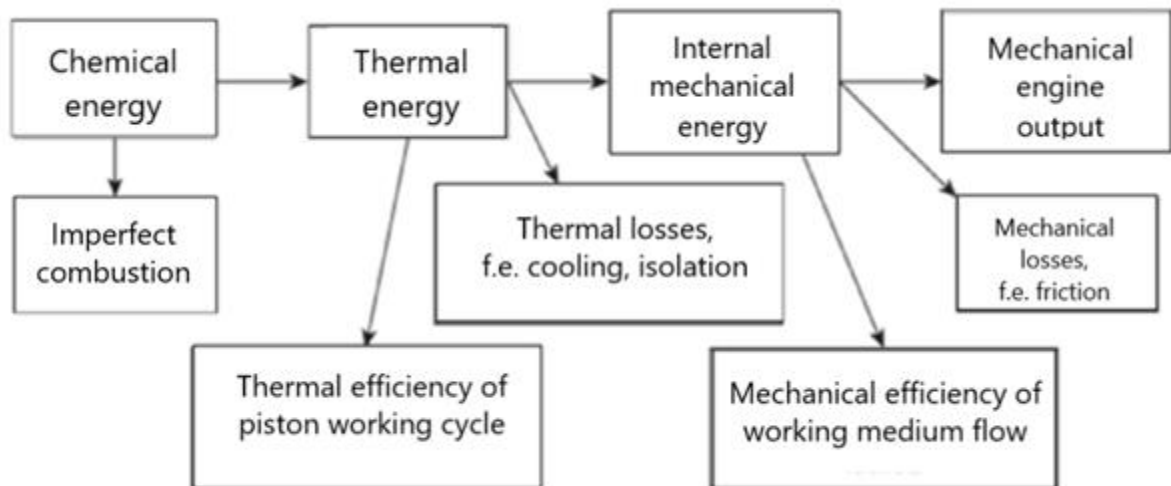


Figura 14: Diagramma di un motore a combustione interna e della conversione dell'energia generata

³¹ Hromádko J., Höning V., Miler P. Spalovací motory, Praha, Grada, 2011, 296 pagg.

La Figura 14 mostra il diagramma delle energie successivamente generate dai motori a combustione interna che originano dal carburante. L'energia chimica viene convertita in lavoro meccanico dal motore a combustione interna.

SVILUPPO DEI MOTORI A COMBUSTIONE

I motori a combustione interna iniziarono a prendere piede dopo l'invenzione dei primi mezzi di trasporto, quando gli individui si resero conto di come tali veicoli semplificassero la vita e il lavoro. Lo sviluppo dei motori a combustione interna è anche associato a effetti negativi sulla natura, come l'utilizzo di minerali, l'inquinamento ambientale, l'effetto serra, le piogge acide e la riduzione dell'ozono.

MOTORE A BENZINA

Nel 1786, l'inventore francese Phillipe Lebon fece richiesta per brevettare il motore a gas. Ad oggi non è noto se abbia costruito un motore del genere o meno. Nel 1807 l'inventore Isaac de Rival ottenne il brevetto per il suo veicolo alimentato dal motore a combustione di gas, che funziona secondo il principio della combinazione di una miscela di gas esplosivi e aria accesa da una scintilla elettrica sotto il pistone. In seguito, l'inventore J.J. Etienne Lenoir brevettò il primo motore a gas utilizzabile, quando nel 1860 creò il motore a due tempi che si avviava con una scintilla elettrica. Inoltre, tra il 1860 e il 1863, lo stesso Etienne Lenoir fu il primo a creare un motore alimentato da un carburante liquido: la benzina. Nel 1879 anche K. Benz ricevette il brevetto per il motore a combustione interna a gas a due tempi, grazie al quale vennero realizzati veicoli dotati di motore a gas ^[32].

La Figura 15 mostra il veicolo a tre ruote alimentato dal motore a benzina a quattro tempi, il cui funzionamento è simile a quello del motore a diesel a quattro tempi, con la principale differenza che l'aria pulita viene aspirata nei cilindri e, una volta che questa è stata riscaldata e compressa, nei cilindri viene iniettato il diesel.

Il principio di funzionamento del motore a quattro tempi ^[33]:

1. **ASPIRAZIONE** - Il pistone si sposta verso il basso, lo spazio nella camera sopra al pistone stesso aumenta e le valvole di aspirazione si aprono. Di conseguenza, la pressione atmosferica è più alta della pressione sopra il

³²Rauscher J. Zoznam použitých pojmov zo spaľovacích motorov. Bratislava 2005
<<http://www.iae.fme.vutbr.cz/userfiles/ramik/files/Spalovaci%20motory%202005.pdf>>.

³³<https://autoride.sk/zazihovy-motor-jeho-funkcia-v-skratke>

pistone, che oltre all'aria fornisce anche il carburante ai cilindri. Carburante + aria = miscela infiammabile

2. **COMPRESSIONE** - Il pistone si muove verso l'alto e comprime la miscela che si riscalda: di conseguenza la pressione aumenta. Pressione e temperatura elevate favoriscono l'evaporazione della miscela di aria e carburante, rendendola più esplosiva.
3. **ESPANSIONE** - In questa fase avviene il processo di combustione, in cui la scintilla sulla candela scatta e accende la miscela compressa. Dopo l'accensione, la miscela si espande e il pistone si muove verso il basso.
4. **SCARICO** - Le valvole di scarico si aprono per favorire l'uscita dei gas di scarico dal cilindro.
- 5.

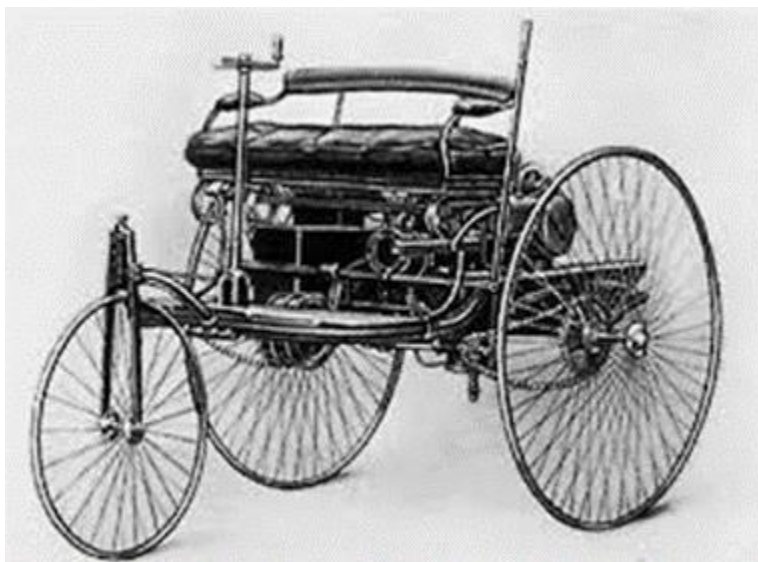


Figura 15 K. Benz - il primo veicolo a tre ruote con motore a quattro tempi [34]

Vantaggi dei motori a benzina:

1. fabbricazione più semplice e meno costosa;
2. i motori a benzina sono più potenti;
3. più adatti per i percorsi più brevi, perché il tempo necessario a raggiungere la temperatura di esercizio è decisamente minore.

MOTORE DIESEL

³⁴<https://www.superstock.com/asset/transport-transportation-car-vehicle-variants-benz-first-three-wheeled-motor/4430-4122>

Nel 1892, Rudolf Diesel ottenne il brevetto per il motore diesel. L'ingegnere creò il prototipo del motore a quattro tempi alimentato a cherosene irrorato nel cilindro utilizzando aria compressa. Era il motore ad accensione spontanea. In passato i motori diesel erano considerati motori economici. Oggi questi motori sono economici e potenti^[32].

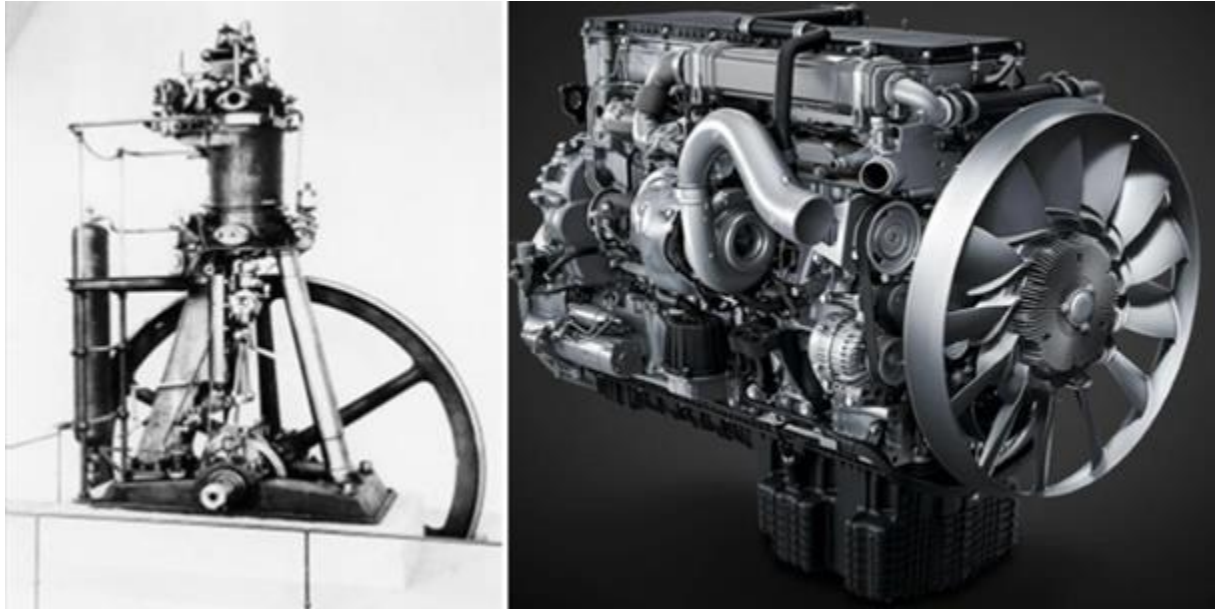


Figura 16: motore diesel storico e moderno ^[35]

Principio di funzionamento ^[36]:

1. **ASPIRAZIONE** - l'albero motore ruota da 0° a 180°: è la fase in cui l'aria entra nel cilindro attraverso una valvola aperta.
2. **COMPRESSIONE** - l'albero motore ruota da 180° a 360°: è la fase in cui il pistone fa sì che l'aria nella camera venga compressa 16-25 volte e raggiunga la temperatura di 700-900°C.
3. **COMBUSTIONE** - l'albero motore ruota da 360° a 540° e inietta il carburante, che viene poi infiammato. La combustione genera sostanze che fanno sì che il pistone si muova verso il basso.
4. **SCARICO** - l'albero motore ruota da 540° a 720° rispetto alla posizione di aspirazione. Il pistone si muove verso l'alto, i gas combusti vengono scaricati.

Vantaggi dei motori diesel^[36]:

35

https://www.reddit.com/r/MechanicalEngineering/comments/ojnpcp/rudolf_diesel_who_invented_the_diesel_engine/

³⁶<https://www.autodoc.sk/info/dieselovy-motor-zaklady>

1. la vita utile del motore diesel è il doppio di quella del motore a benzina;
2. consuma in media il 30% di carburante in meno rispetto al motore a benzina;
3. Il motore diesel brucia il carburante subito dopo la messa in funzione, garantendo così coppie elevate a velocità inferiori.

MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA ALTERNATIVI

Nonostante l'esistenza di motori a combustione interna alternativi convenzionali collaudati, sono stati creati anche motori a combustione interna alternativi che, tuttavia, non si sono successivamente dimostrati ecologici ed economici, ponendo così fine al loro sviluppo^[32].

Motori a pistoni rotanti

Il motore a pistoni rotanti, chiamato anche motore Wankel, è stato l'unico a entrare in produzione di serie con un solo tipo di motore. Si tratta di un motore utilizzato per la prima volta nell'auto NSU Prinz e successivamente nella produzione dell'auto sportiva Mazda RX-8^[32].

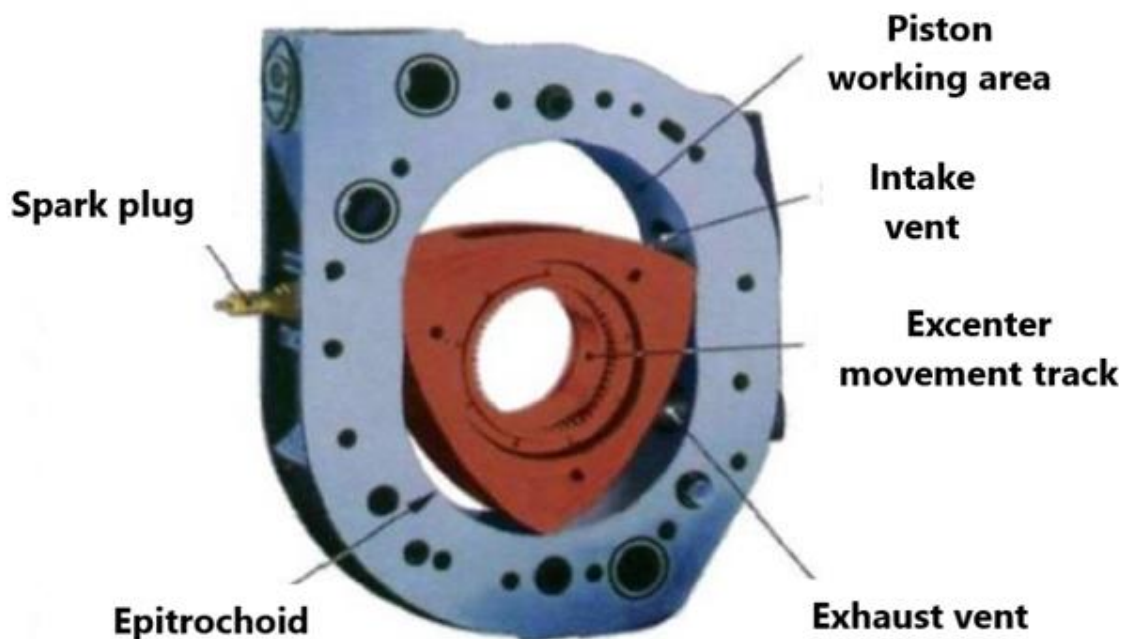


Figura 17: Motore Wankel ^[37]

La Figura 17 illustra le varie parti del motore Wankel. Il motore è costituito dalla candela, la cui funzione è quella di generare la scintilla che avvia la combustione. È inoltre

³⁷<http://www.autorubik.sk/clanky/wankelov-motor/>

composto da superficie di lavoro, canale di aspirazione, orbita eccentrica, canale di scarico ed epitrocoide.

Motore Stirling

Nel 1816 Robert Stirling creò il motore termico alternativo, in grado di ottenere l'energia per il ciclo di funzionamento da una fonte esterna. I motori Stirling non erano tra i più vantaggiosi in termini di costi e progettazione, tuttavia i loro vantaggi rispetto ad altri motori includevano una bassa rumorosità e basse emissioni in fase di scarico. Si tratta di un motore a combustione esterna^[31].

Turbina a combustione

La turbina a combustione ha trovato applicazione soprattutto negli aerei militari e da trasporto, ma anche negli elicotteri, nelle locomotive o nel settore del trasporto marittimo. Tutti i mezzi citati sono azionati da turbine a combustione. La turbina a combustione non veniva particolarmente utilizzata nel trasporto su strada. L'unico marchio di autovetture ad utilizzare la turbina a combustione è stato ROVER. Attualmente le case automobilistiche stanno studiando la riduzione del consumo di carburante in funzione di un aumento della temperatura dei gas di scarico davanti alla turbina. La temperatura dovrebbe salire fino a 1500°C, il che è possibile solo quando si utilizzano materiali ceramici, ad esempio sulle pale dei rotori delle turbine^[31].

I vantaggi dati dai motori a combustione interna sono la rapidità di messa in funzione, la possibilità di progettarli in modo che possano essere alimentati con diversi carburanti, in dimensioni e per scopi diversi; i motori a combustibile liquido operano con un basso consumo di carburante e i motori alternativi a combustione interna hanno un'elevata conversione energetica. Gli svantaggi dei motori a combustione interna comprendono, in particolare, gli effetti negativi sull'ambiente, sulla salute umana e su altri organismi, la necessità di una fonte esterna per l'avviamento e la loro vita utile limitata. I motori a combustione interna rappresentano anche una grave fonte di emissioni acustiche^[34].

3.2 STANDARD EUROPEI SULLE EMISSIONI DEI VEICOLI STRADALI

L'Unione europea ha creato una serie di direttive CE/CEE valide per tutti i paesi membri europei. In seguito, le direttive sono diventate veri e propri regolamenti dell'UE.

Essi si dividono in due gruppi fondamentali:

1. Regolamenti sulle emissioni delle autovetture e dei veicoli commerciali leggeri (EURO 1, EURO 2, EURO 3, EURO 4, EURO 5, EURO 6);
2. Regolamenti sulle emissioni di autocarri e autobus pesanti (EURO I, EURO II, EURO III, EURO IV, EURO V, EURO VI).

I veicoli vengono classificati in base al peso: il primo gruppo comprende veicoli fino a 2610 kg. Nel secondo gruppo si trovano veicoli con un peso superiore a 2610 kg. I limiti di emissione europei riguardano i motori diesel (diesel), ma anche i motori a benzina (GPL, benzina, gas naturale, ecc.). Gli standard sulle emissioni diesel di CO sono più severi: i valori di NO_x sono più elevati. I motori ad accensione comandata non devono essere sottoposti alla misurazione del particolato nella fase EURO 4. Negli standard EURO 5 e 6 viene introdotta la massa delle emissioni di particolato. I regolamenti sulle emissioni disciplinano la quantità massima di inquinanti nei gas di scarico dei motori.

Le emissioni regolamentate includono:

1. Particolato (PM) - si forma solo nei motori diesel, è costituito da carbonio, cenere, fuliggine, residui di olio o carburante incombusto;
2. Ossidi di azoto (NO_x) - si formano per ossidazione dell'azoto aggiunto alla camera di combustione insieme all'ossigeno destinato all'ossidazione del combustibile o all'ossigeno contenuto nei combustibili;
3. Idrocarburi (HC) - si formano dal combustibile in condizioni di scarsa ossidazione, misurati anche come THC o NMHC;
4. Monossido di carbonio (CO) - si forma a causa di una combustione imperfetta, quando manca l'ossigeno nella miscela di combustione.

REGOLAMENTI SULLE EMISSIONI DELLE AUTOVETTURE E DEI VEICOLI COMMERCIALI LEGGERI

Tabella 3: Limiti di emissione Euro 5

		Peso di riferimento (Pr) (kg)	Valori limite					
			Massa di monossido di carbonio (CO)		Massa di tutti gli idrocarburi (THC)		Massa di idrocarburi non metanici (NMHC)	
			L1 (mg·km ⁻¹)		L2 (mg·km ⁻¹)		L3 (mg·km ⁻¹)	
Categoria	Classe		PI	CI	PI	CI	PI	CI
M	-	Tutti	1000	500	100	-	68	-
	I	RM≤1305	1000	500	100	-	68	-
	II	1305<RM≤1760	1810	630	130	-	90	-

N1	III	1760<RM	2270	740	160	-	108	-
N2			2270	740	160	-	108	-
		Peso di riferimento (Pr) (kg)	Massa di ossido di azoto (NO _x)		La somma di tutti i pesi (THC+NO _x)		Massa di particolato (PM)	
			L4 (mg·km ⁻¹)		L2+L4 (mg·km ⁻¹)		L5 (mg·km ⁻¹)	
Categoria	Classe		PI	CI	PI	CI	PI (2)	CI
M	-	Tutti	60	180	-	230	5	5
N1	I	RM≤1305	60	180	-	230	5	5
	II	1305<RM≤1760	75	235	-	295	5	5
	III	1760<RM	82	280	-	350	5	5
N2			82	280	-	350	5	5

Fonte ^[38] (2) *Gli standard sulla massa di particolato per i motori ad accensione comandata si applicano solo ai veicoli dotati di motori a iniezione diretta.*

PI = accensione a scintilla, CI = accensione diesel

I limiti di emissione sono stati regolamentati per la prima volta dalla direttiva 70/220/CEE del 2004, poi sostituita dal regolamento CE 715/2007 del 2007. Il regolamento (UE) 2019/631 del Parlamento e del Consiglio europeo del 17 aprile 2019 che si applica alle autovetture e ai veicoli commerciali nuovi concerne nuovi standard di emissione e sostituisce quindi i regolamenti (CE) n. 443/2009 e (UE) n. 510/2011 (PARLAMENTO EUROPEO E CONSIGLIO DELL'UNIONE EUROPEA, 2019).

Il regolamento (UE) 2019/631 mira alla conformità all'Accordo di Parigi per il periodo 2021-2030, garantendo un trasporto stradale più ecologico, riducendo le emissioni elevate e quindi le emissioni di gas serra. L'Accordo di Parigi stabilisce limiti di emissione di CO₂ per le nuove autovetture e i nuovi veicoli commerciali leggeri, inoltre mira a ridurre le emissioni di gas serra del 30% entro il 2030 rispetto al 2005 ^[38].

- EURO 1 (1993) - introdotto dalla direttiva 91/441/CEE, ulteriormente modificata dalla 93/59/CEE;
- EURO 2 (1996) - introdotto dalla direttiva 94/12/CE, ulteriormente modificata dalla 96/69/CE;
- EURO 3/4 (2000/2005) - introdotti dalla direttiva 98/69/CE, ulteriormente modificata dalla direttiva 2002/80/CE;

³⁸EUR - Lex, sito web ufficiale dell'Unione europea. Disponibile all'indirizzo <https://eur-lex.europa.eu>, ultimo accesso febbraio 2022.

- EURO 5/6 (2009/2014) - introdotto dal regolamento CE 715/2007 e dal regolamento di esecuzione CE 692/2008.

La norma Euro 5 ha introdotto come primo standard i filtri antiparticolato (DPF/FAP) per tutti i nuovi veicoli diesel. Il DPF/FAP è il filtro installato sul sistema di scarico e integrato dal convertitore catalitico, che mira a catturare fino al 99% delle particelle.

Per soddisfare i nuovi standard di emissione Euro 6, alcuni produttori hanno introdotto la riduzione catalitica selettiva, in cui viene iniettato l'AdBlue nello scarico del motore diesel.

Tabella 4: Limiti di emissione Euro 6

Categoria		Classe	Peso di riferimento (Pr) (kg)	Valori limite					
				Massa di monossido di carbonio (CO)		Massa di tutti gli idrocarburi		Massa di idrocarburi non metanici (NMHC)	
				L1 (mg·km ⁻¹)		L2 (mg·km ⁻¹)		L3 (mg·km ⁻¹)	
			PI	CI	PI	CI	PI	CI	
M	-	Tutti		1000	500	100	-	68	-
N1	I			1000	500	100	-	68	-
	II			1810	630	130	-	90	-
	III			2270	740	160	-	108	-
N2				2270	740	160	-	108	-
Categoria		Classe	Peso di riferimento (Pr) (kg)	Massa di ossido di azoto (NO _x)		La somma di tutti i pesi (THC+NO _x)		Massa di particolato (PM)	
				L4 (mg·km ⁻¹)		L2+L4 (mg·km ⁻¹)		L5 (mg·km ⁻¹)	
				PI	CI	PI	CI	PI (4)	CI
M	-	Tutti		60	80	-	170	5	5
N1	I			60	80	-	170	5	5
	II			75	105	-	195	5	5
	III			82	125	-	215	5	5
N2				82	125	-	215	5	5

Fonte ^[38](4) Gli standard sulla massa di particolato per i motori ad accensione comandata si applicano solo ai veicoli dotati di motori a iniezione diretta.

PI = accensione a scintilla, CI = accensione diesel

REGOLAMENTI SULLE EMISSIONI DI AUTOCARRI E AUTOBUS PESANTI

I regolamenti sulle emissioni stabiliscono che i veicoli devono essere conformi ai limiti previsti per tutta la loro vita utile, a seconda della categoria.

Tabella 5: Norme EURO 0, I, II, III, IV, V, EEV

Classe	Anno di produzione/Data di prima immatricolazione
EURO 0, I, II	1992, <85 kW
	1992, >85 kW
	1996.10
	1998.10
EURO III	1999.10 EEVs
	2000.10
EURO IV, V, EEV	2005.10
	2008.10
	2013.01

Fonte [39]

Lo standard EURO V definisce il cosiddetto EEV, un veicolo ecologico migliorato e più ecologico. EURO 0 rappresenta una classe di emissioni che non può essere determinata ricorrendo alla tabella.

Qualora non fosse possibile determinare la classe di emissione del veicolo dalla targa, dal libretto di circolazione o simili, potrà essere determinata secondo la direttiva dell'Unione europea in base a quanto riportato sulla scheda tecnica o sul libretto di circolazione. Ad esempio sul libretto di circolazione in corrispondenza della dicitura "(V. 9)"^[39].

Tabella 6: Vita utile del veicolo

Categoria del veicolo	Fase	
	Euro IV-V	Euro VI
M ₁ N ₁ M ₂	100.000 km/5 anni	160.000 km/5 anni
N ₂ N ₃ ≤ 16 t M ₃ classe I, classe II, classe A e classe B ≤ 7,5 t	200.000 km/6 anni	300.000 km/6 anni
N ₃ > 16 t M ₃ classe III e classe B > 7,5 t	500.000 km/7 anni	700.000 km/7 anni
Legenda: classe I - autobus urbano (>22 posti) classe II - autobus regionale (>22 posti) classe III - pullman (>22 posti) classe A - autobus urbano (≤22 posti) classe B - pullman (≤22 posti)		

Tabella 6 mostra la vita utile di ogni veicolo secondo le emissioni previste.

La riduzione delle emissioni di gas di scarico è regolata dal più dettagliato regolamento sulle emissioni EURO VI.

³⁹Determinazione della classe di emissione. Disponibile all'indirizzo https://www.emyto.sk/files/2017-03/SVOP_03_Emisna_trieda_v4.0_svk.pdf. Ultimo accesso febbraio 2022

Gli aspetti della regolamentazione consistono in:

- Introduzione di un limite di emissioni di ammoniaca;
- Applicazione del limite per il particolato, che porterà a una riduzione fino al 95%;
- Introduzione di standard di emissione per Europa, Nord America e Giappone;
- Estensione dei requisiti di emissione per i veicoli più pesanti e simili fino a 700.000 km o 7 anni di vita utile.

Figura 18 mostra le normative sulle emissioni EURO I-VI a confronto e la riduzione dei limiti di emissione. EURO VI prevede la riduzione significativa degli ossidi di azoto e del particolato, inquinanti che sono interdipendenti in modo sproporzionato. Ciò significa che meno solidi ci sono, maggiore è la presenza di ossidi di azoto.

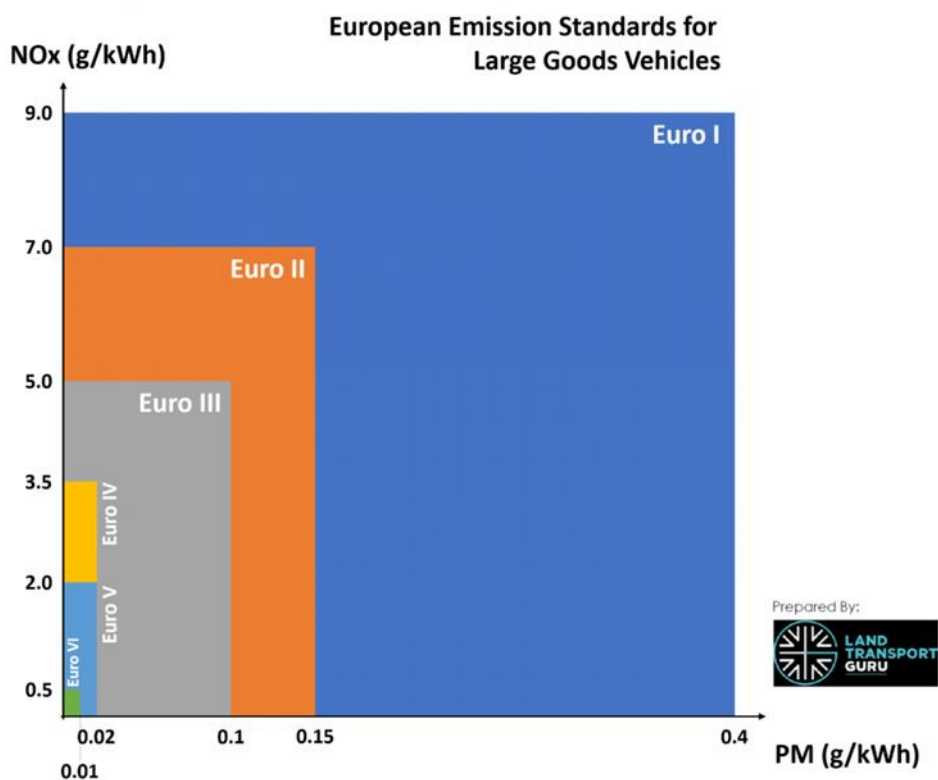


Figura 18: Normativa EURO 1-5

3.3 METODI DI MISURAZIONE DEL CONSUMO DI CARBURANTE

Per determinare il consumo di carburante, è necessario seguire la metodologia che stabilisce la procedura e le condizioni di misurazione. Deve essere applicata nel modo più preciso possibile e deve inquadrare il consumo del veicolo nel modo più oggettivo possibile. Al fine di garantire i risultati di misurazione richiesti, ne sono state create diverse tipologie che possono essere suddivise:

1. in base al luogo di esecuzione:
 - a) esterno - test alla guida;
 - b) interni - test al dinamometro;
2. in base alle modalità di funzionamento del veicolo:
 - a) modalità operative definite;
 - b) normale funzionamento del veicolo;
3. in base al metodo di determinazione della quantità di carburante consumato:
 - a) volumetrico (con possibilità di essere eseguito in laboratorio e all'esterno);
 - b) a seconda del peso (per lo più soggetto a condizioni di laboratorio).

MISURE ESTERNE E INTERNE

Test alla guida

Questo tipo di test viene eseguito su strada o su circuito di prova. In questa sede vengono simulate le condizioni operative. Le resistenze che agiscono sul veicolo sono di natura reale; pertanto è necessario scegliere la procedura di misurazione adeguata affinché vi sia la maggiore aderenza possibile alle condizioni operative richieste.

Test al dinamometro

I test al dinamometro sostituiscono i test alla guida e vengono eseguiti in assenza di un circuito di prova adatto o quando deve essere effettuato un numero consistente di misurazioni. Per questo motivo viene utilizzato dalle moderne case automobilistiche. In questo tipo di misurazione, il veicolo viene posizionato su cilindri di resistenza, impostati per simulare la resistenza di guida teorica precalcolata del veicolo. Successivamente viene eseguita la misurazione: il veicolo deve vincere la forza di resistenza dei cilindri e quindi consumare la quantità di carburante misurata. I risultati saranno meno accurati di quelli ottenuti con le misurazioni dei test alla guida.

MODALITÀ OPERATIVE PER LA MISURAZIONE DEL CONSUMO

Le modalità operative per la misurazione del consumo vengono messe in atto in base a condizioni predeterminate, in modo da poter quantificare in base ai risultati i consumi e gli specifici effetti da essi subiti. Nella maggior parte dei casi si tratta di determinate modalità operative che rappresentano dei "punti" su cui basare i confronti. Il più delle volte si tratta della misurazione del consumo a diverse velocità. Per gli autocarri può essere, ad esempio, a $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ e simili. È tuttavia necessario definire condizioni quali la pendenza della strada su cui viene effettuata la misurazione e il peso effettivo del veicolo e del carico. Questi valori devono essere osservati in ogni misurazione per ottenere risultati paragonabili.

CICLI DI GUIDA IN EUROPA

I cicli di guida determinano la dipendenza della velocità del veicolo dal tempo. Vengono ideati da diversi paesi e organizzazioni in funzione del traffico urbano o extraurbano. I cicli di guida possono essere suddivisi da diversi punti di vista:

- a seconda della legislazione:
 - cicli di guida legislativa
 - cicli di guida di ricerca e sviluppo
- in termini di forma - dipendenza della velocità dal tempo:
 - sui cicli di guida effettivi,
 - poligonali.

Esistono svariate differenze tra i cicli di guida che influiscono sulla quantità di inquinanti prodotti e sulla quantità di carburante consumato. I cicli di guida sviluppati in Europa sono poligonali, ossia composti da accelerazioni, decelerazioni e velocità costanti.

I cicli di guida in Europa:

- ECE 15;
- EUDC;
- EUDCL;
- NEDC;
- WLTP.

La direttiva 70/220/CE stabilisce la procedura per la verifica delle emissioni dei motori ad accensione spontanea e comandata. Tale direttiva è conforme al regolamento UNECE n. 83, in materia di prescrizioni uniformi relative all'omologazione dei veicoli in riferimento all'emissione di sostanze inquinanti causate dal carburante utilizzato dal motore.

ECE 15

Ciclo di guida urbano costituito da quattro parti identiche. Ciascuna sezione ha una lunghezza di 1013 km e il veicolo attraversa il tracciato in 195 s. La distanza totale percorsa durante il ciclo è di 4052 km in 780 s. Il veicolo accelera da fermo alla velocità costante di 15,32 e 50 km·h⁻¹, con una velocità media di 19 km·h⁻¹.

EUDC

Si tratta di un ciclo extraurbano della durata di 400 s, durante il quale il veicolo percorre 6955 km, raggiungendo una velocità media di 62,6 km·h⁻¹. La velocità massima durante questo ciclo è di 120 km·h⁻¹. Durante questo ciclo il veicolo accelera fino a 70 km·h⁻¹, poi decelera fino a 50 km·h⁻¹ e accelera nuovamente a 70, 100 e 120 km·h⁻¹.

EUDECL

È un ciclo simile a quello dell'EUDC, ma si applica ai veicoli a motore di potenza inferiore. La velocità massima raggiunta in questo ciclo di guida è di 90 km·h⁻¹ e la velocità media è di 59,5 km·h⁻¹.

NEDC

Questo ciclo di guida è costituito da quattro parti del ciclo urbano ECE 15 e da una parte extraurbana del ciclo EUDC. La sua durata totale è di 1180 s. In questo lasso di tempo, il veicolo percorrerà 11.007 km. La velocità media del veicolo durante il ciclo di guida è di 33,6 km·h⁻¹. Il veicolo viene avviato con un motore alla temperatura di 20°C-30°C e il veicolo deve aver percorso almeno 3000 km ma non più di 15.000 km. I test vengono eseguiti sul veicolo con un conducente di 75 kg e un carico da 100 kg.

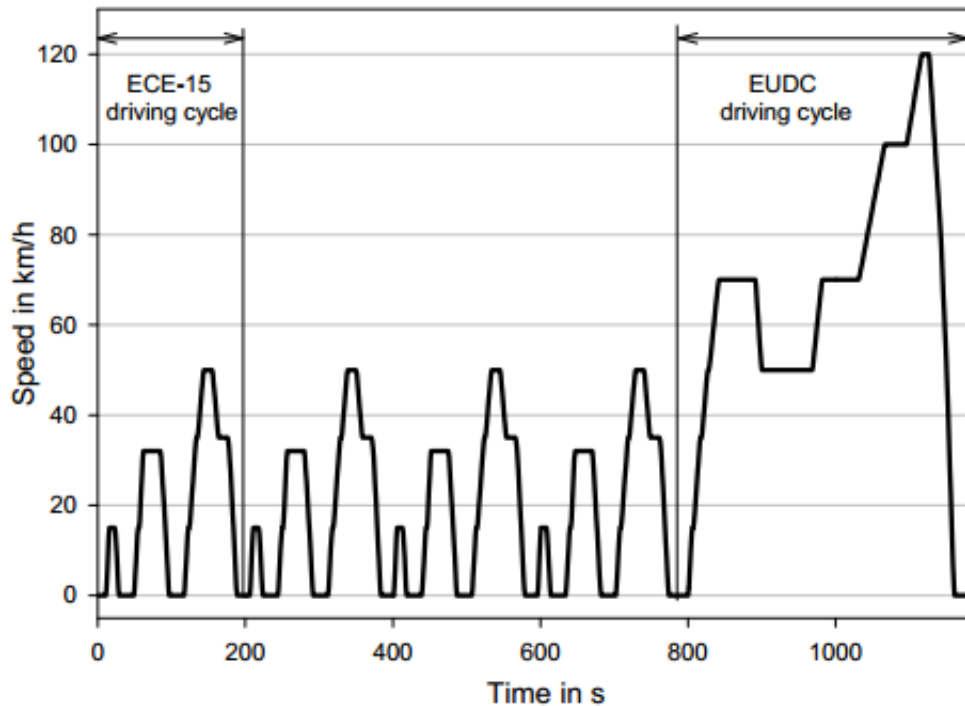


Figura 19: Ciclo di guida NEDC

Tutti i cicli citati sono dei modelli, dal momento che non rappresentano il funzionamento reale del veicolo nel traffico stradale.

WLTP

Da settembre 2017 è entrata in vigore la nuova metodologia WLTP per la determinazione dei consumi di carburante e degli inquinanti. Questo ciclo di guida corrisponde più realisticamente al funzionamento effettivo dei veicoli nel traffico stradale. Questo ciclo è suddiviso in tre classi, che esprimono il rapporto potenza/peso del veicolo.

Classe 1

Il ciclo prevede velocità basse e medie. La durata totale è di 1022 s, la distanza totale percorsa è di 8091 km con una velocità media di $28,5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

Classe 2

Il ciclo prevede velocità basse, medie e relativamente alte per i veicoli. La durata totale è di 1477 s, la distanza è di 14,66 km e la velocità media è di $35,7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

Classe 3

Questo ciclo di guida è costituito da quattro parti con diversi tipi di traffico: traffico urbano, traffico extraurbano, velocità relativamente elevate, zona autostradale. La distanza

percorsa durante il ciclo è di 23.262 km, la durata è di 1800 s e la velocità media è di 46,5 km·h⁻¹.

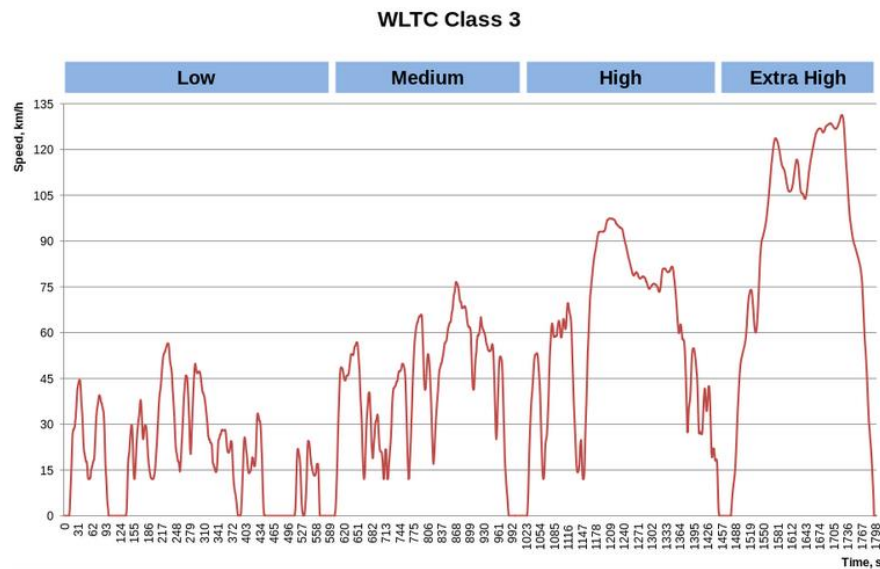


Figura 20: Ciclo di guida WLTP - classe 3

Normale funzionamento del veicolo

I risultati di tale misurazione hanno il valore informativo più accurato dal punto di vista dell'operatore del veicolo, in quanto forniscono risultati corrispondenti al consumo effettivo del veicolo durante il funzionamento reale. Questo genere di misurazione può essere effettuato imitando il traffico reale, in particolare il percorso, il peso del carico, il profilo di velocità e il tempo di funzionamento, oppure effettuando misurazioni durante l'effettivo funzionamento del veicolo. Per evitare di influenzare i risultati di questi metodi di misurazione è consigliabile che il conducente non sia a conoscenza del fatto che verrà effettuata alcuna misura.

METODI DI DETERMINAZIONE DEL CONSUMO DI CARBURANTE

Metodo di massa (gravimetrico)

La quantità di energia contenuta nel carburante dipende dal suo peso, quindi il peso del carburante consumato determina direttamente l'intensità energetica. Il principio è spesso quello di pesare il carburante nel serbatoio prima e dopo la misurazione e la differenza di peso rappresenta il peso del carburante consumato. Il peso può anche essere monitorato a intervalli specifici o continuamente nel corso della misurazione. Questo metodo viene utilizzato più spesso per determinare il consumo del motore o il consumo totale del veicolo quando questo viene determinato a regime stazionario. Elimina la differenza in termini di peso specifico del carburante causata dal suo riscaldamento in entrata e in uscita. Pertanto, viene utilizzato principalmente per scopi scientifici e di ricerca ed è legato soprattutto alle condizioni di laboratorio.

Metodo volumetrico

Questo metodo, come indica il nome stesso, misura il volume di carburante consumato. La quantità di carburante è espressa in unità di volume. Il consumo dei veicoli stradali a motore è spesso espresso in $l \cdot 100km^{-1}$, nel caso di veicoli speciali in litri per ora motore. Si tratta di un metodo più flessibile grazie alla procedura di misurazione e allo strumento utilizzato. Viene pertanto utilizzato per i test di guida fuori dai laboratori.

A causa della variazione della densità del carburante dovuta alla temperatura dell'ambiente e alla pressione atmosferica, è necessario convertire il volume di carburante consumato in volume a valori standardizzati.

Possiamo misurare il volume di carburante consumato mediante dispositivi di misurazione, i cosiddetti flussometri. Funzionano secondo il principio della misurazione meccanica del volume di carburante erogato. Questo movimento delle parti meccaniche viene convertito in impulsi elettrici a una determinata frequenza (più alta è, più precisa e migliore risulterà la misurazione), che viene elaborata dall'elettronica di valutazione e fornisce quindi risultati sotto forma di unità di consumo. A causa della complessità dei flussometri e dell'elettronica di valutazione, i risultati possono rappresentare il consumo totale di carburante per ogni misurazione, il consumo istantaneo in litri all'ora o, se operano con il sensore di velocità del veicolo, in $l \cdot 100km^{-1}$. Il flussometro è collegato direttamente al sistema di alimentazione del veicolo, in modo che tutto il carburante diretto agli iniettori li attraversi, ma possa anche tornare indietro (ramo di troppopieno). Nei sistemi di iniezione ad alta pressione, i flussometri sono collegati alla parte a bassa pressione. In particolare

prima della pompa di alimentazione, se si tratta della pompa a vuoto, mentre se si tratta della pompa a pressione, sarà collegata a questa. I flussometri unidirezionali più semplici possono essere utilizzati con pompe di alimentazione dotate di un circuito interno di ritorno del carburante. In questo genere di sistemi, la dose esatta di carburante da iniettare è regolata direttamente all'interno della pompa di alimentazione, quindi solo un ramo con una direzione del flusso di carburante si dirige agli iniettori. I flussometri unidirezionali misurano il volume del flusso di carburante in una sola direzione. Nei sistemi con controllo dell'iniezione di carburante nell'iniettore (ad esempio, il sistema Common Rail) si trovano due rami del condotto di alimentazione e quindi è necessario utilizzare flussometri bidirezionali. Questi misurano il volume di carburante che scorre dal serbatoio all'iniettore e anche il volume di carburante non consumato che ritorna dagli iniettori attraverso il circuito di ritorno. La differenza tra questi due volumi misurati rappresenta il consumo effettivo del veicolo. I flussometri misurano con un'accuratezza di circa 0,5%.

Monitoraggio del consumo di carburante

Oltre al monitoraggio dei veicoli, le applicazioni telematiche servono anche a monitorare i carburanti. Questo genere di monitoraggio è volto alla prevenzione dei furti di carburante e all'acquisizione di dati oggettivi circa il consumo. Un'analisi di questo tipo ha l'effetto di ridurre i costi dei vettori e il consumo di carburante del 5,5% in media. Le varie soluzioni di misurazione del consumo di carburante possono essere attuate raccogliendo i dati dalla centralina del veicolo tramite bus CAN/FMS, dalla sonda di livello o dal flussometro. L'andamento del consumo di carburante in funzione del tempo e della distanza percorsa viene rappresentato sotto forma di grafico. L'analisi deve concentrarsi sui cali improvvisi di carburante nel serbatoio e svolge una funzione di controllo e prevenzione contro il furto e reati simili. Occorre tuttavia tenere presente che simili cali possono anche essere causati dalle prestazioni in loco del veicolo.

3.4 VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA DEI VEICOLI A CARBURANTE CONVENZIONALE - CASO STUDIO

In questa sede presentiamo un caso studio che può aiutare gli studenti a comprendere una situazione pratica di valutazione del ciclo di vita (LCA) dei veicoli. Abbiamo condotto l'LCA su veicoli a motore a combustione interna (ICEV), che comprendono: autovetture a benzina e diesel.

Abbiamo analizzato l'impronta di carbonio, l'impronta idrica e l'impronta delle risorse di questi veicoli. Abbiamo condotto l'LCA in conformità alle linee guida ISO 14040:2006 utilizzando il programma SimaPro v. 9 con il database Ecoinvent v.3 (per maggiori dettagli sugli strumenti LCA, si rimanda a "5. STRUMENTI PER L'LCA E LA VALUTAZIONE DELL'IMPATTO AMBIENTALE"). La valutazione ambientale delle autovetture a benzina e diesel è stata condotta secondo le quattro fasi dell'LCA:

- Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione
- Definizione dell'inventario del ciclo di vita
- Valutazione dell'impatto del ciclo di vita
- Interpretazione.

Per le analisi LCA, abbiamo stimato un'unità funzionale (UF) pari a 100 km. Abbiamo effettuato un'analisi comparativa tra gli impatti ambientali dei veicoli ICEV a benzina e quelli diesel. I confini del sistema per il ciclo di vita dell'autovettura oggetto di analisi sono illustrati in Figura 21.

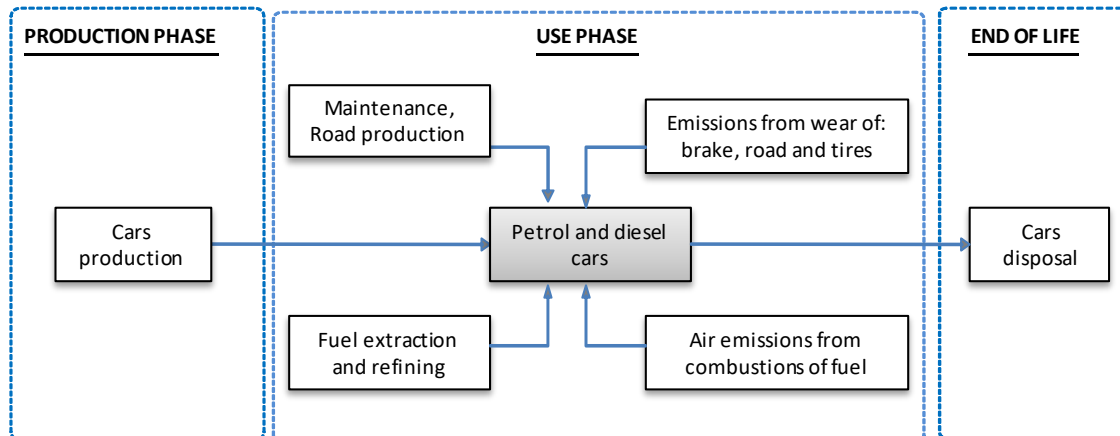


Figura 21: confini del sistema del ciclo di vita dell'autovettura analizzata [40]

I confini del sistema si estendono all'interno di una gamma di tipo cradle-to-grave: produzione di autovetture, produzione di carburante (diesel e benzina), fase di funzionamento delle autovetture (compresa la manutenzione), emissioni legate a funzionamento delle autovetture, lavori stradali, smaltimento delle autovetture e

⁴⁰ Burchart-Korol D.; Folęga P.: Comparative life cycle impact assessment of chosen passenger cars with internal combustion engines, *Transport Problems* 2019 vol. 14 num. 2 pagg. 69-76

manutenzione (Figura 21). Abbiamo condotto una LCA per il trasporto da parte di piccole autovetture con motori a combustione interna, sia a benzina che diesel. Abbiamo scelto auto di piccole dimensioni per l'analisi, dal momento che i motori di dimensioni contenute sono più comuni di quelli di medie e grandi dimensioni nei paesi dell'Unione europea. Il peso medio delle auto di piccole dimensioni è stato stimato in 1200 kg. La cilindrata ipotizzata era fino a 1,4 l. L'analisi comprende autovetture di piccole dimensioni classe Euro 5.

Nella seconda fase dell'LCA (definizione dell'inventario del ciclo di vita) abbiamo analizzato i dati di input e output per il ciclo di vita dell'auto. I dati comprendono la fabbricazione, il funzionamento, la manutenzione e lo smaltimento delle automobili. Per l'analisi LCA sono necessarie tutte le emissioni dirette causate dalla combustione del carburante e le emissioni non di scarico, come quelle generate dall'usura di pneumatici e freni e dalla pavimentazione stradale.

I dati per l'LCA provengono da SimaPro. I principali input dei veicoli elettrici comprendono: batteria agli ioni di litio, produzione di autovetture elettriche, manutenzione, produzione di energia elettrica. I principali output includono: emissioni da usura dei freni, emissioni da usura stradale ed emissioni da usura degli pneumatici.

I principali input per i veicoli con motore a combustione interna alimentati a benzina e diesel comprendono: manutenzione e produzione autovetture, produzione di carburante. I principali output dei veicoli con motore a combustione interna alimentati a benzina e diesel comprendono: emissioni nell'aria di anidride carbonica, monossido di carbonio, composti organici volatili non metanici, ossidi di azoto, particolato e anidride solforosa, emissioni dovute all'usura dei freni, emissioni dovute all'usura della strada e all'usura degli pneumatici.

La fase successiva, ovvero la valutazione dell'impatto del ciclo di vita (LCIA), ha permesso di calcolare i valori delle categorie d'impatto ambientale in base ai metodi di valutazione selezionati nel software SimaPro. Abbiamo scelto i metodi LCIA che ci hanno permesso di effettuare la valutazione delle singole impronte ambientali: impronta di carbonio, impronta idrica e impronta delle risorse delle autovetture a benzina e diesel.

L'impronta di carbonio consente di analizzare le emissioni di gas serra tenendo conto degli impatti diretti e indiretti sulle attività umane, espressi in un'unità di riferimento di kg di CO₂. L'impronta di carbonio viene calcolata in base al potenziale di riscaldamento globale (GWP).

L'**impronta idrica** consente di analizzare l'utilizzo dell'acqua nel corso del ciclo di vita di un prodotto. Questo indicatore si applica al volume di acqua consumata e valuta solo l'acqua utilizzata. La quantità totale attribuita all'impronta idrica è espressa da un'unità di riferimento in m³.

Dal punto di vista dell'economia circolare, è importante anche l'**impronta delle risorse**, che comprende l'esaurimento dei combustibili fossili, dei metalli e dei minerali. La quantità totale dell'impronta delle risorse è espressa in un'unità di riferimento in MJ.

La nostra analisi LCA ci ha permesso di identificare i principali fattori negativi che influenzano ciascuna impronta ambientale. Abbiamo definito i principali fattori negativi come **determinanti**: si tratta degli elementi principali dell'intero ciclo di vita di un veicolo che hanno l'impatto più negativo su una determinata impronta ambientale. I risultati dell'LCA per ciascuna impronta sono stati presentati sotto forma di diagrammi. Di seguito è riportata una descrizione dei diagrammi per tutte le analisi LCA.

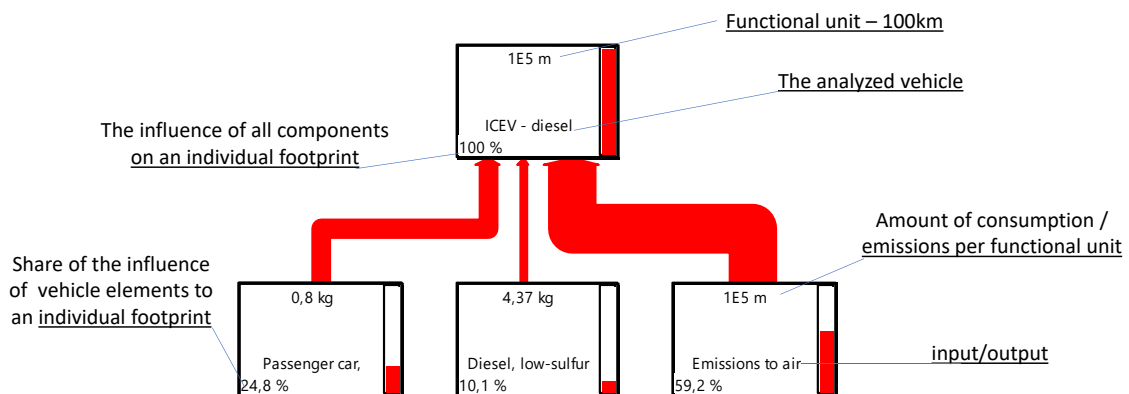


Figura 22: descrizione del diagramma per l'analisi LCA

Il colore rosso della freccia indica un impatto negativo sull'ambiente. Le frecce si dirigono dall'input/output al veicolo oggetto di analisi. Lo spessore della freccia indica l'entità dell'impatto ambientale negativo, in questo caso l'entità delle singole impronte ambientali. Più la freccia rossa è spessa, maggiormente negativo è l'impatto. Il principale fattore determinante dell'impatto ambientale è l'elemento da cui esce la freccia più spessa. L'unità funzionale è di 100 km. L'ammontare del consumo di tutti i fattori produttivi viene convertito nell'unità funzionale: ad esempio, nel caso di un'autovettura diesel ICEV, il consumo di diesel per 100 km è pari a 4,37 kg. Il dato 10,1% indica che la produzione di diesel costituisce il 10,1% del totale delle emissioni di gas serra nel ciclo di vita di un ICEV.

RISULTATI DELLA VALUTAZIONE DELL'IMPRONTA DI CARBONIO DEI VEICOLI A CARBURANTE CONVENZIONALE

Abbiamo stabilito i fattori determinanti dell'impronta di carbonio per i veicoli a benzina e per i veicoli a diesel. I risultati della valutazione dell'impronta di carbonio sono stati illustrati nelle Figura 24.

I principali fattori determinanti dell'impronta di carbonio per gli ICEV (diesel e benzina) sono le emissioni nell'aria, che rappresentano rispettivamente il 59,2% e il 59,8% dell'impronta (Fig. 24 e Fig. 25). Gran parte dell'impronta di carbonio è anche legata alla produzione di veicoli (fattore determinante espresso come autovetture) e carburanti (fattore determinante espresso come benzina a basso tenore di zolfo).

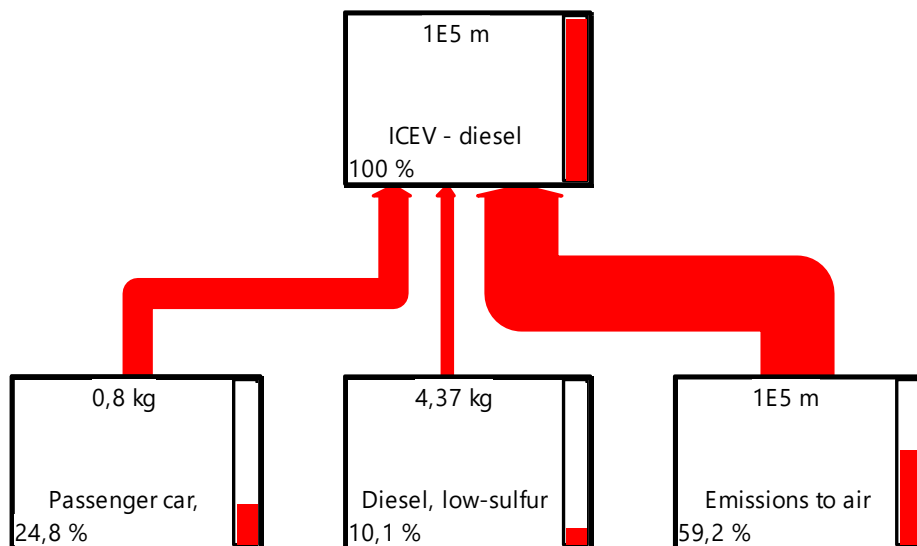


Figura 23: Fattori determinanti dell'impronta di carbonio dei veicoli con motore diesel (ICEV diesel)

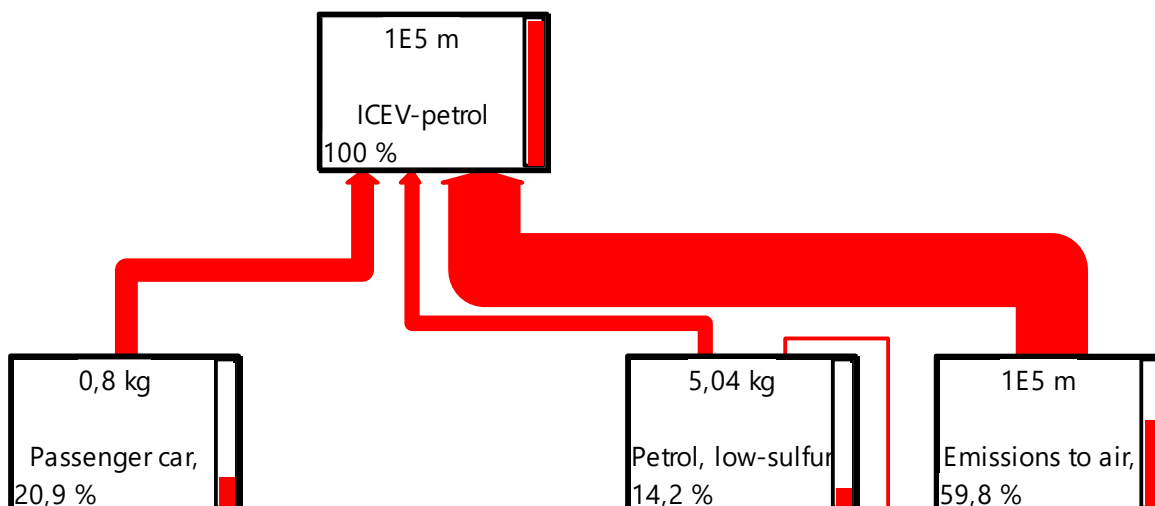


Figura 24: Fattori determinanti dell'impronta di carbonio dei veicoli a benzina (ICEV a benzina)

Le nostre analisi comparative del ciclo di vita dei veicoli a benzina e dei veicoli diesel hanno dimostrato che l'impronta di carbonio attribuibile alle autovetture alimentate a diesel è inferiore a quella delle autovetture alimentate a benzina, il che dipende principalmente dalla maggiore impronta di carbonio causata dalla produzione di benzina e dalle emissioni dirette di CO₂ legate al funzionamento delle autovetture alimentate a benzina. Il principale fattore determinante dell'impronta di carbonio per questi veicoli a combustibile convenzionale è l'emissione diretta in atmosfera di anidride carbonica associata al funzionamento delle auto. L'impronta di carbonio delle autovetture alimentate a benzina e diesel è attribuibile principalmente al funzionamento di questi veicoli. Pertanto, al fine di ridurre il loro impatto sull'ambiente, è opportuno adoperarsi al fine di aumentare la quota di carburanti alternativi nel mix di carburanti che alimentano le autovetture.

RISULTATI DELLA VALUTAZIONE DELL'IMPRONTA IDRICA DEI VEICOLI A CARBURANTE CONVENZIONALE

Abbiamo stabilito i fattori determinanti dell'impronta idrica per i veicoli a benzina e a diesel. I risultati della valutazione dell'impronta idrica sono illustrati di seguito.

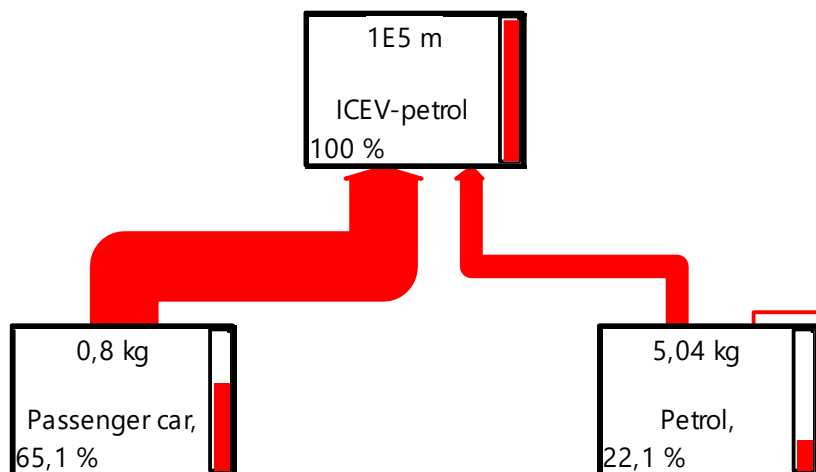


Figura 25: fattori determinanti dell'impronta idrica degli ICEV a benzina

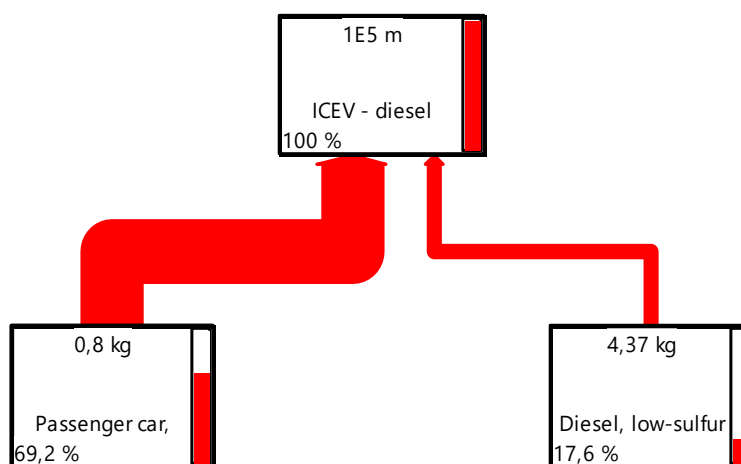


Figura 26: Fattori determinanti dell'impronta idrica degli ICEV a diesel

Come si evince dall'analisi precedente, il principale fattore determinante dell'impronta idrica dei veicoli ICEV è la produzione del veicolo stesso. Una percentuale significativa dell'impronta idrica è anche attribuibile alla produzione di carburante.

RISULTATI DELLA VALUTAZIONE DELL'IMPRONTA DELLE RISORSE DEI VEICOLI A CARBURANTE CONVENZIONALE

Abbiamo stabilito i fattori determinanti dell'impronta delle risorse per i veicoli a benzina e a diesel. I risultati della valutazione dell'impronta delle risorse sono illustrati nelle figure Figura 27, Figura 28.

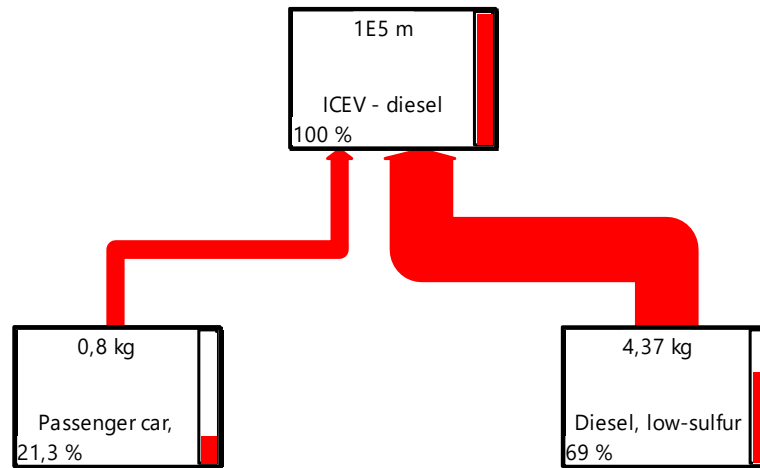


Figura 27: Fattori determinanti dell'impronta di risorse dei veicoli diesel

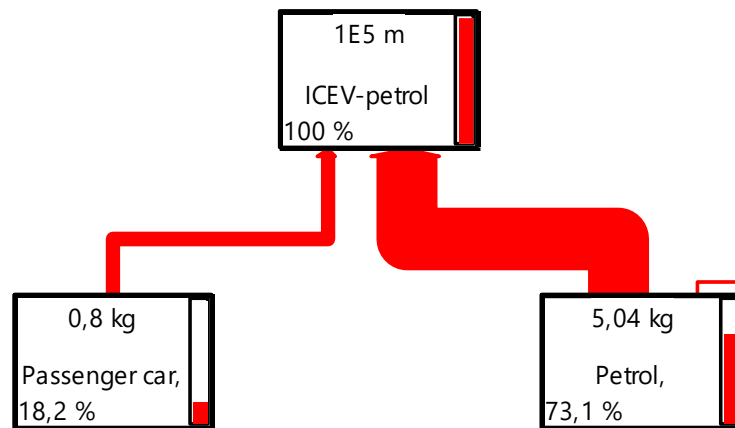


Figura 28: Fattori determinanti dell'impronta di risorse dei veicoli a benzina

Per quanto riguarda gli ICEV, la fase di produzione del carburante è il principale fattore determinante dell'impronta di risorse.

3.5 CONFRONTO TRA TRASPORTO PASSEGGERI INDIVIDUALE E PUBBLICO

Di seguito vengono illustrati i risultati delle misurazioni pratiche dei consumi in condizioni di funzionamento reali, su treni passeggeri, autobus e autovetture. Sono stati monitorati indicatori quali il consumo di energia e la produzione di gas serra, tenendo conto del principio W-t-W.

I consumi sono stati calcolati sulla tratta Žilina-Rajec e ritorno, in Slovacchia, confrontando il trasporto ferroviario di passeggeri, quello in autobus e quello individuale.

La linea ferroviaria tra Žilina e Rajec, in Slovacchia, non è elettrificata. Attualmente i treni regionali a trazione autonoma vi circolano a cicli di una o due ore. La linea ferroviaria e la strada costeggiano il fiume Rajčanka. La lunghezza del binario è di 21,3 km.

La differenza di altitudine tra Žilina (340) e Rajec (450) fa sì che l'ascesa della linea raggiunga il valore massimo di 13%, ad eccezione della breve salita dietro la stazione ferroviaria di Žilina, dove l'ascesa raggiunge per un breve tratto il 17%. La salita media tra le stazioni è del 5% Figura 29 [41].

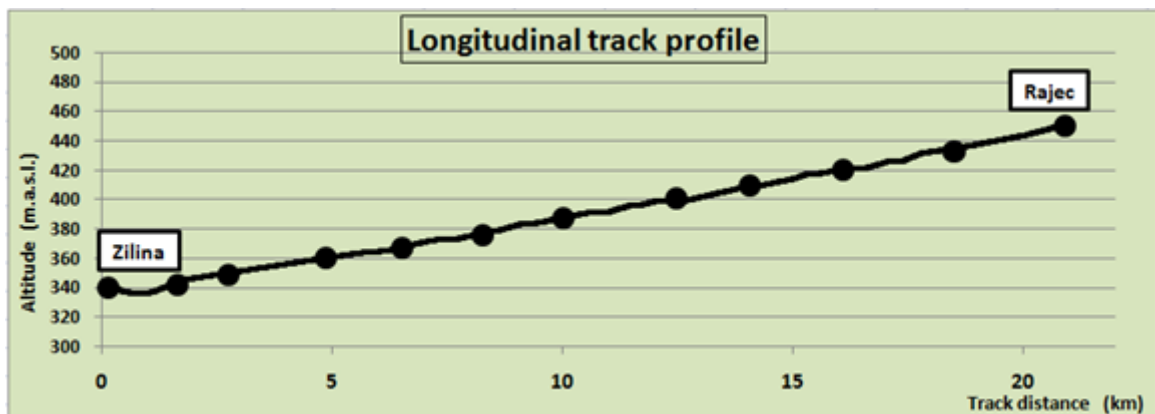


Figura 29: Profilo longitudinale della linea ferroviaria con fermate

La linea comprende 12 fermate e stazioni ferroviarie: Žilina è la prima, mentre Rajec è l'ultima, al capolinea. La velocità massima della linea è di $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, ma su alcune parti della linea la velocità non supera i 50 o $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Il tempo di percorrenza tra la stazione di testa e il capolinea è di circa 37 minuti. Nel 2014 il numero medio di passeggeri trasportati per treno è stato di circa 32 persone.

⁴¹Skrúcaný T., Ponický J., Kendra M., Grenčík J. Energy consumption and GHG production on chosen railway track in regional passenger transport. 22-nd international conference: Current problems in rail vehicles, VOL II, Žilina, 2015

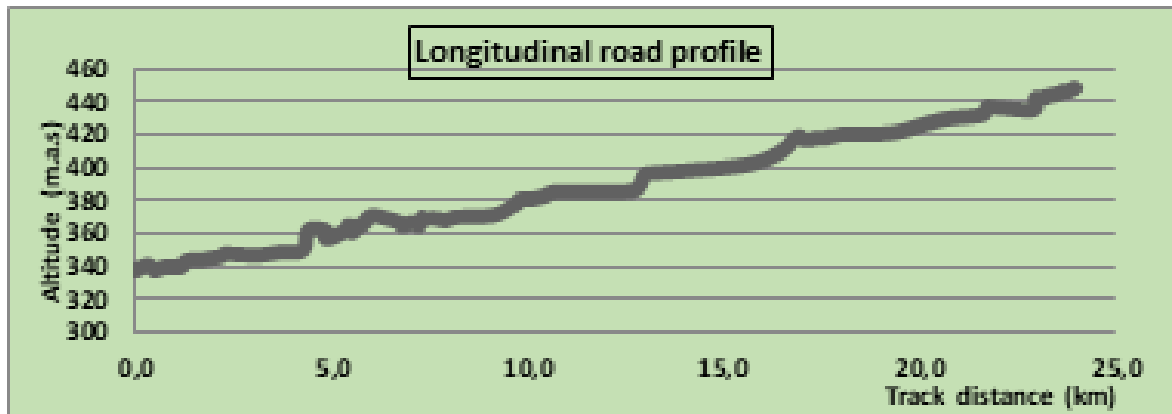


Figura 30: Profilo stradale longitudinale

Per misurare il consumo del treno è stata utilizzata l'unità motore della serie 813-913, prodotta a ŽOS Zvolen (Slovacchia) sulla base della ricostruzione dei vecchi modelli della serie 810.

Per misurare il consumo dell'autobus è stato utilizzato il modello Karosa C954 prodotto dalla ditta Karosa di Vysoké Mýto (Repubblica Ceca) nel periodo dal 2001 al 2006.

I parametri tecnici più dettagliati dei veicoli sono riportati in Tabella 7.



Figura 31: veicoli a confronto (a sinistra: unità treno motore 813-913, a destra: autobus Karosa C 954)

Per calcolare il consumo energetico del treno è stato utilizzato il software di simulazione Railway Dynamics (Figura 33). Il consumo di energia del treno è stato calcolato sulla base di parametri preselezionati e definiti sul percorso prestabilito. Il software funziona importando la direzione del binario e l'altitudine. In base ai parametri definiti (serie di unità motore, peso del treno, lunghezza del treno, carico per asse, numero e collocazione delle fermate), è stato calcolato il consumo di energia in kWh. Il software può essere utilizzato per calcolare il consumo energetico e il tempo di percorrenza di qualsiasi

treno su qualsiasi linea ferroviaria. Per il calcolo è sufficiente inserire i parametri base del treno e i dati del binario.

Tabella 7: parametri tecnici di base di autobus e treni

Veicolo	Unità motore 813-913	autobus Karosa C 954
Configurazione trasmissione	1'A' + 1'1'	-
Alimentazione	Diesel	Diesel
Trasmissione di potenza	idromeccanica	meccanica
Velocità massima	90 km·h ⁻¹	105 km·h ⁻¹
Motore a combustione	MAN D 2876 LUE 21	Iveco Cursor F2 B
Potenza del motore	257 kW	228 kW
Peso del veicolo vuoto	39 t	10,8 t
Peso del veicolo carico	53 t	18 t
Lunghezza del veicolo	28.820 mm	11.990 mm
Numero di posti a sedere	78+5	49
Numero massimo di passeggeri in piedi	120	39

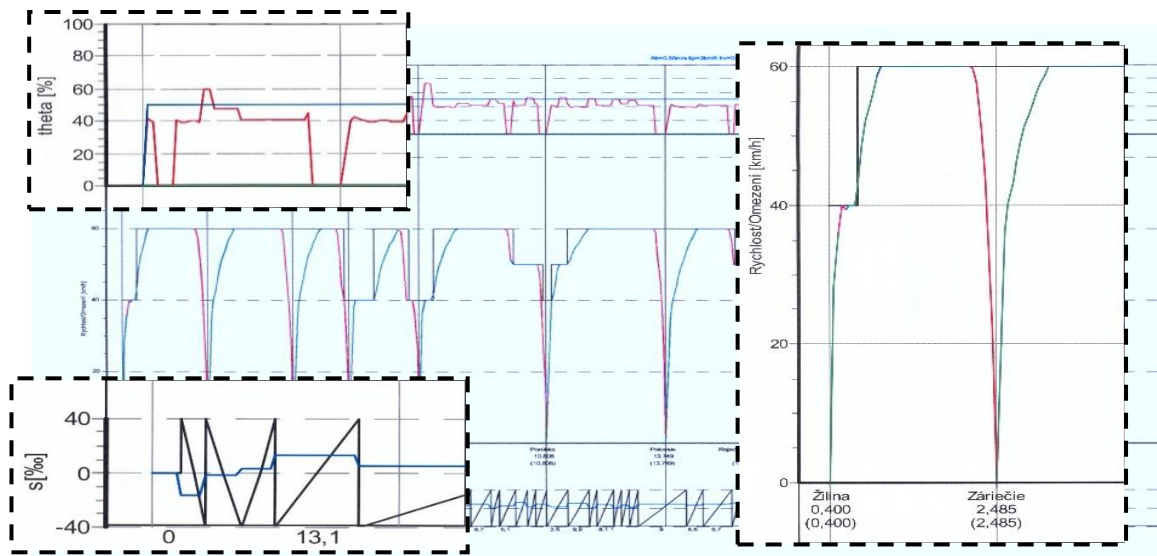


Figura 32: Dati output prodotti dal software Railway Dynamics (Fonte: software Railway Dynamics)

Il calcolo in questo caso studio è stato effettuato per entrambe le direzioni, cioè una in salita e l'altra in discesa. I risultati dei consumi relativi a entrambe le direzioni sono inclusi nella valutazione finale (Tabella 8). La Tabella 8 mostra il vantaggio del trasporto in autobus. Infatti, nonostante i motori parametricamente molto simili (potenza, consumo) del treno e dell'autobus, nonché la minore difficoltà data dalla linea ferroviaria, il veicolo ferroviario è caratterizzato da un consumo di carburante più elevato sulla linea monitorata

rispetto all'autobus. Ciò è dovuto al peso del veicolo ferroviario di 39 t, che supera di 28 t il peso dell'autobus (circa 11 t).

Tabella 8: Risultati del calcolo treno-autobus

Riempimento del veicolo	Veicolo	Consumo di carburante [L]	Consumo totale di energia [MJ]	Produzione totale di CO _{2e} [kg]	Numero di passeggeri	Consumo di energia per passeggero [MJ·persona ⁻¹]	Produzione di CO _{2e} [kg·persona ⁻¹]
Veicolo al completo	Treno	22,98	981,2	74,4	83	11,82	0,90
	Autobus	12,48	532,9	40,4	49	10,88	0,83
Numero effettivo di passeggeri	Treno	19,23	821,3	62,3	32	25,66	1,95
	Autobus	11,76	502,2	38,1	26	19,31	1,47

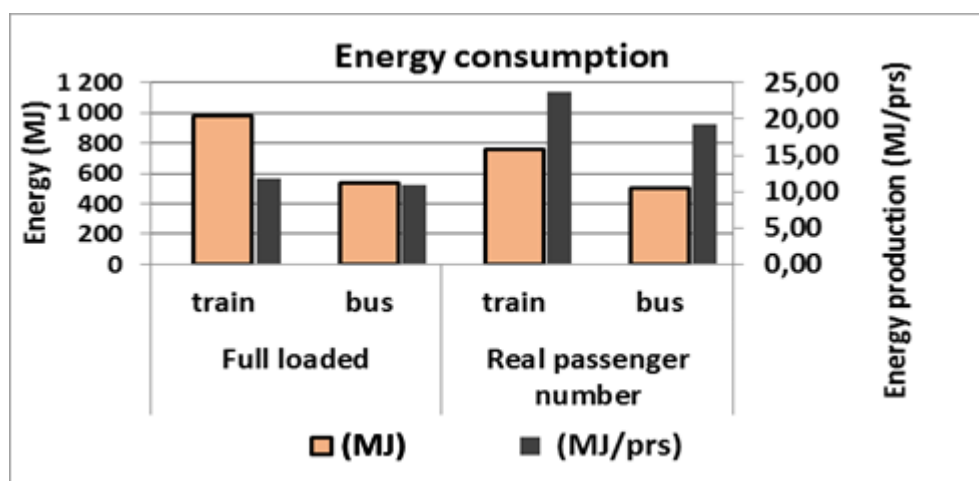


Figura 33: Confronto tra i consumi energetici di treno e autobus

Il risultato della simulazione del consumo di carburante del treno motore è stato confrontato con il consumo reale di tale unità sulla linea in questione. Il risultato della simulazione è stato confermato, in quanto la differenza rispetto al consumo reale è stata solo del - 8,5%. Pertanto, tutti i risultati dei consumi sono stati aumentati dell'8,5% affinché rispecchiassero maggiormente la realtà.

Sebbene il treno motore sia in grado di trasportare un numero maggiore di passeggeri, non supera l'autobus in termini di efficienza. Come già detto, ciò è dovuto al maggiore peso morto del treno. Quando si calcola il consumo totale di energia nell'uso effettivo dei veicoli, il consumo dell'autobus corrisponde solo al 54-66% del consumo del treno. Se si calcola il consumo di energia per passeggero (MJ·persona⁻¹), la differenza è significativamente inferiore (dal 75 al 92%) grazie alla maggiore capacità di riempimento del treno.

Indipendentemente da questo, il trasporto in autobus risulta più efficiente in termini di consumo energetico; tuttavia con il treno al completo, o considerando l'uso dei parcheggi, il trasporto ferroviario può essere considerato assimilabile all'efficienza stradale, e in alcuni casi potrebbe risultare anche più efficiente in termini di numero di persone trasportate.

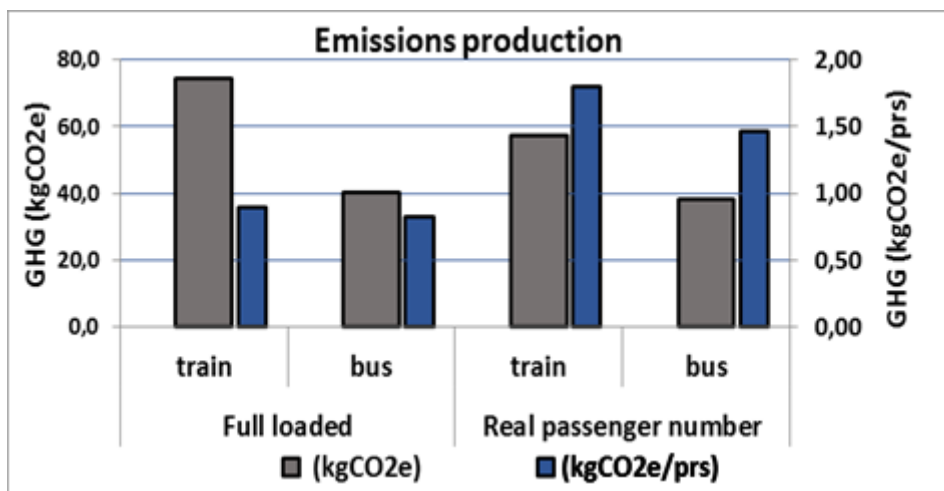


Figura 34: Confronto tra le emissioni di gas serra prodotte dal funzionamento di treni e autobus

Analogamente al consumo energetico, è possibile calcolare anche le emissioni di gas serra. Il rapporto tra le emissioni di gas serra dei veicoli è simile al consumo di energia, in quanto è stato calcolato secondo la norma EN 16 258:2012, in cui la produzione di gas serra è il prodotto del consumo di carburante e del fattore di emissione.

La sezione successiva mette a confronto il consumo del treno passeggeri con quello dell'autovettura. I parametri tecnici della vettura sono elencati in Tabella 9.

Tabella 9: Parametri tecnici del veicolo ^[42]

Skoda Fabia III	
Anno di produzione	2016
Motore	1.2 TSI, DOHC
Carburante	benzina
Sovrappieno	turbocompressore
Codice motore	5J
Cambio	Meccanico (manuale)
Numero di marce	5
Potenza della velocità	66 kW/4400 min ⁻¹
Coppia a velocità	160 Nm/1400 min ⁻¹

⁴²Kendra M., Skrúcaný T., Synák F., Škorupa M., Grenčík J.: Energy intensity of railway and road passenger transport and its breaking point according to vehicle capacity usage. 7th Transport Research Arena TRA 2018, Vienna. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1421671>

peso totale	1564 kg
Peso in standby	1133 kg
Consumo di carburante in città (dati del produttore)	6 l·100km ⁻¹
Consumo di carburante in città (dati del produttore)	4 l·100km ⁻¹



Figura 35: Škoda Fabia III - auto utilizzata per le misurazioni

I risultati delle misurazioni effettuate sull'autovettura hanno evidenziato la grande discrepanza tra il consumo di carburante dichiarato dal produttore e quello effettivamente riscontrato. Le misurazioni riportano valori più elevati, compresi tra l'8 e l'11,5% in più rispetto al consumo di carburante dichiarato. In termini assoluti, il consumo di carburante sul percorso monitorato variava da 4,33 a 4,56 l·100km⁻¹. Tutte le sezioni sono state misurate tre volte.

Le minime divergenze tra le misurazioni sono dovute allo stile di guida del conducente, il più simile possibile. La misurazione è stata effettuata nelle prime ore del mattino in assenza di traffico di altri veicoli, la velocità media di sezione dell'auto è stata costantemente monitorata e regolata e il cruise control dell'auto è stato utilizzato il più possibile. Tramite questa procedura è stato possibile ottenere una divergenza minima tra i risultati delle varie misurazioni, e quindi garantire la ripetibilità. Le differenze riscontrate rappresentano quindi l'effetto del carico della vettura.

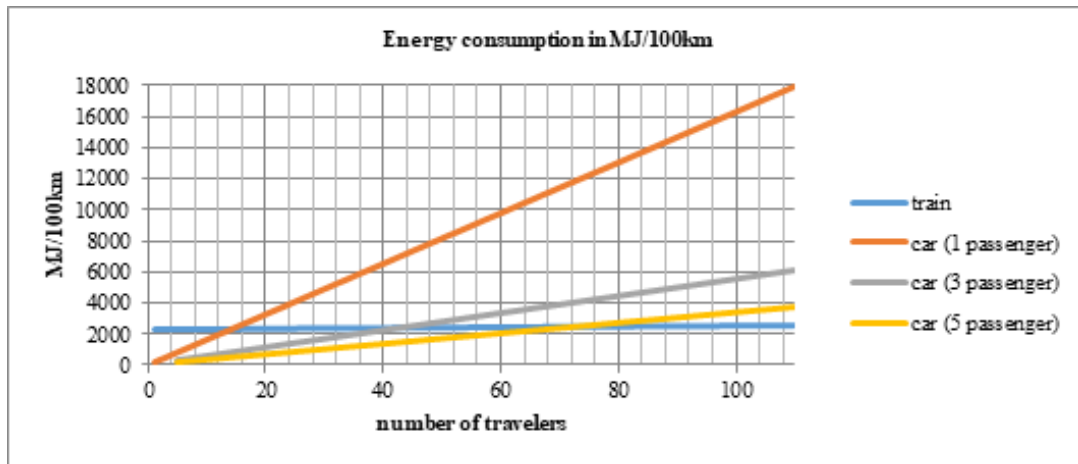


Figura 36: Confronto tra il consumo energetico di treno e automobile

La Figura 36 indica il consumo energetico ogni 100 km dei singoli mezzi di trasporto (treno, autovettura) in relazione al loro riempimento, ovvero al numero di persone trasportate. Il caso peggiore in termini di efficienza energetica è il trasporto di una sola persona in auto (il conducente stesso). Il numero di auto usate è pari al numero di persone trasportate, il che spiega la forte pendenza della linea (rossa). L'efficienza aumenta di molte volte con l'aumentare del numero di passeggeri nell'auto. Sebbene il consumo di carburante dell'auto aumenti in termini di peso istantaneo e quindi di numero di passeggeri, considerando un numero di veicoli da tre a cinque volte inferiore rispetto al primo caso, il risultato ottenuto è una maggiore efficienza. Questo fatto è osservabile sia in termini assoluti in Figura 36 che in termini relativi in Figura 37.

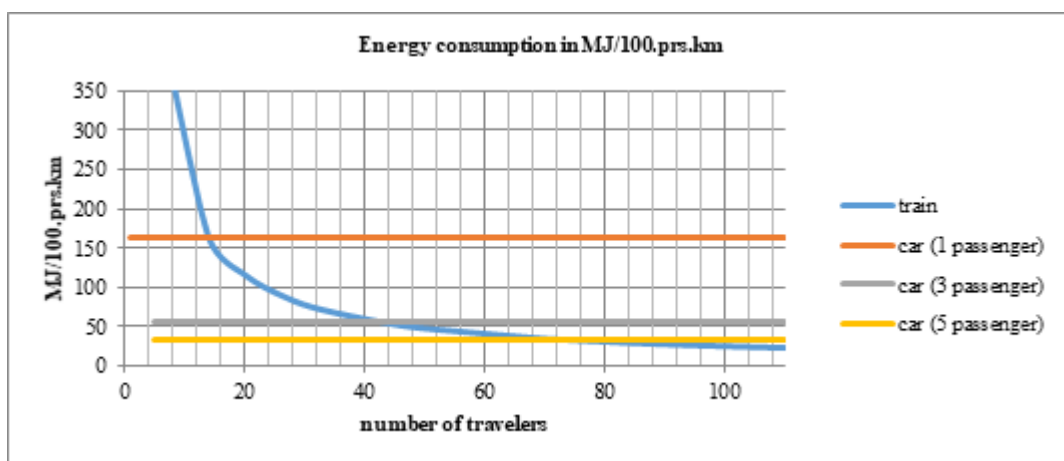


Figura 37: Confronto relativo dei consumi energetici

Le intersezioni delle curve in Figura 36 rappresentano i valori limite dell'efficienza d'uso di treno e auto in funzione del numero di persone trasportate. Se il treno

rappresentasse lo standard, risulterebbe più efficiente dell'auto nel trasportare più di 14 passeggeri. In pratica, ciò significa che su un percorso di trasporto valutato, l'auto con il conducente alla guida risulta più efficiente del treno occupato da meno di 14 persone. Rispetto a un'auto utilizzata al completo, ovvero con 5 persone, il treno diventa più efficiente quando trasporta circa 73 persone, pari a quasi il 90% della capacità dei posti a sedere (83 posti).

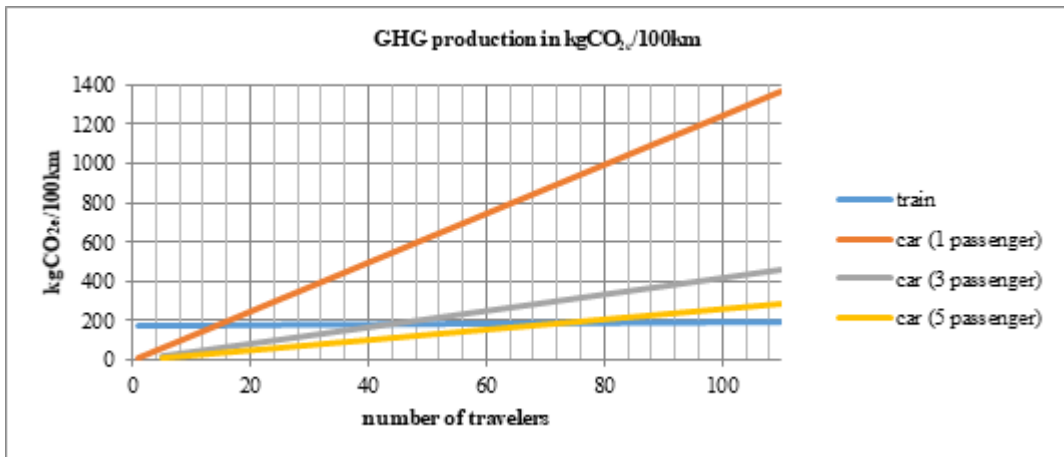


Figura 38: Confronto tra le emissioni di gas serra prodotte dal funzionamento di treni e auto

Il tasso di emissioni di gas serra derivanti dal funzionamento del treno e dell'autovettura nell'area misurata è direttamente correlato al consumo di energia, ovvero di carburante. Si può notare anche in entrambe le rese grafiche in Figura 38 e Figura 39.

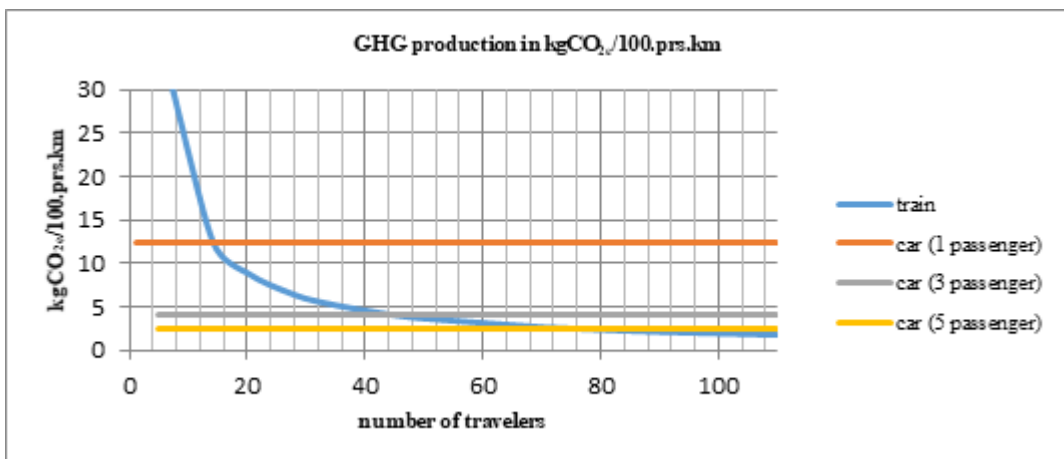


Figura 39: Confronto relativo delle emissioni di gas serra

La quantità di gas serra prodotta è stata calcolata in base allo standard, che prende in considerazione i coefficienti di produzione di gas serra EW (fattore di emissione) costanti rispetto a volume di carburante consumato ($\text{kgCO}_{2e} \cdot \text{l}^{-1}$), quantità di carburante consumato

($\text{kgCO}_2\text{e}\cdot\text{l}^{-1}$) o quantità di energia consumata nel carburante ($\text{gCO}_2\text{e}\cdot\text{MJ}^{-1}$), in questo caso benzina o diesel. Pertanto, la quantità di gas serra prodotti è direttamente proporzionale alla quantità di carburante combusto.

A causa del valore dei fattori di emissione dei carburanti oggetto di confronto, la benzina ($75.2 \text{ gCO}_2\text{e}\cdot\text{MJ}^{-1}$) è in leggero svantaggio rispetto al diesel, il cui valore del fattore di emissione è leggermente inferiore ($74.5 \text{ gCO}_2\text{e}\cdot\text{MJ}^{-1}$). Tuttavia, se si considerano le quantità di energia consumate nei mezzi di trasporto e si arrotondano alla cifra intera più vicina, ciò non ha alcun impatto in termini di modifica dei risultati dell'espressione relativa della produzione di gas serra dei veicoli rispetto all'espressione relativa del consumo energetico. Pertanto, anche in termini di produzione di gas serra, il treno è più efficiente quando è occupato da più di 14 persone rispetto all'auto con il solo conducente. Rispetto a una vettura che trasporta 3 o 5 persone, il treno diventa più efficiente solo a partire da un riempimento minimo di 44 persone, rispetto alle 73 persone di cui sopra.

I risultati di queste misurazioni pratiche non hanno lo scopo di determinare quale modalità di trasporto sia migliore o più ecologica. Non esiste una risposta univoca in questo senso, poiché l'efficienza energetica e la produzione di gas serra dipendono non solo dal consumo di carburante e di energia, ma anche dal livello di riempimento dei mezzi di trasporto. È importante garantire ai passeggeri la massima fruibilità dei mezzi di trasporto, ad esempio attraverso la scelta appropriata del veicolo per un particolare flusso di traffico. L'efficienza del trasporto da un punto di vista ecologico diminuisce anche con la diminuzione della reale fruibilità dei mezzi di trasporto. Pertanto per garantire un trasporto pubblico di passeggeri rispettoso dell'ambiente è fondamentale un'adeguata combinazione tra il tipo di flusso di traffico e i veicoli in circolazione.

3.6 PUNTI CHIAVE DEL CAPITOLO



Riassunto

Al termine di questo capitolo, gli studenti comprenderanno i seguenti termini:

- Motore a combustione interna
- Standard europei sulle emissioni
- Regolamenti sulle emissioni
- Limiti di emissione
- Misurazione del consumo di carburante
- Cicli di guida
- Consumo di energia
- Produzione di gas serra



Domande

- Quali sono i carburanti utilizzati nei motori a combustione interna convenzionali?
- Quali sono le fasi fondamentali del funzionamento di un motore a quattro tempi?
- Quali sono i vantaggi di un motore a benzina?
- Quali sono i vantaggi di un motore diesel?
- In quali due gruppi fondamentali si suddividono gli standard europei sulle emissioni?
- Quali emissioni sono regolamentate dagli standard europei in materia?
- Quali sono le differenze tra gli specifici cicli di guida europei?
- Quali sono i metodi di misurazione del consumo di carburante?
- Quali impronte ambientali dei motori a combustione interna conosci?
- Quali caratteristiche tecniche dei veicoli influiscono sulla loro efficienza operativa in termini di consumo energetico e produzione di gas serra?

Abbreviazioni

BSFC - Consumo di carburante specifico del freno

CAN - Controller Area Network

CI - Accensione diesel

CO - Monossido di carbonio

CO₂ - Anidride carbonica

DALY - anno di vita corretto per la disabilità

DPF/FAP - Filtro antiparticolato

CE - Comunità europea

ECE 15 - Specifiche della Commissione economica per l'Europa delle Nazioni Unite per la simulazione del ciclo di guida urbano

CEE - Comunità economica europea

EEV - veicolo ecologico migliorato

UNECE - Commissione economica per l'Europa delle Nazioni Unite

EN - Standard europeo

ES - Comunità europea

UE - Unione europea

EUDC - Ciclo di guida extraurbano

EUDCL - Ciclo di guida extraurbano applicato a veicoli con potenza motore inferiore

FMS - Screening del movimento funzionale

UF - Unità funzionale

GHG - Gas serra

GWP - Potenziale di riscaldamento globale

HC - Idrocarburi

ICEV - Veicolo con motore a combustione interna

IPCC - Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico

ISO - Una rete di istituti nazionali di normazione di 148 paesi (deriva dalla parola greca "isos" che significa "uguale")

LCA - Valutazione del ciclo di vita

LCIA - Valutazione dell'impatto del ciclo di vita

GPL - Gas di petrolio liquefatto

NEDC - Nuovo ciclo di guida europeo

NMHC - Idrocarburi non metanici

NO_x - Ossidi di azoto

PI - Accensione a scintilla

PM - Particolato

RW - Peso di riferimento

THC - Tetraidrocannabinolo

UNECE - Commissione economica per l'Europa delle Nazioni Unite

WLTC - Procedura di prova per veicoli leggeri armonizzata a livello mondiale

WLTP - Procedura di prova per veicoli leggeri armonizzata a livello mondiale

W-t-W - Well-to-Wheel

ŽOS - Società per le riparazioni e l'ingegneria ferroviaria (Železnične opravovne a strojárne)

4. LCA NEL SETTORE AUTOMOBILISTICO: VEICOLI A CARBURANTE ALTERNATIVO

4. LCA NEL SETTORE AUTOMOBILISTICO: VEICOLI A CARBURANTE ALTERNATIVO.....	84
4.1 Introduzione Ai Veicoli Elettrici	86
4.2 Valutazione Del Ciclo Di Vita Dei Veicoli Elettrici A Batteria (Bev).....	88
Risultati Della Valutazione Dell'impronta Di Carbonio Dei Veicoli Elettrici A Batteria	92
Risultati Della Valutazione Dell'impronta Idrica Dei Veicoli Elettrici A Batteria ...	93
Risultati Della Valutazione Dell'impronta Delle Risorse Dei Veicoli Elettrici A Batteria	93
4.3 Lca Della Ricarica Delle Batterie Dei Veicoli Elettrici Nei Paesi Dell'unione Europea - Caso Studio.....	94
Risultati	95
4.4 Analisi Comparativa Del Ciclo Di Vita Di Icev A Benzina, Icev Diesel E Bev - Caso Studio	102
Ipotesi	102
4.5 Valutazione Del Ciclo Di Vita Dei Veicoli Elettrici A Celle A Combustibile.....	105
Idrogeno: L'opzione Di Decarbonizzazione Più Promettente Per I Veicoli	105
4.6 Valutazione Del Ciclo Di Vita Dei Veicoli Elettrici A Celle A Combustibile - Caso Studio	108
4.7 Punti Chiave Del Capitolo	113
Gabi	132
Openlca.....	133
Umberto.....	135



Tempo di studio

120 minuti



Obiettivi

CONOSCENZE CHE GLI STUDENTI ACQUISIRANNO:

Gli studenti acquisiranno conoscenze sull'applicazione della valutazione del ciclo di vita LCA in campo automobilistico, in particolare l'LCA di veicoli a carburante alternativo come i veicoli elettrici a batteria (BEV) e i veicoli elettrici a celle a combustibile (FCEV)

COME IL CAPITOLO LI AIUTERÀ A COMPRENDERE L'ARGOMENTO:

Gli studenti apprenderanno la metodologia di analisi LCA, le varie impronte ambientali e l'importanza di questi metodi di valutazione ambientale all'interno dell'industria automobilistica

QUALI COMPETENZE SVILUPPERÀ IL CAPITOLO:

Il capitolo garantisce l'acquisizione di competenze necessarie che saranno utili allo studente per il suo futuro professionale nel campo dell'industria automobilistica. Gli studenti apprenderanno i fattori determinanti della valutazione ambientale del ciclo di vita dei veicoli e dei carburanti alternativi.

IN CHE CONTESTO GLI STUDENTI POTRANNO UTILIZZARE QUANTO ACQUISITO:

Gli studenti potranno utilizzare le conoscenze acquisite nel loro futuro professionale nel campo della tutela ambientale nell'industria automobilistica, in particolare in sede di analisi delle emissioni di gas serra. Dalle analisi LCA sono emerse nuove informazioni utili per ulteriori analisi sullo sviluppo dei carburanti alternativi nell'Unione europea e sul loro potenziale impatto ambientale.



Teoria

4.1 INTRODUZIONE AI VEICOLI ELETTRICI

Il veicolo elettrico a batteria (BEV) è dotato di motore elettrico che sostituisce il motore a combustione interna. Il veicolo utilizza una batteria di trazione di grandi dimensioni per alimentare il motore elettrico e deve essere collegato a una presa di corrente o a una stazione di ricarica, chiamata anche apparecchiatura di alimentazione per veicoli elettrici (Figura 40).

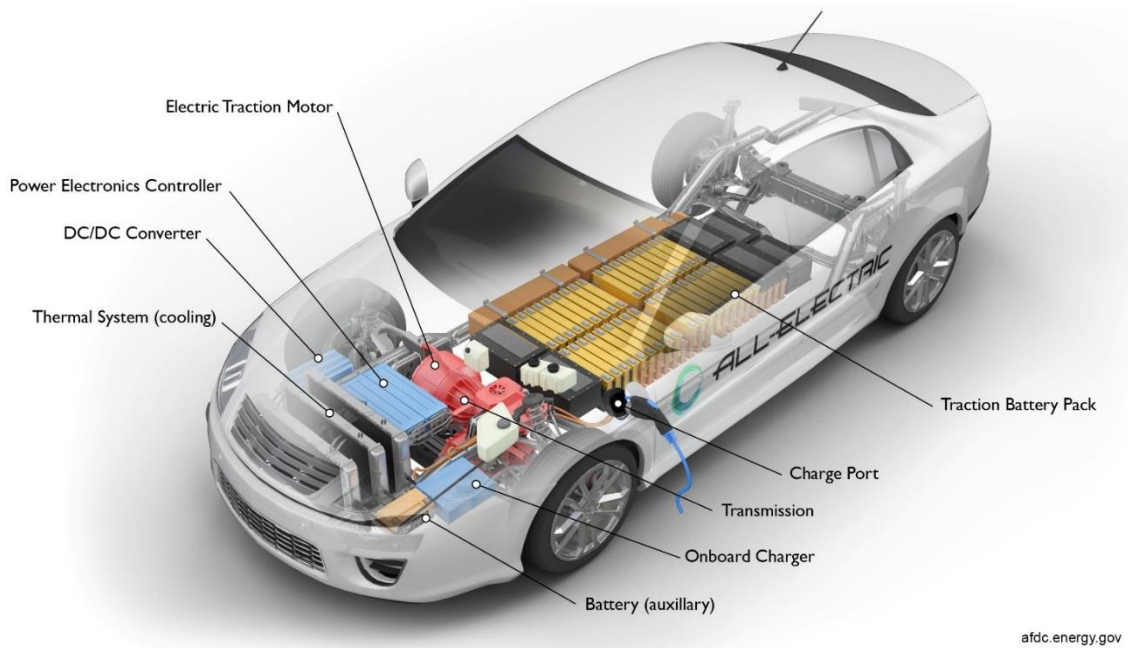


Figura 40: Struttura di un veicolo elettrico

Un veicolo elettrico è costituito dagli elementi illustrati in Figura 41:

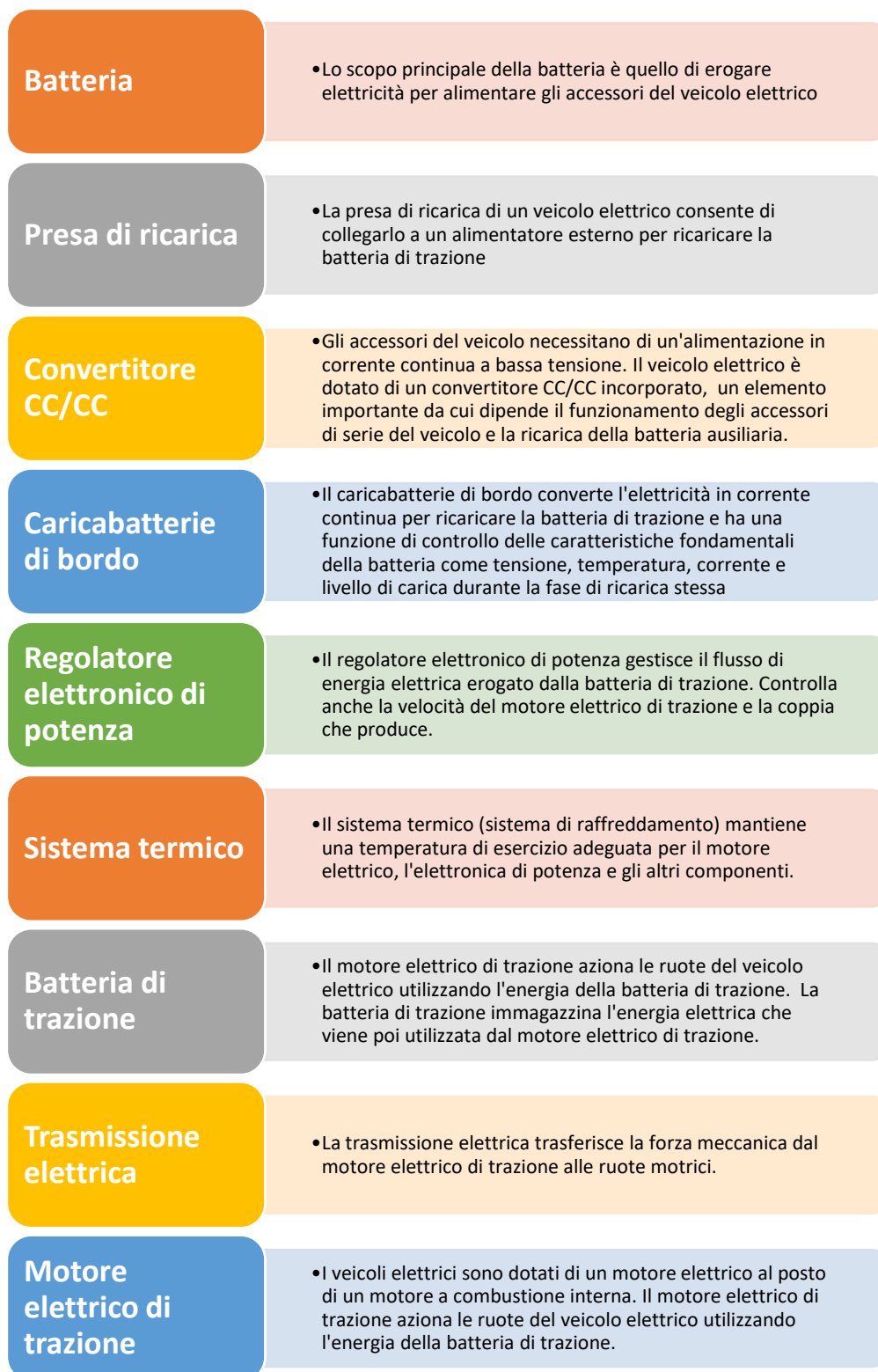


Figura 41: Elementi di un veicolo elettrico ⁴³

L'Agenzia USA per la tutela dell'ambiente classifica i veicoli elettrici a batteria come veicoli a emissioni zero, in quanto non producono emissioni di scarico dirette. Sono

⁴³ Analisi indipendente basata su <https://www.newkidsscar.com/electric-car-construction/>

disponibili in commercio veicoli completamente elettrici sia pesanti che leggeri. I veicoli elettrici a batteria sono più costosi di analoghi veicoli con motore a combustione interna e hanno un'autonomia inferiore rispetto ai veicoli con motore a combustione interna. L'efficienza e l'autonomia dei veicoli elettrici a batteria variano sostanzialmente a seconda delle condizioni di guida. I veicoli completamente elettrici sono più efficienti nella guida in città che in autostrada.

Il trasporto su strada è responsabile di quasi un quarto delle emissioni di gas serra. Recentemente, i veicoli elettrici hanno assunto un ruolo importante nelle strategie di sviluppo dell'industria automobilistica dell'Unione europea. I veicoli elettrici sono il futuro del trasporto su strada e rappresentano un notevole potenziale per ridurre l'inquinamento atmosferico e aumentare la qualità della vita, soprattutto nei centri urbani affollati. Nei paesi dell'Unione europea le azioni governative, così come il pacchetto normativo, puntano ad aumentare l'uso di carburanti alternativi e a sostenere lo sviluppo della mobilità elettrica. I veicoli elettrici a batteria ricaricati con energia elettrica rinnovabile sembrano avere un impatto ambientale quasi nullo in un'ottica Well-to-Wheel.

4.2 VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA DEI VEICOLI ELETTRICI A BATTERIA (BEV)

Nel capitolo 3.4 abbiamo presentato un caso studio sulla valutazione del ciclo di vita dei veicoli a carburante convenzionale; in questa sede andremo invece a presentare un caso studio sulla valutazione del ciclo di vita dei veicoli a carburante alternativo.

Abbiamo condotto una LCA per i veicoli elettrici a batteria (BEV). A tal fine, come per l'analisi LCA dei veicoli a combustibile convenzionale, anche in questo caso sono state effettuate analisi incentrate su impronta di carbonio, impronta idrica e impronta delle risorse. Nel caso dell'LCA dei veicoli elettrici, abbiamo preso in considerazione le opzioni di ricarica delle batterie in base al mix energetico disponibile tra il 2020 e il 2050. Abbiamo condotto la valutazione del ciclo di vita in conformità a Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida - Emendamento 2 (ISO 14044: 2006/Amd 2: 2020). Abbiamo definito l'unità funzionale, i confini del sistema e le ipotesi di base. La valutazione delle impronte ambientali è stata condotta utilizzando il software SimaPro v. 9 con il database Ecoinvent v.3. Come per l'analisi LCA dei veicoli a carburante convenzionale, anche per i veicoli elettrici abbiamo definito un'unità funzionale pari a 100 km.

I confini del sistema per i veicoli elettrici a batteria comprendono i cicli di vita utile di un'autovettura elettrica (tra cui la produzione dell'autovettura, la produzione della batteria, i lavori stradali, l'uso dell'autovettura, la manutenzione e lo smaltimento della stessa) e la ricarica della batteria, tenendo conto delle tendenze nella fornitura di elettricità per la ricarica delle batterie tra il 2015 e il 2050.

Il funzionamento del veicolo elettrico in sé non provoca l'emissione di composti nocivi nell'atmosfera; è la ricarica della batteria che comporta il suo effettivo impatto ambientale. La ricarica viene effettuata utilizzando la rete elettrica pubblica, quindi l'impatto ambientale del veicolo elettrico sarà direttamente influenzato dal modo in cui viene generata l'elettricità consumata per caricare la batteria integrata del veicolo.

Per questo motivo, al fine di eseguire l'analisi LCA per i veicoli elettrici, abbiamo sviluppato un modello computazionale di LCA per la ricarica delle batterie dei veicoli elettrici, che ha lo scopo di aiutare nell'analisi dell'impatto ambientale dei veicoli elettrici.

Abbiamo condotto un'analisi per le singole fonti di energia elettrica. Le otto principali fonti energetiche utilizzate per la produzione di energia elettrica sono riportate nella Figura 42.

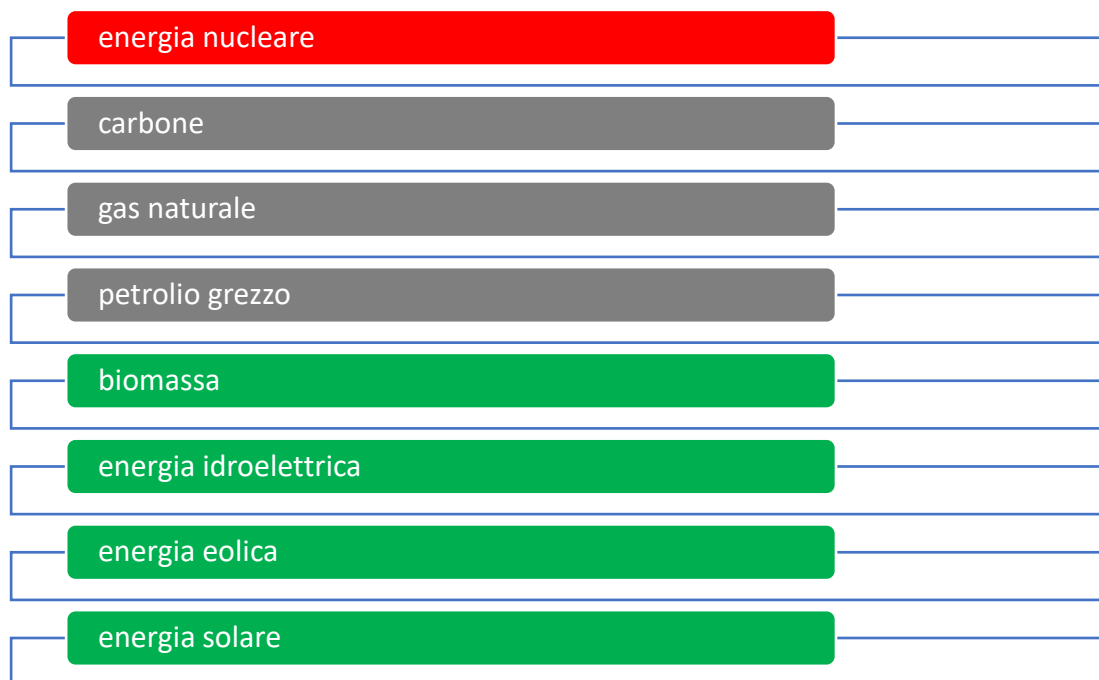


Figura 42: Principali fonti energetiche utilizzate per produrre elettricità

Abbiamo calcolato le impronte ambientali di ciascuna fonte di energia elettrica (Tabella 10).

Tabella 10: Impronta di carbonio, impronta idrica e risorse

Lp.	Impronta ambientale	Impronta di carbonio	Impronta idrica	Impronta delle risorse
	Abbreviazioni	CF	WF	RF
	Unità	g CO ₂ eq/kWh	m ³ /kWh	MJ/kWh
1	Biomassa	4,77E+01	1,96E-04	5,52E-01
2	Carbone fossile	1,19E+03	1,58E-02	1,43E+01
3	Idro	4,15E+00	1,00E-04	3,69E-02
4	Lignite	1,15E+03	5,90E-03	1,29E+01
5	Gas naturale	5,49E+02	1,70E-03	8,91E+00
6	Nucleare	1,19E+01	3,50E-03	1,37E-01
7	Solare	7,69E+01	8,00E-04	9,38E-01
8	Eolico	1,58E+01	2,00E-04	1,93E-01

Abbiamo analizzato la letteratura sulle previsioni per lo sviluppo dell'ingegneria energetica nell'Unione europea negli anni a venire, dalla quale è emersa la futura sostituzione dell'energia basata sui combustibili fossili da quella ottenuta tramite fonti rinnovabili, principalmente da impianti eolici. I cambiamenti che ne deriveranno comporterebbero lo sviluppo di centrali elettriche basate su fonti di energia rinnovabili, principalmente impianti eolici, nonché la crescita del settore dell'energia nucleare.

Il modello di calcolo dell'LCA per la ricarica delle batterie dei veicoli elettrici che abbiamo sviluppato richiede i seguenti dati: la quota percentuale delle singole fonti energetiche nel mix totale del paese selezionato e il consumo energetico per 100 km del veicolo selezionato. Il valore dell'impronta ambientale per ciascuna fonte di energia è stato da noi calcolato e presentato nella Tabella 10.

Abbiamo sviluppato il seguente modello computazionale sulle impronte ambientali (formule 1-3) per calcolare appunto le tre impronte ambientali correlate alla ricarica delle batterie dei veicoli elettrici:

$$CF_{EV} = (CF_{ES1-8} * S_{ES1-8}) * E_{EV} \quad (1)$$

dove:

CF_{EV} – impronta di carbonio dovuta alla ricarica delle batterie dei veicoli elettrici [g CO₂ eq/100 km];

$CF_{ES\ 1-8}$ – impronta di carbonio derivante dalla produzione di 1 kWh di energia per ciascuna fonte di energia [g CO₂ eq/kWh];

$S_{ES\ 1-8}$ – quota percentuale della fonte di energia (S - quota, ES - fonti di energia) nel mix energetico di un determinato paese o di singole fonti;

E_{EV} – consumo energetico del veicolo [kWh/100 km];

1-8 - indica una singola fonte di energia: biomassa, carbone fossile, idro, lignite, gas naturale, nucleare, solare ed eolica

$$WF_{EV} = (WF_{ES\ 1-8} * S_{ES\ 1-8}) * E_{EV} \quad (2)$$

dove:

WF_{EV} – impronta idrica per la ricarica delle batterie dei veicoli elettrici [m³/100 km];

$WF_{ES\ 1-8}$ – impronta idrica derivante dalla produzione di 1 kWh di energia per ciascuna fonte di energia [m³/kWh];

$S_{ES\ 1-8}$ – quota percentuale della fonte di energia (S - quota, ES - fonti di energia) nel mix energetico di un determinato paese o di singole fonti;

E_{EV} – consumo energetico del veicolo [kWh/100 km];

1-8 - indica una singola fonte di energia: biomassa, carbone fossile, idro, lignite, gas naturale, nucleare, solare ed eolica

$$RF_{EV} = (RF_{ES\ 1-8} * S_{ES\ 1-8}) * E_{EV} \quad (3)$$

dove:

RF_{EV} – impronta delle risorse per la ricarica delle batterie dei veicoli elettrici [MJ/100 km];

$RF_{ES\ 1-8}$ – impronta delle risorse derivante dalla produzione di 1 kWh di energia per ciascuna fonte di energia [MJ/kWh];

$S_{ES\ 1-8}$ – quota percentuale della fonte di energia (S - quota, ES - fonti di energia) nel mix energetico di un determinato paese o di singole fonti;

E_{EV} – consumo energetico del veicolo [kWh/100 km];

1-8 - indica una singola fonte di energia: biomassa, carbone fossile, idro, lignite, gas naturale, nucleare, solare ed eolica

VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA DEI VEICOLI ELETTRICI A BATTERIA - CASO STUDIO PER LA POLONIA

Abbiamo condotto una valutazione del ciclo di vita dei veicoli elettrici a batteria in Polonia. A tal fine abbiamo analizzato la struttura del mix di produzione di energia elettrica in Polonia, sia attuale che futuro. Abbiamo stabilito che l'energia elettrica rappresenta il principale fattore determinante dell'impatto ambientale dei veicoli elettrici. Abbiamo condotto un'analisi delle impronte ambientali dovute alla ricarica delle batterie dei veicoli elettrici in Polonia, basandoci sul modello di analisi computazionale del ciclo di vita da noi sviluppato.

Nella nostra analisi LCA abbiamo preso in considerazione il ciclo di vita di un'auto elettrica: fabbricazione, funzionamento, manutenzione e smaltimento dell'auto. Per l'analisi abbiamo scelto una batteria agli ioni di litio dal momento che è il modello più utilizzato nei BEV.

Per la nostra analisi LCA abbiamo preso in considerazione l'energia per la ricarica delle batterie fornita dalla rete elettrica polacca attuale e futura nell'arco di tempo 2020-2050.

Abbiamo analizzato tre impronte ambientali: impronta di carbonio, impronta idrica e impronta delle risorse per i veicoli elettrici a batteria in Polonia. Per una descrizione di queste impronte ambientali si veda il capitolo 3.

RISULTATI DELLA VALUTAZIONE DELL'IMPRONTA DI CARBONIO DEI VEICOLI ELETTRICI A BATTERIA

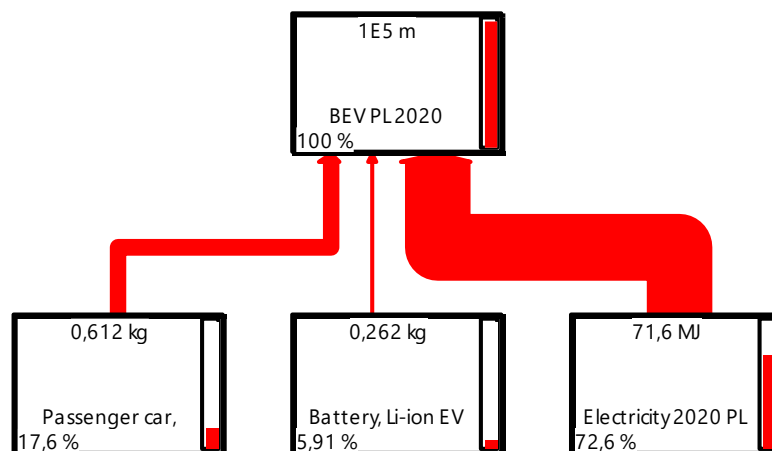


Figura 43: Fattori determinanti dell'impronta di carbonio dei veicoli elettrici a batteria in Polonia nel 2020

I risultati dell'LCA per ciascuna impronta sono stati presentati sotto forma di diagrammi.

Abbiamo stabilito i fattori determinanti dell'impronta di carbonio per i veicoli elettrici a batteria utilizzati in Polonia nel 2020. I risultati della valutazione dell'impronta ambientale oggetto di studio sono stati illustrati in Figura 43.

Dalla nostra analisi LCA è emerso che il principale fattore determinante dell'impronta di carbonio per i BEV in Polonia è l'elettricità utilizzata per ricaricare le batterie del veicolo (Figura 43). L'elettricità consumata per caricare le batterie rappresenta il 71,6% dell'impronta di carbonio dei BEV in Polonia nel 2020. Una buona parte dell'impronta di carbonio è inoltre correlata alla produzione delle autovetture (17,6%).

RISULTATI DELLA VALUTAZIONE DELL'IMPRONTA IDRICA DEI VEICOLI ELETTRICI A BATTERIA

Abbiamo stabilito i fattori determinanti dell'impronta idrica per i veicoli elettrici a batteria utilizzati in Polonia nel 2020. I risultati della valutazione dell'impronta idrica sono illustrati in Figura 44. Il principale fattore determinante dell'impronta idrica dei BEV è legato all'elettricità utilizzata per caricare le batterie dei veicoli, la cui quota ammonta al 73,1% nel 2020.

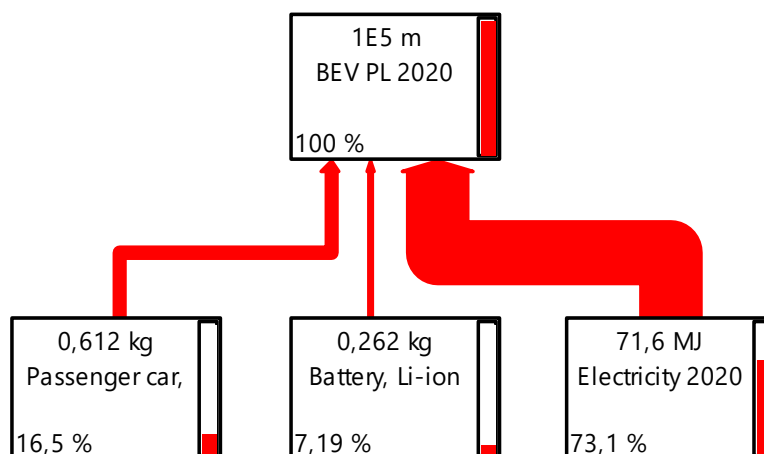


Figura 44: Fattori determinanti dell'impronta idrica dei veicoli elettrici in Polonia nel 2020

RISULTATI DELLA VALUTAZIONE DELL'IMPRONTA DELLE RISORSE DEI VEICOLI ELETTRICI A BATTERIA

Abbiamo stabilito i fattori determinanti dell'impronta delle risorse dei veicoli elettrici a batteria in servizio in Polonia nel 2020. I risultati della valutazione delle impronte ambientali oggetto di studio sono illustrati in Figura 45.

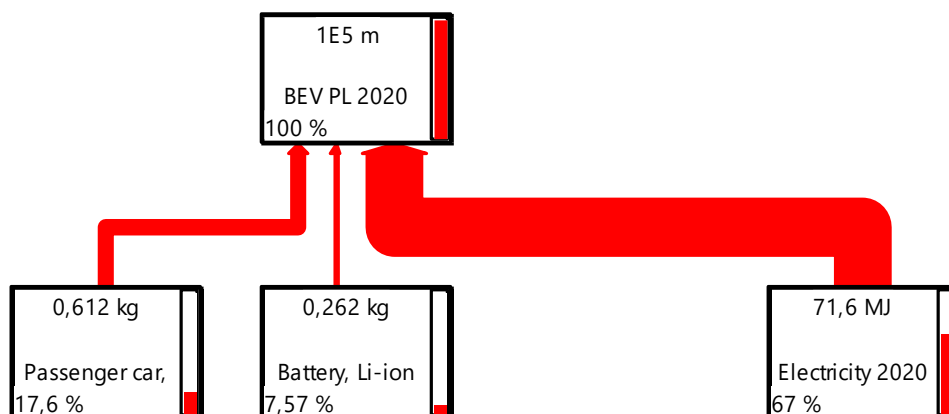


Figura 45: Fattori determinanti dell'impronta delle risorse dei veicoli elettrici in Polonia nel 2020

Le analisi comparative delle impronte ambientali delle autovetture elettriche attuali e future sono state eseguite considerando le variazioni delle fonti di energia elettrica che costituiscono il mix polacco. È emerso che il principale fattore determinante dell'impronta ambientale dei veicoli elettrici in Polonia è l'elettricità utilizzata per ricaricare i veicoli. Per il futuro si prevede da un lato un aumento della produzione di elettricità da fonti alternative e da nucleare a partire dal 2035, e dall'altro un calo del volume di elettricità prodotta da combustibili solidi, previsione che influisce sui risultati dello studio. All'esempio della Polonia e del mix elettrico polacco è possibile applicare il calcolo dei fattori determinanti dell'impronta dei veicoli elettrici utilizzato per altri paesi. L'analisi LCA delle fonti di elettricità utilizzate per la ricarica delle batterie dei veicoli ha mostrato che il principale fattore determinante dell'impatto ambientale negativo dei sistemi energetici in Polonia è il consumo di combustibili solidi, nello specifico sia carbone fossile che lignite.

4.3 LCA DELLA RICARICA DELLE BATTERIE DEI VEICOLI ELETTRICI NEI PAESI DELL'UNIONE EUROPEA - CASO STUDIO

IPOTESI

Questo capitolo si concentra sull'analisi dell'energia elettrica prodotta nei singoli paesi membri dell'UE e utilizzata negli stessi per la ricarica delle batterie dei veicoli elettrici. Abbiamo eseguito l'analisi LCA sulle categorie d'impatto ambientale relative alle emissioni di gas serra, al consumo cumulativo di acqua e all'esaurimento delle risorse. Le nostre analisi si riferiscono all'anno 2015 e includono anche previsioni sulla produzione di energia in tutti i paesi dell'UE per il 2020, 2030 e 2050.

Abbiamo analizzato la struttura del mix di produzione di energia elettrica in Europa, sia attuale che futura. In Europa la produzione di energia risulta molto diversificata in termini di fonti di energia utilizzate, il che comporta un impatto ambientale diversificato. La **funzione del sistema** era la quantità di energia della rete elettrica utilizzata per caricare la batteria elettrica di un'autovettura per una distanza ipotizzata di 100 km. A scopo di confronto, tutte le analisi si riferiscono alla stessa unità funzionale (UF) di 100 km. All'interno dei suoi **confini** il sistema si estende a tutte le tecnologie andando a includere il mix elettrico di tutti i paesi. Il confine del sistema è *di tipo cradle to gate* (la spiegazione e i dettagli di questo approccio sono illustrati nel capitolo 2.5). Per poter effettuare l'analisi del ciclo di vita è stato definito il confine del sistema e sono stati identificati i set di dati con riferimento alla struttura della produzione di energia elettrica per i singoli paesi dell'UE. La principale **fonte di dati** per le analisi sulla struttura attuale e futura del mix di produzione di energia elettrica in tutti i paesi dell'Unione europea è stata la documentazione pubblicata dalla Commissione europea. La struttura della produzione di energia presente nella rete elettrica e fornita alla batteria è uno dei parametri più importanti presi in considerazione quando si analizza un veicolo elettrico.

Abbiamo ipotizzato che la variabile fondamentale che determina l'impatto dei veicoli elettrici sull'ambiente nei paesi dell'Unione europea sia la struttura della produzione di elettricità per la ricarica delle batterie delle auto elettriche. Per questo motivo sono state condotte diverse analisi ambientali sui cambiamenti previsti a livello di fonti energetiche in tutti i paesi dell'UE. Le analisi riguardano il periodo 2015-2050 e affrontano le ipotesi fondamentali relative al cambiamento delle fonti energetiche, secondo quanto previsto per i singoli paesi. Le analisi riguardano anche i diversi tipi di produzione energetica previsti nei paesi analizzati per gli anni 2015-2050.

Le analisi di impatto ambientale sono state condotte considerando la valutazione delle emissioni di gas serra dovute alla produzione di energia elettrica, tenendo conto della struttura delle fonti energetiche in tutti i paesi dell'UE. Abbiamo analizzato altre categorie considerate rilevanti in termini di impatto ambientale dei veicoli elettrici, tra cui il consumo cumulativo di acqua e l'esaurimento delle risorse.

RISULTATI

Analisi delle fonti di produzione di energia nei paesi UE

In primo luogo, abbiamo analizzato le fonti di energia elettrica nell'UE. Le quote di ciascuna fonte di energia elettrica nell'Unione europea sono illustrate in Figura 46. Figura 48 riporta invece l'evoluzione prevista per gli anni 2015-2050 della quota delle singole fonti energetiche utilizzate per la produzione di energia elettrica nell'Unione europea.

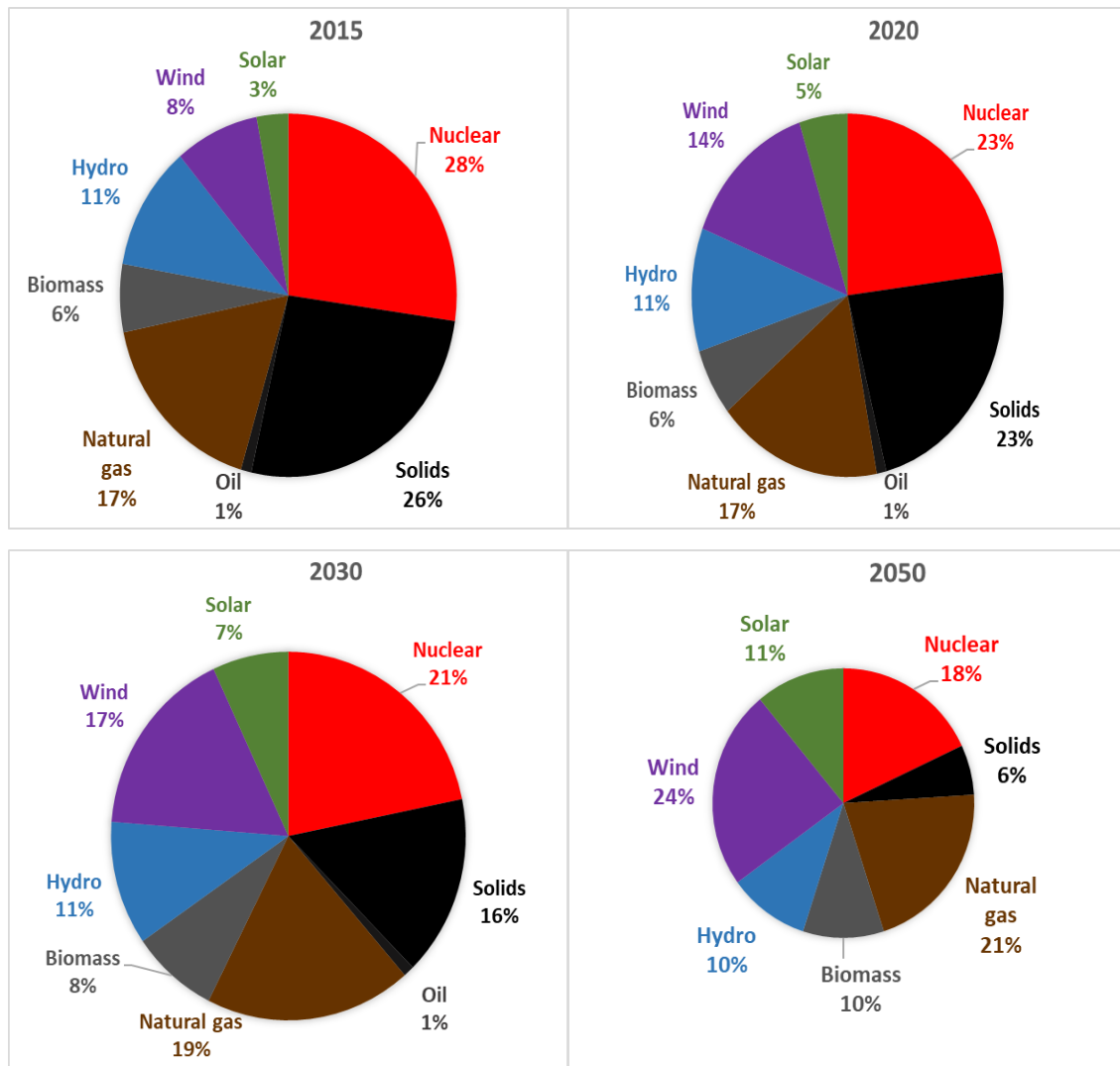


Figura 46 a: Quote delle singole fonti di energia elettrica nell'Unione europea

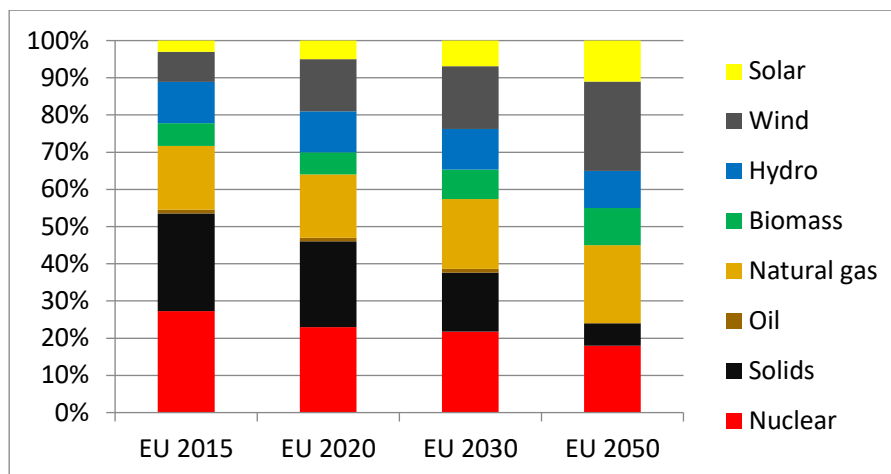


Figura 47 b: Quote delle singole fonti di energia elettrica nell'Unione europea

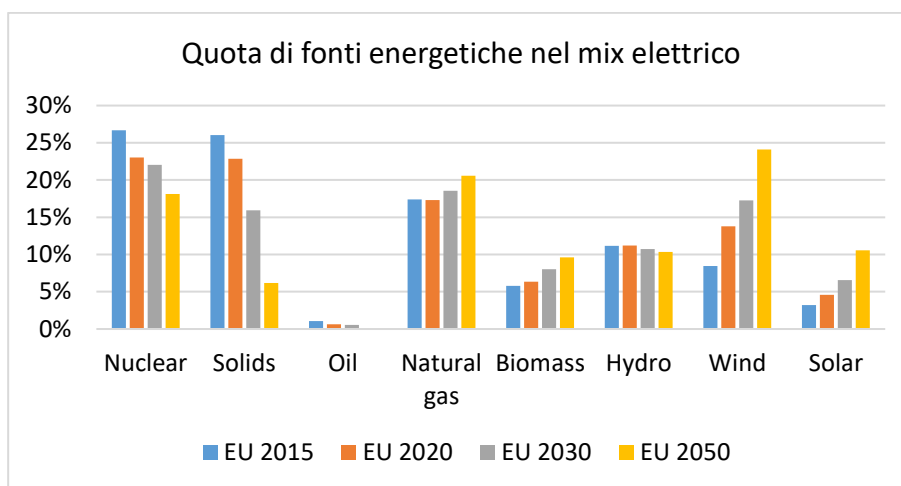


Figura 48: Variazione delle quote di ciascuna fonte energetica utilizzata per la produzione di energia elettrica nell'Unione europea nel periodo 2015-2050

È emerso che nel 2015 nei paesi UE la quota cumulativa di energia nucleare e derivante da solidi e gas naturale rappresentava il 70% (dove la quota individuale di queste fonti era rispettivamente del 27%, 26% e 17%), mentre la quota delle fonti di energia rinnovabile (FER) rappresentava solo il 29%. Nei prossimi anni, si prevede che la quota dei solidi scenderà al 6% nel 2050 e quella del nucleare al 18%, mentre la quota delle FER dovrebbe aumentare al 55%, con la quota più alta attribuibile all'energia eolica (24%). Per l'Unione europea si prevede anche un leggero aumento della quota di consumo di gas naturale per la produzione di energia elettrica. Un'analisi dettagliata delle politiche energetiche dei singoli paesi dell'UE è stata illustrata nella pubblicazione Energy Policies of IEA Countries (www.iea.org).

Valutazione del ciclo di vita della ricarica delle batterie dei veicoli elettrici nell'Unione europea

Sulla base dell'analisi della ricarica delle batterie dei veicoli elettrici in rapporto al consumo di elettricità dalla rete elettrica nell'Unione europea, abbiamo calcolato gli indicatori per le emissioni di gas serra (Figura 49), l'uso cumulativo di acqua (Figura 50) e l'esaurimento delle risorse (Figura 51), considerando come unità di misura funzionale 100 km percorsi da un'autovettura elettrica. Gli indicatori di cui sopra sono stati calcolati per ciascun paese dell'Unione europea.

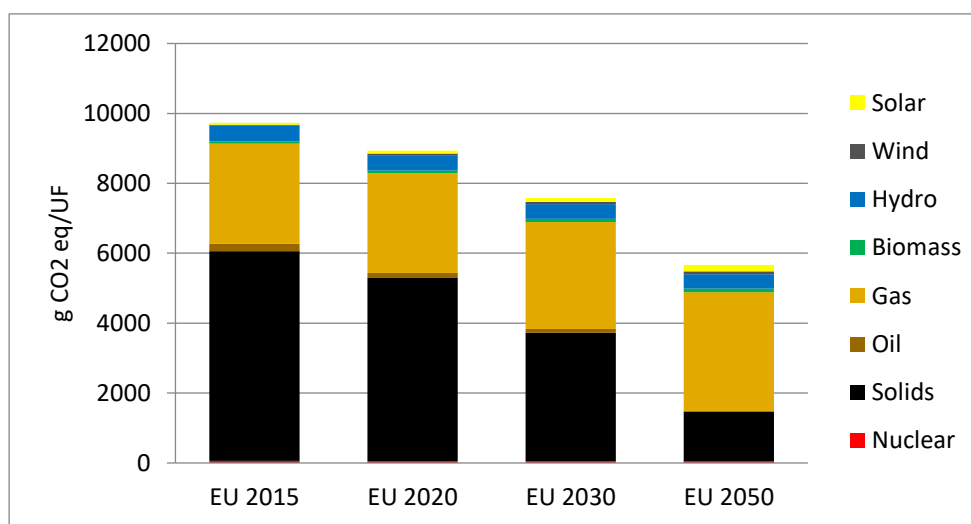


Figura 49: Impatto della ricarica delle batterie dei veicoli elettrici sulle emissioni di gas serra in Unione europea

Sulla base della nostra analisi delle emissioni di gas serra (GHG) legate alla ricarica delle batterie dei veicoli elettrici, abbiamo stabilito che tali emissioni sono in calo, e corrispondono a: 9727,67 g di CO₂ eq. per 100 km nel 2015, 8934,34 g di CO₂ eq. per 100 km nel 2020, 7579,62 g di CO₂ eq. per 100 km nel 2030, e 5661,96 g di CO₂ eq. per 100 km previsti per il 2050. Come si evince da Figura 49, l'impatto maggiore sulle emissioni di gas serra è attribuibile all'uso di carbone (solidi) e gas naturale nella produzione di energia elettrica. Abbiamo inoltre riscontrato che, nonostante l'aumento della quota di fonti energetiche rinnovabili, queste non esercitano alcun impatto sulle emissioni di gas serra (l'impatto delle FER sulle emissioni di gas serra è minimo). Inoltre, nonostante l'ampia quota di energia nucleare nel mix energetico dell'Unione europea, essa non ha alcun impatto sulle emissioni di gas serra.

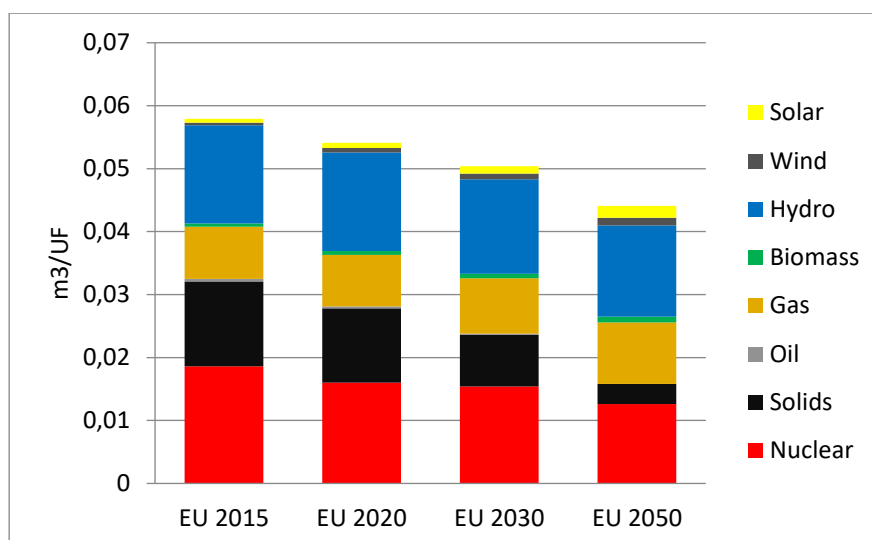


Figura 50: Uso cumulativo di acqua per la ricarica delle batterie dei veicoli elettrici in Unione europea

Sulla base dell'analisi dell'uso cumulativo di acqua per la ricarica delle batterie dei veicoli elettrici in rapporto al consumo di elettricità dalla rete elettrica, abbiamo calcolato l'uso cumulativo di acqua per 100 km percorsi da un'autovettura elettrica. Abbiamo dimostrato che il rapporto del consumo cumulativo di acqua diminuirà da 0,0579 m³/100 km nel 2015, 0,0541 m³/100 km nel 2020, e 0,0505 m³/100 km nel 2030, a 0,0442 m³/100 km nel 2050. Come illustra Figura 50, la maggiore influenza sul coefficiente di consumo cumulativo di acqua deriva dal consumo di energia idroelettrica, energia nucleare, gas naturale e solidi per la produzione di elettricità.

Abbiamo riscontrato che l'aumento della quota di gas naturale nella struttura della produzione di energia elettrica innesca un aumento del consumo di acqua e che, nonostante l'aumento delle quote di altre fonti di energia rinnovabile (eolica, solare e biomassa), esse non esercitano ancora alcun impatto sull'indicatore oggetto di analisi. L'elevato consumo di acqua attribuibile alla produzione di energia elettrica tramite energia nucleare, carbone e gas naturale è associato all'altissimo consumo di acqua per i processi di raffreddamento di queste tecnologie.

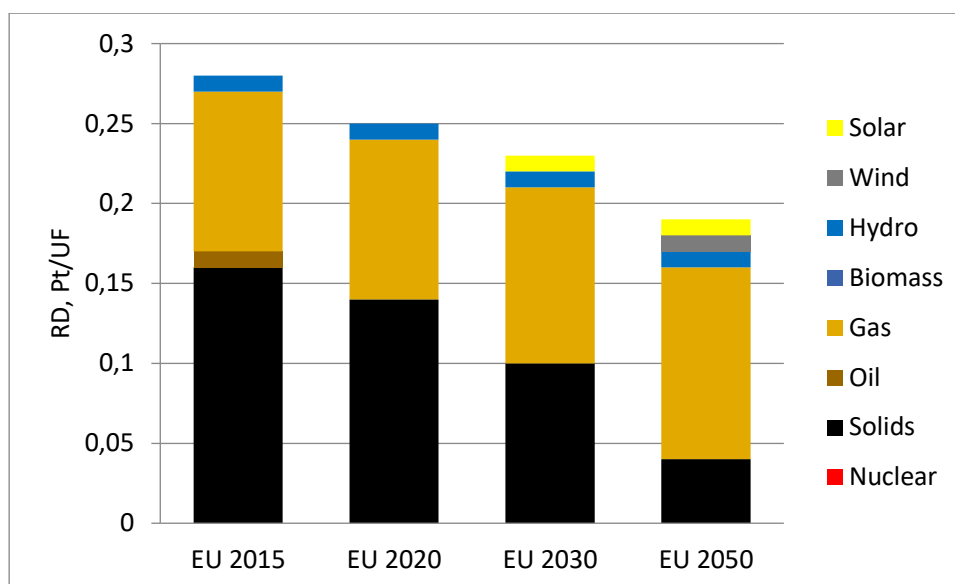


Figura 51: Impatto sull'esaurimento delle risorse dovuto alla ricarica delle batterie dei veicoli elettrici in Unione europea

Sulla base dell'analisi dell'esaurimento delle risorse per la ricarica delle batterie dei veicoli elettrici, abbiamo dimostrato che tale indicatore diminuisce da 0,29 Pt/100 km nel 2015, 0,27 Pt/100 km nel 2020 e 0,24 Pt/100 km nel 2030, fino a 0,19 Pt/100 km nel 2050. Figura 51 mostra che l'impatto maggiore sul consumo di risorse è attribuibile al consumo di solidi e di gas naturale nella produzione di elettricità. Il consumo di solidi decresce, causando una riduzione di tale indicatore, mentre il consumo di gas naturale è in aumento, con conseguente incremento dell'indicatore di esaurimento delle risorse.

Per quanto riguarda l'analisi di tutti gli indicatori ambientali per la produzione dell'energia elettrica utilizzata nell'Unione europea per ricaricare le batterie dei veicoli elettrici, è stato stabilito che tutti questi indicatori sono in calo. Ciò è dovuto principalmente alla riduzione della quota di solidi nella produzione di elettricità. Tuttavia l'aumento della quota di gas naturale ha un impatto sull'aumento degli indicatori di efficienza ambientale, in particolare sull'esaurimento delle risorse (materie prime, ovvero combustibili fossili e minerali) e sulle emissioni di gas serra.

L'analisi dell'impatto dell'utilizzo di fonti di energia rinnovabili per la produzione di elettricità ha dimostrato che la risorsa energetica più ecologica è l'energia eolica. L'analisi dell'energia idroelettrica ne ha invece rivelato l'impatto negativo sul consumo cumulativo di acqua. Rispetto all'energia elettrica eolica, gli indicatori ambientali stabiliti per la produzione di energia elettrica solare sono più elevati.

L'analisi LCA del ciclo di vita della produzione di energia elettrica nella rete elettrica per la ricarica delle batterie dei veicoli elettrici ha prodotto i seguenti risultati:

- Nella maggior parte dei paesi dell'Unione europea, gli indicatori ambientali analizzati sono risultati in calo negli anni successivi a quelli in cui sono state effettuate le analisi (dal 2015 al 2050).
- I fattori determinanti delle emissioni di gas serra derivanti dalla produzione di energia elettrica sono il consumo di solidi e di gas naturale. Le altre fonti di energia utilizzate nei paesi dell'UE hanno un impatto minimo sulle emissioni di gas serra.
- È stato dimostrato che il maggiore impatto sull'indicatore del consumo accumulato di acqua dovuto alla produzione di energia elettrica deriva dal consumo di energia idroelettrica, energia nucleare, gas naturale e combustibili solidi. L'elevata incidenza dell'indicatore di consumo idrico attribuibile alla produzione di energia elettrica tramite tecnologia nucleare, carbone e gas naturale è associata all'elevato consumo di acqua per i processi di raffreddamento richiesti da queste tecnologie.
- L'impatto maggiore sull'esaurimento delle risorse è attribuibile al consumo di solidi e gas naturale nella produzione di energia elettrica. La riduzione del consumo di carbone nella struttura di produzione dell'energia elettrica ha un effetto positivo sull'esaurimento delle risorse, mentre l'aumento del consumo di gas naturale negli anni successivi in alcuni paesi dell'UE ha un impatto negativo sull'ambiente, in quanto va invece ad innescare un aumento dell'indicatore di esaurimento delle risorse.
- L'analisi dell'impatto ambientale generato dall'uso di fonti di energia rinnovabile nella produzione di energia elettrica ha dimostrato che la fonte energetica più ecologica è l'energia eolica.
- Le emissioni di gas serra e l'impronta idrica risultano inferiori quando le batterie dei veicoli elettrici vengono ricaricate utilizzando energia rinnovabile invece di altre fonti. Da qui la conclusione che i paesi dell'Unione europea dovrebbero assolutamente affidarsi alle fonti di energia rinnovabile per la ricarica delle batterie dei veicoli elettrici.

4.4 ANALISI COMPARATIVA DEL CICLO DI VITA DI ICEV A BENZINA, ICEV DIESEL E BEV - CASO STUDIO

IPOTESI

In questa sede abbiamo confrontato l'impatto ambientale dei veicoli con motore a combustione interna (ICEV) con quello dei veicoli elettrici a batteria (BEV), prendendo in considerazione il ciclo di vita di questi tipi di auto. A tal fine abbiamo analizzato l'impronta di carbonio, l'impronta idrica e l'impronta delle risorse dei suddetti veicoli. I confini di sistema per il ciclo di vita dei BEV e degli ICEV (alimentati a diesel e a benzina) sono mostrati in Figura 52. Abbiamo realizzato l'LCA sull'esempio del mix energetico polacco.

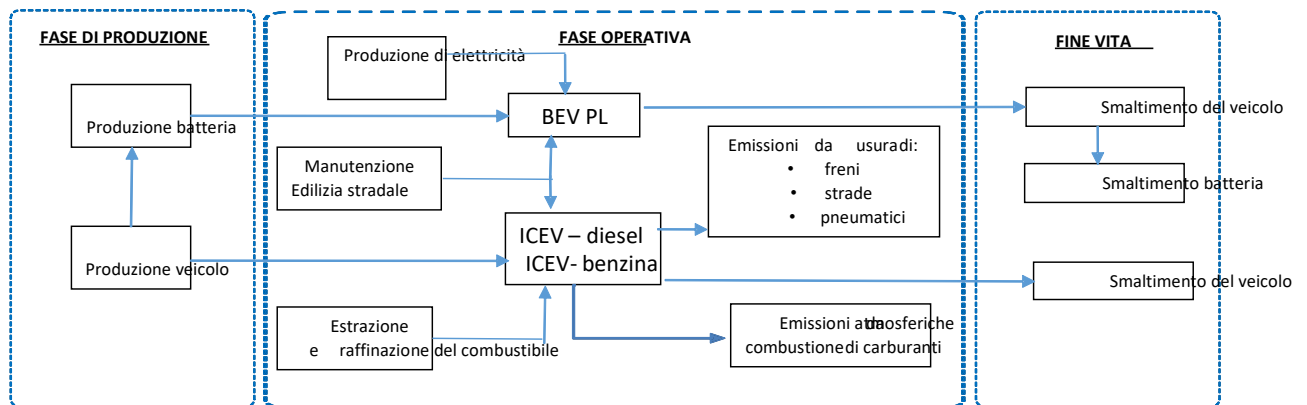


Figura 52: Confini di sistema per il ciclo di vita di BEV e ICEV (diesel e benzina)

LCA COMPARATIVA DEI VEICOLI - RISULTATI

La Figura 53 illustra i diversi fattori che incidono sull'impronta di carbonio degli ICEV diesel, degli ICEV a benzina e dei BEV oggetto di analisi, considerando la ricarica delle batterie con il mix energetico disponibile tra il 2020 e il 2050.

È stato riscontrato che gli indicatori dell'impronta di carbonio attuali e futuri dei BEV in Polonia sono inferiori a quelli dei veicoli elettrici diesel e a benzina. Nel caso degli ICEV a benzina e diesel, le emissioni atmosferiche dirette tipiche della fase di utilizzo del veicolo sono i principali fattori determinanti dell'impronta di carbonio, mentre nel caso dei BEV il fattore determinante corrispettivo è la produzione di elettricità.

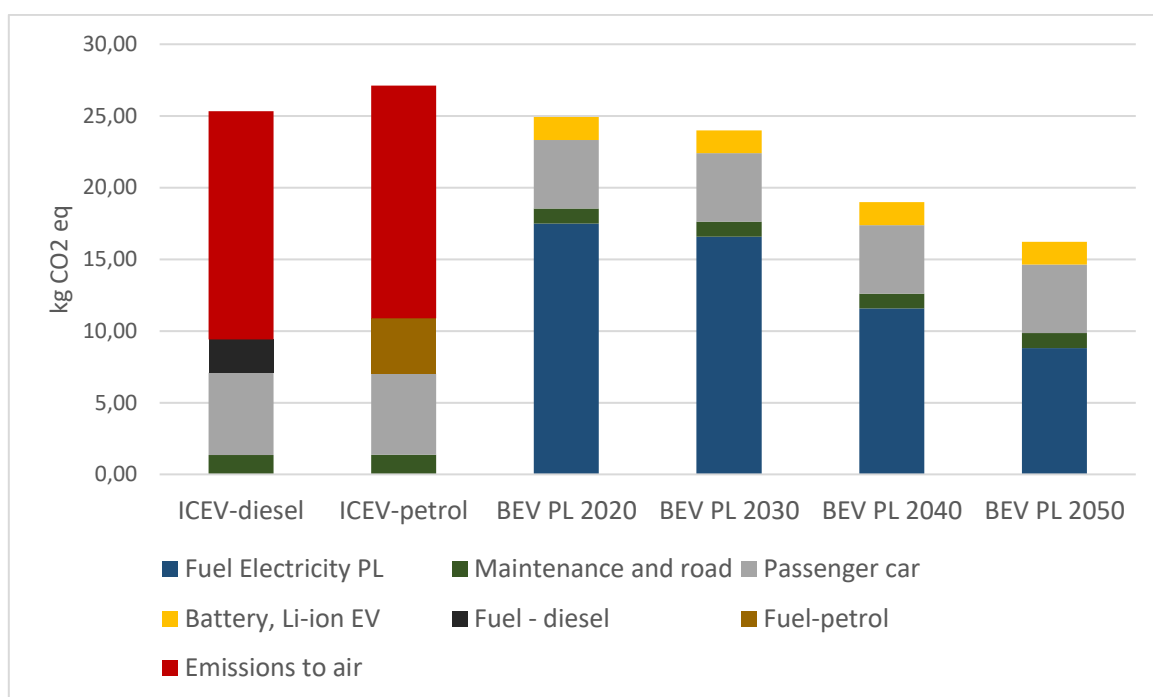


Figura 53: Analisi dell'impronta di carbonio di ICEV a benzina, ICEV diesel e BEV

La Figura 54 illustra i fattori che influenzano l'impronta idrica di ICEV diesel, ICEV a benzina e BEV nel caso in cui il processo di ricarica delle batterie si basa sul mix energetico nazionale disponibile nel periodo 2020-2050.

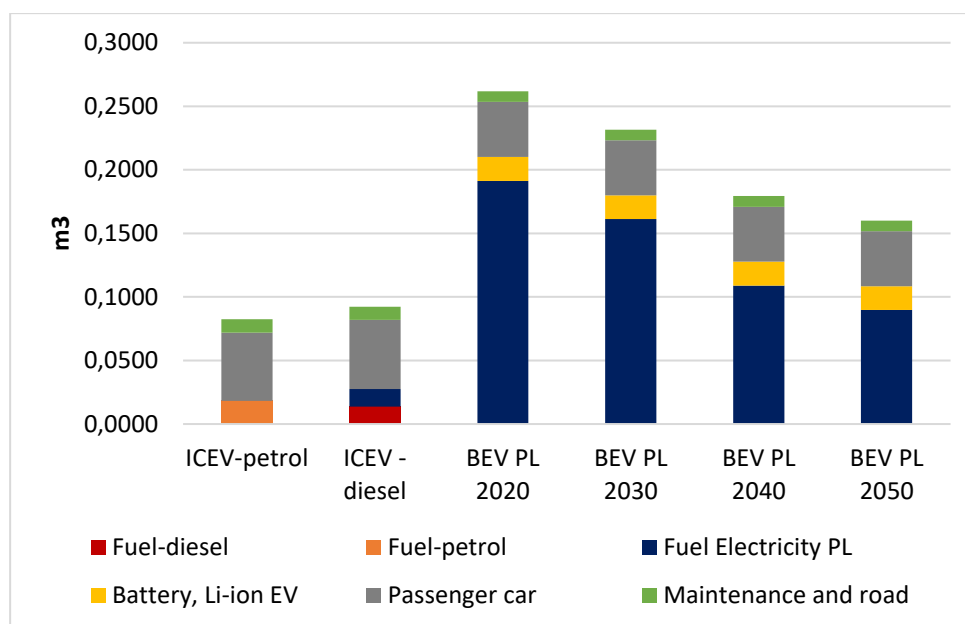


Figura 54: Analisi dell'impronta idrica di ICEV a benzina, ICEV diesel e BEV

È emerso che l'impronta idrica attuale e futura dei BEV in Polonia è superiore a quella degli ICEV (Figura 54). Per gli ICEV, la fase di produzione dell'auto è il principale fattore determinante dell'impronta idrica, mentre nel caso dei BEV il fattore determinante è l'elettricità.

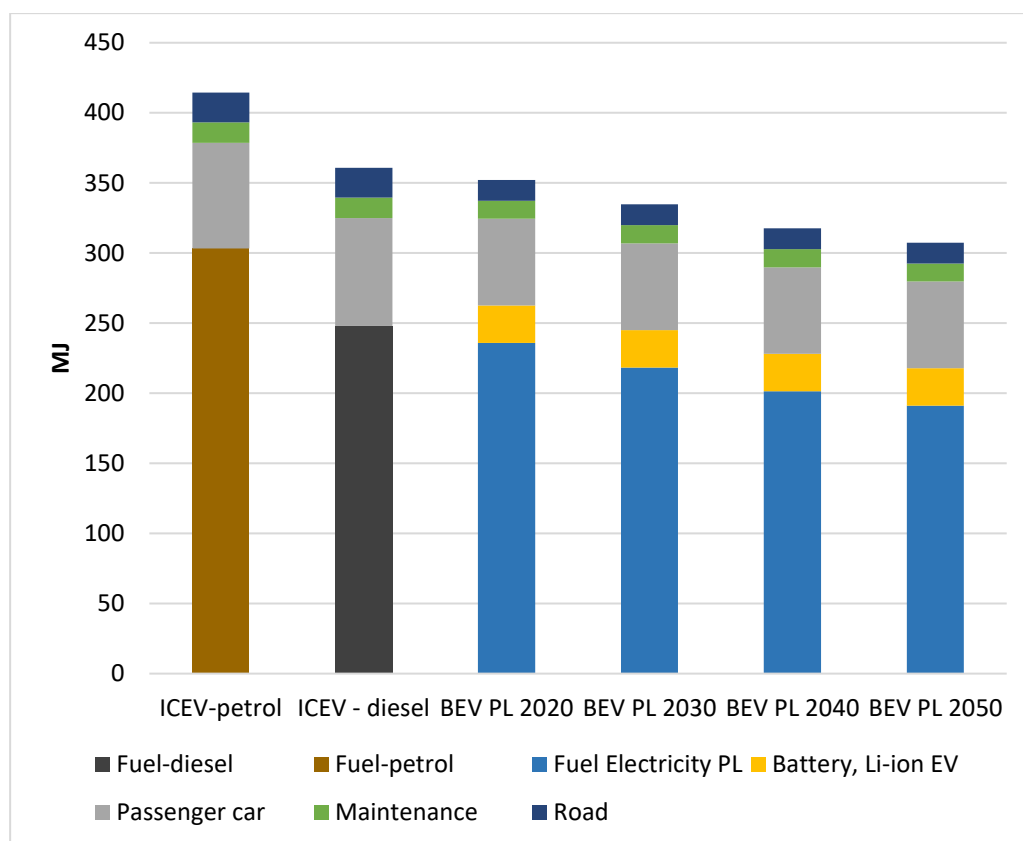


Figura 55: Analisi dell'impronta delle risorse di ICEV a benzina, ICEV diesel e BEV

La Figura 55 illustra i diversi fattori che influenzano l'impronta delle risorse dei veicoli ICEV diesel, ICEV a benzina e BEV oggetto dell'analisi, considerando la ricarica delle batterie con il mix energetico disponibile tra il 2020 e il 2050.

Sulla base dell'analisi, abbiamo riscontrato che le impronte ambientali proposte sono strumenti adeguati e utili ai fini del processo decisionale per la valutazione della sostenibilità dei trasporti secondo l'approccio del ciclo di vita. Al fine di perfezionare tali metodi sono tuttavia necessarie ulteriori ricerche. Le metriche ambientali così ottenute possono essere utilizzate a supporto del processo decisionale nell'economia circolare.

4.5 VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA DEI VEICOLI ELETTRICI A CELLE A COMBUSTIBILE

IDROGENO: L'OPZIONE DI DECARBONIZZAZIONE PIÙ PROMETTENTE PER I VEICOLI

Il cambiamento climatico e l'esaurimento dei combustibili fossili sono le ragioni principali che hanno portato allo sviluppo di metodi basati sulla tecnologia dell'idrogeno.

Sono molti i processi per la produzione di idrogeno da risorse convenzionali e alternative come il gas naturale, il carbone, il nucleare, la biomassa, il solare e l'eolico. L'idrogeno può essere ricavato da diverse fonti, e può essere verde, blu o grigio (Figura 56).

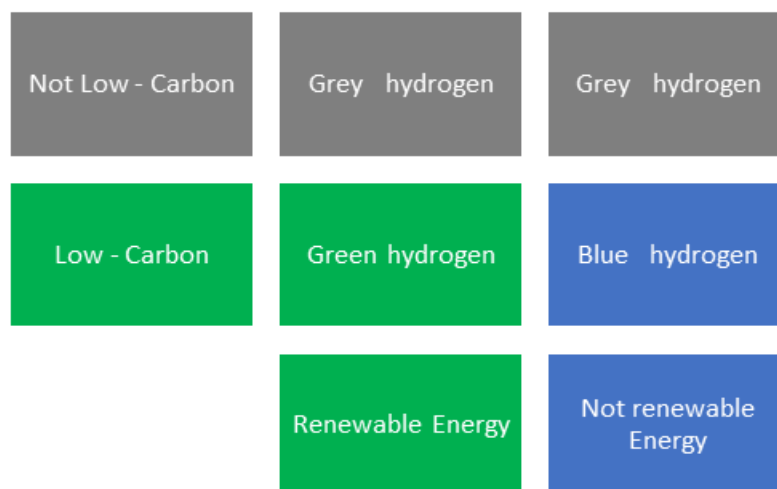


Figura 56: Colori indicativi per la produzione di idrogeno da fonti non rinnovabili e rinnovabili

L'idrogeno può essere prodotto da fonti rinnovabili come l'energia eolica e solare, ma può anche essere ricavato da combustibili fossili, tra cui il gas e la lignite. I colori, in questo caso, svolgono il ruolo di indicatori che mostrano come è stato ottenuto l'idrogeno, consentendo ai governi, alle imprese e alle comunità di giudicarne gli svantaggi rispetto ai vantaggi di prodotti puliti e che non generano emissioni:

- L'idrogeno verde deriva al 100% da fonti rinnovabili a zero emissioni come il vento e il sole;
- L'idrogeno è blu quando il processo di produzione non genera emissioni aggiuntive (ad esempio quando si utilizza l'energia nucleare), come accade nei processi che utilizzano tecnologie specifiche (ad esempio la tecnologia CCS) per ottenere emissioni nette zero;
- L'idrogeno grigio viene prodotto con emissioni aggiuntive (tipicamente da gas naturale o lignite). Purtroppo questa categoria rappresenta circa il 95% di tutto l'idrogeno attualmente prodotto nel mondo.

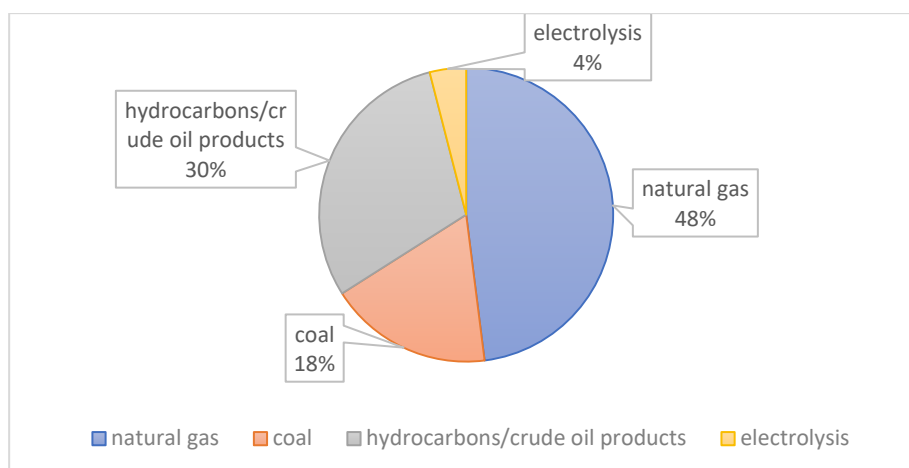


Figura 57: Fonti utilizzate per la produzione di idrogeno

I metodi più diffusi per la produzione dell'idrogeno sono la conversione di gas naturale e idrocarburi leggeri, la gassificazione di carbone e biomassa, il recupero dei gas di cokeria e l'elettrolisi dell'acqua, i processi fotoelettrolitici e fotobiologici.

L'8 luglio 2020, nell'ambito dell'attuazione del Green Deal europeo, la Commissione europea ha annunciato la sua strategia in materia di idrogeno, il cui obiettivo principale è quello di promuovere lo sviluppo della produzione di idrogeno da fonti rinnovabili, in particolare di idrogeno verde ottenuto per elettrolisi utilizzando fonti di energia rinnovabili. L'idrogeno è di gran lunga l'opzione di decarbonizzazione più promettente per veicoli commerciali pesanti, autobus, navi, treni, auto di grandi dimensioni e veicoli commerciali per quattro motivi (Figura 58).

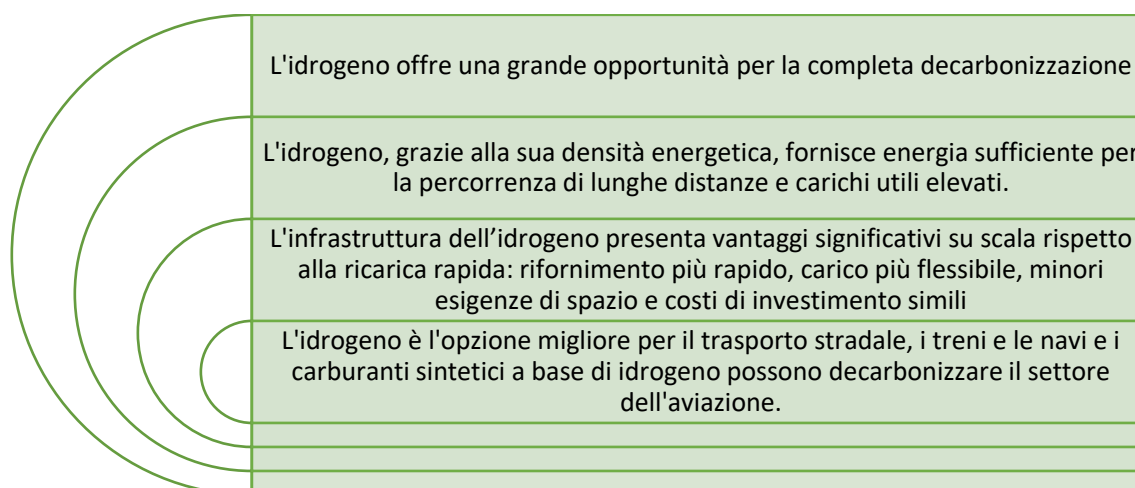


Figura 58: Motivi per cui l'idrogeno è l'opzione di decarbonizzazione più promettente per vari veicoli

Secondo il report 2020 intitolato *Fuelling the Future of Mobility: Hydrogen and Fuel Cell Solutions for Transportation*, sviluppato da Deloitte China e Ballard Power

Systems, dal punto di vista delle emissioni del ciclo di vita, il futuro dei trasporti è rappresentato dai veicoli a celle a combustibile alimentati a idrogeno.

L'interesse sempre maggiore che suscita l'idrogeno e la domanda crescente dello stesso, comunemente noto come il *carburante del futuro*, sono dovuti al suo crescente consumo nei trasporti. L'idrogeno utilizzato nel settore dei trasporti è percepito come un carburante a basse emissioni di carbonio che costituisce una valida alternativa ai prodotti a base di petrolio e di gas. Dal momento che, analogamente ai BEV, non causano emissioni dirette di gas di scarico, i FCEV potrebbero ridurre l'inquinamento atmosferico.

L'idrogeno è considerato un carburante a basse emissioni. L'unico composto emesso attraverso il tubo di scarico di un veicolo alimentato da questo gas è il vapore. Tuttavia, le emissioni effettive legate alla produzione di idrogeno dipendono dal modo in cui è stato ottenuto. L'idrogeno è una delle fonti più importanti di energia pulita sostenute dall'Unione europea, ma affinché questo sia riconosciuto come verde in conformità alla politica UE, deve essere prodotto solo tramite energia rinnovabile. Nel frattempo, in Europa e in Polonia l'argomento principale di discussione è la produzione su scala industriale di idrogeno utilizzando combustibili fossili o, in altre parole, l'idrogeno grigio. La produzione di idrogeno in Polonia ha finora utilizzato in misura considerevole tecnologie basate sul carbone: è pertanto necessario sviluppare tecnologie basate su fonti rinnovabili, in modo che l'idrogeno così ottenuto sia classificabile come verde.

4.6 VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA DEI VEICOLI ELETTRICI A CELLE A COMBUSTIBILE - CASO STUDIO

Abbiamo analizzato le emissioni di gas serra dei veicoli elettrici a celle a combustibile (FCEV) alimentati con idrogeno prodotto da carbone. A tal fine, abbiamo eseguito l'analisi LCA della produzione di idrogeno e abbiamo utilizzato i risultati dell'analisi dei gas serra della produzione e del funzionamento dei veicoli FCEV presenti in letteratura.

I seguenti risultati emersi dalle analisi delle emissioni di gas serra, sia per la produzione che per il funzionamento dei FCEV, sono stati riscontrati nella letteratura in materia [⁴⁴,⁴⁵]:

- Pila PEMFC – 5 g CO₂ eq/km;

⁴⁴ Evtimov I. & Ivanov R. & Stanchev H. & Kadikyanov G. & Staneva G. Life cycle assessment of fuel cells electric vehicles. *Transport Problems*. 2020. Vol. 15, No. 3, pagg. 153-166

⁴⁵ Valente, A. & Iribarren, D. & Candelaresi, D. & Spazzafumo, G. & Dufour, J. Using harmonised life-cycle indicators to explore the role of hydrogen in the environmental performance of fuel cell electric vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy* 2020. Vol. 45. pagg. 25758-25765

- Infrastruttura del veicolo (senza pila PEMFC) - 40 g CO₂ eq/km;
- Funzionamento del veicolo (senza idrogeno) – 10 g CO₂ eq/km.

Abbiamo effettuato un'analisi comparativa delle emissioni di gas serra derivanti da FCEV alimentati a idrogeno prodotto da gas di cokeria (COG) e da FCEV alimentati a idrogeno prodotto dalla gassificazione del carbone. L'analisi delle emissioni di gas serra derivanti dalla produzione di idrogeno tramite gassificazione comprende i processi di estrazione del carbone, il trattamento meccanico, il trasporto del carbone all'impianto di gassificazione, la gassificazione stessa, la cattura della CO₂ e lo stoccaggio del carbonio. I risultati presentati riguardano l'analisi delle emissioni di gas serra dovute alla produzione di idrogeno tramite gassificazione del carbone con CCS e senza CCS, secondo le condizioni del contesto Polonia [17]. Abbiamo esteso il confine del sistema ai FCEV e applicato l'idrogeno ottenuto ai FCEV. Nel nostro caso studio l'unità funzionale era pari a 1 km e il confine di sistema è stato esteso. Dall'analisi delle emissioni di gas serra dei FCEV è emerso che tali emissioni derivanti dalla produzione di idrogeno da COG sono inferiori a quelle legate alla produzione di idrogeno tramite gassificazione del carbone. Inoltre i FCEV alimentati a idrogeno ottenuto tramite gassificazione del carbone (senza tecnologia CCS) erano caratterizzati dall'indicatore di emissioni di gas serra più elevato, mentre la tecnologia di gassificazione della biomassa utilizzata per la produzione di idrogeno ha riportato un indicatore di emissioni di gas serra più basso: quest'ultima è pertanto la migliore alternativa di produzione di idrogeno.

Il confine di sistema del ciclo di vita dei FCEV alimentato a idrogeno prodotto da gas di cokeria è presentato in Figura 59.

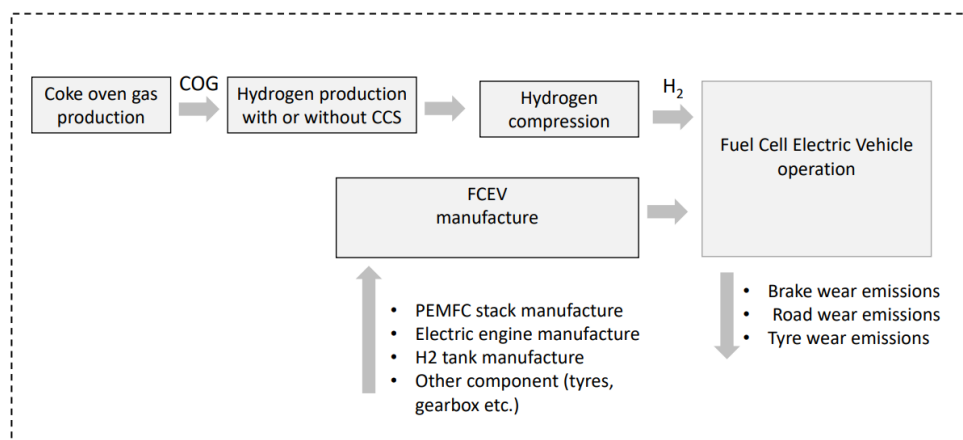


Figura 59: Confine del sistema del ciclo di vita dei FCEV

I nostri risultati sono stati confrontati con il ciclo di vita di un FCEV ipotizzando fonti di idrogeno diverse come il gas naturale, la biomassa e l'elettrolisi (Tabella 11).^{46, 47, 48, 49, 50}

Tabella 11: Analisi comparativa dei risultati degli studi originali

Sistema di produzione di idrogeno	Emissioni di gas serra del ciclo di vita dei FCEV [g CO ₂ eq/km]	Fonti
Idrogeno da gas di cokeria senza CCS	156	51, 17
Idrogeno da gas di cokeria con CCS	97	
Idrogeno da gassificazione del carbone senza CCS	215	
Idrogeno da gassificazione del carbone con CCS	121	
Idrogeno da riforma del metano con vapore	140	45
Idrogeno da gassificazione della biomassa	60	
Idrogeno da elettrolisi - energia eolica	70	52

Le emissioni di gas serra sono state valutate per i BEV le cui batterie sono state ricaricate con l'elettricità della rete elettrica, ovvero il mix energia elettrica polacco [^{53, 54}]. Nel caso dei BEV in Polonia, le emissioni di gas serra sono risultate pari a 41,4 kg CO₂eq/150.000 km (nel 2015). Entro il 2050, tali emissioni dovrebbero scendere a 25,8 kg

⁴⁶ Heo E., Kim J., Cho S.: Selecting hydrogen production methods using fuzzy analytic hierarchy process with opportunities, costs, and risks. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, 2012, pagg. 17655-17662.

⁴⁷ Chang P.L., Hsu C.W., Chang P.C.: Fuzzy Delphi method for evaluating hydrogen production technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, 2011, pagg. 14172-14179

⁴⁸ Kügemann M., Polatidis, H.: Multi-Criteria Decision Analysis of Road Transportation Fuels and Vehicles: A Systematic Review and Classification of the Literature. *Energies*, Vol. 13, num. 1, 2020

⁴⁹ Nikolaidis P., Poullikkas A.: A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 67, 2017, pagg. 597-611

⁵⁰ Staffell I., Scamman D., Abad W.A., Balcombe P., Dodds P. E., Ekins P., Ward K. R.: The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, Vol. 12, 2019, pagg. 463-491.

⁵¹ Piotr Fołęga, Dorota Burchart, Paweł Marzec, Simona Jursova, Pavlina Pustejovska: Potential environmental life cycle impacts of fuel cell electric vehicles powered by hydrogen produced from polish coke oven gas, *Transport Problems*, num. 1, vol. 17, 2022

⁵² Evtimov I. & Ivanov R. & Stanchev H. & Kadikyanov G. & Staneva G. Life cycle assessment of fuel cells electric vehicles. *Transport Problems*. 2020. Vol. 15, No. 3, pagg. 153-166

⁵³ Zhang, B., Chen, Y., Kang, B., Qian, J., Chuai, X., Peng, R., Zhang, J., Hydrogen production via steam reforming of coke oven gas enhanced by steel slag-derived CaO *International Journal of Hydrogen Energy* 2020. Vol. 45. Pagg. 13231-13244

⁵⁴ Valente, A. & Iribarren, D. & Dufour, J. Harmonising methodological choices in life cycle assessment of hydrogen: A focus on acidification and renewable hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy* 2019. Vol. 44. Pagg. 19426-19433

CO₂eq/150.000 km. Per il periodo 2015-2050, le emissioni di gas serra attribuibili ai BEV sono comprese tra 172 e 276 gCO₂eq/km, a seconda della fonte di elettricità.

Le emissioni di gas serra dei veicoli FCEV sono comprese tra 60 e 215 CO₂eq/km, il che significa che l'utilizzo dell'idrogeno, anche se prodotto con combustibili fossili, è una soluzione migliore per i trasporti rispetto ai veicoli elettrici. L'eccezione è rappresentata dall'idrogeno ottenuto dalla gassificazione del carbone senza tecnologia CCS.⁵⁵

I FCEV non generano emissioni locali di composti come i NO_x, né emettono CO₂. Nella fase tank-to-wheel (TTW), solo i FCEV e i BEV sono completamente neutrali dal punto di vista delle emissioni di carbonio, mentre le altre opzioni di decarbonizzazione, come i veicoli alimentati a biocarburanti, gas naturale e ibridi, non lo sono. Rispetto agli ICEV diesel e benzina, le emissioni devono essere considerate alla stregua di quelle derivanti dalla produzione di carburante nella fase TTW e well-to-tank (WTT). Le emissioni WTT per i veicoli elettrici comprendono le emissioni derivanti dall'estrazione, dal trasporto, dalla raffinazione e dalla lavorazione del petrolio e dalla distribuzione alle stazioni di servizio. Per quanto riguarda i BEV, le emissioni WTT dipendono dal mix di energia elettrica del paese in cui il veicolo viene solitamente ricaricato. Un vantaggio dei FCEV rispetto ai BEV è che le celle a combustibile richiedono meno energia delle batterie. L'impatto ambientale dei FCEV nella fase WTT dipende dalle modalità di produzione dell'idrogeno.

Nel sottocapitolo abbiamo analizzato l'impronta di carbonio delle catene di fornitura dell'idrogeno per i veicoli a celle a combustibile. In particolare i FCEV non solo causano emissioni di gas serra inferiori rispetto ai veicoli a benzina, ma non rilasciano quasi nessuna emissione durante il loro funzionamento, contribuendo così a una migliore qualità dell'aria soprattutto nelle aree urbane.

I combustibili fossili consumati per produrre idrogeno (cioè i percorsi di produzione dell'idrogeno basati sul gas naturale, sul carbone e sull'energia di rete), che sono destinati a essere il carburante del futuro, non possono essere considerati un'alternativa verde. Solo i veicoli a celle a combustibile alimentati con idrogeno prodotto tramite tecniche basate sulle fonti di energia rinnovabili, in particolare l'energia eolica e idroelettrica, possono ridurre le emissioni di gas serra. L'LCA è uno strumento utile per valutare l'impatto ambientale dei veicoli a celle a combustibile che utilizzano diversi carburanti. Un'analisi

⁵⁵ Fueling the Future of Mobility Hydrogen and fuel cell solutions for transportation. Vol. 1, Deloitte China 2020.

del ciclo di vita dell'idrogeno well to wheel ha dimostrato che l'idrogeno è una soluzione promettente per la riduzione delle emissioni di gas serra. Tuttavia, per quanto riguarda i veicoli a celle a combustibile alimentati a idrogeno, questa soluzione può causare emissioni di gas serra ancora più elevate di quelle attribuibili ai veicoli con motore a combustione interna, se l'idrogeno viene prodotto utilizzando combustibili fossili. I veicoli a idrogeno rappresentano una delle tre opzioni principali per il trasporto a basse emissioni di carbonio, insieme ai veicoli alimentati a biocarburanti e ai veicoli elettrici. A differenza dei biocarburanti, l'idrogeno non ha alcun impatto sull'uso del suolo o sulla qualità dell'aria; inoltre l'idrogeno offre un'autonomia maggiore e tempi di ricarica più brevi rispetto ai BEV. Le auto elettriche sono tuttavia più avanzate di quelle alimentate a idrogeno grazie ai loro costi inferiori e alle infrastrutture facilmente accessibili [^{56,57}].

⁵⁶ Chen, Y.& Ding, Z.& Wang, W.& Liu, J. Life-cycle assessment and scenario simulation of four hydrogen production schemes for hydrogen fuel cell vehicles. *China Journal of Highway and Transport* 2019. Vol. 32. Num. 5. Pagg. 172-180

⁵⁷ Burchart D. Application of advanced environmental life cycle assessment methods to pathways of alternative transport fuels. Monografia. Politechnika Śląska, Gliwice 2021, pag. 170

4.7 PUNTI CHIAVE DEL CAPITOLO



Riassunto

Al termine di questo capitolo, gli studenti comprenderanno i seguenti termini:

- Importanza dell'LCA nel settore automobilistico
- LCA dei veicoli elettrici a batteria (BEV)
- LCA dei veicoli elettrici a celle a combustibile (FCEV)
- Valutazione dell'impronta ambientale
- LCA per la ricarica delle batterie dei veicoli elettrici
- Impronta di carbonio, impronta idrica e impronta delle risorse delle fonti energetiche
- Modello computazionale dell'impronta ambientale per la ricarica delle batterie dei veicoli elettrici
- LCA comparativa tra ICEV a benzina, ICEV diesel e BEV
- L'idrogeno come opzione di decarbonizzazione più promettente per i veicoli



Domande

- Qual è l'importanza rivestita dall'LCA nel settore automobilistico?
- Come influisce il ciclo di vita dei BEV sull'impronta di carbonio?
- Come influisce il ciclo di vita dei BEV sull'impronta idrica?
- Quali sono le fonti per la produzione dell'idrogeno?
- Che cos'è l'impronta ambientale?
- In che modo le singole fonti energetiche influenzano l'impronta ambientale?
- Quali sono i risultati dell'LCA di ICEV a benzina, ICEV diesel e BEV?
- Perché l'idrogeno è l'opzione di decarbonizzazione più promettente per i veicoli?

Abbreviazioni

BEV - Veicoli elettrici a batteria

CCS - cattura e stoccaggio del carbonio

CF - Impronta di carbonio

CWU - uso cumulativo di acqua

DALY - anno di vita corretto per la disabilità

EF - Impronta ecologica

FCEV - Veicoli elettrici a celle a combustibile

UF - Unità funzionale

Emissioni GHG - Emissioni di gas serra

GWP - Potenziale di riscaldamento globale

ICEV - Veicoli con motore a combustione interna

LCA - Valutazione del ciclo di vita

LCI - Inventario del ciclo di vita

LCIA - Valutazione dell'impatto del ciclo di vita

RES - Fonti di energia rinnovabile

RF - Impronta delle risorse

TTW - tank-to-wheel (da serbatoio a ruota)

WF - Impronta idrica

WTT - well-to-tank (dal pozzo al serbatoio)

5. STRUMENTI PER L’LCA E LA VALUTAZIONE DELL’IMPATTO AMBIENTALE

5. STRUMENTI PER L’LCA E LA VALUTAZIONE DELL’IMPATTO AMBIENTALE.....	115
5.1 Introduzione Agli Strumenti Lca	117
Che Aspetti Prendere In Considerazione Nella Scelta Di Un Software Lca.....	117
5.2 Database Lci.....	119
Ecoinvent.....	119
Federal Lca Commons	121
Database Carbon Minds	122
Gabi	123
Altri Database.....	125
5.3 Strumenti Software Lca	128
Simapro	129
Simapro Collect.....	131
Simapro Share	131
Gabi	132
Openlca.....	133
Umberto.....	135
5.4 Punti Chiave Del Capitolo	137



Tempo di studio

120 minuti



Obiettivi

CONOSCENZE CHE GLI STUDENTI ACQUISIRANNO:

Gli studenti acquisiranno la conoscenza di diversi database LCI e di diversi strumenti software LCA che possono essere utilizzati per l'analisi LCA.

COME IL CAPITOLO LI AIUTERÀ A COMPRENDERE L'ARGOMENTO:

Lo studente otterrà una visione d'insieme dei diversi strumenti LCA disponibili e dei relativi database LCI utilizzati per la valutazione del ciclo di vita.

QUALI COMPETENZE SVILUPPERÀ IL CAPITOLO:

Il capitolo aiuterà gli studenti ad acquisire competenze e conoscenze su strumenti software LCA che potranno essere utili nel loro futuro professionale.

IN CHE CONTESTO GLI STUDENTI POTRANNO UTILIZZARE QUANTO ACQUISITO:

Gli studenti possono utilizzare le conoscenze acquisite nel loro futuro professionale nel campo dell'analisi LCA e dell'utilizzo di strumenti software LCA e di vari database LCI.



Teoria

5.1 INTRODUZIONE AGLI STRUMENTI LCA

Per facilitare l'analisi LCA sono disponibili sul mercato, a titolo gratuito o a pagamento, diversi strumenti apposti. Esistono differenze significative tra gli strumenti per quanto riguarda la facilità d'uso, i principi di modellazione e i database inclusi che possono essere utilizzati.

CHE ASPETTI PRENDERE IN CONSIDERAZIONE NELLA SCELTA DI UN SOFTWARE LCA

Quando si sceglie uno strumento software LCA da utilizzare per un progetto, sono diversi i criteri da considerare per selezionare l'opzione migliore per le proprie esigenze.

Prima di tutto, è necessario identificare le esigenze che lo strumento deve soddisfare. Vuoi calcolare l'LCA di un prodotto di nuova ideazione o stai valutando e migliorando un prodotto già affermato?

In secondo luogo, occorre considerare se i risultati che il software è in grado di produrre sono applicabili alla propria situazione:

- Quale ambiente software hai a disposizione?
- Lo strumento sarà gestito da una sola persona o più persone condivideranno i dati?
- Che tipo di dati sono disponibili nel software?
- Lo strumento verrà utilizzato solo dalla tua azienda o condividerai la fonte e i risultati con altri?
- In che modo lo strumento collabora con altri possibili strumenti e sistemi in uso nella tua azienda?
- Quanto tempo ci vorrà per i calcoli?
- Sarai in grado di utilizzare direttamente i dati e i risultati per presentarli e sottoporli a ulteriori valutazioni?
- Lo strumento supporta la certificazione desiderata?

È anche importante considerare l'aspetto finanziario:

- L'azienda possiede già uno strumento LCA o ne acquisterà uno nuovo?
- Qual è il budget a disposizione?
- Quante ore di lavoro sono necessarie per imparare a utilizzare lo strumento?
- Ti è possibile pagare un corso che ti aiuterà ad apprendere come usare lo strumento?
- Esistono esempi sufficienti e una documentazione adeguata sullo strumento?

Infine, ma non per questo meno importante, è necessario considerare anche le funzioni offerte dagli strumenti software LCA. Devono essere prese in considerazione queste cinque categorie:

- Database - l'elemento principale dello strumento da considerare è costituito dal database utilizzato per il calcolo e la metodologia. Esistono diversi database che sono disponibili per uno o più strumenti software LCA. Ulteriori informazioni sui set di dati LCI verranno descritte in seguito.
- Analisi dell'incertezza - poiché la variazione tra i metodi di modellazione statistica può comportare potenziali distorsioni, è importante che gli strumenti software LCA prevedano l'analisi dell'incertezza e della variabilità.
- Analisi di sensibilità - È opportuno che gli strumenti software LCA includano l'analisi di sensibilità per studiare la solidità dei risultati e la loro sensibilità a fattori incerti. Questa fase è essenziale ai fini dell'interpretazione finale, perché i parametri di input per l'LCA sono spesso incerti.
- Metodi di valutazione dell'impatto - Gli strumenti di LCA dovrebbero includere una serie di metodi volti a valutare i potenziali impatti ambientali. Due metodi prevalenti e riconosciuti a livello internazionale per l'LCA sono il metodo CML 2001⁵⁸ e l'Eco-Indicator 99.⁵⁹
- Presentazione - uno stile di presentazione di facile utilizzo è imprescindibile per un buono strumento software LCA. I risultati devono essere presentati in una gerarchia strutturata e consentire l'interattività tra loro stessi.

⁵⁸ Guinée, J., Heijungs, R., Huppes, G., Koning, A.D., Oers, L., Sleeswijk, A.W., Haes, U.D., Duin, R.V. & Lindeijer, E. 2001. Life cycle assessment—An operational guide to the ISO Standards Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM), and Centre of Environmental Science, Leiden University (CML), The Netherlands

⁵⁹ Goedkoop, M., Effting, S. & Collignon, M. 2000. The Eco-Indicator 99: Manual for designers: A damage-oriented method for life cycle impact assessment. Amersfoort: PRé Consultants.

5.2 DATABASE LCI

Il database Life Cycle Inventory (LCI) è utile per diversi tipi di valutazione della sostenibilità. Esistono molti database LCI a pagamento e gratuiti che contengono informazioni e set di dati su uno o più settori, e che possono essere importati e utilizzati dagli strumenti precedentemente descritti. Nel testo che segue ci concentreremo solo su alcuni di questi database.

Nella scelta del database occorre verificare che sia ben definito e regolarmente aggiornato, dato che i progressi tecnologici causano un invecchiamento precoce dei dati esistenti. Dal punto di vista della misurazione dell'impatto ambientale, sono due i parametri fondamentali:

- Il volume, la qualità, l'accuratezza e la pertinenza dei dati disponibili all'utente nel software;
- La facilità di utilizzo del pacchetto software.

ECOINVENT

Il database Ecoinvent^[60] contiene circa 18.000 set di dati di inventari del ciclo di vita, che coprono diversi settori a livello globale e locale:

- Servizi di alloggio - il database comprende dati relativi alla costruzione e alla gestione di strutture ricettive turistiche, nonché ai relativi beni di consumo.
- Agricoltura, pesca e zootecnia - il database è composto da set di dati che comprendono la coltivazione di colture, la produzione di olio dalle colture, il sostegno alle attività agricole, il trasporto, la produzione di mangimi per animali, la zootecnia e il fine vita di vari sottoprodotti.
- Edilizia e costruzioni - il database riguarda l'estrazione, la lavorazione, il trasporto e la produzione di minerali e materiali da costruzione, nonché il trattamento fine vita dei materiali da costruzione.
- Chimica e plastica - il database è composto da oltre 1900 set di dati riguardanti una vasta gamma di sostanze che vengono successivamente utilizzate in altri settori. Il

⁶⁰ Ecoinvent Database, disponibile all'indirizzo <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>. Ultimo accesso febbraio 2022.

database contiene dati su fertilizzanti, pesticidi, inchiostri e vernici, plastica, gomma e molto altro.

- Energia - il database contiene dati sull'elettricità e sul calore a sostegno di molte attività diverse, utilizzate e consumate per il funzionamento di abitazioni, uffici e strutture, per la produzione, il trasporto e il funzionamento dei macchinari.
- Silvicoltura e legno - il database copre la coltivazione delle foreste, la produzione di legno, il trasporto e la lavorazione del legno, nonché le attività di supporto e il fine vita di vari sottoprodotti.
- Combustibili - il database contiene dati sulle tecnologie di estrazione e lavorazione, sul trasporto di combustibili grezzi o raffinati, sulla produzione e sulla distribuzione dei tipi di combustibile più comuni (di tipo fossile come carbone fossile, lignite, petrolio, prodotti petroliferi raffinati e gas naturale) combustibili rinnovabili come biogas, biometano, bioetanolo, biodiesel e vari biocarburanti solidi da biomassa.
- Infrastrutture - il database contiene set di dati sulle infrastrutture immobili per i settori di edilizia, trasporti, agricoltura, industria manifatturiera, produzione e trasporto di energia, industria mineraria, trattamento dei rifiuti e ospitalità.
- Metalli - il database descrive le attività legate alla produzione di prodotti metallici semilavorati come billette, lingotti e barre nonché le attività che producono prodotti metallici finiti. Il database riguarda la produzione di 35 metalli diversi.
- Pasta e carta - il database comprende circa 160 set di dati che trattano l'intera catena di approvvigionamento, dalla silvicoltura iniziale alla produzione di diversi prodotti di carta e cartone, nonché il trattamento a fine vita della carta e del cartone da macero.
- Tessile - il database contiene circa 150 set di dati riguardanti la coltivazione delle materie prime, la loro lavorazione e il trasporto dei vari sottoprodotti.
- Trasporti - il database contiene circa 600 set di dati che riguardano la produzione, la manutenzione e il funzionamento dei veicoli di trasporto, le infrastrutture e il trattamento di fine vita.
- Gestione e riciclaggio dei rifiuti - il database contiene più di 1600 set di dati relativi a raccolta, differenziazione, smaltimento e recupero dei rifiuti provenienti da diversi settori.

- Approvvigionamento idrico - il database comprende oltre 150 set di dati che riguardano l'estrazione, il trattamento e la distribuzione di acqua di rubinetto, acqua trattata e acqua di irrigazione.

Ogni set di dati è attribuito a un'area geografica: uno stato, paese o continente. La copertura geografica dipende dalla qualità e dalla disponibilità dei dati. Per quasi tutti i set di dati è anche disponibile una ubicazione geografica globale o riferita al "Resto del Mondo", che rappresenta la produzione media globale. L'ubicazione globale, o posizione "Resto del Mondo", può essere utilizzata nei casi in cui non sia disponibile una rappresentazione dell'area desiderata. Il set di dati globale è stato creato per riflettere le condizioni medie globali sulla base di dati internazionali. Se non esistono dati di questo tipo, l'ubicazione globale viene creata tramite il calcolo della media ponderata dei set di dati locali disponibili.

FEDERAL LCA COMMONS

Il Federal LCA Commons [61] è un database che fornisce dati LCA rappresentativi degli Stati Uniti. Il database contiene set di dati sviluppati da diverse agenzie governative statunitensi, quali il ministero dell'agricoltura degli Stati Uniti (USDA), il ministero dell'energia e l'agenzia per la tutela dell'ambiente (EPA). Inoltre al supporto e alla creazione di vari set di dati partecipano anche altre agenzie, come il National Renewable Energy Laboratory (NREL), il National Agriculture Laboratory (NAL), il Servizio Forestale degli Stati Uniti e l'Istituto nazionale per gli standard e la tecnologia (NIST).

L'obiettivo di Federal LCA Commons, come dichiarato sul sito web [62], è:

1. Far progredire i dati, la ricerca e i sistemi informativi LCA federali sfruttando le risorse e le competenze di più agenzie;
2. Migliorare la coerenza dei metodi LCA sviluppati da ciascuna agenzia al fine di elaborare risultati LCA utili per le fasi di processo decisionale e divulgazione al pubblico;

⁶¹Federal LCA Commons, disponibile all'indirizzo <https://www.lcacommons.gov/>, ultimo accesso febbraio 2022.

⁶²Federal LCA Commons, disponibile all'indirizzo <https://www.lcacommons.gov/about-us-0>. Ultimo accesso febbraio 2022.

3. Migliorare l'accesso del pubblico e delle agenzie ai dati LCA federali in un formato standardizzato e ricercabile da un archivio comune.

Il database Federal LCA Commons è accessibile e scaricabile dal sito web LCA commons [63], o disponibile per OpenLCA.

The screenshot shows a web page for 'coal extraction and processing - Central Appalachia, BIT, Processing'. It includes a description of the cradle-to-gate inventory, a list of inputs/outputs, by-products, and produced waste. The interface has tabs for 'Inputs/Outputs', 'Documentation', and 'Allocation factors'. A 'Switch to table view' link is visible on the right.

coal extraction and processing - Central Appalachia, BIT, Processing
21: Mining, Quarrying, and Oil and Gas Extraction / 2121: Coal Mining

The cradle-to-gate inventory for production of coal aggregated to basin, mine type, and coal type groups. For coal extraction there are two major processes that form the basis of the coal life cycle model - underground and surface coal mining. These are connected to auxiliary processes that provide inventories from things like coal mine methane emissions, water use, water emissions, etc. All processes use parameters that allow some differentiation based on region or coal type. Details on the coal modeling can be found in the NETL Coal Baseline report to be published in the near future: netl.doe.gov/LCA This process was created with ElectricityLCI (<https://github.com/USEPA/ElectricityLCI>) version 1.0.1 using the ELCI_1 configuration.

Inputs/Outputs Documentation Allocation factors

Reference product
1.0000e+0 sh tn coal, processed, at mine

By-products
0.0000e+0 kg methane, captured

Produced waste
0.0000e+0 kg 2,4-DINITROTOLUENE
0.0000e+0 kg 2-BUTANONE, PEROXIDE (R,T) (OR) METHYL ETHYL KETONE PEROXIDE (R,T)
0.0000e+0 kg 2-PROPANONE (I) (OR) ACETONE (I)
0.0000e+0 kg ACETALDEHYDE, TRICHLORO- (OR) CHLORAL
0.0000e+0 kg ACIDIC AQUEOUS WST
0.0000e+0 kg AQUEOUS W/O CYANIDES
0.0000e+0 kg AQUEOUS/CYANIDES
0.0000e+0 kg ARSENIC
0.0000e+0 kg ASH
0.0000e+0 kg BARIUM
Show 78 more

Switch to table view

Figura 60: Esempio di set di dati in LCA Commons [63]

DATABASE CARBON MINDS

Il database Cm.chemicals di Carbon Minds[64] è un set di dati su larga scala per la valutazione ambientale di sostanze chimiche e plastiche. Grazie a una metodologia coerente e agli aggiornamenti annuali, cm.chemicals è una fonte di dati unica per gli studi di valutazione del ciclo di vita dei prodotti chimici e delle materie plastiche in conformità alle norme ISO 14040/14044:2006/AMD 2:2020. Il database riguarda oltre 1000 prodotti in 190 aree geografiche.

Il database Carbon Minds può essere acquistato come pacchetto di dati standard nelle versioni Basic, Technology insights, Global insights che comprende 78 prodotti chimici comuni, oppure nella versione Data-on-Demand.

⁶³Federal LCA Commons, disponibile all'indirizzo <https://www.lcacommons.gov/lca-collaboration/>. Ultimo accesso febbraio 2022.

⁶⁴Carbon minds, disponibile su <https://www.carbon-minds.com/>. Ultimo accesso febbraio 2022.

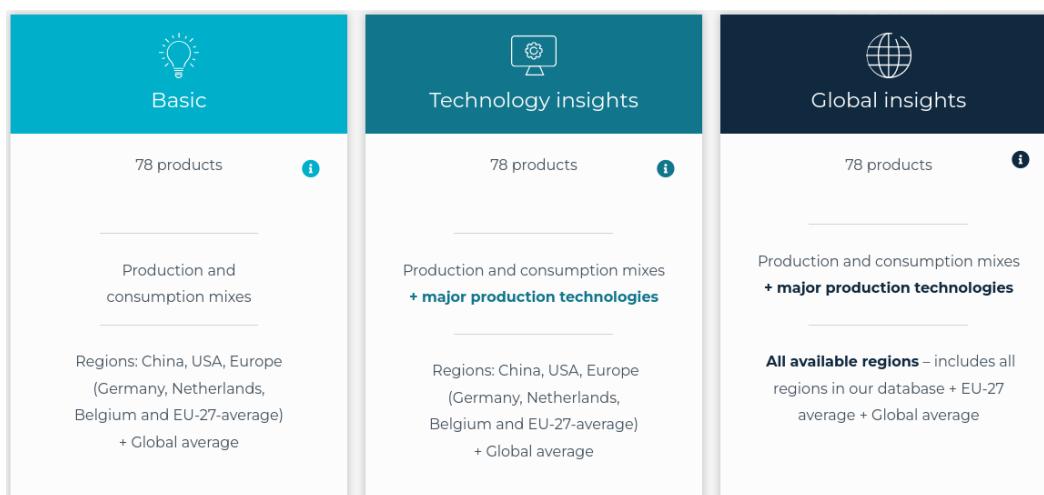


Figura 61: Opzioni disponibili per il database Carbon Minds [64]

GABI

I database GaBi LCA^[65] offrono circa 17.000 processi e modelli di piano, basati sui dati raccolti da GaBi durante la collaborazione con aziende, associazioni ed enti pubblici. GaBi offre diversi database:

- Intermedi organici - contiene 184 processi riguardanti i prodotti di base della sintesi industriale (ad esempio metanolo, formaldeide), i prodotti di ossidazione dell'etilene (ad esempio l'ossido di etilene), gli alcoli, i componenti per le poliammidi (ad esempio acido adipinico, caprolattame, esametildiammina), i prodotti di conversione del propene (ad esempio acrilonitrile, acetone, epicloridrina, bisfenolo A), aromatici e prodotti di conversione del benzene (ad esempio BTX, etilbenzene, stirene, cumene, cicloesano, MSA), prodotti di ossidazione dello xilene (ad esempio anidride ftalica, dimetiltereftalato).
- Intermedi inorganici - contiene 126 processi che comprendono idrogeno, acido nitrico, acido cianidrico, ammoniaca e molti altri.
- Energia - 1460 processi riguardanti gas naturale, energia, carbone fossile, petrolio grezzo, miscele di lignite di diversi paesi, energia termica da vapore, gas naturale di diversi paesi e molto altro.
- Acciaio - 33 lavorazioni sulle leghe d'acciaio più utilizzate.

⁶⁵Sphera Solutions GmbH, disponibile su <https://gabi.sphera.com/databases/gabi-databases/>, ultimo accesso febbraio 2022.

- Alluminio - 86 processi riguardanti lingotti primari e secondari, profili di estrusione, lamine di alluminio e altri.
- Metalli non ferrosi - 13 processi che coinvolgono titanio, cadmio, nichel, rame, manganese, ferrocromo ad alto e basso tenore di carbonio e altri.
- Metalli preziosi - 28 processi riguardanti argento, miscela di argento, oro, rodio, platino, palladio e altri.
- Plastiche - il database contiene 107 processi che coinvolgono le plastiche di massa (ad esempio PE con varie densità, PP, PS), i polimeri vinilici (ad esempio PVC, PVAL), le plastiche tecniche (ad esempio ABS, PMMA, PTFE), la poliammide (ad esempio PA 6, PA 6.6, PA 6.12), le plastiche speciali (ad esempio PPS, PEEK, SMA).
- Verniciature - contiene 80 processi che riguardano vari tipi di solvente, vernice a polvere e ad acqua, vernice trasparente slurry, piani per la modellazione di verniciature per automobili e industriali.
- Fine vita - il database contiene 520 processi che riguardano granulatori, discariche, inceneritori, modelli di processo dinamici.
- Processi di produzione - 68 processi che comprendono lavorazione, rivettatura, imbutitura, macinatura, stampaggio, taglio laser, zincatura.
- Elettronica - il database contiene 251 processi riguardanti linee di assemblaggio, bobine, diodi, circuiti integrati, PWB, paste per saldatura, condensatori, transistor, LED SMD, resistenze, bobine con nucleo ad anello, substrati FR4, termistori e altro.
- Materie prime rinnovabili - 157 processi riguardanti fertilizzanti e pesticidi, trattori, attrezzature agricole, prodotti intermedi industriali, diverse colture come mais, grano, canapa, lino, colza, soia e molte altre.
- Materiali da costruzione - il database contiene 2640 processi riguardanti additivi, colla, calcestruzzo, malta, intonaco, vernici, calcestruzzo di aggregati leggeri, mattoni, malta espansa, mattoni silico-calcarei, lastre da costruzione, legno, materiale isolante, sistemi di incollaggio per l'isolamento termico, metalli, plastica, finestre, illuminazione e impianti idraulici, riscaldamento e ventilazione, ascensori e molti altri.
- Finissaggio tessile - 147 processi che comprendono il pretrattamento (processi a secco come il bruciapelo, o a umido come la sbazzimatura, il candeggio e la purga),

la tintura e/o la stampa (ad esempio acidi, cationici, coloranti diretti, dispersi e reattivi), il finissaggio, i tessuti.

- Copriesedili - 46 processi che riguardano pelle, tessuto PET, taglio e cucito, pelle sintetica, tessuto non tessuto.
- Bioplastiche - 128 processi riguardanti le bioplastiche provenienti da diverse fonti, ad esempio canna da zucchero, mais, grano, ecc.
- Alimenti e mangimi - il database comprende 434 processi che rappresentano i prodotti alimentari e i mangimi più comunemente utilizzati in diverse aree geografiche: colture e animali, ad esempio mais, tapioca, semi di colza, manzo, pecora, fabbricazione di prodotti alimentari (compresi i prodotti lattiero-caseari, amido e cereali, zucchero, carne, cioccolato, mangimi, oli vegetali e animali, ecc.) e sottoprodotti.
- Compositi di carbonio - il database contiene 137 processi per le tecnologie di produzione e lavorazione più comuni in diverse aree geografiche: set di dati per la produzione di fibre di carbonio (CF) in varie condizioni tecnologiche al contorno (processo standard, ottimizzazione energetica, energie rinnovabili) e condizioni regionali al contorno (mix di produzione Global, EU28, DE, US, JP, CN, TW, HU, KR, FR, GB, ES, BR, CA), set di dati per la produzione di componenti in plastica rinforzata con fibra di carbonio (CFRP) con matrice termoindurente o termoplastica utilizzando le tecnologie di lavorazione più comuni, processi di lavorazione (processi unitari) per la plastica rinforzata con fibra di carbonio per la modellazione di specifiche catene di processi produttivi.

ALTRI DATABASE

Esistono molti altri database che possono essere utilizzati come fonti per l'analisi LCA. Molti di questi sono supportati da uno o più strumenti di LCA. Per ulteriori informazioni, consultare lo strumento in questione.

DATABASE WEEE LCI

WEEE LCI [66] è un database francese dedicato al fine vita delle apparecchiature elettriche ed elettroniche, che contiene oltre 900 processi di sistema che combinano 86 materiali.

Database EXIOBASE

Database EXIOBASE [67] - database multiregionale, globale e dettagliato, esaustivo da un punto di vista ambientale su fornitura e uso/input output. Il database fornisce dati su settori, prodotti, emissioni e risorse per 43 paesi e oltre 200 categorie di prodotti.

Database Environmental Footprint

Environmental Footprint database [68] - progettato a sostegno dell'uso delle regole di categoria relative all'impronta ambientale di prodotto (PEFCR) e delle regole di settore relative all'impronta ambientale delle organizzazioni (OEFSR). Contiene set di dati secondari dell'inventario del ciclo di vita conforme all'EF e un metodo compatibile di valutazione dell'impatto EF. Il database Environmental Footprint fa parte dell'iniziativa della Commissione europea sul mercato unico dei prodotti verdi⁶⁹.

ESU world food LCA database

ESU world food LCA database [70] - comprende circa 1900 set di dati sugli impatti globali delle aree di interesse legate all'alimentazione, come i servizi di produzione agricola, la produzione di ortaggi, la frutta, i prodotti animali, il pesce, i prodotti lattiero-caseari, le alternative alla carne, gli alimenti di base, le bevande, i dolci, i pasti, gli elettrodomestici, il consumo di cibo e il cibo per animali.

DATASMART LCI Package

DATASMART LCI Package [71] - consiste in un'ampia gamma di materiali e processi che comprendono il mix di gas naturale statunitense, la produzione di energia elettrica geotermica, i processi di produzione tessile, i processi di trattamento dei rifiuti per

⁶⁶Database Ecosystem LCI, disponibile su <https://weee-lci.ecosystem.eco/>, ultimo accesso febbraio 2022.

⁶⁷Consorzio Exiobase, disponibile su <https://www.exiobase.eu/>, ultimo accesso febbraio 2022.

⁶⁸European Platform on Life Cycle Assessment, disponibile all'indirizzo <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/contactListEF.xhtml>, ultimo accesso febbraio 2022.

⁶⁹Commissione europea, Ambiente. Disponibile all'indirizzo <https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/>, ultimo accesso febbraio 2022.

⁷⁰ESU-services Ltd. Disponibile all'indirizzo <http://esu-services.ch/data/fooddata/>, ultimo accesso febbraio 2022.

⁷¹Long Trail Sustainability, disponibile all'indirizzo <https://ltsexperts.com/services/software/datasmart-life-cycle-inventory>, ultimo accesso febbraio 2022.

gli elettrodomestici bianchi e l'elettronica, gli imballaggi, i biomateriali e il settore lattiero-caseario; per tutti i 50 stati americani, 13 province e territori canadesi e 10 mix di energia elettrica e GRID statunitensi.

IDEA Japanese Inventory database

IDEA Japanese Inventory database [72] - L'Inventory Database for Environmental Analysis è un database di inventario ibrido che presenta dati statistici e di processo. Copre in modo completo quasi tutte le attività economiche del Giappone e contiene circa 3800 processi classificati principalmente in base alla Japan Standard Commodity Classification. Abbraccia numerosi settori quali: agricoltura, silvicoltura e alimentazione, chimica, gomme e plastica, acciaio e metalli non ferrosi, tessile, elettronica e macchinari, mezzi di trasporto, energia, acqua, trattamento dei rifiuti, ingegneria civile, servizi al dettaglio e all'ingrosso.

Social Hotspots Database

Social Hotspots Database [73] - fornisce un quadro eccellente degli snodi sociali nelle catene di approvvigionamento dei prodotti, e abbraccia 140 paesi e regioni e 57 settori economici. Il database comprende un ampio elenco di indicatori relativi a diritti del lavoro, salute e sicurezza, diritti umani, governance e infrastrutture comunitarie.

Evah Pigments Database

Evah Pigments Database [74] - il database presenta l'inventario di 51 pigmenti provenienti da varie regioni, tra cui 16 diversi pigmenti inorganici colorati e 10 diversi pigmenti organici colorati. La metà di tutti i pigmenti inorganici viene utilizzata per la stampa, un quarto per le pitture architettoniche e il resto per colorare tessuti, plastica, ceramica, smalti, carta, cemento, alimenti, cosmetici, prodotti farmaceutici e automobilistici.

NEEDS LCI database

NEEDS LCI database - contiene dati internazionali di inventario del ciclo di vita industriale sui futuri sistemi di fornitura di energia elettrica (energia fossile avanzata, idrogeno, celle a combustibile, eolico offshore, fotovoltaico, solare termico, biomassa,

⁷²IDEA Inventory Database for Environmental Analysis, disponibile all'indirizzo <http://idea-lca.com/?lang=en>, ultimo accesso febbraio 2022.

⁷³Social Hotspots Database, disponibile su <http://www.socialhotspot.org/>, ultimo accesso febbraio 2022.

⁷⁴The Evah Institute, disponibile all'indirizzo <http://www.evah.com.au>, ultimo accesso febbraio 2022.

nucleare avanzato, energia del moto ondoso), sulla futura fornitura di materiali, sui futuri servizi di trasporto. I set di dati LCI disponibili in questo database sono stati progettati per essere utilizzati nella valutazione delle tecnologie ambientali a lungo termine. I set di dati contengono informazioni descrittive sulla tecnologia.

ProBas

ProBas [⁷⁵] - Biblioteca di dati tedesca originariamente fornita dall'Agenzia federale tedesca per l'ambiente (Umweltbundesamt). Include processi unitari e aggregati sui seguenti argomenti: energia, materiali e prodotti, servizi di trasporto e rifiuti.

Worldsteel

Worldsteel Association [⁷⁶] - organizzazione senza scopo di lucro e associazione industriale, con membri in tutti i principali paesi produttori di acciaio. Worldsteel rappresenta produttori di acciaio, associazioni nazionali e regionali dell'industria siderurgica e istituti di ricerca sull'acciaio. I membri che ne fanno parte rappresentano circa l'85% della produzione mondiale di acciaio. Il database contiene dati LCI globali e regionali per 16 prodotti siderurgici, dalle bobine laminate a caldo alle lamiere, ai tondini, ai profilati e agli acciai rivestiti.

5.3 STRUMENTI SOFTWARE LCA

Sul mercato esistono molti strumenti software LCA che possono essere utilizzati e che sono più adatti di altri: molti di essi sono multiuso, altri sono progettati per un settore specifico.

Ai fini di questo corso, abbiamo selezionato diversi strumenti LCA che verranno presentati in modo più dettagliato. Questo elenco di strumenti LCA non è completo e l'assenza di uno specifico strumento non è da intendersi come un parere negativo sullo stesso.

Esamineremo da vicino i seguenti strumenti:

- SimaPro

⁷⁵ProBas Proyessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme, disponibile su <https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php>, ultimo accesso febbraio 2022.

⁷⁶World Steel Association, disponibile su <https://worldsteel.org/steel-by-topic/life-cycle-thinking/>, ultimo accesso febbraio 2022.

- GaBi
- OpenLCA
- Umberto

SIMAPRO

SimaPro [⁷⁷] è uno dei principali strumenti software LCA, ampiamente utilizzato nell'industria e nel mondo accademico da oltre 25 anni. È stato sviluppato da PRÉ Consultants.

Il software può essere utilizzato per diverse applicazioni: creazione di report in materia di sostenibilità, rilevazione dell'impronta idrica e di carbonio, progettazione di prodotti, creazione di dichiarazioni ambientali di prodotto e determinazione di indicatori chiave di prestazione.

SimaPro può essere utilizzato per:

- Modellare e analizzare agevolmente cicli di vita complessi in modo sistematico e trasparente.
- Misurare l'impatto ambientale di prodotti e servizi in tutte le fasi del ciclo di vita.
- Identificare i punti chiave in ogni anello della catena di approvvigionamento, dall'estrazione delle materie prime alla produzione, alla distribuzione, all'uso e allo smaltimento.

La suite di strumenti SimaPro comprende il classico software desktop e i moduli accessibili su cloud SimaPro Collect e SimaPro Share, disponibili tramite la piattaforma online.

⁷⁷Pré Sustainability, disponibile su <https://simapro.com/>, ultimo accesso febbraio 2022.

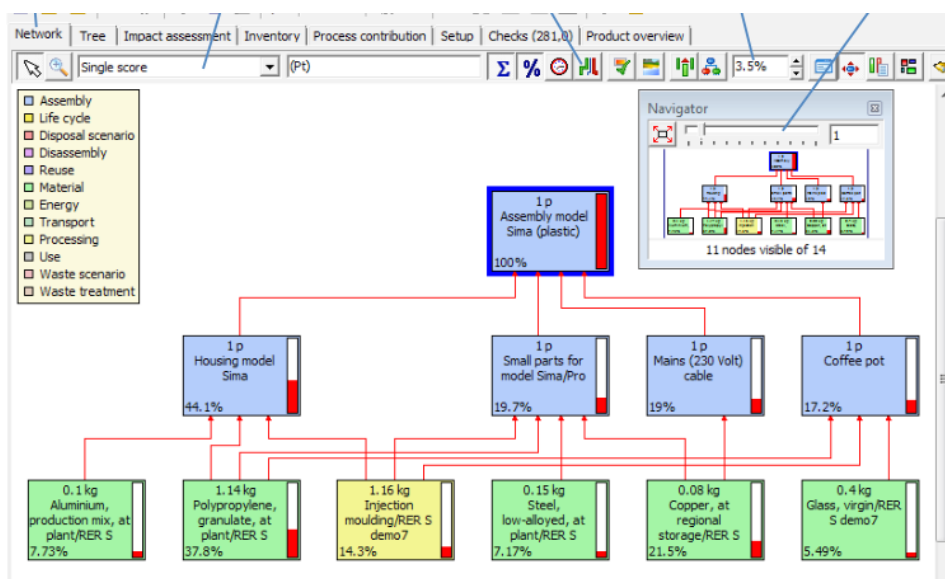


Figura 62: Esempio di SimaPro^[75]

SimaPro contiene una serie di metodi di valutazione dell'impatto⁷⁸ utilizzati per calcolarne i risultati:

- Metodi europei - CML-IA, Environment Prices, Ecological scarcity 2013, metodi EF 3.0, metodi EN 15804 + A2, EPD (2018), EPS 2015d e EPS 2015dx
- Metodi globali – IMPACT World+, LC-IMPACT, ReCiPe 2016
- Nord America - Api, TRACI 2.1
- Su questioni specifiche - Domanda di energia cumulativa, domanda di exergia cumulativa (cumulative exergy demand), eutrofizzazione delle acque dolci, IPCC 2021, Risultati selezionati di LCI, USEtox 2
- Impronta idrica - AWARE, WAVE, Water Scarcity^{79 80, 81, 82}

⁷⁸Pré Sustainability, disponibile all'indirizzo <https://simapro.com/wp-content/uploads/2021/12/DatabaseManualMethods930.pdf>, ultimo accesso febbraio 2022.

⁷⁹ Berger, Markus & Van der Ent, Ruud & Eisner, Stephanie & Bach, Vanessa & Finkbeiner, Matthias. (2014). Water Accounting and Vulnerability Evaluation (WAVE): Considering Atmospheric Evaporation Recycling and the Risk of Freshwater Depletion in Water Footprinting. Environmental science & technology. 48. 10.1021/es404994t.

⁸⁰ Boulay, Anne-Marie & Bulle, Cécile & Bayart, Jean-Baptiste & Deschênes, Louise & Margni, Manuele. (2011). Regional Characterization of Freshwater Use in LCA: Modeling Direct Impacts on Human Health. Environmental science & technology. 45. 8948-57. 10.1021/es1030883.

⁸¹ Hoekstra, Arjen & Mekonnen, Mesfin & Chapagain, Ashok & Mathews, Ruth & Richter, Brian. (2012). Global Monthly Water Scarcity: Blue Water Footprints versus Blue Water Availability. PloS one. 7. e32688. 10.1371/journal.pone.0032688.

⁸² Motoshita, Masaharu & Itsubo, Norihiro & Inaba, Atsushi. (2011). Development of impact factors on damage to health by infectious diseases caused by domestic water scarcity. The International Journal of Life Cycle Assessment. 16. 65-73. 10.1007/s11367-010-0236-8.

SimaPro include ^[83] (di default o su richiesta) molti database LCI come Ecoinvent, Carbon minds, WEEE LCI database, Environmental Footprint database, Social hotspots database, LCI Datasmart Package e molti altri.

SimaPro offre licenze commerciali (Business User, Expert User e Power User) e didattiche (SimaPro Phd, SimaPro Classroom, SimaPro Faculty). Le licenze si differenziano per la durata del contratto di servizio e per la disponibilità delle funzioni.

SIMAPRO COLLECT

SimaPro Collect è uno strumento accessibile sul web per la raccolta di dati LCA. È pensato per raccogliere dati dai fornitori e da altre parti interessate tramite modelli di indagine personalizzabili.

SimaPro Collect è disponibile tramite la piattaforma online SimaPro. La funzione di invio di sondaggi è inclusa nei pacchetti Power user, Expert user e PhD per l'intera durata del contratto di servizio. La compilazione dei sondaggi può essere effettuata da persone che abbiano l'accesso tramite licenza commerciale alla piattaforma online SimaPro.

SIMAPRO SHARE

SimaPro Share è uno strumento accessibile sul web che consente agli esperti di valutazione del ciclo di vita di creare scenari di prodotto e di condividerli con le parti commerciali interessate. Gli esperti non LCA possono quindi visualizzare e confrontare tali scenari ipotetici e osservare in prima persona l'impatto delle loro decisioni grazie a risultati accessibili e tangibili. SimaPro Share supporta il processo decisionale basato sui fatti effettivi e lo sviluppo sostenibile dei prodotti, consentendo di condividere facilmente i risultati LCA.

SimaPro Share è incluso nei pacchetti con licenza SimaPro Power user, Expert user e PhD ed è disponibile per la durata del contratto di servizio. Le parti commerciali interessate che visualizzeranno, adatteranno e confronteranno gli scenari devono disporre di una licenza commerciale.

⁸³Pré Sustainability, disponibile su <https://simapro.com/databases>, ultimo accesso febbraio 2022.

GABI

GaBi [⁸⁴] Solutions vanta oltre 25 anni di esperienza nella fornitura di strumenti e consulenza in materia di LCA. GaBi offre licenze commerciali e didattiche. GaBi Software Suite offre diversi strumenti software:

- GaBi ts - è una soluzione nel campo della sostenibilità che offre piani di produzione per l'intero ciclo di vita e il calcolo dei risultati degli impatti ambientali in base a set di dati LCI selezionati e metodi LCIA pertinenti. GaBi ts offre anche la possibilità di confrontare gli scenari di progettazione e di effettuare analisi ipotetiche per identificare il progetto più sostenibile ed efficiente in termini di costi.
- GaBi Envision - è un'applicazione web intuitiva che consente all'utente di confrontare diversi scenari del progetto di prodotto creato nel software GaBi Products Sustainability, modificando semplicemente i parametri del modello.
- GaBi Server - supporta la collaborazione tra i professionisti dell'LCA, offrendo una gestione centrale del database, flussi di lavoro incentrati sulla garanzia della qualità e gestione dei diritti degli utenti. Gli utenti lavorano con lo stesso database e quindi possono operare in parallelo sullo stesso modello.
- GaBi DfX - è un software per la conformità e lo sviluppo sostenibile dei prodotti in vista della fase di fine vita. GaBi DfX offre analisi su prodotti complessi come quelli del settore automobilistico, aerospaziale ed elettronico. Il software dispone delle seguenti funzionalità: importazione della distinta dei materiali come elemento base per l'analisi, diagramma dei collegamenti per visualizzare l'ordine di smontaggio, report di smontaggio, analisi dei costi di riciclaggio per lo scenario di fine vita e modello di riciclaggio per la definizione degli scenari di smontaggio e riciclaggio.

La suite GaBi Software utilizza diversi database LCI già citati, come il database GaBi, Ecoinvent o Environmental Footprints. GaBi offre anche un approccio "Data on demand", in cui il software stesso compila un database personalizzato con i set di dati richiesti.

⁸⁴Sphera Solutions GmbH, disponibile su <https://gabi.sphera.com/international/index/>, ultimo accesso febbraio 2022.

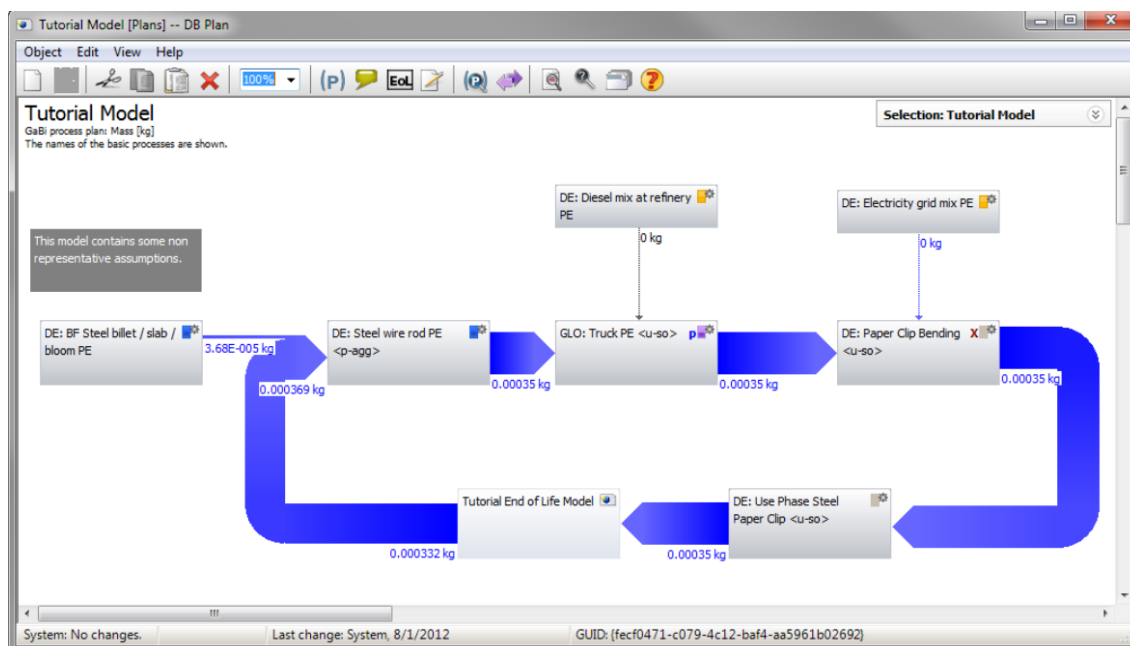


Figura 63: Esempio di interfaccia utente GaBi

OPENLCA

OpenLCA è un software gratuito e open source per la valutazione della sostenibilità e del ciclo di vita che offre diverse funzionalità, ad esempio:

- Modellazione di studi LCA conformi a standard internazionali quali ISO 14040 e ISO 14044:2006/ e 2:2020.
- I sistemi di qualità dei dati definiti dall'utente o quelli esistenti possono essere utilizzati per visualizzare la qualità dei dati nei risultati dell'inventario, nei risultati della LCIA, nell'analisi d'impatto e nel diagramma di Sankey. Inoltre i valori incerti possono essere calcolati dalle matrici di qualità dei dati.
- Creazione automatica e grafica di sistemi di prodotto.
- Valutazione dell'incertezza mediante simulazione Monte Carlo, che prende in considerazione tutte le distribuzioni dell'incertezza definite nei flussi, nei parametri e nei fattori di caratterizzazione.
- Lo schema ad albero dei vari elementi che contribuiscono all'impatto fornisce i risultati LCI o LCIA a monte dei vari livelli del sistema di prodotto, suddividendo i risultati nei contributi totali a monte dei processi di fornitura all'interno di ogni catena di approvvigionamento.
- I parametri possono essere usati per definire i valori in openLCA. I parametri possono essere valori concreti, formule o regole di calcolo complesse.

- Per gli utenti esperti sono disponibili strumenti di sviluppo per l'esecuzione dei software Python e JavaScript e per le query SQL.
- È possibile calcolare la Product Environmental Footprint.
- Valutazione d'impatto regionalizzata - la versione più recente di openLCA offre la possibilità di gestire i dati SIG, consentendo all'utente di includere questi ultimi nelle ubicazioni del processo, nonché di definire nel metodo fattori d'impatto specifici in ragione dell'ubicazione stessa (utilizzando la parametrizzazione), rendendo quindi possibile una valutazione d'impatto regionalizzata.
- Il costo del ciclo di vita (LCC) è un approccio basato sui flussi per calcolare appunto i costi del ciclo di vita e il valore aggiunto, quest'ultimo considerato come "costo negativo".

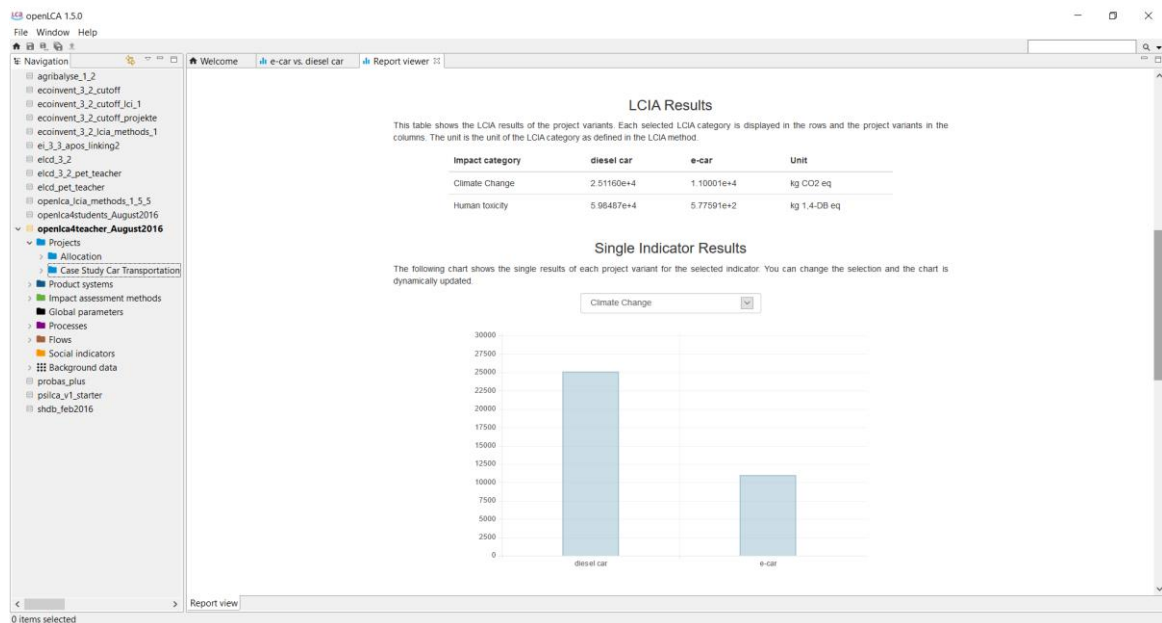


Figura 64: esempio di interfaccia utente openLCA - report [79]

Sono molti i database LCA disponibili a titolo gratuito e a pagamento, forniti da diverse istituzioni. È possibile visualizzare e accedere a ulteriori informazioni attraverso openLCA Nexus⁸⁵ - ad esempio Ecoinvent, Federal LCA Commons, Carbon Minds cm.chemicals e molti altri.

⁸⁵OpenLCA Nexus, disponibile all'indirizzo <https://nexus.openlca.org/databases>, ultimo accesso febbraio 2022.

Il pacchetto di metodi OpenLCA contiene più di 40 metodi quali AWARE (basato su flussi), BEES+, CML, Crustal Scarcity Indicator, Cumulative Energy Demand, eco-indicator 99, Ecological Scarcity 2013, Ecosystem Damage Potential, Environmental Footprint method v3.0, EN 15804 +A2, ILCD Midpoint +, IPCC 2021 AR6, ReCiPe, TRACI, USETox.

OpenLCA offre client per diverse piattaforme: MS Windows, Mac e Linux, inoltre fornisce l'applicazione server LCA Collaboration Server, che completa openLCA (l'applicazione desktop LCA). Agevola lo scambio e la sincronizzazione dei dati LCA (quali flussi, processi, sistemi di prodotto o interi modelli LCA) tra utenti che lavorano da computer diversi, consentendo una modellazione LCA distribuita e collaborativa. Il Collaboration Server introduce nel mondo LCA concetti consolidati nel settore dello sviluppo software, quali il monitoraggio on-demand delle modifiche, il confronto tra database e la fusione opzionale dei dati. È un prodotto unico nel suo genere. Il Collaboration Server è disponibile a titolo gratuito.

UMBERTO

Sviluppato da ifu Hamburg (ora conosciuto come iPoint), Umberto [⁸⁶] è una suite di software LCA presente sul mercato da oltre 25 anni. Umberto offre diversi strumenti software LCA.

Umberto LCA+ è un software desktop per l'analisi LCA che illustra in modo trasparente le catene di processi attraverso elementi grafici chiari, e una modellazione gerarchica che si sviluppa in sottoreti. Umberto LCA+ vanta l'integrazione di diversi database LCA, fra cui Ecoinvent e cm.chemical.

⁸⁶iPoint, disponibile all'indirizzo <https://www.ifu.com/umberto>, ultimo accesso febbraio 2022.

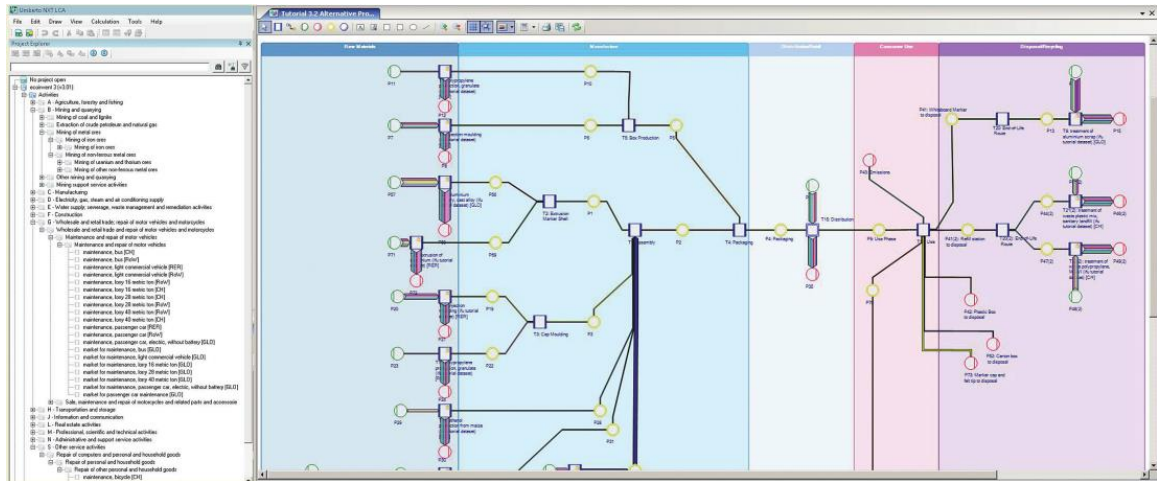


Figura 65: Esempio di interfaccia utente Umberto [80]

Umberto Efficiency+ è uno strumento software incentrato sull'efficienza delle risorse e sull'ottimizzazione dei processi. Con Efficiency+ è possibile mappare digitalmente tutti i flussi di energia e di materiali. I diagrammi di Sankey vengono utilizzati per visualizzare i flussi di materiale nei processi produttivi.

e!Sankey è uno strumento di visualizzazione dei dati utile in diversi campi di applicazione, quali audit energetici e gestione dell'energia, flussi di energia (bilancio energetico, efficienza energetica), flussi di materiali, trasferimento e perdita di calore, processi tecnici, ingegneria chimica, acque reflue e smaltimento dei rifiuti, logistica, trasporto merci, catena di approvvigionamento, visualizzazione dei flussi di costi e di valore.

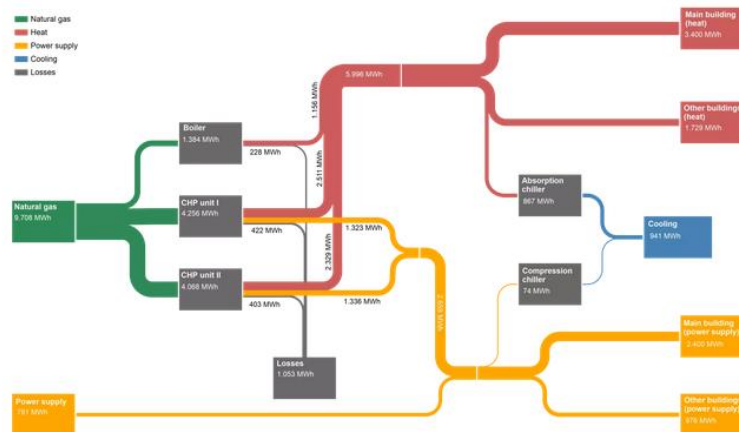


Figura 66: Esempio di output Umberto e!Sankey [80]

5.4 PUNTI CHIAVE DEL CAPITOLO



Riassunto

Al termine di questo capitolo, gli studenti comprenderanno i seguenti termini:

- Cos'è un database LCA
- Cos'è uno strumento LCA
- In quale ambiente utilizzare i database LCA e come scegliere il più appropriato
- Conoscenze di base sull'utilizzo degli strumenti LCA



Domande

- Che cos'è un database LCA?
- Perché utilizzare un database LCA?
- Quali sono i diversi database LCA disponibili all'uso?
- Che cos'è uno strumento LCA?
- In che modo uno strumento LCA può risultare utile ai fini dell'analisi LCA?

Abbreviazioni

ABS - Acrilonitrile butadiene stirene

AWARE – Available Water Remaining

BEES – Building for Environmental and Economic Sustainability

BOM - Distinta dei materiali

BR - Brasile

BTX - Benzene, toluene, xilene

CA - Canada

CF - fibra di carbonio

CFRP - plastica rinforzata con fibra di carbonio

CN - Cina

DE - Germania

EF - Fattore di emissione

EPA - Agenzia per la tutela dell'ambiente

ES - Spagna

FR - Francia

FR4 - ritardante di fiamma

GB - Gran Bretagna

HU - Ungheria

IC - circuiti integrati

ILC - Ciclo di vita infinito

IPCC - Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico

JP - Giappone

KR - Repubblica di Corea

LCA - Valutazione del ciclo di vita

LCI - Inventario del ciclo di vita

LED - Diodo a emissione luminosa

MSA - Acido metansolfonico

NAL - National Agriculture Laboratory

NIST - Istituto Nazionale di Standard e Tecnologia

NREL - Laboratorio nazionale per le energie rinnovabili

OEFSR - regole di settore relative all'impronta ambientale delle organizzazioni

ReCiPe - metodo di valutazione dell'impatto

PA - Poliammide

PEFCR - regole di categoria relative all'impronta ambientale di prodotto

PEEK - Polietere etere chetone

PET - Polietilene tereftalato

PMMA - Polimetilmetacrilato

PTFE – Politetrafluoroetilene

PS - Polistirene

PP - Polipropilene

PPS - Solfuro di polifenilene

PVAL - Alcool polivinilico

PVC - Polivinilcloruro

PWB - Schede di cablaggio stampate

SMA - Anidride stirenica maleica

SMD - Dispositivi a montaggio superficiale

TRACI - Tool for Reduction and Assessment of Chemicals and Other Environmental Impacts (Strumento per la riduzione e la valutazione delle sostanze chimiche e di altri impatti ambientali)

TW - Taiwan

US - Stati Uniti

USDA - Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti

WAVE – Water Accounting and Vulnerability Evaluation

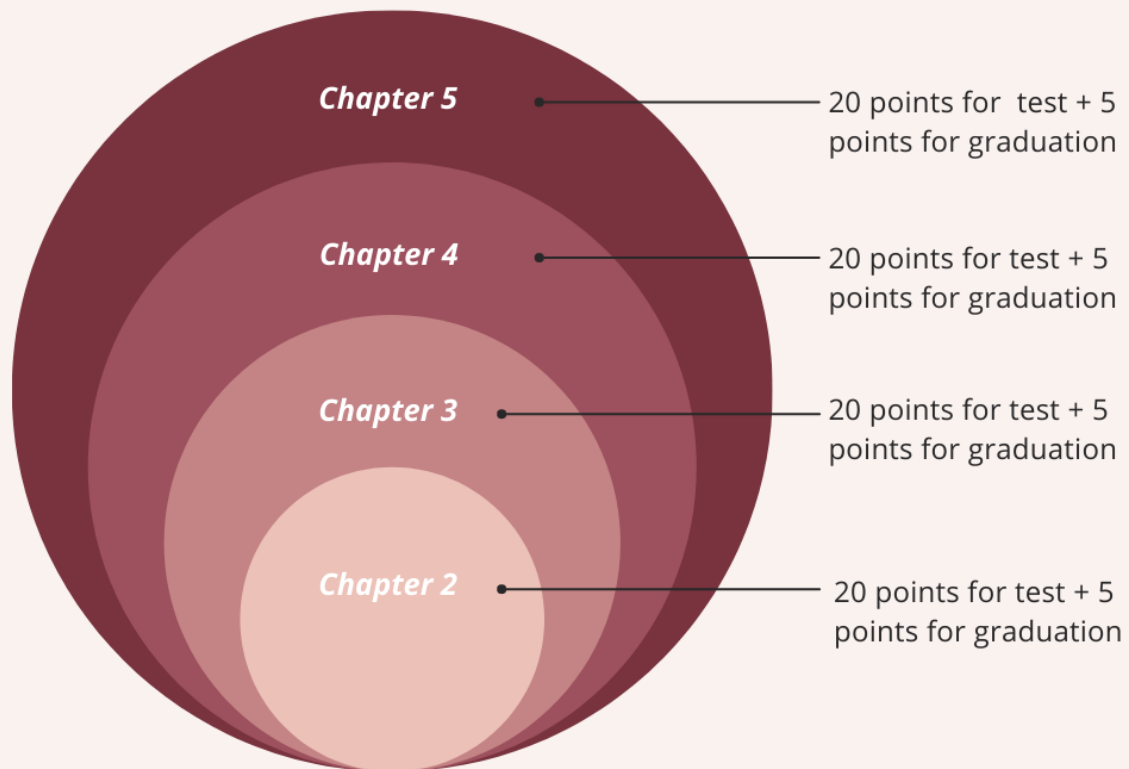


Cofinanziato dall'Unione europea

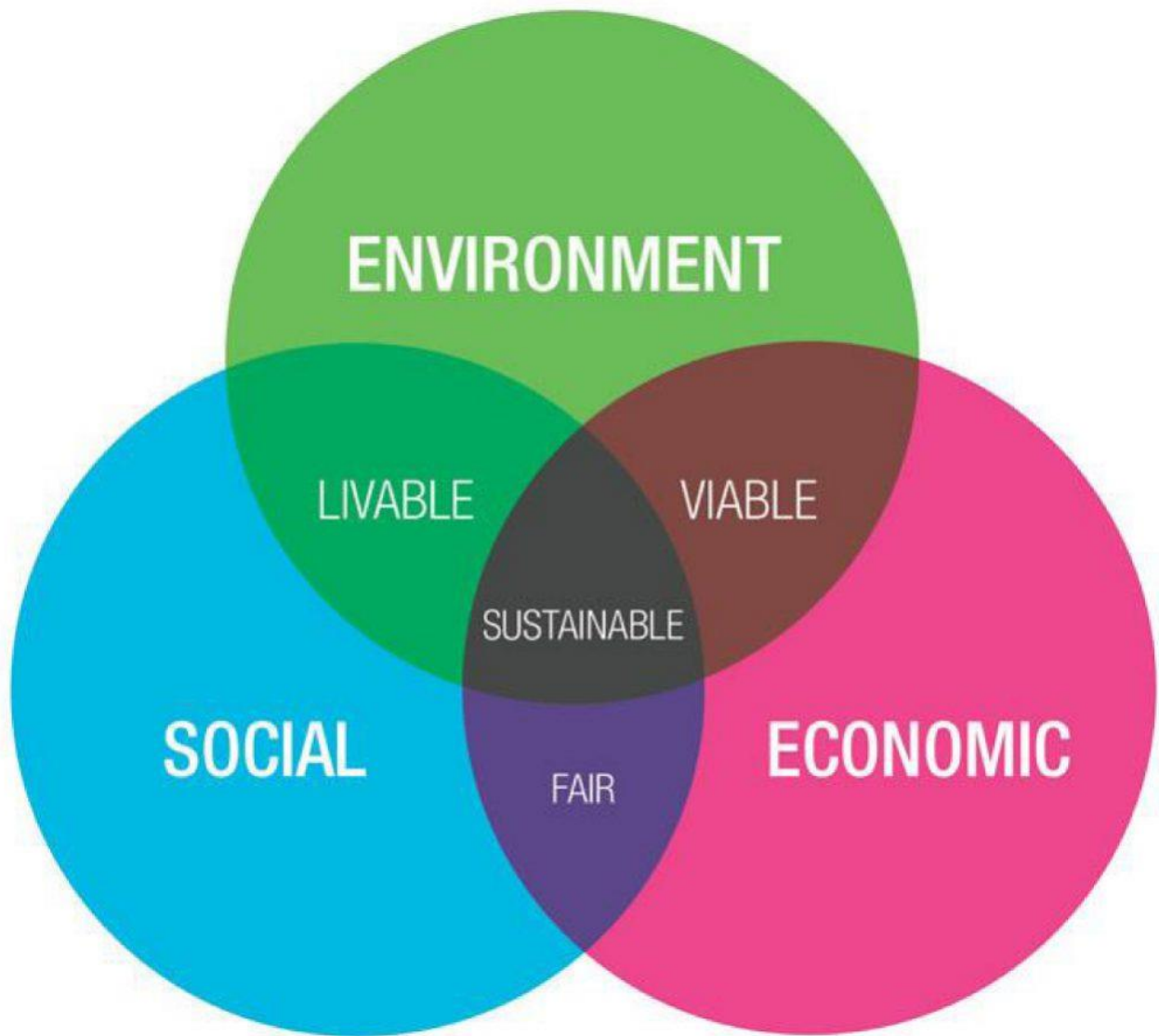
Finanziato dall'Unione europea. Le opinioni espresse appartengono, tuttavia, al solo o ai soli autori e non riflettono necessariamente le opinioni dell'Unione europea o dell'Agenzia esecutiva europea per l'istruzione e la cultura (EACEA). Né l'Unione europea né l'EACEA possono esserne ritenute responsabili.

aLIFEca	aLIFEca
Co-funded by the European Union	Progetto cofinanziato dall'Unione europea
The European Commission's support for the production of this publication does not constitute an endorsement of the contents, which reflect the views only of the authors, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.	Il sostegno della Commissione europea alla produzione di questa pubblicazione non ne costituisce un'approvazione dei contenuti, che riflettono esclusivamente le opinioni degli autori, e la Commissione non può essere ritenuta responsabile per l'uso che può essere fatto delle informazioni ivi contenute.

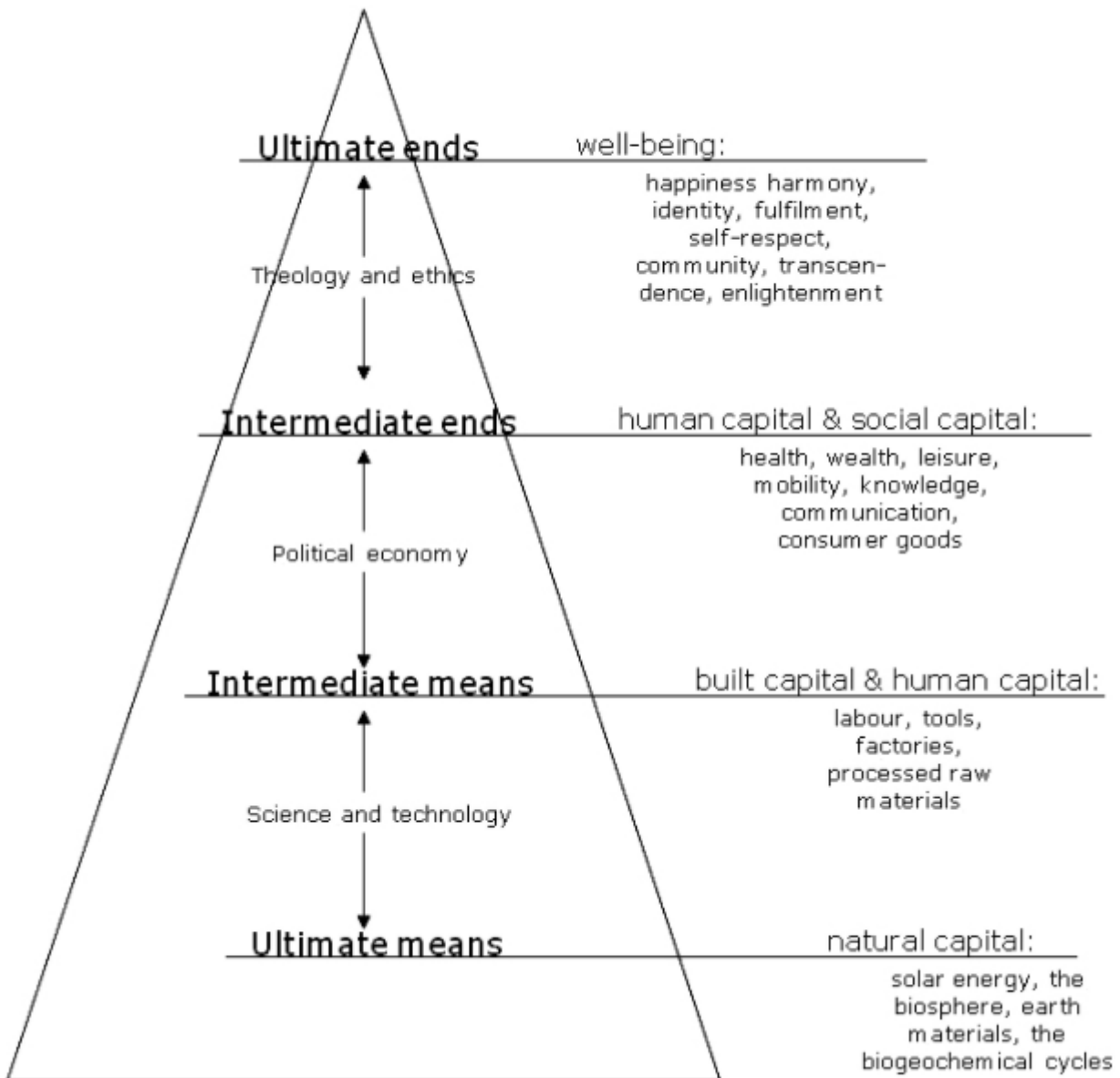
ASSESSMENT MODEL MOOC aLIFeCa



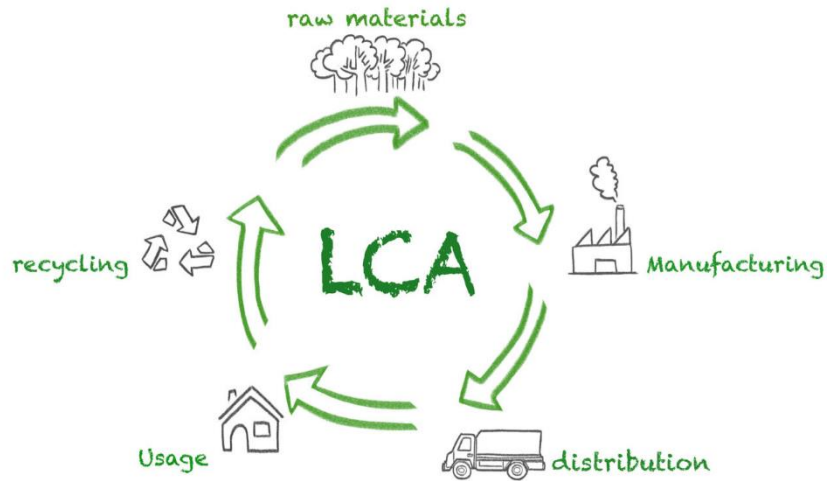
ASSESSMENT MODEL	MODELLO DI VALUTAZIONE
MOOC aLIFeCa	MOOC aLIFeCa
Chapter 2	Capitolo 2
20 points for test + 5 points for graduation	20 punti per il test + 5 crediti per il voto finale
Chapter 3	Capitolo 3
20 points for test + 5 points for graduation	20 punti per il test + 5 crediti per il voto finale
Chapter 4	Capitolo 4
20 points for test + 5 points for graduation	20 punti per il test + 5 crediti per il voto finale
Chapter 5	Capitolo 5
20 points for test + 5 points for graduation	20 punti per il test + 5 crediti per il voto finale



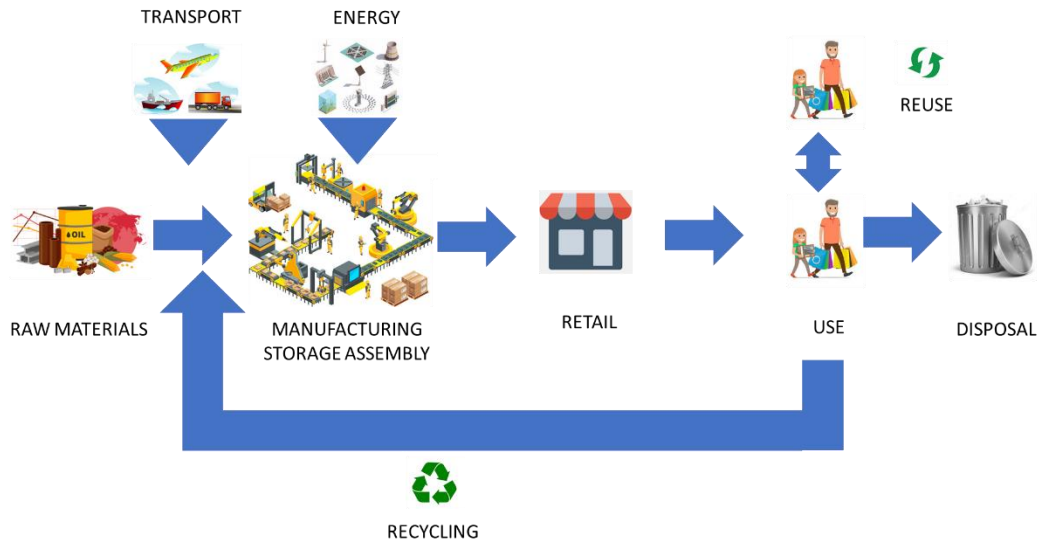
ENVIRONMENT	AMBIENTE
LIVABLE	VIVIBILE
VIALE	FATTIBILE
SUSTAINABLE	SOSTENIBILE
SOCIAL	SOCIALE
FAIR	EQUA
ECONOMIC	ECONOMIA



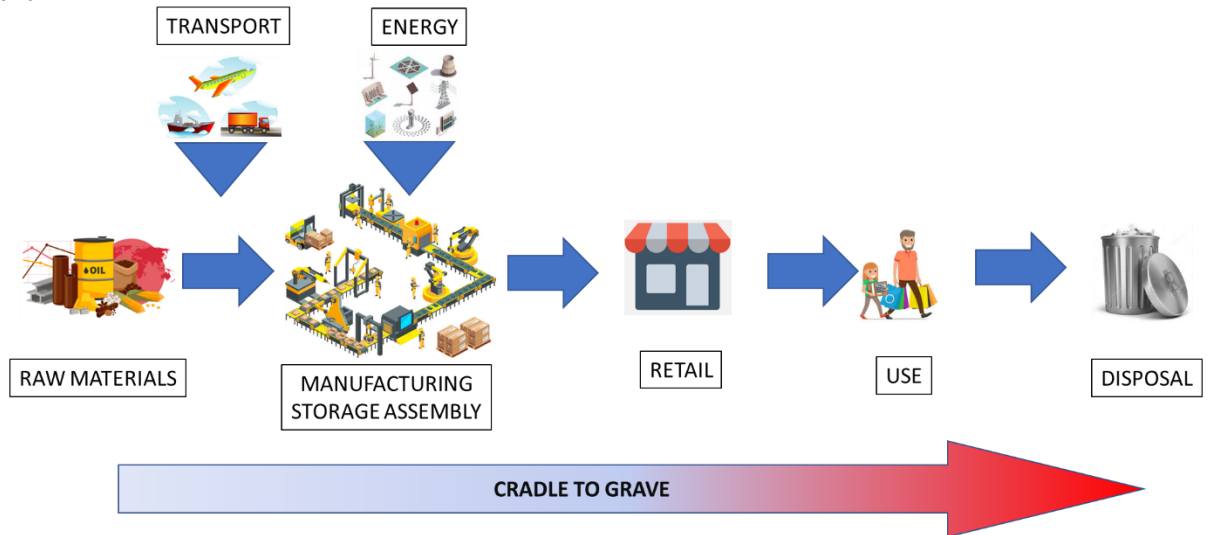
Ultimate ends	Obiettivi definitivi
well-being:	benessere:
happiness harmony, identity, fulfilment, self-respect, community, transcendence, enlightenment	felicità, armonia, identità, realizzazione, rispetto di sé, comunità, trascendenza, illuminazione
Theology and ethics	Teologia ed etica
Intermediate ends	Obiettivi intermedi
human capital & social capital	capitale umano e capitale sociale
health, wealth, leisure, mobility, knowledge, communication, consumer goods	salute, ricchezza, tempo libero, mobilità, conoscenza, comunicazione, beni di consumo
Political economy	Economia politica
Intermediate means	Mezzi intermedi
built capital & human capital	capitale costruito e capitale umano
labour, tools, factories, processed raw materials	manodopera, utensili, fabbriche, materie prime lavorate
Science and technology	Scienza e tecnologia
Ultimate means	Mezzi definitivi
natural capital:	capitale naturale:
solar energy, the biosphere, earth materials, the biogeochemical cycles	energia solare, biosfera, materiali della Terra, cicli biogeochimici



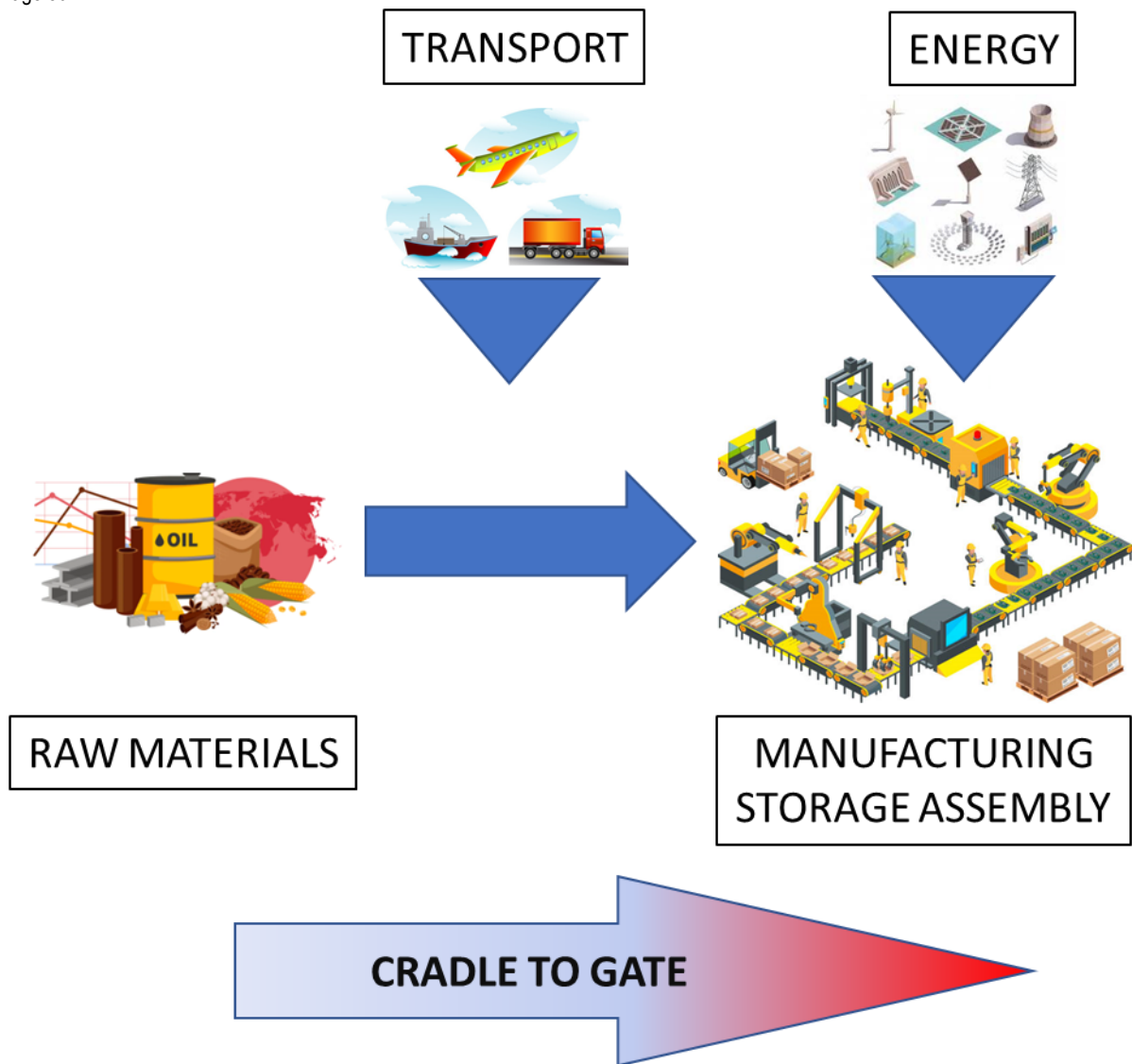
raw materials	materie prime
Manufacturing	produzione
distribution	distribuzione
Usage	utilizzo
recycling	riciclaggio
LCA	LCA



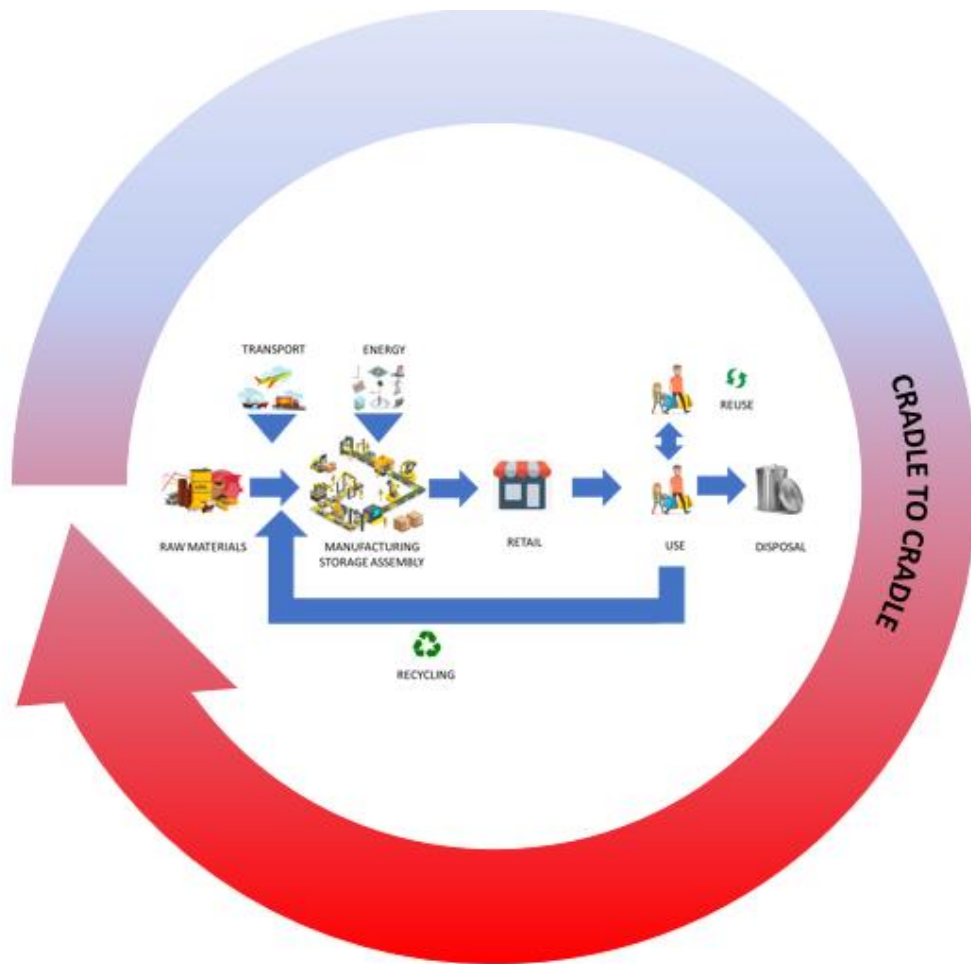
TRANSPORT	TRASPORTO
ENERGY	ENERGIA
REUSE	RIUTILIZZO
RAW MATERIALS	MATERIE PRIME
MANUFACTURING STORAGE ASSEMBLY	FABBRICAZIONE STOCCAGGIO ASSEMBLAGGIO
RETAIL	VENDITA AL DETTAGLIO
USE	UTILIZZO
DISPOSAL	SMALTIMENTO
RECYCLING	RICICLAGGIO



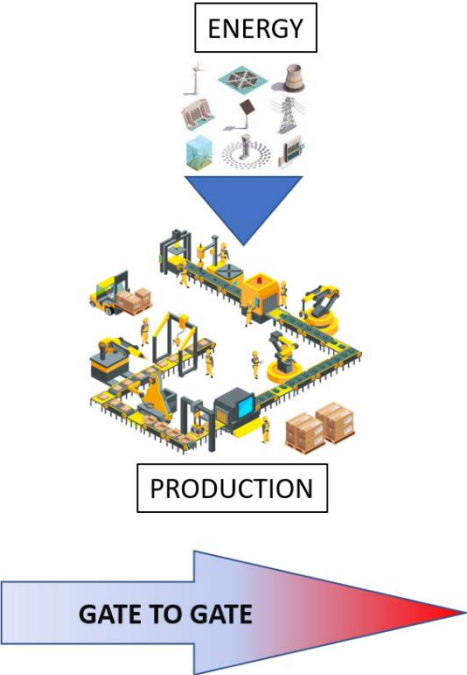
TRANSPORT	TRASPORTO
ENERGY	ENERGIA
RAW MATERIALS	MATERIE PRIME
MANUFACTURING STORAGE ASSEMBLY	FABBRICAZIONE STOCCAGGIO ASSEMBLAGGIO
RETAIL	VENDITA AL DETTAGLIO
USE	UTILIZZO
DISPOSAL	SMALTIMENTO
CRADLE TO GRAVE	CRADLE TO GRAVE



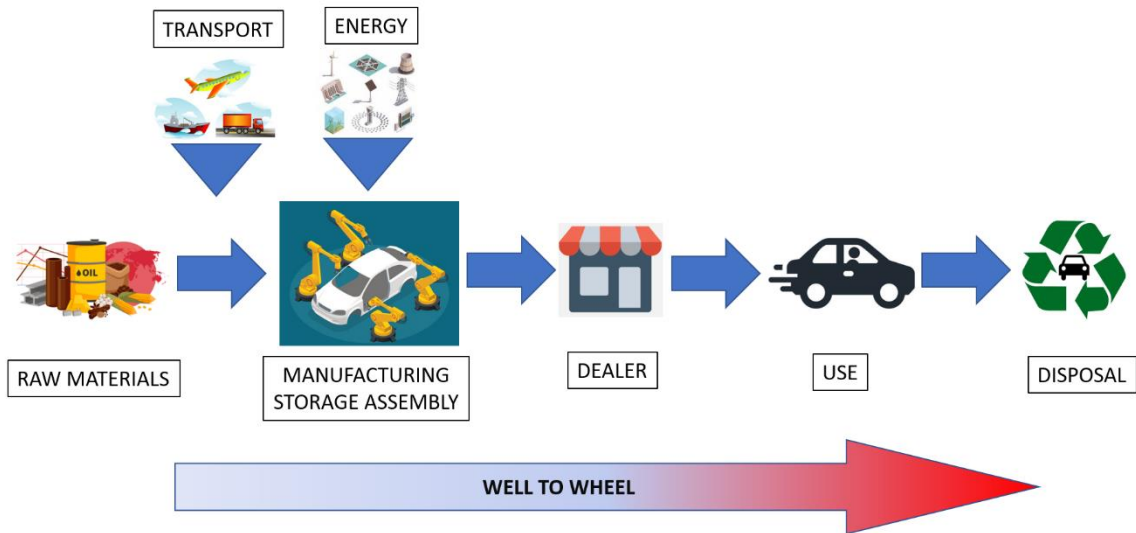
TRANSPORT	TRASPORTO
ENERGY	ENERGIA
RAW MATERIALS	MATERIE PRIME
MANUFACTURING STORAGE ASSEMBLY	FABBRICAZIONE STOCCAGGIO ASSEMBLAGGIO
CRADLE TO GATE	CRADLE TO GATE



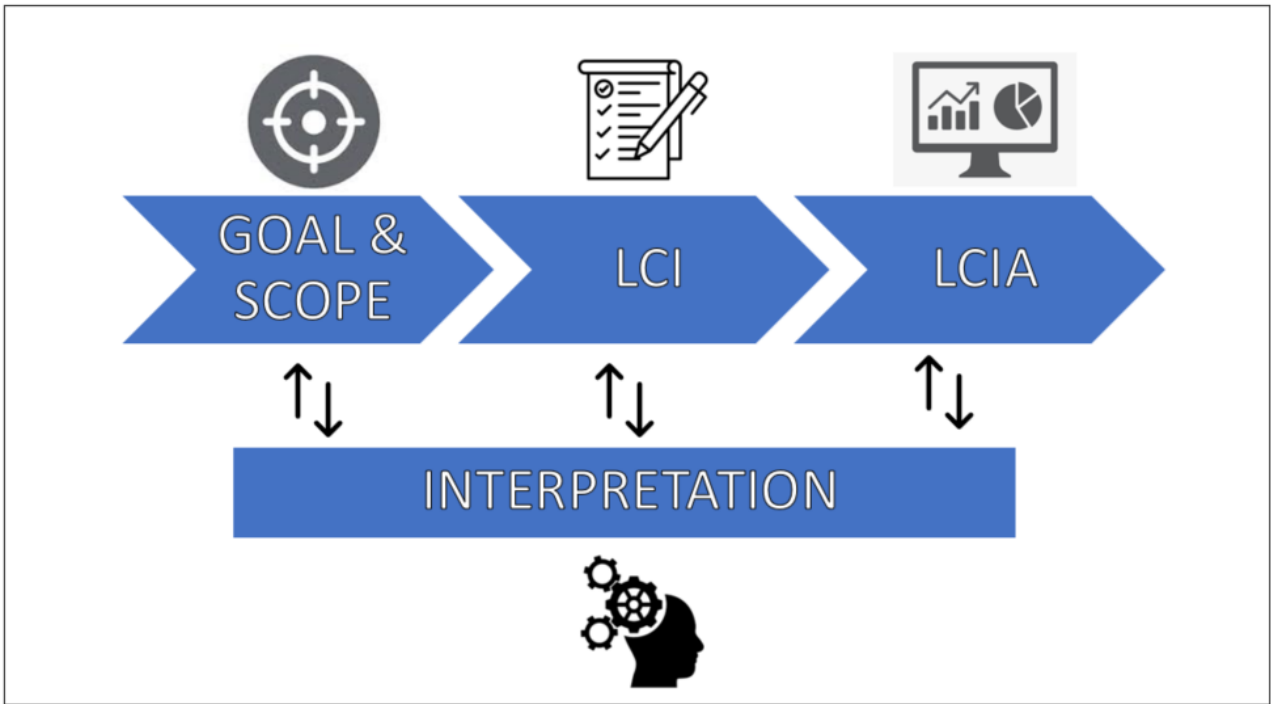
TRANSPORT	TRASPORTO
ENERGY	ENERGIA
RAW MATERIALS	MATERIE PRIME
MANUFACTURING STORAGE ASSEMBLY	FABBRICAZIONE STOCCAGGIO ASSEMBLAGGIO
RETAIL	VENDITA AL DETTAGLIO
USE	UTILIZZO
DISPOSAL	SMALTIMENTO
RECYCLING	RICICLAGGIO
CRADLE TO CRADLE	CRADLE TO CRADLE



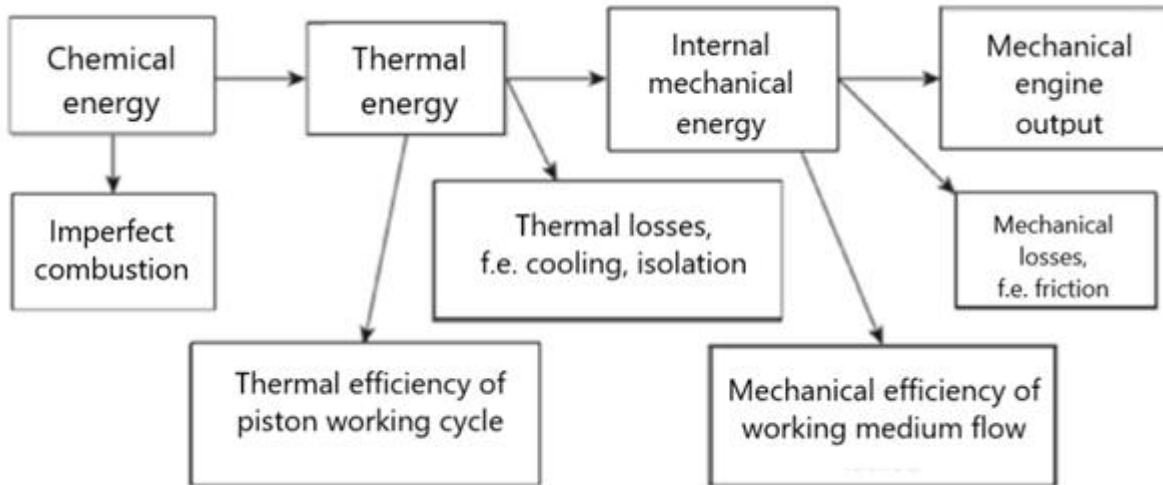
ENERGY	ENERGIA
PRODUCTION	PRODUZIONE
GATE TO GATE	GATE TO GATE



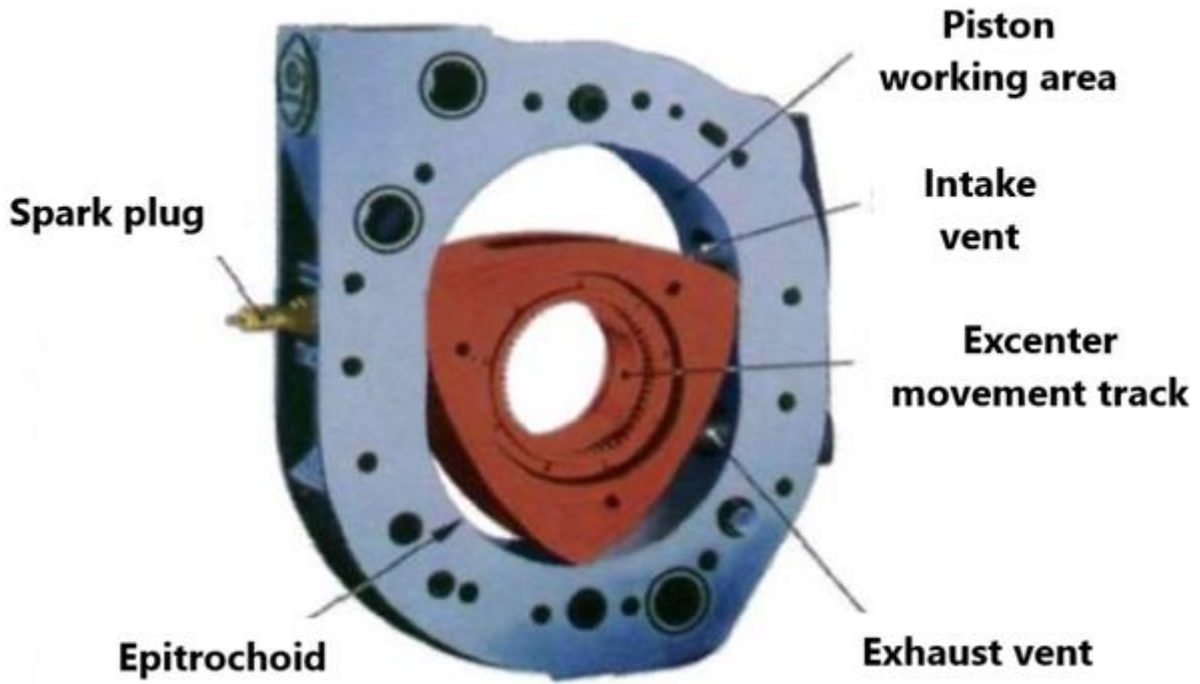
TRANSPORT	TRASPORTO
ENERGY	ENERGIA
RAW MATERIALS	MATERIE PRIME
MANUFACTURING STORAGE ASSEMBLY	FABBRICAZIONE STOCCAGGIO ASSEMBLAGGIO
DEALER	RIVENDITORE
USE	UTILIZZO
DISPOSAL	SMALTIMENTO
WELL TO WHEEL	WELL TO WHEEL



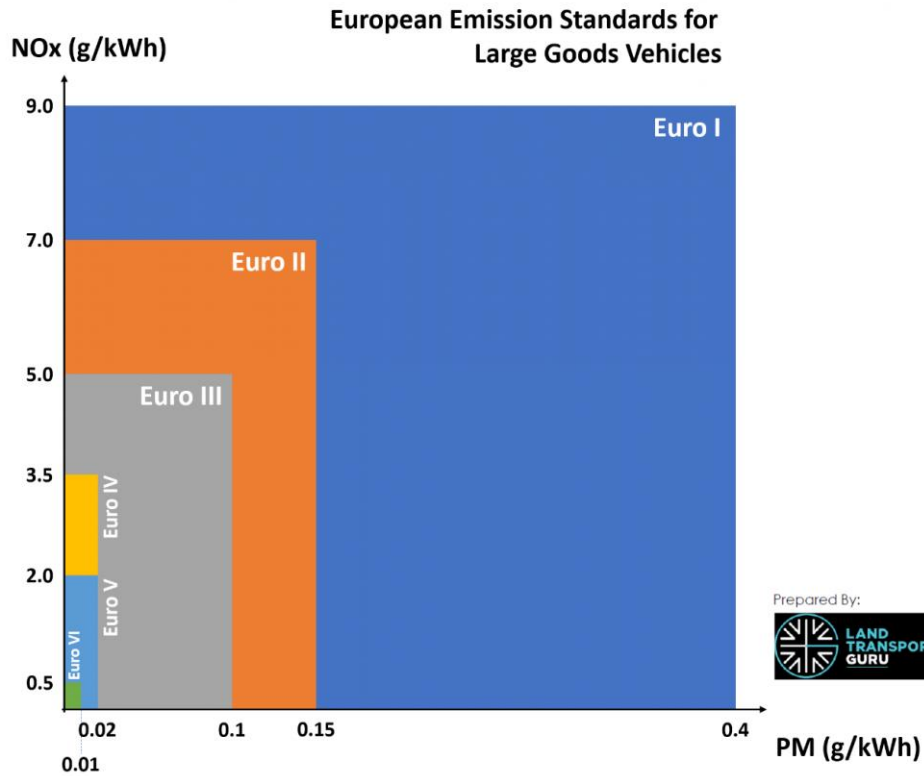
GOAL & SCOPE	OBIETTIVO E CAMPO DI APPLICAZIONE
LCI	LCI
LCIA	LCIA
INTERPRETATION	INTERPRETAZIONE



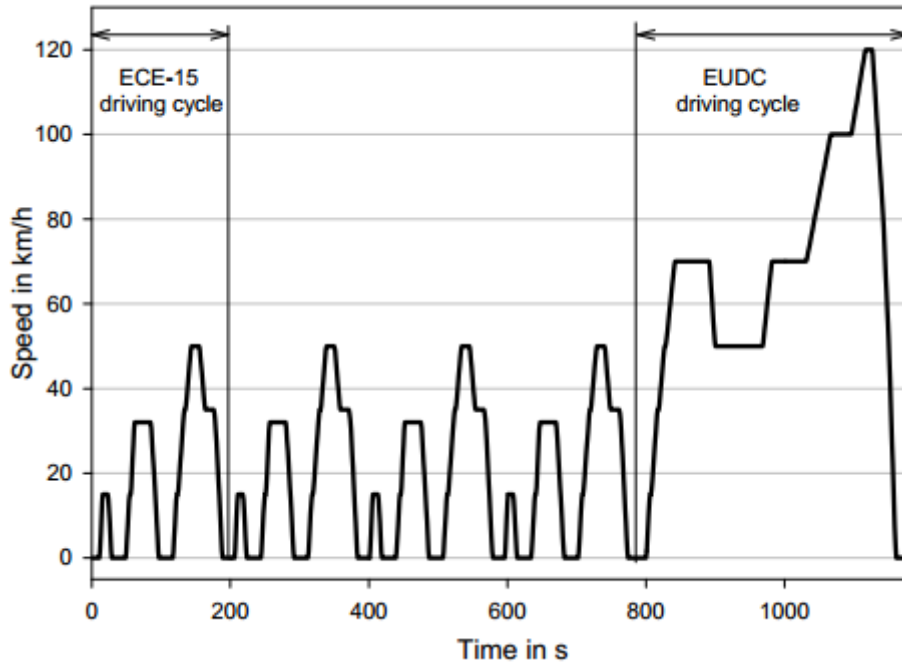
Chemical energy	Energia chimica
Thermal energy	Energia termica
Internal mechanical energy	Energia meccanica interna
Mechanical engine output	Potenza meccanica del motore
Imperfect combustion	Combustione imperfetta
Thermal losses, f.e. cooling, isolation	Perdite termiche, ad es. raffreddamento, isolamento
Mechanical losses, f.e. friction	Perdite meccaniche, ad es. attrito
Thermal efficiency of piston working cycle	Efficienza termica del ciclo di lavoro del pistone
Mechanical efficiency of working medium flow	Efficienza meccanica del flusso del fluido motore



Spark plug	Candela
Piston working area	Area di lavoro pistone
Intake vent	Condotto di aspirazione
Excenter movement track	Albero motore eccentrico
Epitrochoid	Epitrocoide
Exhaust vent	Condotto di scarico

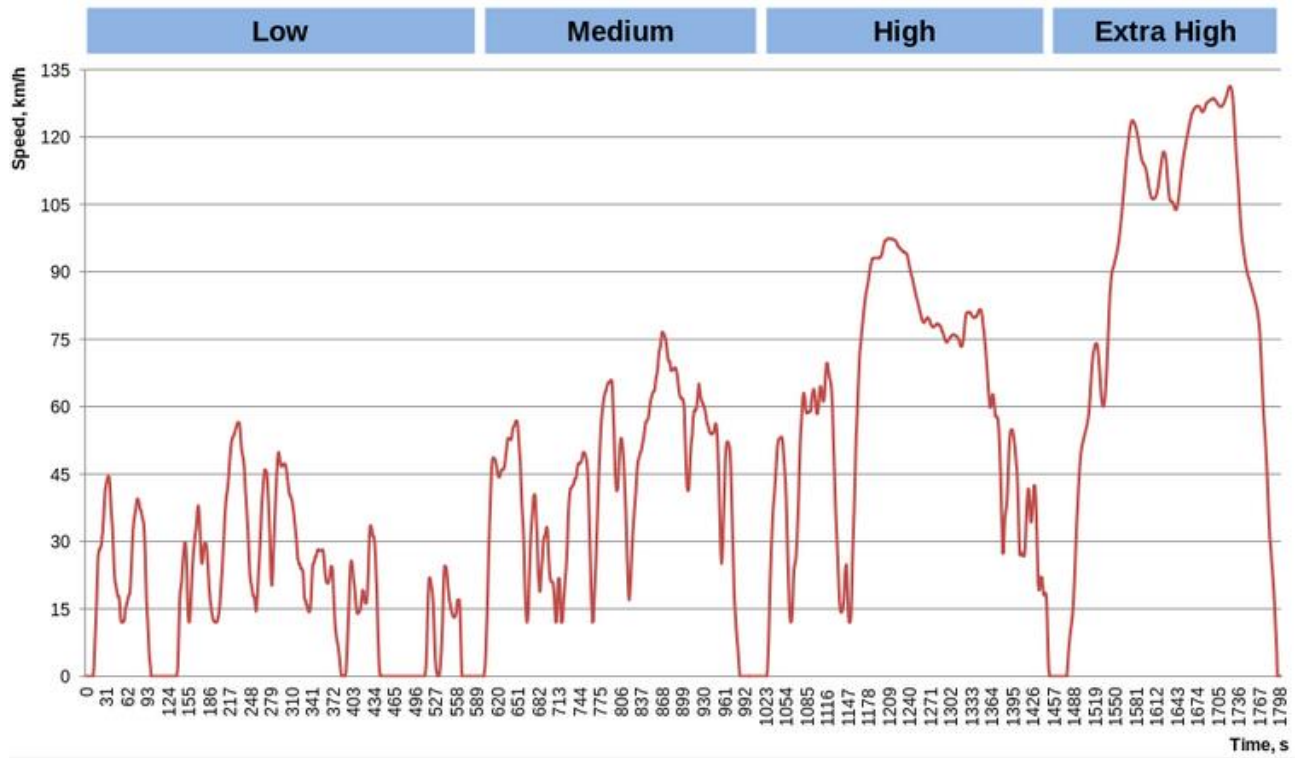


PM (g/kWh)	PM (g/kWh)
0,40	0,40
0,30	0,30
0,20	0,20
0,10	0,10
- 97 %	-97%
Euro 1	Euro 1
Euro 2	Euro 2
Euro 3	Euro 3
Euro 4	Euro 4
Euro 5	Euro 5
Euro 6	Euro 6
NOx (g/kWh)	NOx (g/kWh)
- 95 %	-95%

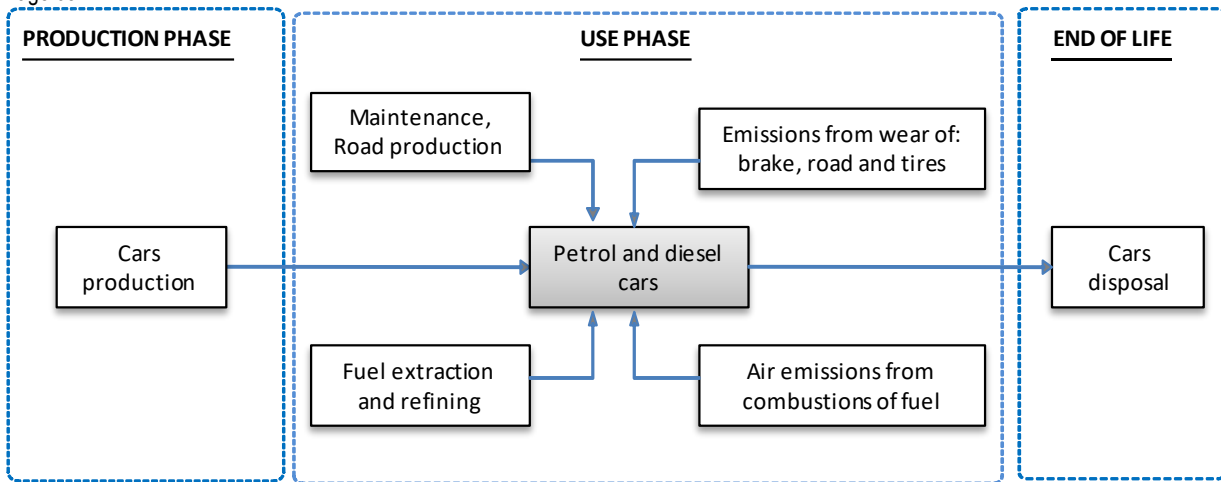


ECE-15 driving cycle	Ciclo di guida ECE-15
EUDC driving cycle	Ciclo di guida EUDC
Speed in km/h	Velocità in km/h
Time in s	Tempo in s

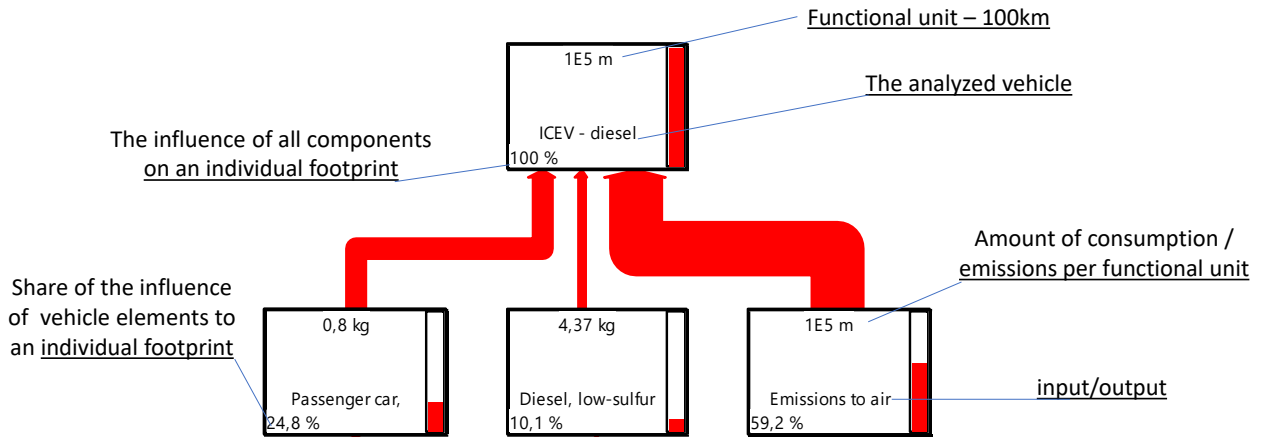
WLTC Class 3



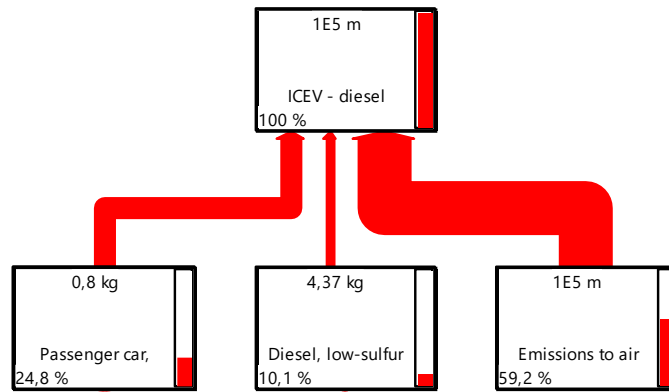
WLTC Class 3	WLTC Classe 3
Low	Basso
Medium	Medio
High	Alto
Extra High	Molto alto
Speed, km/h	Velocità, km/h
Time, s	Tempo, s



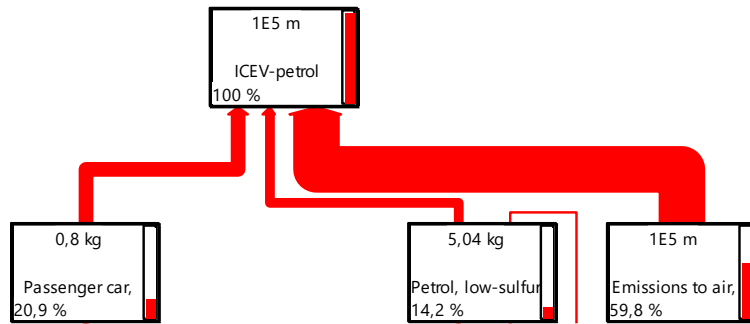
PRODUCTION PHASE	FASE DI PRODUZIONE
Cars production	Produzione auto
USE PHASE	FASE DI UTILIZZO
Maintenance, Road production	Manutenzione, edilizia stradale
Emissions from wear of: brake, road and tires	Emissioni dovute all'usura di: freni, strada e pneumatici
Petrol and diesel cars	Auto a benzina e diesel
Fuel extraction and refining	Estrazione e raffinazione di combustibile
Air emissions from combustions of fuel	Emissioni atmosferiche derivanti dalla combustione di carburante
END OF LIFE	FINE VITA
Cars disposal	Smaltimento auto



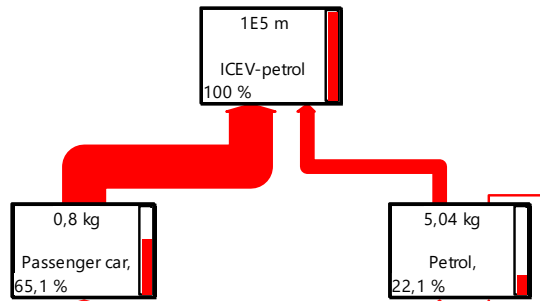
The influence of all components on an individual footprint	Influenza di tutti i componenti su un'impronta specifica
1E5 m	1E5 m
ICEV - diesel	ICEV - diesel
100 %	100%
Functional unit-100km	Unità funzionale: 100 km
The analyzed vehicle	Veicolo analizzato
Share of the influence of vehicle elements to an individual footprint	Quota dell'influenza degli elementi del veicolo su un'impronta specifica
0,8 kg	0,8 kg
Passenger car,	Autovettura,
24,8 %	24,8%
4,37 kg	4,37 kg
Diesel, low-sulfur	Diesel a basso tenore di zolfo
10,1 %	10,1%
1E5 m	1E5 m
Emissions to air	Emissioni atmosferiche
59,2 %	59,2%
Amount of consumption / emissions per functional unit	Quantità di consumo/emissioni per unità funzionale
input/output	input/output



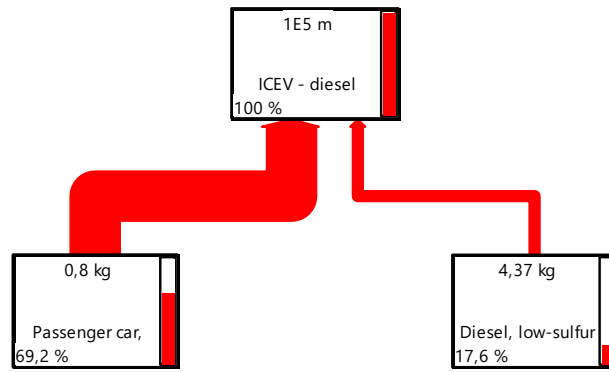
1E5 m	1E5 m
ICEV - diesel	ICEV - diesel
100 %	100%
0,8 kg	0,8 kg
Passenger car,	Autovettura,
24,8 %	24,8%
4,37 kg	4,37 kg
Diesel, low-sulfur	Diesel a basso tenore di zolfo
10,1 %	10,1%
1E5 m	1E5 m
Emissions to air	Emissioni atmosferiche
59,2 %	59,2%



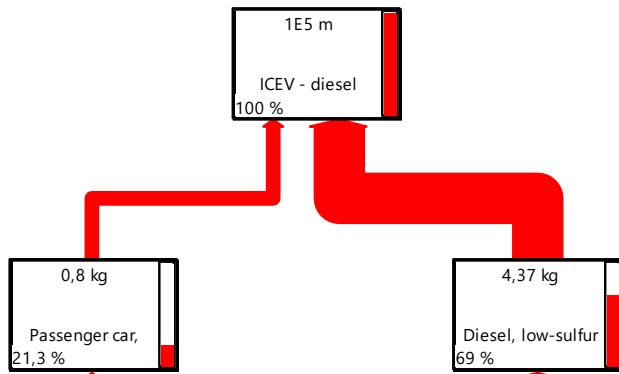
1E5 m	1E5 m	1E5 m
0,8 kg	0,8 kg	0,8 kg
Passenger car,	Autovettura,	
20,9 %	20,9%	
5,04 kg	5,04 kg	
Petrol, low-sulfur	Benzina a basso tenore di zolfo	
14,2 %	14,2%	
1E5 m	1E5 m	
Emissions to air,	Emissioni atmosferiche,	
59,8 %	59,8%	



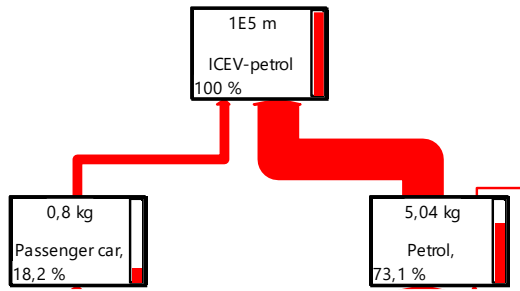
1E5 m	1E5 m
ICEV-petrol	ICEV a benzina
100 %	100%
0,8 kg	0,8 kg
Passenger car,	Autovettura,
65,1 %	65,1%
5,04 kg	5,04 kg
Petrol,	Benzina,
22,1 %	22,1%



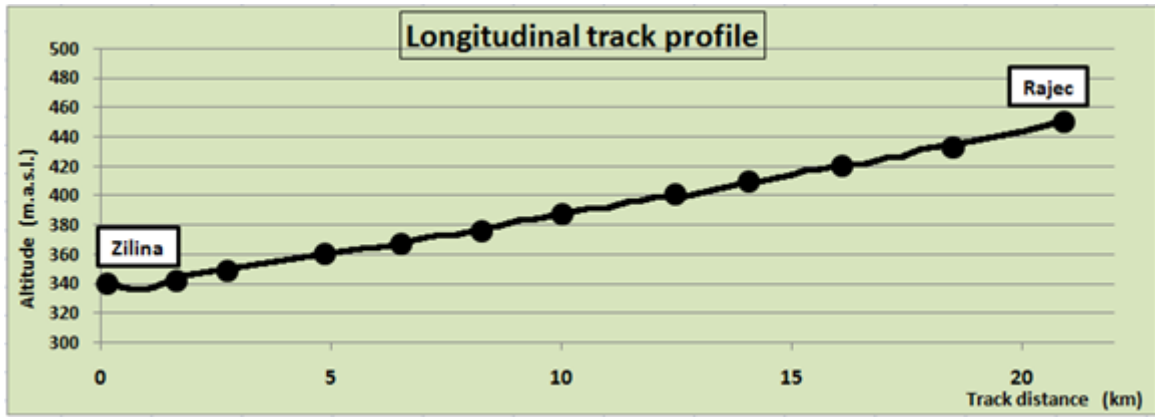
1E5 m	1E5 m
ICEV - diesel	ICEV - diesel
100 %	100%
0,8 kg	0,8 kg
Passenger car,	Autovettura,
69,2 %	69,2%
4,37 kg	4,37 kg
Diesel, low-sulfur	Diesel a basso tenore di zolfo
17,6 %	17,6%



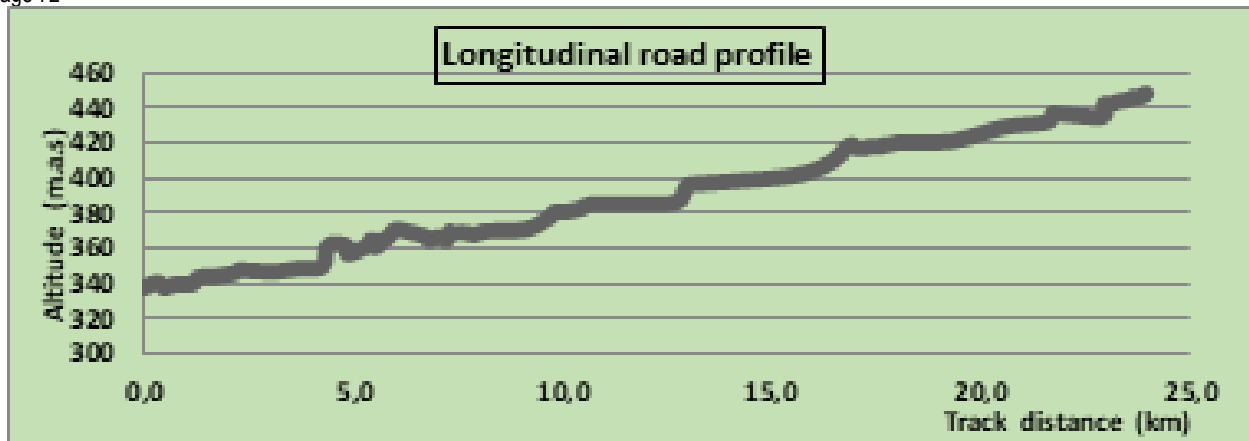
1E5 m	1E5 m
ICEV - diesel	ICEV - diesel
100 %	100%
0,8 kg	0,8 kg
Passenger car,	Autovettura,
21,3 %	21,3%
4,37 kg	4,37 kg
Diesel, low-sulfur	Diesel a basso tenore di zolfo
69 %	69%



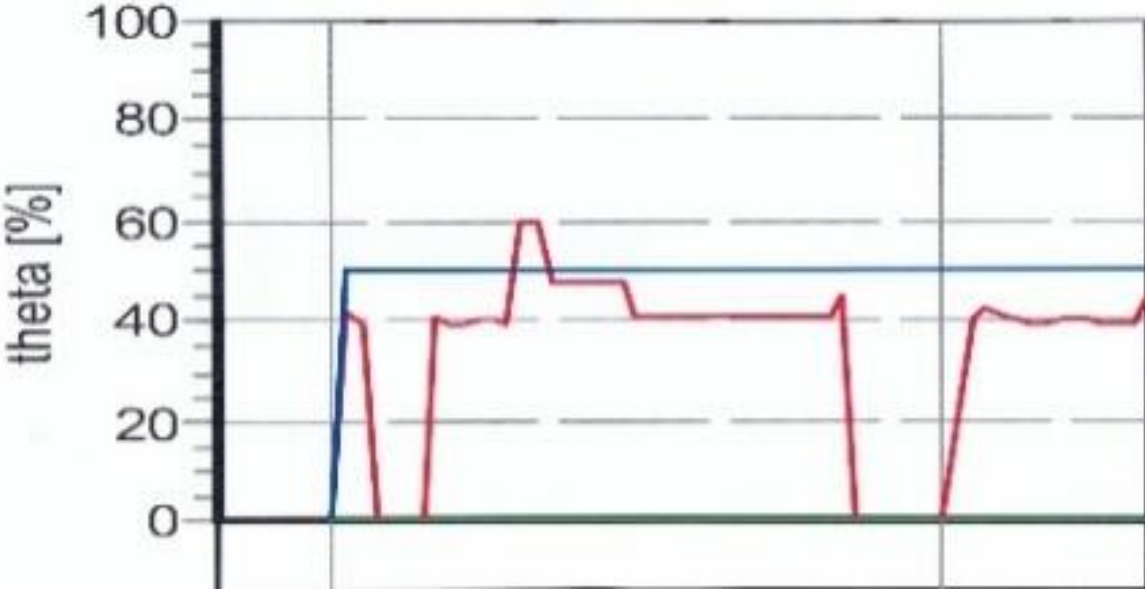
1E5 m	1E5 m
ICEV - petrol	ICEV a benzina
100 %	100%
0,8 kg	0,8 kg
Passenger car,	Autovettura,
18,2 %	18,2%
5,04 kg	5,04 kg
Petrol,	Benzina,
73,1 %	73,1%



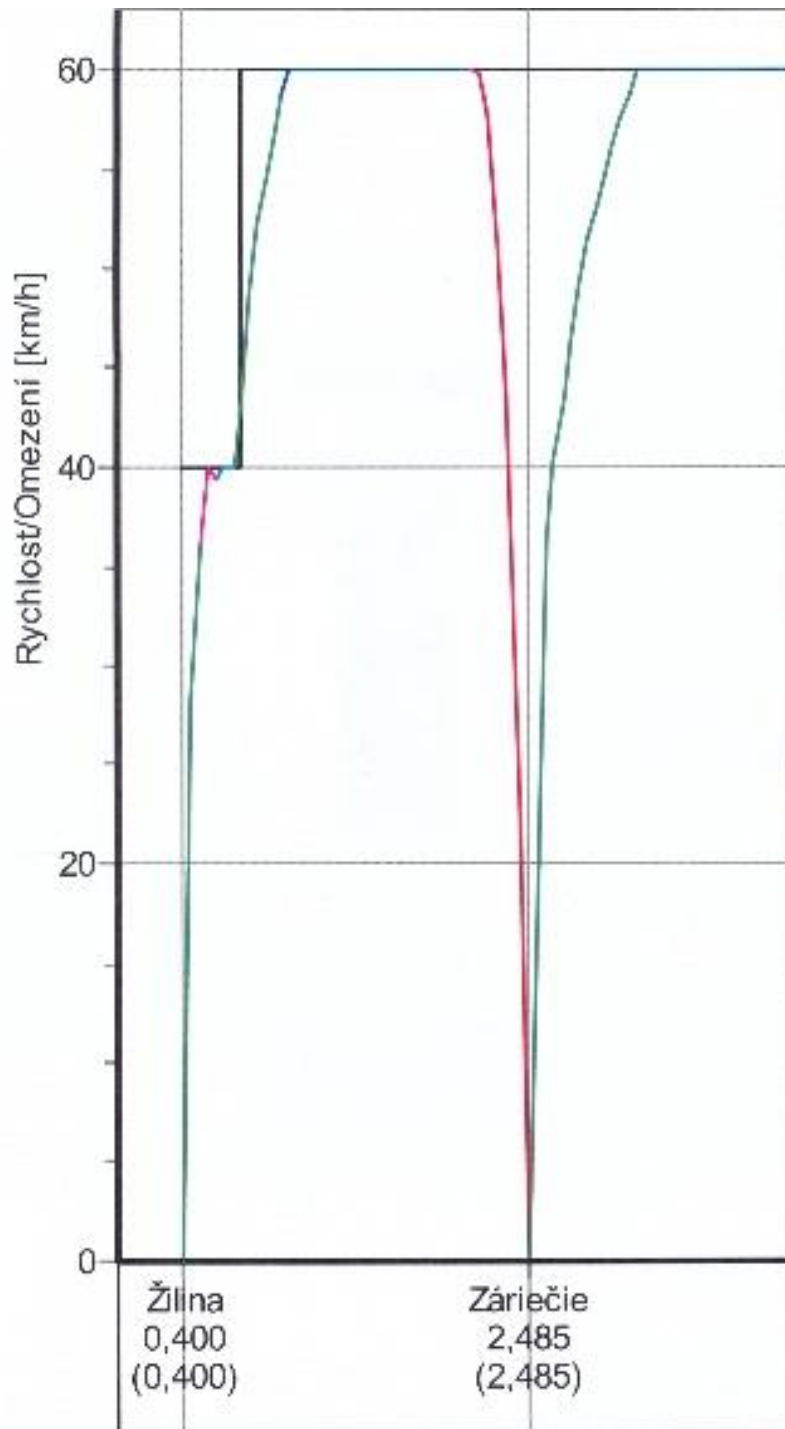
Longitudinal track profile	Profilo longitudinale del binario
Zilina	Zilina
Rajec	Rajec
Altitude (m.a.s.l.)	Altitudine (s.l.m.)
Track distance (km)	Lunghezza della linea ferroviaria (km)



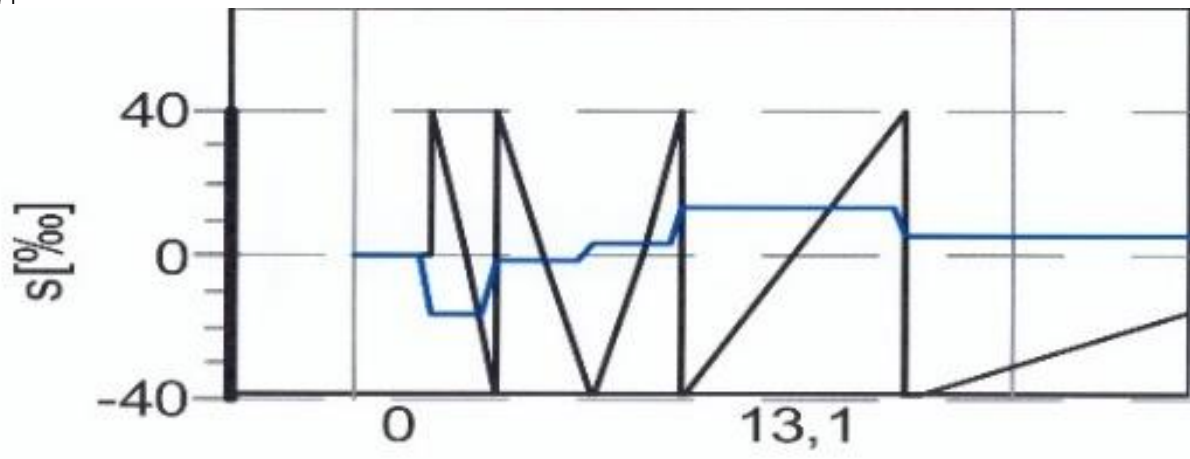
Longitudinal road profile	Profilo stradale longitudinale
Altitude (m.a.s.)	Altitudine (s.l.m.)
Track distance (km)	Lunghezza della linea ferroviaria (km)
0,0	0,0
5,0	5,0
10,0	10,0
15,0	15,0
20,0	20,0
25,0	25,0



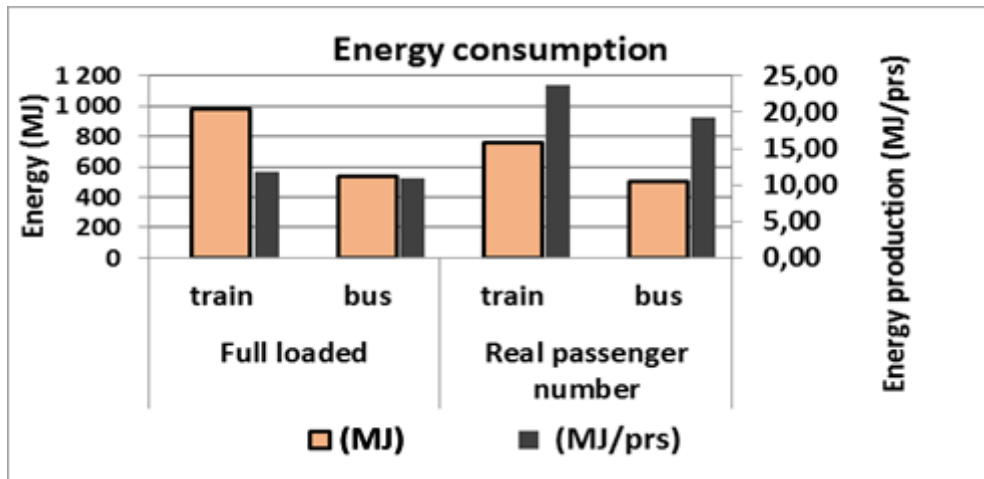
theta [%]



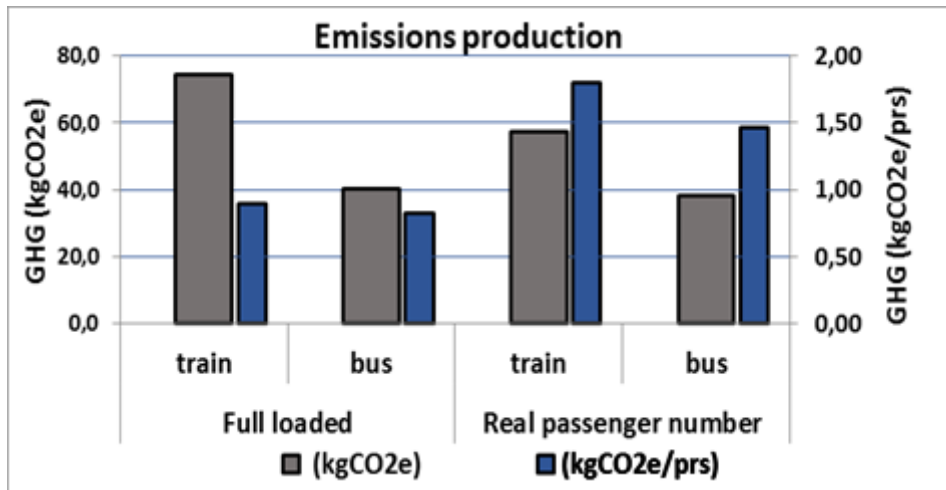
Rychlost/Omezeni [km/h]	Rychlost/Omezeni [km/h]
Žilina	Žilina
0,400	0,400
(0,400)	(0,400)
Záriečie	Záriečie
2,485	2,485
(2,485)	(2,485)



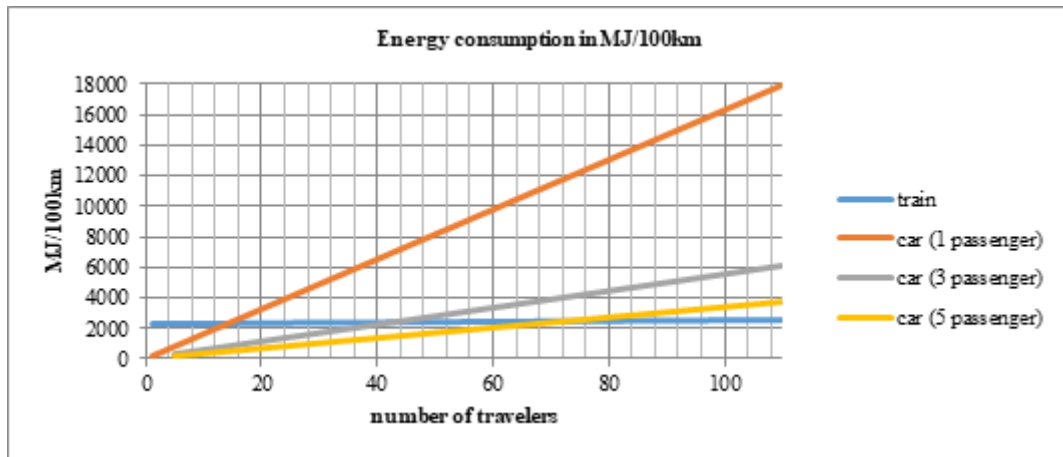
$S[‰]$	$S[‰]$
13,1	13,1



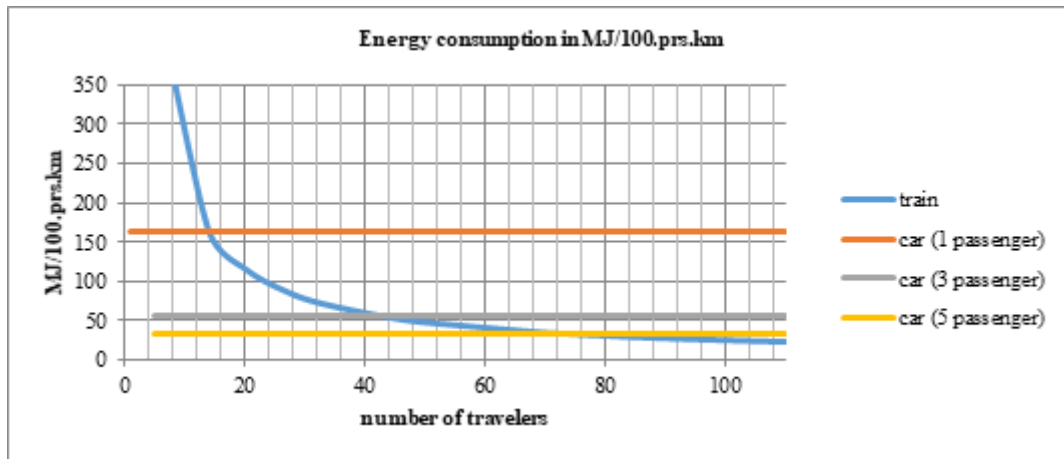
Energy consumption	Consumo energetico
Energy (MJ)	Energia (MJ)
25,00	25,00
20,00	20,00
15,00	15,00
10,00	10,00
5,00	5,00
0,00	0,00
Energy production (MJ/prs)	Produzione di energia (MJ/prs)
train	treno
bus	autobus
Full loaded	Al completo
Real passenger number	Numero reale di passeggeri
(MJ)	(MJ)
(MJ/prs)	(MJ/prs)



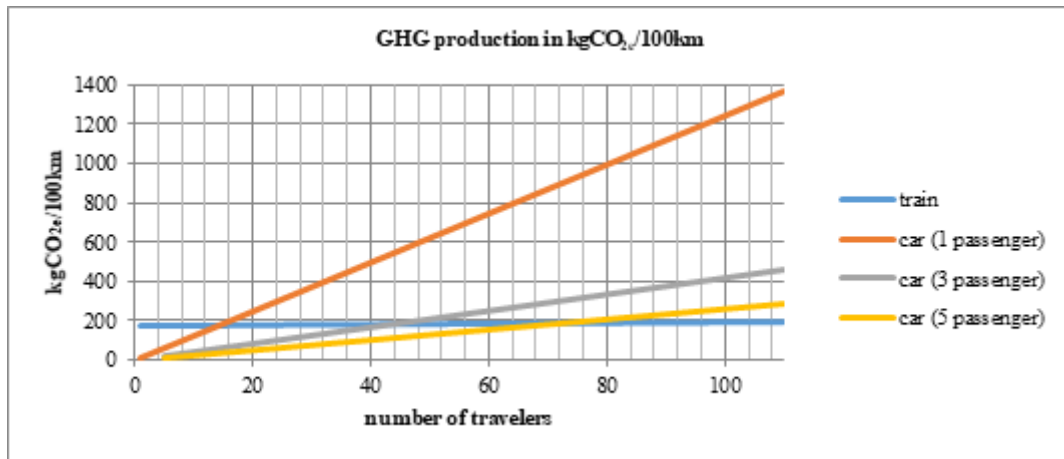
Emissions production	Produzione di emissioni
GHG(kgCO ₂ e)	GHG (kgCO ₂ e)
80,0	80,0
60,0	60,0
40,0	40,0
20,0	20,0
0,0	0,0
GHG (kgCO ₂ e/prs)	GHG (kgCO ₂ e/prs)
2,00	2,00
1,50	1,50
1,00	1,00
0,50	0,50
0,00	0,00
train	treno
bus	autobus
Full loaded	Al completo
Real passenger number	Numero reale di passeggeri
(kgCO ₂ e)	(kgCO ₂ e)
(kgCO ₂ e/prs)	(kgCO ₂ e/prs)



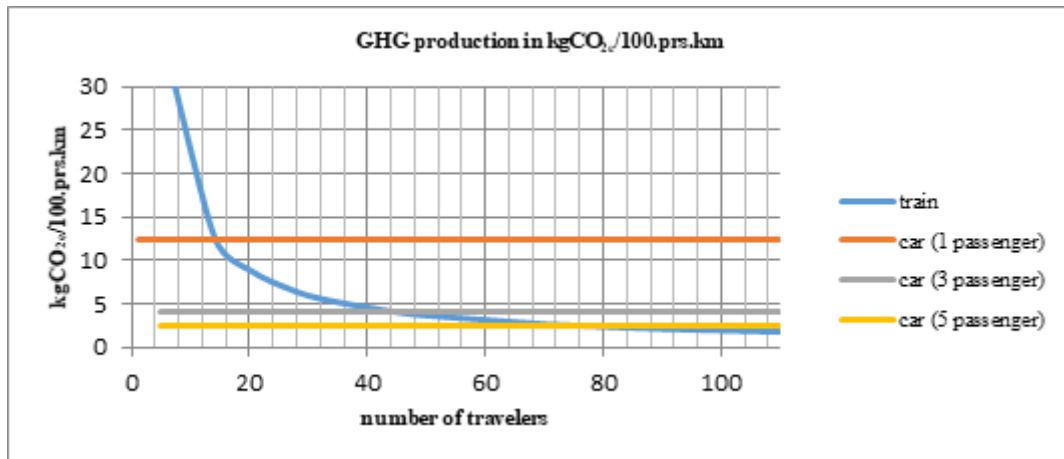
Energy consumption in MJ 100km	Consumo energetico in MJ/100 km
MJ/100km	MJ/100km
number of travelers	numero di viaggiatori
train	treno
car (1 passenger)	auto (1 passeggero)
car (3 passenger)	auto (3 passeggeri)
car (5 passenger)	auto (5 passeggeri)



Energy consumption in MJ/100.prs.km	Consumo energetico in MJ/100.prs.km
MJ/100.prs.km	MJ/100.prs.km
number of travelers	numero di viaggiatori
train	treno
car (1 passenger)	auto (1 passeggero)
car (3 passenger)	auto (3 passeggeri)
car (5 passenger)	auto (5 passeggeri)

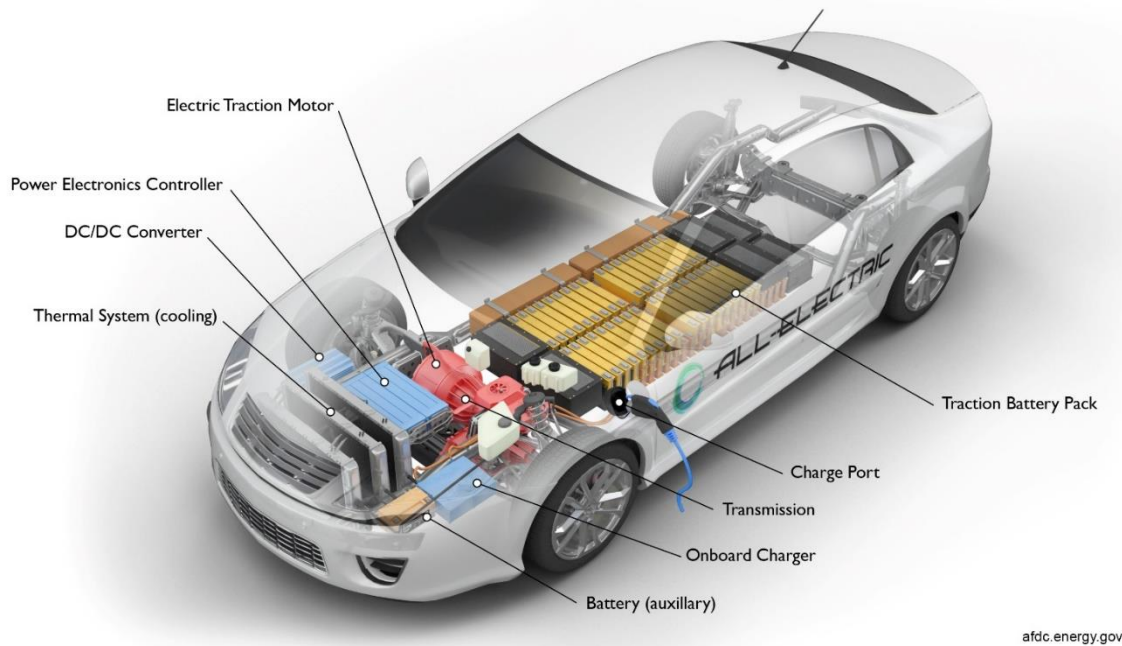


GHG production in kgCO ₂ /100km	Gas serra prodotti in kgCO ₂ /100 km
kgCO ₂ /100km	kgCO ₂ /100 km
number of travelers	numero di viaggiatori
train	treno
car (1 passenger)	auto (1 passeggero)
car (3 passenger)	auto (3 passeggeri)
car (5 passenger)	auto (5 passeggeri)



GHG production in kgCO ₂ /100.prs.km	Gas serra prodotti in kgCO ₂ /100.prs.km
kgCO ₂ /100.prs.km	kgCO ₂ /100.prs.km
number of travelers	numero di viaggiatori
train	treno
car (1 passenger)	auto (1 passeggero)
car (3 passenger)	auto (3 passeggeri)
car (5 passenger)	auto (5 passeggeri)

All-Electric Vehicle



afdc.energy.gov

All-Electric Vehicle	Veicolo completamente elettrico
Electric Traction Motor	Motore elettrico di trazione
Power Electronics Controller	Regolatore elettronico di potenza
DC/DC Converter	Convertitore CC/CC
Thermal System (cooling)	Sistema termico (raffreddamento)
Traction Battery Pack	Batteria di trazione
Charge Port	Presa di ricarica
Transmission	Trasmissione
Onboard Charge	Caricabatterie di bordo
Battery (auxiliary)	Batteria (ausiliaria)
afdc.energy.gov	afdc.energy.gov

$$CF_{EV} = (CF_{ES\ 1-8} * S_{ES\ 1-8}) * E_{EV}$$

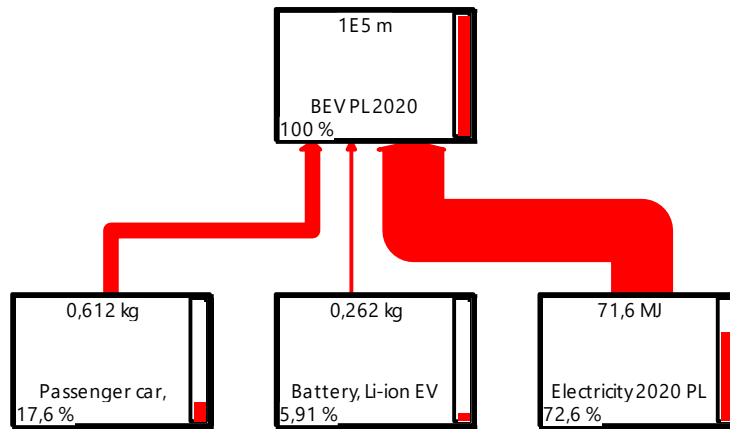
$CF_{EV} = (CF_{ES\ 1-8} * S_{ES\ 1-8}) * E_{EV}$	
---	--

$$WF_{EV} = (WF_{ES\ 1-8} * S_{ES\ 1-8}) * E_{EV}$$

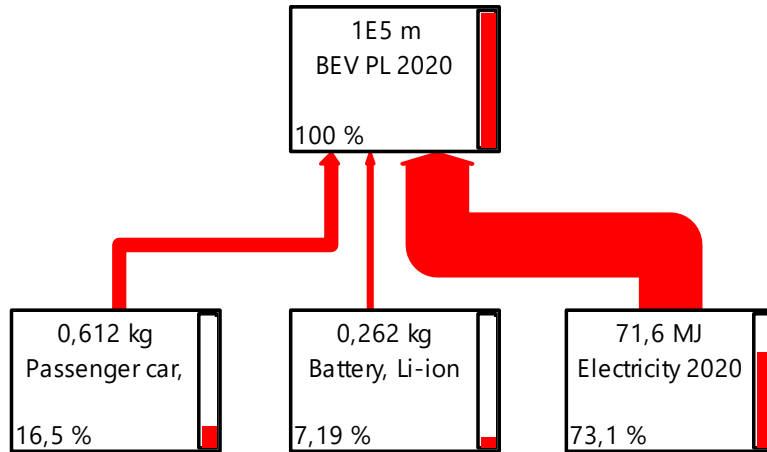
$WF_{EV} = (WF_{ES\ 1-8} * S_{ES\ 1-8}) * E_{EV}$	
---	--

$$RF_{EV} = (RF_{ES\ 1-8} * S_{ES\ 1-8}) * E_{EV}$$

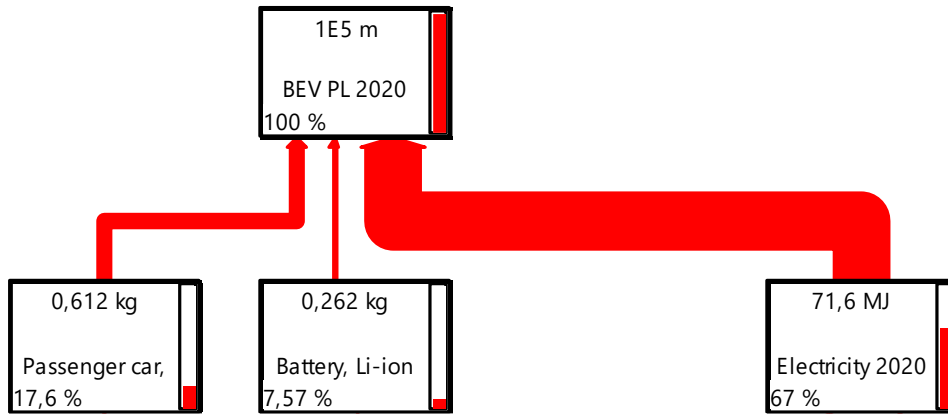
$RF_{EV} = (RF_{ES\ 1-8} * S_{ES\ 1-8}) * E_{EV}$	
---	--



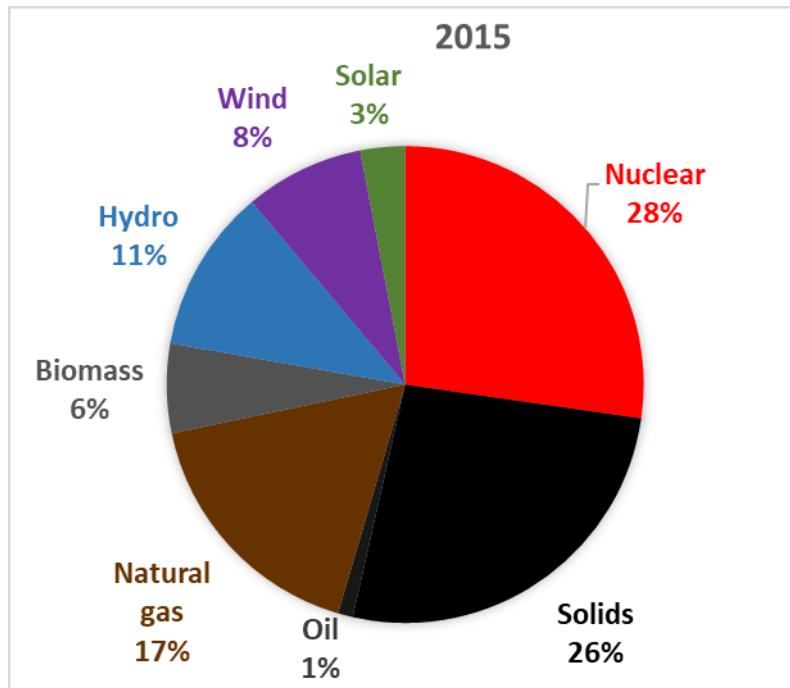
1E5 m	1E5 m
BEV PL 2020	BEV PL 2020
100 %	100%
0,612 kg	0,612 kg
Passenger car,	Autovettura,
17,6 %	17,6%
0,262 kg	0,262 kg
Battery, Li-ion EV	EV a batteria agli ioni di litio
5,91 %	5,91%
71,6 MJ	71,6 MJ
Electricity 2020 PL	Elettricità PL 2020
72,6 %	72,6%



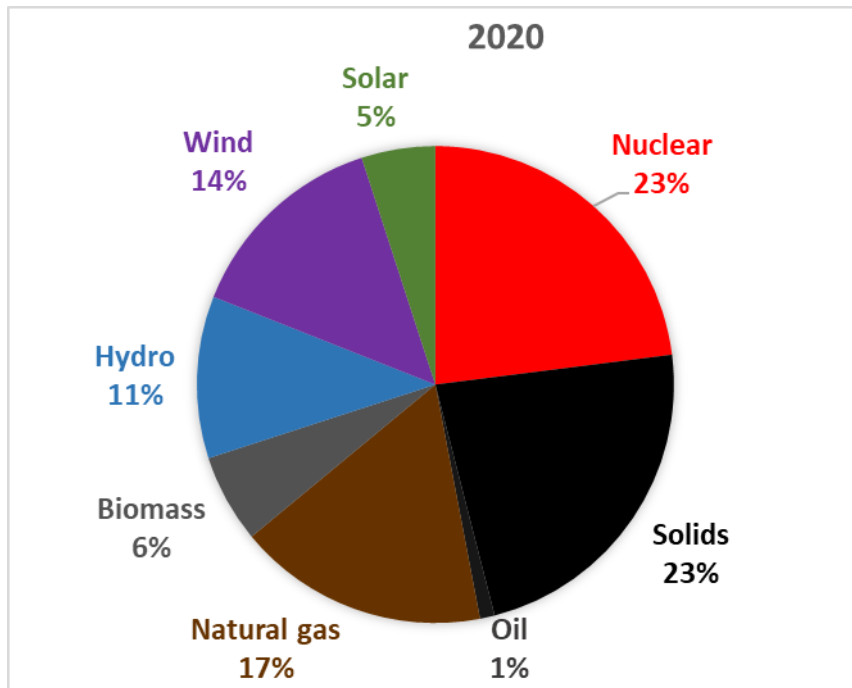
1E5 m	1E5 m
BEV PL 2020	BEV PL 2020
100 %	100%
0,612 kg	0,612 kg
Passenger car,	Autovettura,
16,5 %	16,5%
0,262 kg	0,262 kg
Battery, Li-ion	Batteria agli ioni di litio
7,19 %	7,19%
71,6 MJ	71,6 MJ
Electricity 2020	Elettricità 2020
73,1 %	73,1%



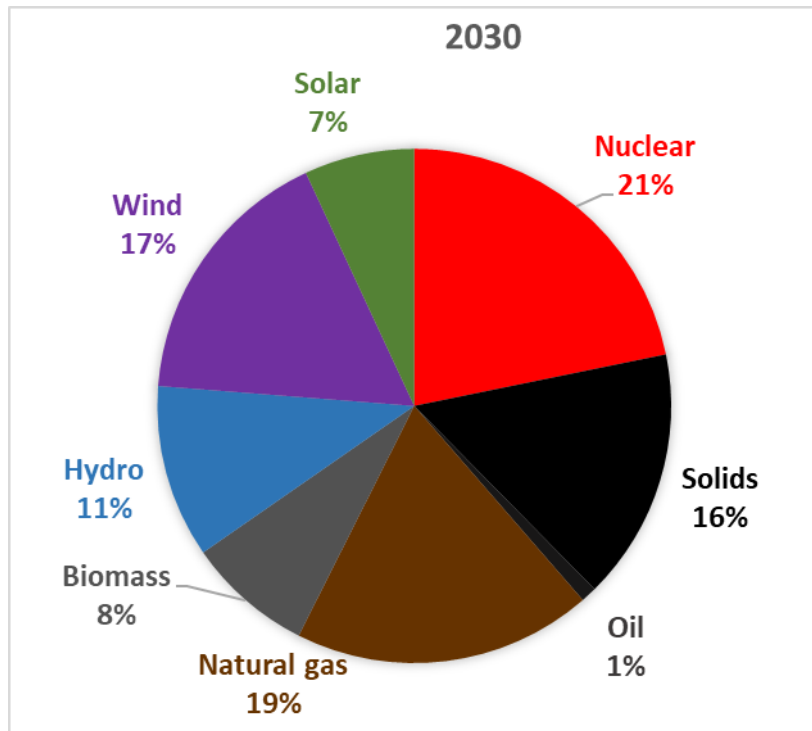
1E5 m	1E5 m
BEV PL 2020	BEV PL 2020
100 %	100%
0,612 kg	0,612 kg
Passenger car,	Autovettura,
17,6 %	17,6%
0,262 kg	0,262 kg
Battery, Li-ion	Batteria agli ioni di litio
7,57 %	7,57%
71,6 MJ	71,6 MJ
Electricity 2020	Elettricità 2020
67 %	67%



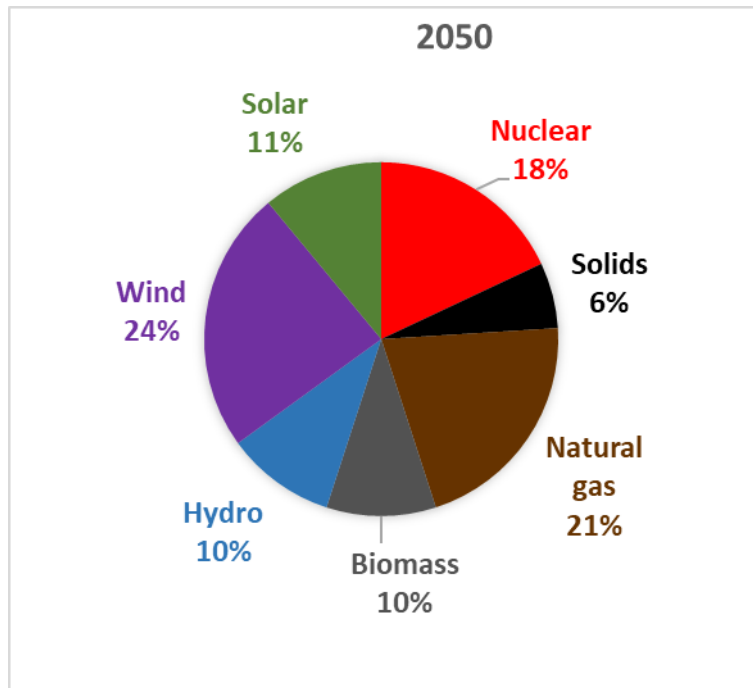
Solar 3%	Solare 3%
Wind 8%	Eolico 8%
Hydro 11%	Idrico 11%
Biomass 6%	Biomassa 6%
Natural gas 17%	Gas naturale 17%
Oil 1%	Petrolio 1%
Solids 26%	Solidi 26%
Nuclear 28%	Nucleare 28%



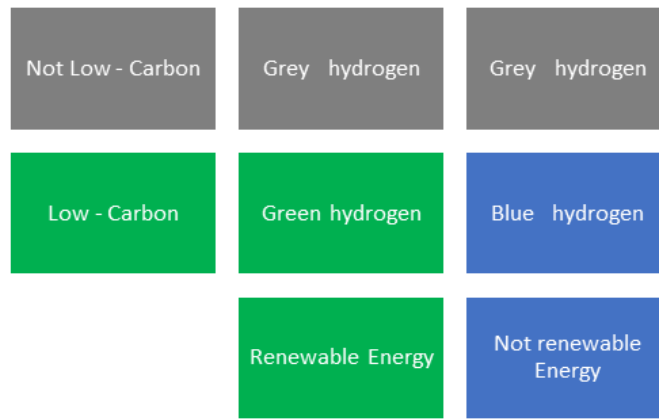
Solar 5%	Solare 5%
Wind 14%	Eolico 14%
Hydro 11%	Idrico 11%
Biomass 6%	Biomassa 6%
Natural gas 17%	Gas naturale 17%
Oil 1%	Petrolio 1%
Solids 23%	Solidi 23%
Nuclear 23%	Nucleare 23%



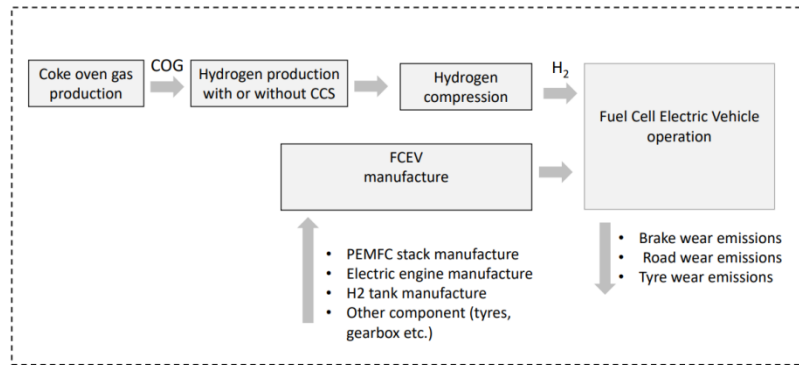
Solar 7%	Solare 7%
Wind 17%	Eolico 17%
Hydro 11%	Idrico 11%
Biomass 8%	Biomassa 8%
Natural gas 19%	Gas naturale 19%
Oil 1%	Petrolio 1%
Solids 16%	Solidi 16%
Nuclear 21%	Nucleare 21%



Solar 11%	Solare 11%
Wind 24%	Eolico 24%
Hydro 10%	Idrico 10%
Biomass 10%	Biomassa 10%
Natural gas 21%	Gas naturale 21%
Solids 6%	Solidi 6%
Nuclear 18%	Nucleare 18%



Not Low - Carbon	Non a basso tenore di carbonio
Grey hydrogen	Idrogeno grigio
Low - Carbon	Basso tenore di carbonio
Green hydrogen	Idrogeno verde
Blue hydrogen	Idrogeno blu
Renewable Energy	Energia rinnovabile
Not renewable Energy	Energia non rinnovabile



Coke oven gas production	Produzione di gas da cokeria
COG	Gas da cokeria
Hydrogen production with or without CCS	Produzione di idrogeno con o senza CCS
Hydrogen compression	Compressione dell'idrogeno
H ₂	H ₂
Fuel Cell Electric Vehicle operation	Funzionamento del veicolo elettrico a celle a combustibile
FCEV manufacture	Fabbricazione FCEV
PEMFC stack manufacture	Fabbricazione pila PEMFC
Electric engine manufacture	Fabbricazione motori elettrici
H ₂ tank manufacture	Fabbricazione serbatoi H ₂
Other component (tyres, gearbox etc.)	Altri componenti (pneumatici, cambio ecc.)
Brake wear emissions	Emissioni da usura dei freni
Road wear emissions	Emissioni da usura stradale
Tyre wear emissions	Emissioni da usura degli pneumatici

coal extraction and processing - Central Appalachia, BIT, Processing

21: Mining, Quarrying, and Oil and Gas Extraction / 2121: Coal Mining



The cradle-to-gate inventory for production of coal aggregated to basin, mine type, and coal type groups. For coal extraction there are two major processes that form the basis of the coal life cycle model - underground and surface coal mining. These are connected to auxiliary processes that provide inventories from things like coal mine methane emissions, water use, water emissions, etc. All processes use parameters that allow some differentiation based on region or coal type. Details on the coal modeling can be found in the NETL Coal Baseline report to be published in the near future: netl.doe.gov/LCA This process was created with ElectricityLCI (<https://github.com/USEPA/ElectricityLCI>) version 1.0.1 using the ELCI_1 configuration.

Inputs/Outputs

Documentation

Allocation factors

[Switch to table view](#)

Reference product

1.0000e+0 sh tn coal, processed, at mine

By-products

0.0000e+0 kg methane, captured

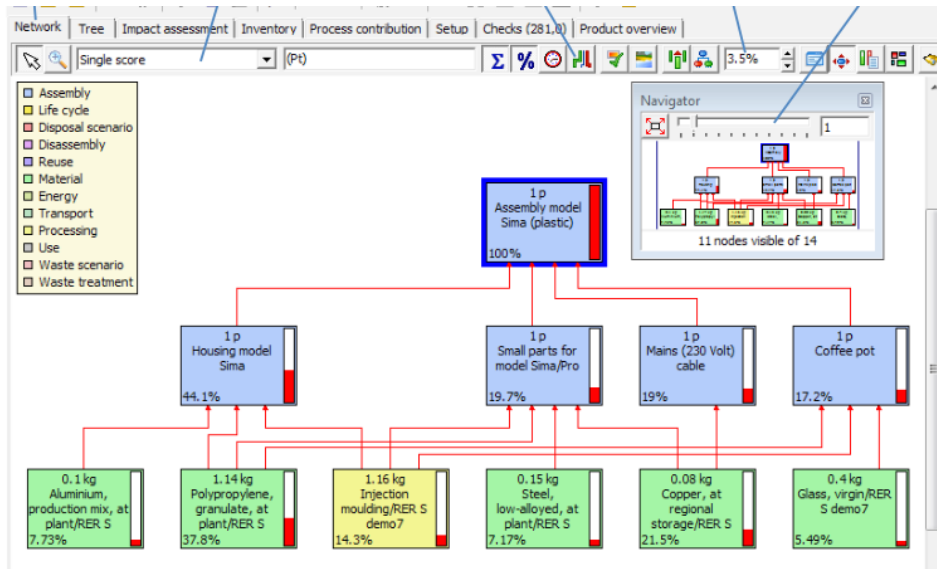
Produced waste

- 0.0000e+0 kg 2,4-DINITROTOLUENE
 - 0.0000e+0 kg 2-BUTANONE, PEROXIDE (R,T) (OR) METHYL ETHYL KETONE PEROXIDE (R,T)
 - 0.0000e+0 kg 2-PROPANONE (I) (OR) ACETONE (I)
 - 0.0000e+0 kg ACETALDEHYDE, TRICHLORO- (OR) CHLORAL
 - 0.0000e+0 kg ACIDIC AQUEOUS WST
 - 0.0000e+0 kg AQUEOUS W/O CYANIDES
 - 0.0000e+0 kg AQUEOUS/CYANIDES
 - 0.0000e+0 kg ARSENIC
 - 0.0000e+0 kg ASH
 - 0.0000e+0 kg BARIUM
- [Show 78 more](#)

coal extraction and processing - Central Appalachia, BIT, Processing	estrazione e lavorazione del carbone - Appalachia centrale, BIT, lavorazione
21: Mining, Quarrying, and Oil and Gas Extraction / 2121: Coal Mining	21: Attività mineraria ed estrattiva, estrazione di petrolio e gas/2121: Estrazione del carbone
The cradle-to-gate inventory for production of coal aggregated to basin, mine type, and coal type groups.	L'inventario cradle-to-gate per la produzione di carbone in relazione a bacini, tipo di miniera e tipo di carbone.
For basis of the coal life cycle model - underground and surface coal mining.	Per base del modello del ciclo di vita del carbone - estrazione sotterranea e di superficie del carbone.
These are connected to auxiliary methane emissions, water use, water emissions, etc.	Esse sono collegate alle emissioni ausiliarie di metano, all'uso dell'acqua, alle emissioni nell'acqua, ecc.
All processes use parameters that allow some differential modeling can be found in the NETL Coal Baseline report to be published in the near future: netl.doe.gov/LCA (https://github.com/USEPA/ElectricityLCI) version 1.0.1 using the ELCI_1 configuration.	Tutti i processi utilizzano parametri che consentono alcuni modelli possono essere riscontrati nel report NETL Coal Baseline di prossima pubblicazione: Netl.doe.gov/LCA (https://github.com/USEPA/ElectricityLCI) versione 1.0.1 con configurazione ELCI_1.
Inputs/Outputs	Input/Output
Documentation	Documentazione
Allocation factors	Fattori di assegnazione
Reference product	Prodotto di riferimento
1,0000e+0 sh tn coal, processed, at mine	1,0000e+0 sh tn carbone, lavorato, in miniera
By-products	Sottoprodotti
0.0000e+0 kg methane, captured	0,0000e+0 kg di metano, catturato
Produced waste	Rifiuti prodotti
0.0000e+0 kg 2,4-DINITROTOLUENE	0,0000e+0 kg 2,4-DINITROTOLUENE
0.0000e+0 kg 2-BUTANONE, PEROXIDE (R.T) (OR) METHYL ETHYL KETONE PEROXIDE (R,T)	0,0000e+0 kg 2-BUTANONE, PEROSSIDO (R,T) (O) METILETILCHETONE PEROSSIDO (R, T)
0.0000e+0 kg 2-PROPANONE (I) (OR) ACETONE (I)	0,0000e+0 kg 2-PROPANONE (I) (O) ACETONE (I)
0.0000e+0 kg ACETALDEHYDE, TRICHLORO- (OR) CHLORAL	0,0000e+0 kg ACETALDEIDE, TRICLORO- (O) CLORALIO
0.0000e+0 kg ACIDIC AQUEOUS WST	0,0000e+0 kg ACIDO ACQUOSO WST
0.0000e+0 kg AQUEOUS W/O CYANIDES	0,0000e+0 kg ACQUOSO SENZA CIANURI
0.0000e+0 kg AQUEOUS/CYANIDES	0,0000e+0 kg ACQUOSI/CIANURI

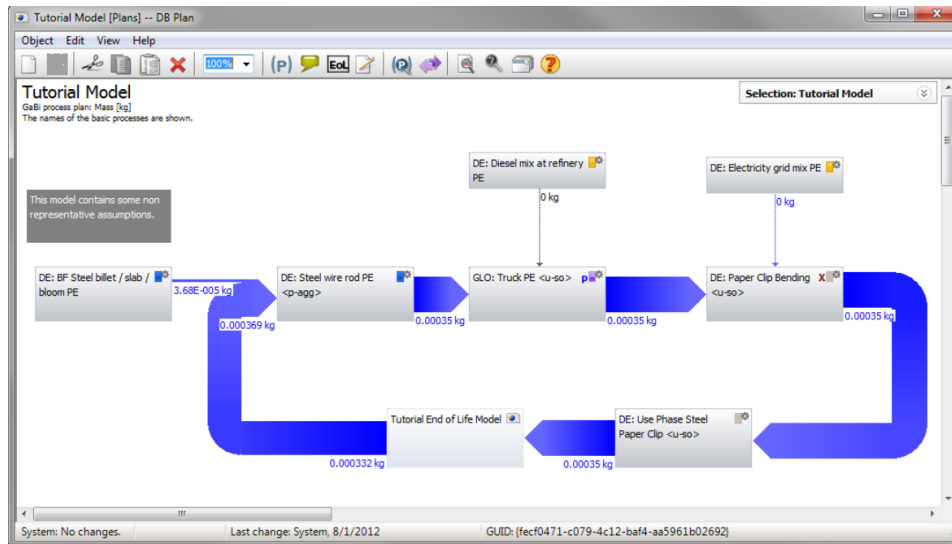


Basic	Basic
78 products	78 prodotti
Production and consumption mixes	Mix produzione e consumo
Regions: China, USA, Europe (Germany, Netherlands, Belgium and EU-27-average) + Global average	Aree: Cina, USA, Europa (Germania, Paesi Bassi, Belgio e media UE-27) + media globale
Technology insights	Technology pack
78 products	78 prodotti
Production and consumption mixes	Mix produzione e consumo
+ major production technologies	+ principali tecnologie di produzione
Regions: China, USA, Europe (Germany, Netherlands, Belgium and EU-27-average) + Global average	Aree: Cina, USA, Europa (Germania, Paesi Bassi, Belgio e media UE-27) + media globale
Global insights	Global pack
78 products	78 prodotti
Production and consumption mixes	Mix produzione e consumo
major production technologies	principali tecnologie di produzione
All available regions - includes all regions in our database + EU-27 average + Global average	Tutte le regioni disponibili - include tutte le regioni nel nostro database + Media UE-27 + Media globale

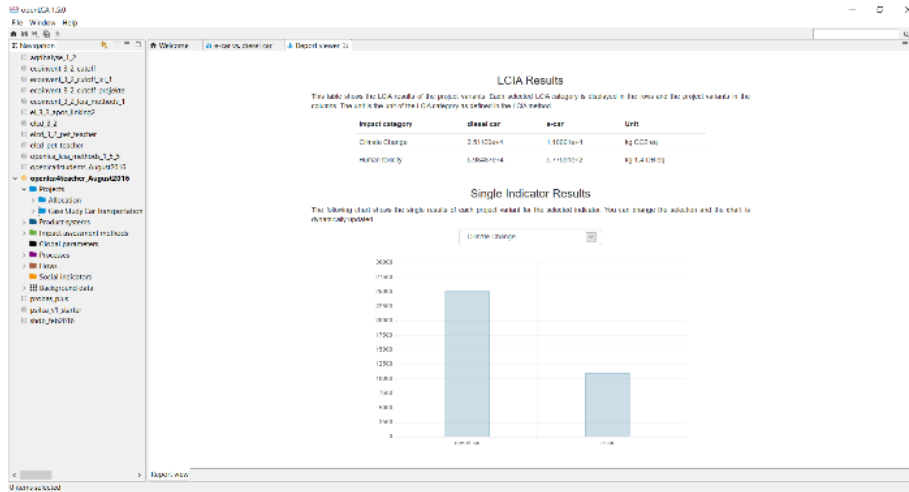


Network	Rete
Tree	Albero
Impact assessment	Valutazione d'impatto
Inventory	inventario
Process contribution	Contributi al processo
Setup	Set-up
Checks (281,0)	Controlli (281,0)
Product overview	Panoramica prodotto
Single score	Valore unico
(pt)	(pt)
Σ	Σ
3,5 %	3,5%
Assembly	Assemblaggio
life cycle	ciclo di vita
Disposal scenario	scenario di smaltimento
Disassembly	Smontaggio
Reuse	Riutilizzo
Material	Materiale
Energy	Energia
Transport	Trasporti
Processing	Lavorazione
Use	Utilizzo
Waste scenario	Scenario rifiuti
Waste treatment	Trattamento dei rifiuti
Navigator	Navigator
11 nodes visible of 14	11/14 snodi visibili
1p Assembly model Sima (plastic)	1p modello assemblaggio Sima (plastica)
100 %	100%
1p Housing model Sima	1p modello alloggiamento Sima
44,1 %	44,1%
1p Small parts for mode Sima/Pro	1p Piccole parti per modello Sima/Pro
19,7 %	19,7%
1p Mains (230 Volt) cable	1p cavo di rete (230 Volt)
19 %	19%
1p Coffee pot	1p caffettiera
17,2 %	17,2%
0.1kg Aluminium, production mix, at plant/RER S	0,1 kg di alluminio, mix di produzione, presso l'impianto/RER S
7,73%	7,73%
1.14 kg Polypropylene, granulate, at plant/RER S	1,14 kg di polipropilene, granulato, presso l'impianto/RER S
37,8%	37,8%
1,16 kg Injection moulding/RER S demo 7	1,16 kg Stampaggio ad iniezione/RER S demo 7
14,3 %	14,3%
0.15 kg Steel, low-alloyed, at plant/RER S	0,15 kg Acciaio, a bassa lega, presso l'impianto/RER S
7,17%	7,17%
0,08 kg Copper, at regional storage/RER S	0,08 kg Rame, presso deposito regionale/RER S

21.5 %	21,5%
0,4 kg Glass, virgin/RER S demo7	0,4 kg Vetro, vergine/RER S demo7
5.49 %	5,49%

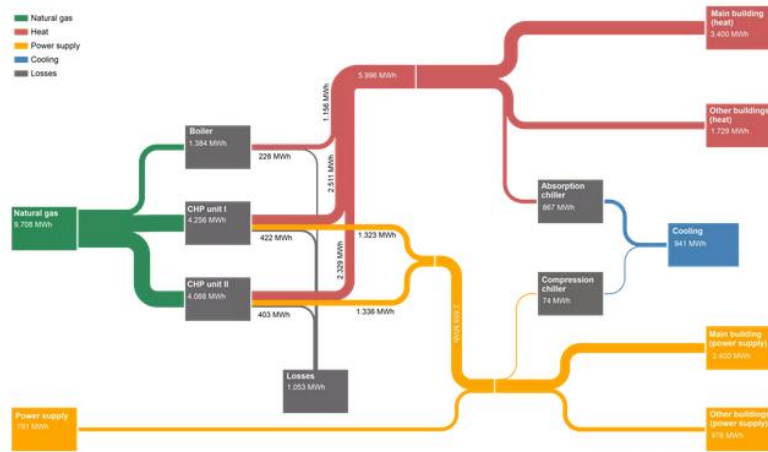


Tutorial Model [Plans] -- DB Plan	Modello tutorial [Piani] — Piano DB
Object	Oggetto
Edit	Modifica
View	Visualizza
Help	Aiuto
Tutorial Model	Modello tutorial
GaBi process plan: Mass [kg] The names of the base processes are shown.	Piano processo GaBi: Massa [kg] Vengono mostrati i nomi dei processi di base.
Selection: Tutorial Model	Selezione: Modello tutorial
This model contains some non representative assumptions.	Questo modello contiene alcune ipotesi non rappresentative.
DE: Diesel mix at refinery PE	DE: Mix diesel presso raffineria PE
0 kg	0 kg
DE: Electricity grid mix PE	DE: Mix rete elettrica PE
DE: BF Steel Met / slab / bloom PE	DE: BF Steel Met/lastra/bloom PE
3.68E-005kg	3,68 E-005 kg
DE: Steel wire rod PE <p-agg>	DE: Vergella in acciaio PE <p-agg>
0.000369 kg	0,000369 kg
0.00035 kg	0,00035 kg
GLO: Trude PE <u-so>	GLO: Autocarro PE <u-so>
DE: Paper Clip Bending <u-so>	DE: Flessione fermaglio <u-so>
Tutorial End of Life Model	Modello tutorial fine vita
0.000332 kg	0,000332 kg
DE: Use Phase Steel Paper Clip <u-so>	DE: Fase utilizzo fermaglio <u-so>
System: No changes.	Sistema: Nessuna modifica.
Last change: System, 8/1/2012	Ultima modifica: Sistema, 8/1/2012
GUID:	GUID:



openLCA 1.5.0	openLCA 1.5.0
File	File
Window	Finestra
Help	Aiuto
Navigation	Navigazione
Welcome	Benvenuto
e-car vs. diesel car	auto elettrica vs auto diesel
Report viewer	Visualizzatore report
agribalyse_1_2	agribalyse_1_2
ecoinvent_3_2_cutoff	ecoinvent_3_2_cutoff
ecoinvent_3_2_cutoffJci_1	ecoinvent_3_2_cutoffJci_1
ecoinvent_3_2_cutoff_projekte	ecoinvent_3_2_cutoff_projekte
ecoinvent_3_2lcia_methods_1	ecoinvent_3_2lcia_methods_1
ei_3_3_apos_linking_2	ei_3_3_apos_linking_2
elcd_3_2	elcd_3_2
elcd_3_2_pet_teacher	elcd_3_2_pet_teacher
elcd_pet_teacher	elcd_pet_teacher
openlca_lcia_methods_1_5_5	openlca_lcia_methods_1_5_5
openlca4students_August2016	openlca4students_August2016
openlca4teacherAugust2016	openlca4teacherAugust2016
Projects	Progetti
Allocation	Assegnazione
Case Study Car Transportation	Caso studio Trasporto in auto
Product systems	Sistemi di prodotto
Impact assessment methods	Metodi di valutazione dell'impatto
Global parameters	Parametri globali
Processes	Processi
Flows	Flussi
Social indicators	Indicatori sociali
Background data	Dati di base
probas_plus	probas_plus
psilca_v1_starter	psilca_v1_starter
shdb_feb2016	shdb_feb2016
0 items selected	0 elementi selezionati
Report view	Visualizzazione report
LCIA Results	Risultati LCIA
This table shows the LCIA results of the project variants.	Questa tabella mostra i risultati LCIA delle varianti di progetto.
Each selected LCIA category is displayed in the rows and the project variants in the columns The unit is the unit of the LCIA category as defined in the LCIA method	Ogni categoria LCIA selezionata viene visualizzata nelle righe, e le varianti di progetto nelle colonne. L'unità è l'unità della categoria LCIA definita nel metodo LCIA
Impact category	Categoria d'impatto
diesel car	auto diesel
e-car	auto elettrica
Unit	Unità
Climate Change	Cambiamento climatico
Human toxicity	Tossicità umana
2.51160e+4	2,51160e+4

5.98487e+4	5,98487e+4
1.10001 e+4	1,10001 e+4
5.77591e+2	5,77591e+2
kg CO2 eq	kg CO2 eq
kg 1.4-DB eq	kg 1,4 dB eq
Single Indicator Results	Risultati a indicatore unico
The following chart shows the single results of each project variant for the selected indicator.	Il seguente grafico mostra i singoli risultati di ogni variante di progetto per l'indicatore selezionato.
You can change the selection and the chart is dynamically updated	È possibile modificare la selezione e il grafico verrà aggiornato dinamicamente
Climate Change	Cambiamento climatico
diesel car	auto diesel
e-car	auto elettrica



Natural gas	Gas naturale
Heat	Calore
Power supply	Alimentatore
Cooling	raffreddamento
Losses	Perdite
Natural gas 9.706 MWh	Gas naturale 9,706 MWh
Boiler 1.384 MWh	Caldaia 1,384 MWh
CHP unit I 4.256 MWh	Unità di cogenerazione I 4,256 MWh
CHP unit II 4.058 MWh	Unità di cogenerazione II 4,058 MWh
Power supply 791 MWh	Alimentazione 791 MWh
228 MWh	228 MWh
422 MWh	422 MWh
403 MWh	403 MWh
Losses 1.053 MWh	Perdite 1,053 MWh
2.329 MWh	2,329 MWh
2.511 MWh	2,511 MWh
1.156 MWh	1.156 MWh
5.996 MWh	5,996 MWh
2.659 MWh	2,659 MWh
Main building (heat) 3.400 MWh	Edificio principale (calore) 3,400 MWh
Other building (heat) 1.729 MWh	Altro edificio (calore) 1,729 MWh
Absorption chiller 857 MWh	Refrigeratore ad assorbimento 857 MWh
Cooling 941 MWh	Raffreddamento 941 MWh
Compression chiller 74 MWh	Refrigeratore a compressione 74 MWh
Main building (power supply) 2.400 MWh	Edificio principale (alimentazione) 2,400 MWh
Other buildings (power supply) 796 MWh	Altri edifici (alimentazione) 796 MWh