

Auto elettriche e auto tradizionali: un confronto basato sul ciclo di vita dalla city-car due posti al SUV

Pierpaolo Girardi, Cristina Brambilla RSE - Ricerca Sistema Energetico

In questo articolo si confrontano le prestazioni ambientali durante l'intero ciclo di vita (LCA), di veicoli elettrici con omologhi veicoli a benzina e diesel, considerando una ampia gamma di veicoli: da una piccola due posti ad auto per tutta la famiglia

Introduzione

È diffusa nel grande pubblico l'idea che i veicoli elettrici, e in particolare i veicoli elettrici destinati al trasporto privato dei passeggeri, possano essere una soluzione sostenibile per la mobilità privata, essendo in grado di ridurre sia le emissioni di gas ad effetto serra che le emissioni inquinanti del settore trasporti. L'attenzione verso questi temi coinvolge sia gli organi di stampa - numerosi sono gli articoli sull'argomento pubblicati sulla stampa generalista - sia gli organi di governo. Solo a titolo di esempio si ricorda la presentazione, il 30 maggio 2017 presso il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, del volume "Elementi per una roadmap della mobilità sostenibile". Anche in questa testata non sono mancati interventi in proposito (Bessegghini et al., 2017). Ultimamente anche i costruttori più scettici come FCA hanno dichiarato un piano di investimenti consistente sull'elettrico¹.

All'interno della comunità scientifica vi è poi consenso sul fatto che gli eventuali miglioramenti portati dalla sostituzione di veicoli tradizionali con veicoli elettrici debbano essere verificati attraverso un approccio di Life Cycle Assessment o LCA (Jungmeier et al., 2013; Bauer et al., 2015). Infatti numerosi sono stati gli studi di LCA effettuati sull'argomento. Hawkins et al., (2012) e successivamente Nordelöf et al., (2014) ne avevano recensiti circa 50 e 70 rispettivamente, senza tuttavia trovarne nessuno soddisfacente. Le principali criticità risultavano legate al ridotto numero di impatti considerati e, soprattutto, al non aver caratterizzato in maniera adeguata il mix elettrico, ovvero il mix di fonti energetiche e tecnologie di conversione (centrali) che ricarica le batterie delle auto elettriche. Sebbene ai recenti lavori svolti nell'ambito della Ricerca di Sistema (Girardi et al., 2015) sia stato riconosciuto il pregio di colmare queste lacune (Borén & Ny 2016), è ovvio che esistano ancora degli aspetti da approfondire. Se questo è normale in qualsiasi ambito di ricerca, è tanto più vero in un settore in continua e rapida evoluzione come quello dell'auto elettrica. Già in passato alcuni autori (Egede et al., 2015) avevano sottolineato come siano diversi i fattori che influenzano le prestazioni dei veicoli elettrici e dei loro corrispondenti a combustione interna, soprattutto in un'ottica LCA.

¹http://www.repubblica.it/economia/2018/06/01/news/fca_a_balocco_la_maratona_marchionne_per_presentare_il_nuovo_piano-197890125/?ref=RHPPLF-BH-IO-C8-P5-S1.8-T1

Tra questi, i più importanti risultano essere consumi e mix energetici, ma compaiono anche aspetti quali le abitudini di guida. Più di recente Requia et al., (2018) in un interessante studio di review hanno aggiunto fattori quali le condizioni climatiche, la capillarità delle infrastrutture di ricarica, le condizioni di guida, le politiche di mobilità e il tipo di veicoli. A partire da quest'ultima considerazione, nel presente articolo si affrontano tre aspetti ancora poco indagati. Innanzitutto i veicoli elettrici sono stati confrontati non solo con veicoli a benzina ma anche con veicoli diesel. In secondo luogo non sono stati considerati dei generici ed ideali veicoli elettrici ed a combustione interna ma veicoli reali, già in commercio per i quali fossero presenti le tre alimentazioni diesel, benzina ed elettrico considerandone le reali caratteristiche (peso, consumi, autonomia, vita attesa, ecc.). L'ampia gamma di veicoli scelti, dalla micro car, alla city car, alle medie compatte fino alla familiare, ha permesso di indagare se vi fosse una particolare taglia di veicolo dove maggiori (o minori) fossero i vantaggi della transizione verso i veicoli elettrici. Infine, poiché si ritiene che il luogo d'elezione per l'uso di tali veicoli sia, anche in ragione della loro autonomia, l'area urbana, si sono considerati i consumi e le emissioni relativi a dei cicli di guida urbani e non ai cicli di omologazione che sappiamo discostarsi dal reale utilizzo. I paragrafi che seguono sono impostati, per comodità di lettura come le fasi della LCA da norma ISO 14040: Goal and Scope (in cui si definiscono le principali assunzioni dello studio), Inventario (in cui si raccolgono i dati), Valutazione degli impatti ed Interpretazione (conclusioni).

Ambito e obiettivo dello studio (Goal and Scope)

Lo scopo di questo studio è di confrontare le prestazioni ambientali di veicoli elettrici con omologhi veicoli a benzina e diesel, considerando modelli commerciali di veicoli per i quali esistano le tre versioni. La scelta dei veicoli da analizzare è stata guidata dalla volontà di rappresentare differenti taglie di veicoli, dalla micro car al veicolo di grossa taglia, tali da coprire tutti i segmenti di mercato relativi alle auto per trasporto passeggeri in ambito urbano. I modelli considerati sono Smart Fortwo, Chevrolet Spark, Fiat 500, Volkswagen Golf, Ford Focus e Kia Soul. I veicoli elettrici sono equipaggiati con batterie agli ioni di litio, mentre tutti i veicoli a combustione interna sono veicoli Euro

6, ad eccezione della Fiat 500 Diesel (Euro 5), perché al momento della redazione dello studio per i veicoli diesel di piccola cilindrata non erano disponibili dati ufficiali di emissione reale per chilometro.

Unità funzionale

L'unità funzionale rappresenta l'unità di misura del servizio reso dal sistema in esame. Il servizio fornito dai veicoli è il trasporto delle persone. Di conseguenza, l'unità funzionale dello studio è basata sui chilometri percorsi dai veicoli ovvero $1\text{km} \cdot \text{passeggero}$ considerando un coefficiente di riempimento dell'auto pari ad 1,62 passeggeri/veicolo. Il coefficiente di riempimento non influenza direttamente il confronto tra autoveicoli, in quanto considerato costante per tutti. Tuttavia, esso è di ausilio ad eventuali confronti con altri mezzi di locomozione (bici, motocicletta, trasporto pubblico). Inoltre il coefficiente di riempimento influenza direttamente (abrasione di freni, pneumatici e manto stradale) ed indirettamente (incidendo sui consumi) le emissioni in fase d'uso (Simons, 2016). La scelta del coefficiente di riempimento è inoltre coerente con le ipotesi per la stima dei consumi da parte della *Environmental Protection Agency* - EPA (www.fueleconomy.gov) e con i principali cicli di omologazione. L'unità funzionale è il metro attraverso cui vengono espresse tutte le grandezze in gioco, compresi gli impatti. Questo vuol dire che tutti gli impatti per tutte le fasi del ciclo di vita in questo articolo si riferiscono ad 1 km percorso.

Scelta delle categorie d'impatto

Le categorie di impatto considerate in questo studio includono aspetti legati all'effetto serra e all'inquinamento atmosferico, poiché questi risultano essere i principali motori della spinta verso la diffusione delle auto elettriche, specie l'inquinamento atmosferico nelle aree urbane. In relazione a quest'ultimo aspetto, sono stati valutati gli effetti relativi all'acidificazione atmosferica, alla formazione di smog fotochimico e alla formazione di particolato. Sono poi considerati aspetti relativi all'eutrofizzazione delle acque e dei suoli, nonché aspetti legati alla tossicità umana (effetti cancerogeni e non cancerogeni) perché questi costituiscono di fatto il "tallone d'Achille" delle auto elettriche (Hawkins et al., 2012). Gli indicatori scelti sono quantificati secondo i metodi raccomandati dalle linee guida pubblicate dal Joint Research Centre (JRC, 2011), nel quadro della *European Platform on Life Cycle Assessment*.

Confini del sistema

Le fasi considerate sono: la produzione e dismissione del veicolo; la produzione e dismissione della batteria (congegnata a parte per i soli veicoli elettrici); la filiera di approvvigionamento del vettore energetico utilizzato per alimentare il veicolo; la fase d'uso del veicolo; la fase di manutenzione del veicolo e infine la costruzione, manutenzione e dismissione delle strade.

Inventario

Per i dati dei processi secondari, la principale fonte di dati è il database Ecoinvent v3.1 (2013), il database più utilizzato in ambito LCA. Per quanto riguarda le assunzioni e i dati inerenti i processi contenuti nelle principali fasi, questi vengono descritti nei paragrafi seguenti.

Produzione (e dismissione) dei veicoli

Per meglio rappresentare le caratteristiche dei diversi veicoli in esame, la produzione e dismissione dei veicoli è stata distinta per sistema di propulsione (l'insieme di tutte le componenti che consentono di generare e trasmettere l'energia di propulsione al veicolo) e *glider* (le componenti restanti del veicolo, che non sono strettamente legate alla propulsione: telaio, pneumatici, sedili, finestrini, sistema di sospensioni, ecc.). Quello che varia passando da un tipo di veicolo all'altro è il peso relativo del sistema di propulsione rispetto al *glider*. In Ecoinvent v3.1

la proporzione era 91% *glider* e 9% propulsione per l'elettrico, 74% *glider* e 26% propulsione per il benzina e 70% *glider* e 30% propulsione per il diesel. Rispetto a questi dati, è stata variata la proporzione, per i soli veicoli elettrici, tra *glider* e sistema di propulsione assumendo il peso di quest'ultimo proporzionale alla potenza del motore. Inoltre il database Ecoinvent v3.1 contiene dati relativi alla produzione di veicoli medi rispetto alla produzione mondiale di veicoli. Viceversa in questo studio per ogni veicolo è stata individuata la nazione di produzione della versione elettrica. Si è ipotizzato che gli omologhi veicoli a benzina e diesel venissero prodotti nel medesimo luogo. Si sono quindi adattati i dati medi mondiali al singolo paese di produzione, adattando almeno il mix energetico relativo a quel luogo per le fasi di assemblaggio. Quest'assunzione ha garantito di confrontare i veicoli omologhi a parità di condizioni di produzione (e dismissione) del veicolo ed ha nel contempo garantito di differenziare gli impatti per veicoli provenienti da zone geografiche differenti. La **tabella 1** riporta, per ciascun veicolo, la nazione in cui avviene il processo di assemblaggio/produzione del veicolo.

Un aspetto rilevante è poi legato alla vita utile del veicolo. L'averne veicoli sempre più efficienti da un punto di vista ambientale ha fatto crescere sia in termini assoluti, ma soprattutto in termini percentuali rispetto al totale,

Tabella 1 Nazioni in cui avviene il processo di produzione dei veicoli analizzati

AUTO	NAZIONE
Smart Fortwo	Francia
Kia Soul	Corea del Sud
Chevrolet Spark	Corea del Sud
Ford Focus	USA - Michigan
Volkswagen Golf	Germania
Fiat 500	Messico



gli impatti legati alla fase di costruzione. Ovviamente questi sono tanto più pesanti quanto più breve è la vita del veicolo. Sottostimare la reale vita del veicolo porta a sovrastimare quei veicoli che hanno maggiori impatti di costruzione (veicoli elettrici). Viceversa ipotizzare vite troppo lunghe porterebbe ad una sottostima degli impatti. Ecoinvent nella versione v3.1 considera una vita utile dei veicoli di 150.000 km, indipendentemente dal segmento di appartenenza o dall'alimentazione. In questo studio, si è ritenuto più realistico considerare che la vita utile dei veicoli dipenda dal tipo di alimentazione del veicolo stesso e dal segmento di mercato di appartenenza. Questa assunzione trova riscontro in recenti studi (Weymar e Finkbeiner, 2016; Hardwick e Outeridge, 2015). La **tabella 2** riporta la vita utile considerata nel presente studio in funzione della taglia e della motorizzazione.

Costruzione (e dismissione) della batteria.

Ecoinvent v3.1 considera, a fronte di una vita del veicolo elettrico pari a 150000 km, una vita della batteria di 100.000 km (Del Duce et al., 2016). In letteratura, è possibile trovare le assunzioni più diverse (Aguirre et al., 2012), relativamente alla vita utile della batteria e alla possibi-

lità di considerare la sostituzione della batteria lungo la vita del veicolo. Tuttavia, al momento di redigere il presente articolo, non abbiamo trovato nessuna evidenza scientifica che porti a supporre che la vita della batteria possa essere di 100.000 o 150.000 km. Studi d'invecchiamento sembrano dimostrare che allo stato attuale le batterie per autotrazione possano arrivare comodamente a una vita di 200.000 km (Friesen et al., 2015). Inoltre, da uno studio recente (Saxena et al., 2015) emerge che molti utilizzatori non percepirebbero, per l'uso che fanno del veicolo, una variazione nell'utilizzabilità dell'auto se la batteria si trovi all'80, 70 o 60% della sua capacità nominale e quindi, di fatto, continuerebbero ad utilizzare il veicolo pur essendo la batteria giunta convenzionalmente a fine vita.

Il forum di discussione Electrek (<https://electrek.co/2018/04/14/tesla-battery-degradation-data/>) ha di recente pubblicato un'analisi effettuata su circa 350 Tesla Model S (**figura 1**) da cui si evince che per questo modello la batteria potrebbe durare oltre i 300.000 km (anche se altre auto hanno sperimentato un degrado legato più all'età della batteria che alla distanza coperta).

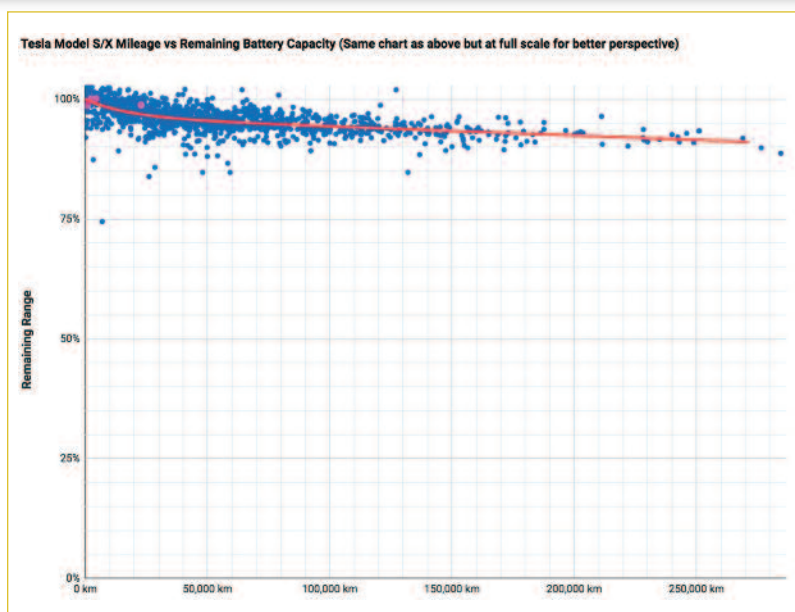
Appare quindi del tutto giustificato, secondo

Tabella 2 Vita media assunta nello studio per le diverse tipologie di auto in funzione della motorizzazione

TAGLIA	BENZINA	DIESEL	ELETTRICO	AUTO CONSIDERATE NELLO STUDIO
micro	150000	200000	175000	Smart Fortwo
piccola	180000	210000	200000	Chevrolet Spark, Fiat 500
media	210000	240000	230000	VW Golf, Ford Focus
grande	210000	240000	230000	Kia Soul

Figura 1

Degrado della batteria della Tesla Model S e X in funzione della distanza percorsa -
Fonte: <https://electrek.co>



gli autori, considerare che la vita utile della batteria sia coincidente con la vita utile del veicolo ed è l'ipotesi che è stata adottata nel presente studio.

Aspetti legati alla fase d'uso

Per quanto riguarda la fase d'uso, i consumi derivano da misure fatte e pubblicate da Environmental Protection Agency (EPA www.fueleconomy.gov). La scelta di utilizzare i dati EPA deriva dal fatto di poter avere un database in cui i consumi fossero misurati nello stesso modo per tutte le tipologie di motorizzazione e di poter scegliere i consumi relativi al solo uso urbano per tutte le motorizzazioni. Per quanto riguarda le emissioni dirette dei veicoli a combustione interna, i fattori emissivi derivano dall'applicazione del modello COPERT (Ntziachristos et al., 2009) per l'elaborazione dell'Inventario Nazionale delle Emissioni pubblicato da ISPRA (2014). Le emissioni indirette (dovute all'usura di freni, manto stradale e pneumatici conseguenti al movimento del veicolo) sono calcolate in funzione del peso a pieno carico del veicolo (Simons, 2016) a partire dai dataset Ecoinvent v3.1 e ne è stata verificata la coerenza con i dati pubblicati per l'inventario nazionale delle emissioni (ISPRA, 2014).

Approvvigionamento dei vettori energetici

Per quanto riguarda i veicoli a combustione interna, la catena di approvvigionamento del vettore energetico utilizzato per alimentare i veicoli deriva integralmente da Ecoinvent v3.1. Per quanto riguarda i veicoli elettrici, il mix elettrico di ricarica è stato costruito come mix marginale

durante le ore di ricarica delle auto come suggerito in Girardi et al., 2015.

In altre parole non è stato considerato il mix elettrico medio, ma il mix di fonti e tecnologie marginali durante le ore di ricarica, secondo il profilo orario ipotizzato in **figura 2**.

In altre parole, il mix di ricarica è il mix energetico che risponderebbe a una domanda di energia aggiuntiva durante le ore ipotizzate per la ricarica. Si tratta di un mix con una percentuale di rinnovabili molto inferiore rispetto al mix elettrico medio nazionale e quindi di un'ipotesi di lavoro molto "conservativa".

Inoltre i fattori emissivi della fase di generazione delle singole tecnologie sono stati modificati in accordo con i dati di efficienza pubblicati da TERNA (2014) e con i dati contenuti nelle dichiarazioni ambientali annuali degli impianti italiani registrati EMAS (Girardi, 2012). Infine si è ritenuto opportuno correggere il mix d'importazione del gas naturale per l'Italia secondo quanto dichiarato da ENI per l'anno 2013 (SNAM, 2014).

Valutazione degli impatti (LCIA)

Le ipotesi illustrate hanno lo scopo di ricalcare quanto più fedelmente possibile la realtà Europea e Italiana in quanto la dimensione geografica, come accennato nell'introduzione, può avere una grande influenza sui risultati. Rimanendo quindi nel campo delle ipotesi che meglio rappresentano la realtà Italiana, dalle anali-

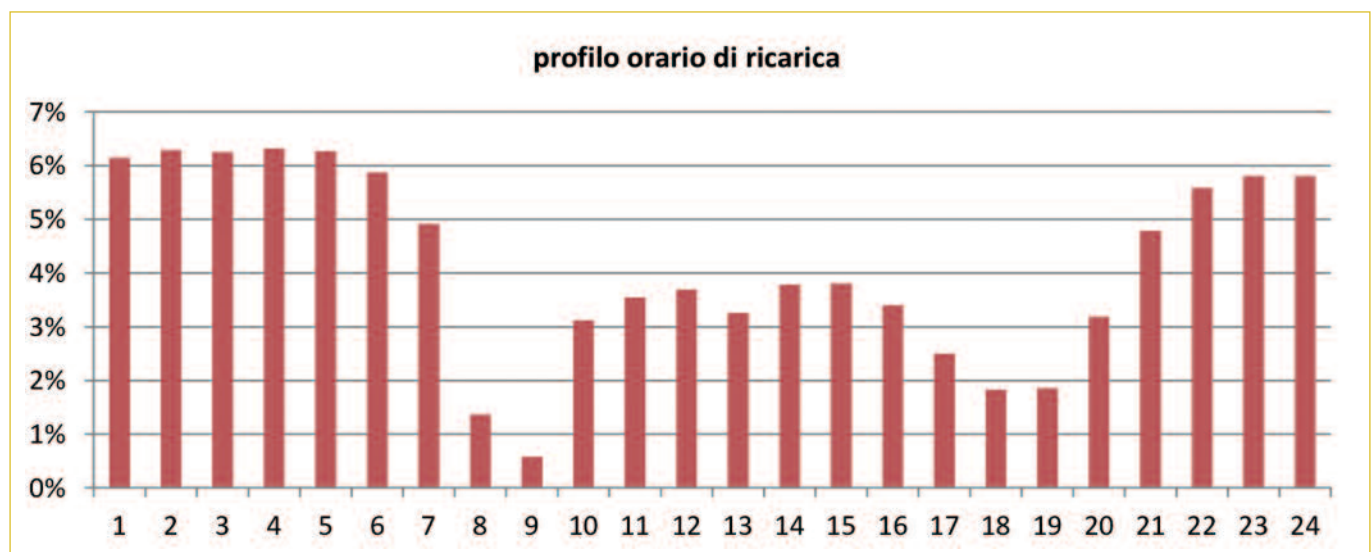


Figura 2
Profilo orario di ricarica ipotizzato per i veicoli elettrici in percentuale di energia ricaricata

si sviluppate emerge che i veicoli elettrici hanno prestazioni migliori per le emissioni di gas serra, riducendole di circa la metà rispetto agli omologhi a benzina.

Per quanto riguarda la formazione di particolato, i veicoli elettrici sono sempre vincenti rispetto a entrambi i veicoli a combustione interna, ancora una volta con due eccezioni. La prima è rappresentata dalla Fiat 500 0.9 TwinAir, che mostra prestazioni molto vicine all'elettrico grazie all'elevata efficienza del veicolo a benzina ma anche a causa del peso elevato del veicolo elettrico per la sua categoria. La seconda è costituita dalla Ford Focus elettrica che essendo anch'esso un veicolo pesante per la sua categoria risulta essere particolarmente penalizzato nel confronto con i veicoli a combustione interna.

Nella formazione di ossidanti fotochimici, il veicolo elettrico è in tutti i casi analizzati nettamente vincente.

Oltre a queste categorie d'impatto sono state considerati impatti come l'acidificazione atmosferica, l'eutrofizzazione di acque e suolo, la tossicità cancerogena e non cancerogena, il consumo di risorse non rinnovabili. Pur avendo prestazioni migliori per quanto riguarda l'acidificazione atmosferica, i veicoli elettrici non sono in grado, allo stato attuale, di essere vincenti per impatti come l'eutrofizzazione delle acque dolci o la tossicità umana, per i quali i consistenti impatti legati alla produzione e dismissione della batteria del veicolo giocano un ruolo determinante. Oltre agli impatti per fase del ciclo di vita è interessante, nell'ottica di un decisore politico, ripartire la tota-

Figura 3 Fonti energetiche nel mix medio nazionale 2014 (a sinistra) e del mix marginale di ricarica considerato nel presente studio (a destra)

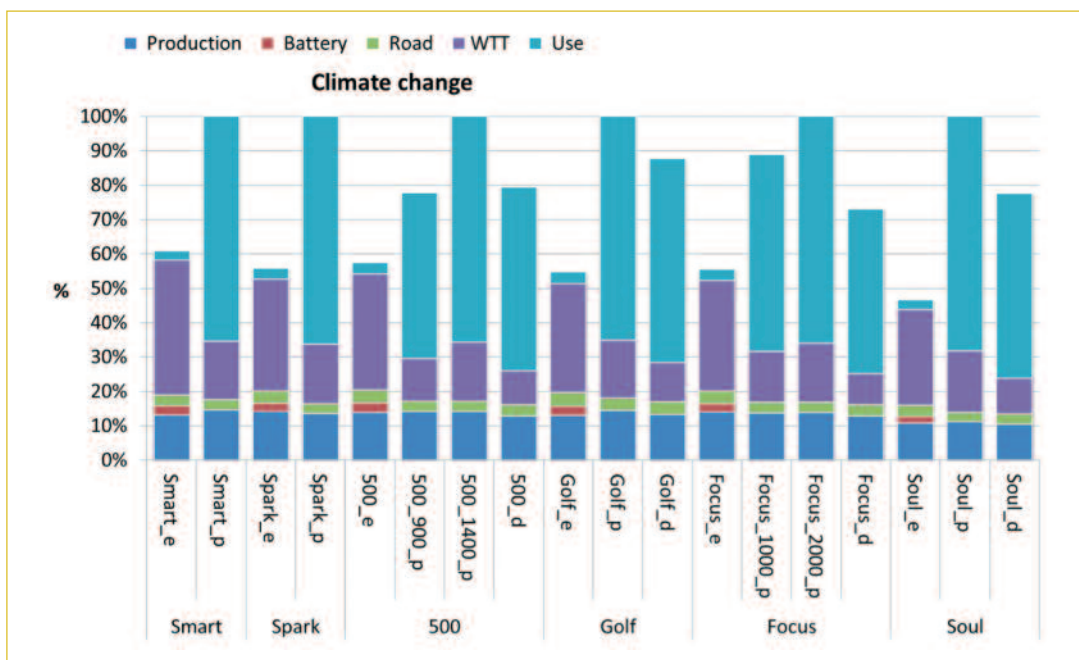
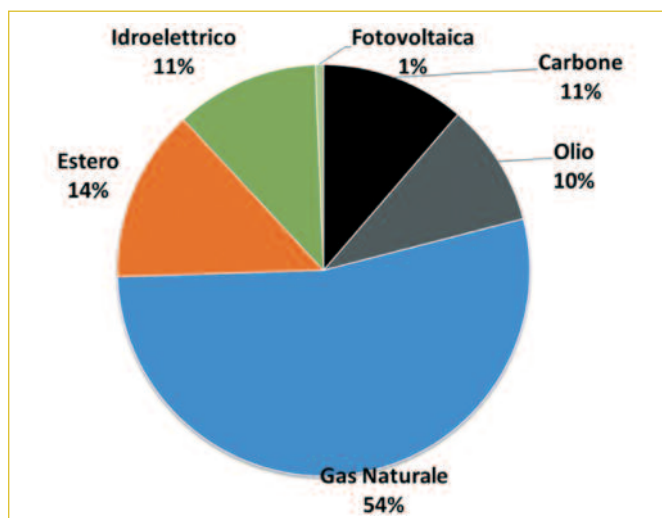
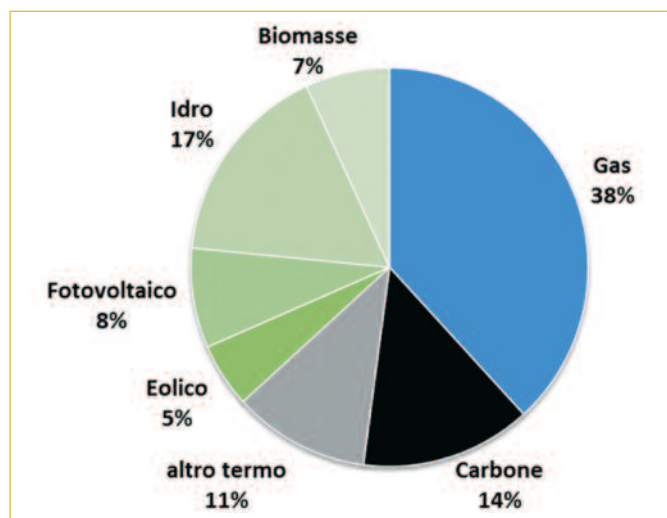


Figura 4 Confronto lungo il ciclo di vita delle emissioni a effetto serra

lità degli impatti per l'area geografica dove questi avvengono. Questo approfondimento è stato effettuato solo per la VW Golf, considerata come "auto media" rispetto ai casi analizzati sopra.

A tal fine gli impatti sono stati ripartiti in quattro aree:

- Italia, dove avviene l'uso dei veicoli, la manutenzione dei veicoli, la produzione di energia elettrica e la raffinazione e distribuzione dei combustibili.
- Germania, dove vengono prodotti i veicoli ed assemblate le batterie.

- Unione Europea, dove vengono prodotti la maggior parte dei semilavorati (acciaio, vetro, plastiche...).
- Extra EU, dove avvengono il grosso dei processi inerenti l'estrazione delle materie prime e delle fonti di energia fossile, nonché la produzione delle celle (in Corea del Sud).

Come si nota, il considerare solo gli impatti che avvengono sul suolo nazionale non solo non altera l'ordinamento delle alternative ma aumenta il "distacco" in termini di compatibilità ambientale tra il veicolo elettrico e quelli tradizionali.

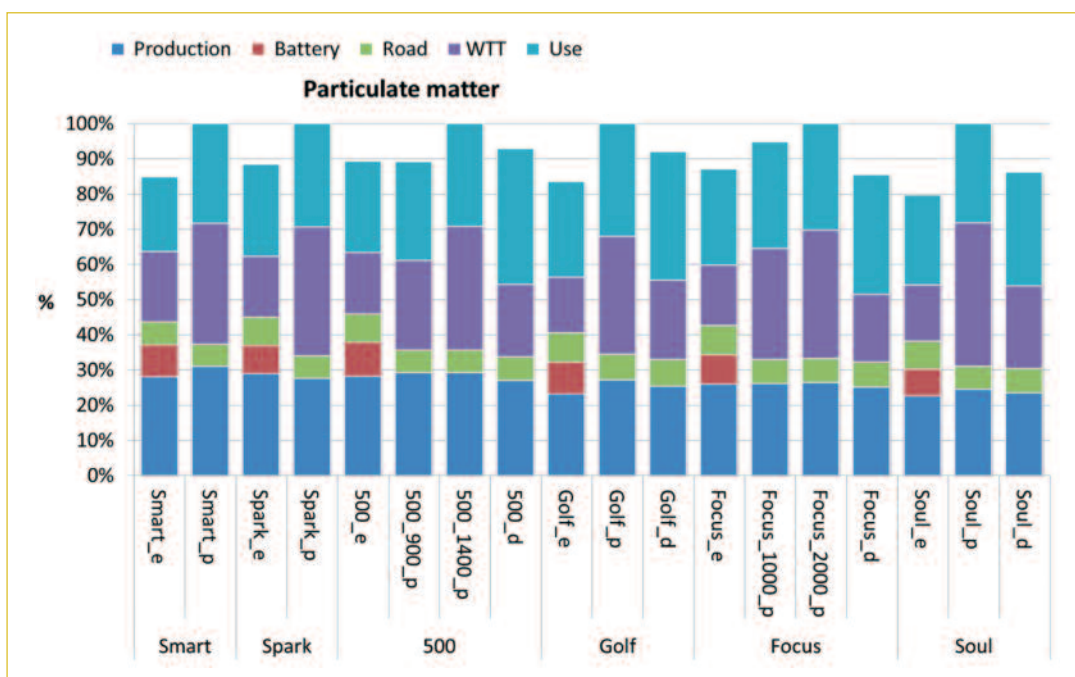


Figura 5 Confronto lungo il ciclo di vita delle emissioni che contribuiscono alla formazione di particolato

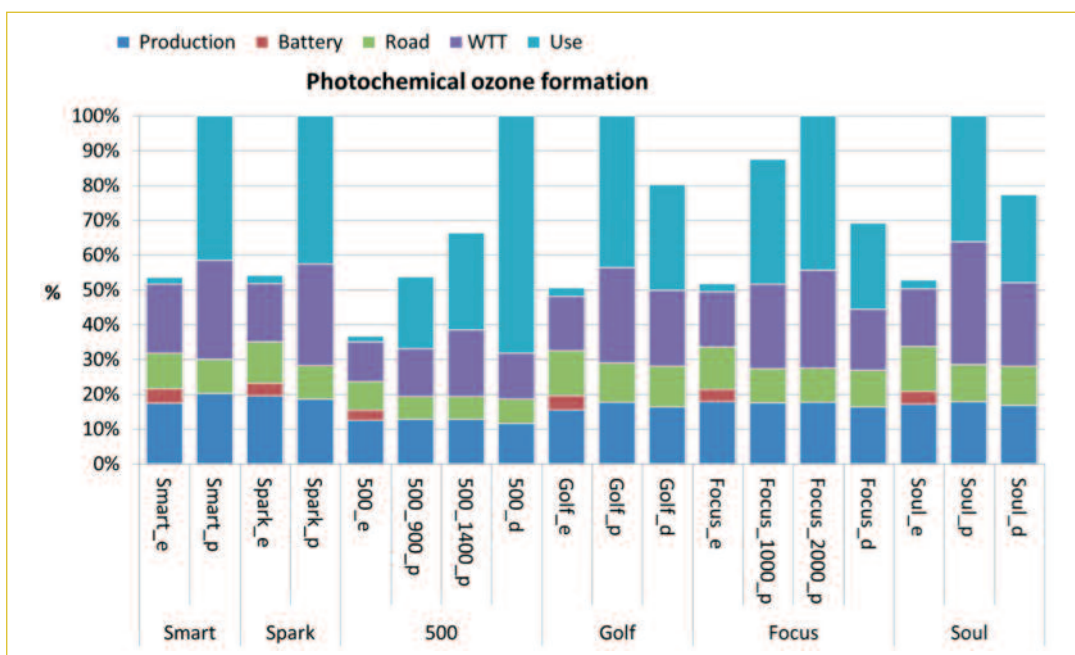


Figura 6 Confronto lungo il ciclo di vita delle emissioni che contribuiscono alla formazione ossidanti fotochimici (ozono troposferico)

Analisi di sensitività

Al fine di valutare la robustezza dei risultati e come suggerito dalla ISO 14040 per LCA comparativi, sono state effettuate delle analisi di sensibilità. In particolare si è ipotizzato uno scenario in cui le auto elettriche si ricaricassero esclusivamente da pannelli fotovoltaici durante le ricariche diurne, uno scenario in cui le batterie dei veicoli elettrici avessero vita utile pari a 150000 km (indipendentemente dalla vita utile dei veicoli su cui sono montate) e due scenari complementari in cui la vita dei veicoli elettrici fosse uguale rispettivamente a quella degli omologhi veicoli a benzina e diesel.

In tutti gli scenari analizzati, in nessun caso l'ordinamento tra i veicoli cambia. In altre parole in tutti gli scenari di sensibilità analizzati, per quanto sfavorevoli come ipotesi all'auto elettrica, le auto a combustione interna mostrano impatti ambientali maggiori per effetto serra

Figura 7
Distribuzione delle emissioni di CO_{2eq} per area geografica

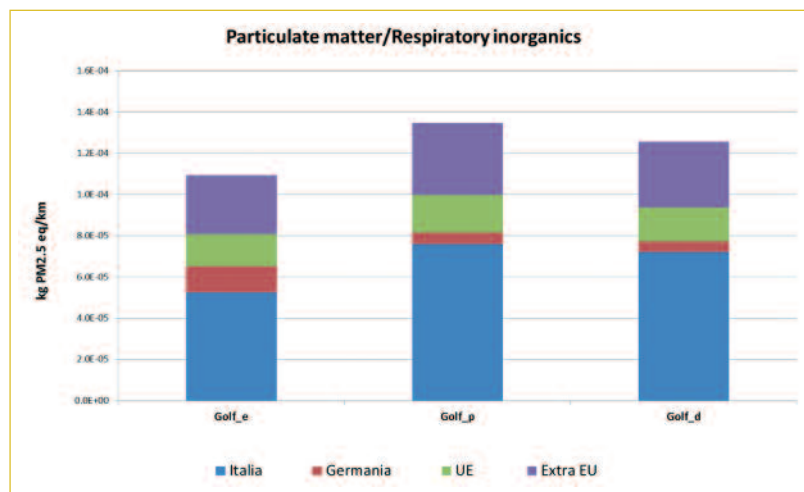
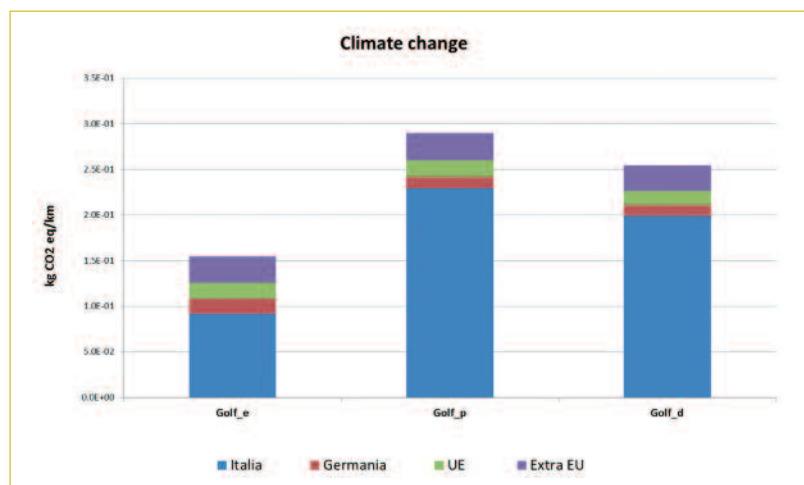


Figura 8 Distribuzione delle emissioni che contribuiscono alle concentrazioni di particolato fine (PM_{2.5}) per area geografica

e inquinamento atmosferico (particolato e ozono troposferico).

Particolare attenzione è stata posta ultimamente anche dalla stampa generalista² in merito alle emissioni di CO_{2eq} legate alla vita della batteria. La maggior parte di queste comunicazioni fanno riferimento, spesso erroneamente, ad un recente studio di letteratura (Romare & Dahllöf, 2017) che indica un range di emissioni di CO_{2eq} legate alla batteria molto ampio. Secondo le ipotesi discusse sopra e facendo riferimento ai dati del database Ecoinvent v3.1 a noi risulta che la costruzione e dismissione³ della batteria della eGolf versione 2016 comporti emissioni di CO_{2eq} di circa 2 tonnellate (1972 kg). Questo per una batteria di 24.2 kWh e 312 kg vuol dire un'emissione specifica di circa 81.5 kg CO_{2eq}/kWh di capacità o 6,3 CO_{2eq}/kg di batteria. Secondo le nostre ipotesi, e supponendo una percorrenza annua di 15000 km, il surplus di emissioni di CO_{2eq} legate alla vita della batteria si ripagherebbe in circa un anno di uso dell'autovettura.

Il citato studio di Romare & Dahllöf indica una gamma di valori da ritenersi più realistici il cui valore massimo è 200 kg CO_{2eq}/kWh. Si tratta di un valore triplo rispetto a quello da utilizzato da noi. Questo può essere dovuto a varie ragioni ma tra queste va sicuramente notato il fatto che l'analisi di letteratura prende in considerazione studi che spaziano dal 2011 al 2016 e che quelli più recenti mostrano i valori più bassi. Comunque, sempre in un'ottica di analisi di sensibilità, anche considerando il valore di 200 kg CO_{2eq}/kWh (batteria max nel grafico di **figura 11**) si vede come le emissioni di CO_{2eq} legate alla batteria non sono tali da compromettere il vantaggio nell'uso del veicolo elettrico.

Inoltre va notato come non sia del tutto corretto, nell'ottica di valutare scenari futuri, estrapolare dati di emissione al kWh di capacità della batteria. Se questa analisi è corretta per valutare, *ceteris paribus*, alternative tecnologiche, non può essere usata per desumere quali saranno le emissioni di future batterie da 50 o 100 kWh. Infatti le emissioni delle batterie sono legate ai materiali ivi contenute (e quindi al peso) più che all'energia contenuta (capacità). In altre parole, al crescere della densità energetica crescerà la capacità delle batterie ma non il loro peso e, quindi, le emissioni di CO_{2eq} legate alla costruzione e dismissione rimarranno pressoché invariate. Giusto per fornire un esempio concreto, la versione 2016 della eGolf (quella considerata in questo studio)

aveva una batteria di 24.2 kWh per un peso di 312 kg. La versione 2017 ha una capacità di 35.8 kWh (quasi il 50% in più) per un peso di 318 kg e la Kreisel Electric (<http://www.kreiselectric.com/en/projects/electric-golf/>) dichiara di essere in grado di produrre un pacco batterie da 55.7 kWh per un peso di 330 kg e una vita di oltre 400.000 km⁴.

Conclusioni

L'analisi effettuata conferma che per tutte le taglie considerate, dalle micro car alle familiari, passando per le utilitarie e le compatte, le auto elettriche hanno impatti ambientali inferiori rispetto alle omologhe a combustione interna. Questo è particolarmente vero per quanto riguarda l'effetto serra e le emissioni inquinanti che concorrono a categorie d'impatto come la formazione di particolato, l'acidificazione atmosferica o la formazione di smog fotochimico. Resta anche confermato, indipendentemente dalla

taglia, il fatto che i veicoli elettrici non sono al momento in grado di essere vincenti per aspetti quali l'eutrofizzazione delle acque dolci o la tossicità umana, per i quali i consistenti impatti legati alla produzione e dismissione della batteria del veicolo giocano un ruolo importante. In ge-

Figura 9 Distribuzione delle emissioni di che contribuiscono alla formazione di ossidanti fotochimici (ozono troposferico) per area geografica

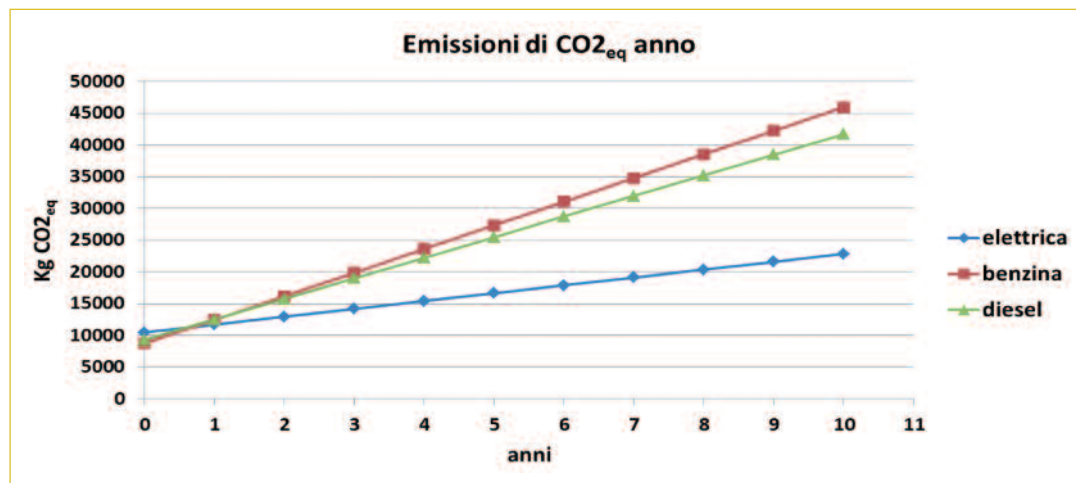
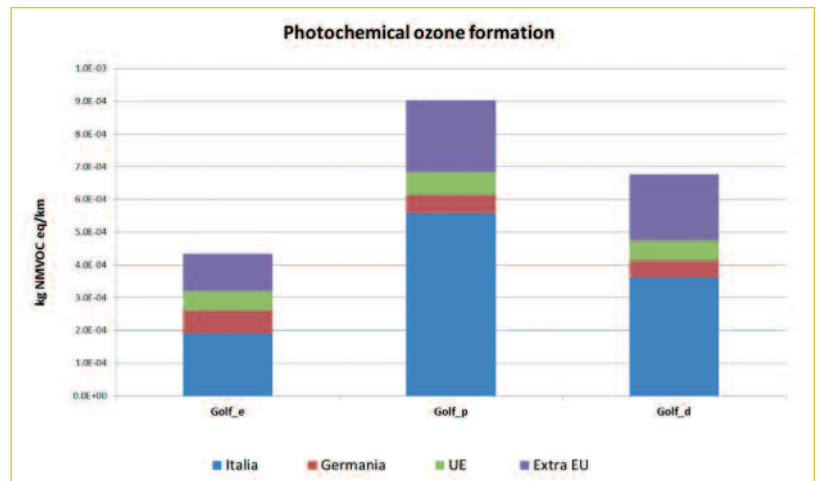


Figura 10 Tempo di ritorno del surplus di emissioni legate alla batteria dell'auto elettrica. Ipotizzando 15.000 km anno il tempo di ritorno è circa 1 anno

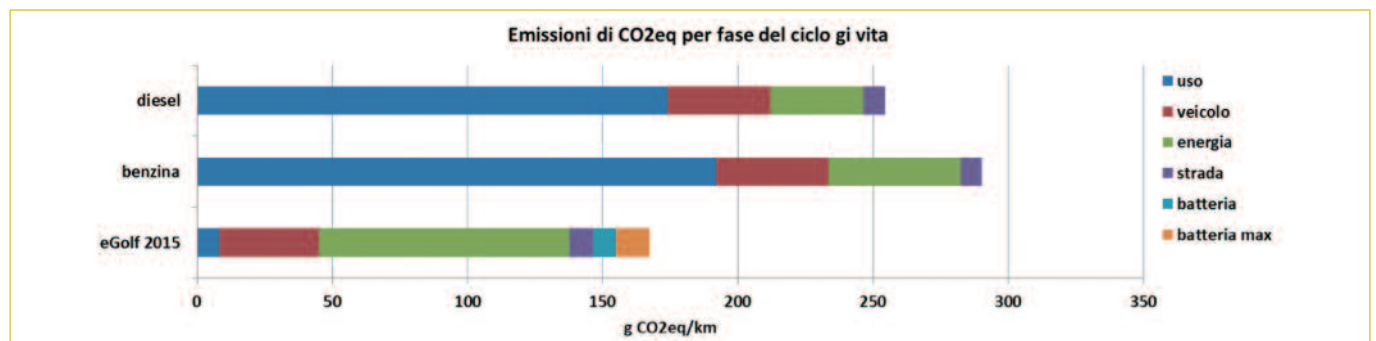


Figura 11 Tempo di ritorno del surplus di emissioni legate alla batteria dell'auto elettrica. Ipotizzando 15.000 km anno il tempo di ritorno è circa 1 anno

² Si cita a puro titolo di esempio: <https://www.focus.it/tecnologia/motori/quanto-inquina-davvero-l-auto-elettrica>.

³ Il sistema di allocazione utilizzato in questo studio, Ecoinvent default, prevede che circa il 25% del materiale della batteria possa essere recuperato e riutilizzato per la produzione di nuove batterie.

⁴<http://www.kreiselectric.com/en/projects/electric-golf/>

nerale gli impatti del veicolo elettrico risultano essere legati al peso (che incide sia sui consumi che sulla produzione). A tal proposito occorre sottolineare che in questo studio, al fine di confrontare, per ogni classe, veicoli quanto più simili tra loro, sono stati presi in considerazione veicoli elettrici non progettati ad hoc, bensì derivati da modelli già esistenti di veicoli a benzina e diesel e per questo sotto certi aspetti (ad esempio i materiali impiegati) forse non ottimizzati. La scelta di questi veicoli è stata guidata dall'obiettivo di confrontare tra loro veicoli elettrici con omologhi veicoli a combustione interna presenti sul mercato. Un interessante spunto di ricerca futuro potrebbe essere indagare le performance ambientali di veicoli elettrici progettati ex novo, approfondendo gli aspetti legati alla progettazione del veicolo e ai materiali utilizzati, soprattutto nella

fase di produzione del veicolo. Questo tuttavia apre la questione di come affrontare gli aspetti di miglioramento cross-tecnologici, ovvero quei miglioramenti applicati solo alle auto elettriche (ruote a bassa resistenza, scocca in fibra di carbonio) ma che potrebbero essere applicati anche alle auto a combustione interna, non essendo legati al tipo di propulsione. Un altro spunto di ricerca potrebbe essere quello di evidenziare, per alcune delle auto studiate, quali sono gli impatti che si verificano in Italia, quali in Europa e quali fuori Europa, in modo da fornire un'informazione più completa al decisore.

Il lavoro è stato finanziato dal Fondo di Ricerca per il Sistema Elettrico nell'ambito dell'Accordo di Programma tra RSE S.p.A. ed il Ministero dello Sviluppo Economico - D.G. Nucleare, Energie rinnovabili ed efficienza energetica - in temeranza del DM, 8 marzo 2006.

bibliografia

- [1] K. Aguirre, L. Eisenhardt, C. Lim, B. Nelson, A. Norring, P. Slowik, N. Tu: *Lifecycle analysis comparison of a battery electric vehicle and a conventional gasoline vehicle*. California Air Resource Board, 2012.
- [2] C. Bauer, J. Hofer, H.J. Althaus, A. Del Duce, A. Simons: *The environmental performance of current and future passenger vehicles: life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework*. Appl. Energy, 157, 871-883, 2015.
- [3] S. Besseghini, M. Benini, G. Mauri, P. Girardi: *Analisi del possibile sviluppo del mercato dell'auto elettrica, con attenzione agli aspetti economici e ai punti critici*. Energia Elettrica 94(6):31-47, 2017.
- [4] S. Borén, H. Ny: *A Strategic Sustainability and Life Cycle Analysis of Electric Vehicles in EU today and by 2050*. In The 18th International Conference on Sustainable Urban Transport and Environment (ICSUTE), Madrid, Spain, March 24-25. Vol. 10, pp. 229-237, 2016.
- [5] A. Del Duce, M. Gauch, H.J. Althaus: *Electric passenger car transport and passenger car life cycle inventories in Ecoinvent version 3*. Int J Life Cycle Assess, 21(9), 1314-1326, 2016.
- [6] Ecoinvent Database v3.1, Swiss Centre for Life Cycle Inventories. <http://www.ecoinvent.org> (2013).
- [7] P. Egede, T. Dettmer, C. Herrmann, S. Kara: *Life Cycle Assessment of Electric Vehicles-A Framework to Consider Influencing Factors*. Procedia CIRP, 29, 233-238, 2015.
- [8] A. Friesen, F. Schappacher, M. Winter: *Long-Term Aging of Commercial Automotive Lithium-Ion Cells at Various Conditions*. Meeting Abstracts No. 1. The Electrochemical Society, 2015.
- [9] P. Girardi, A. Gargiulo, C. Brambilla: *A comparative LCA of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle using the appropriate power mix: the Italian case study*. Int J Life Cycle Assess, 20(8), 1127-1142. (2015).
- [10] P. Girardi: *Il ciclo di vita del sistema termoelettrico attuale*. VI convegno nazionale della rete Italiana LCA, Bari, 6-8 Giugno 2012.
- [11] A.P. Hardwick, T. Outeridge: *Vehicle lightweighting through the use of molybdenum-bearing advanced high-strength steels (AHSS)*. Int J Life Cycle Assess, 21(11):1616-1623. (2015).
- [12] T.R. Hawkins, O.M. Gausen, A.H. Strømman: *Environmental impacts of hybrid and electric vehicles - a review*. Int J Life Cycle Assess, 17(8), 997-1014. (2012).
- [13] ISPRA - La banca dati dei fattori di emissione medi del trasporto stradale in Italia. <http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/tetransp/>. (2014).
- [14] JRC - Institute for Environment and Sustainability, International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. EUR 24571 EN, 2011.
- [15] G. Jungmeier, J.B. Dunn, A. Elgowainy, E.D. Ozdemir, S. Ehrenberger, H.J. Althaus, R. Widmer: *Key issues in life cycle assessment of electric vehicles - Findings in the International Energy Agency (IEA) on Hybrid and Electric Vehicles (HEV)*. Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), 2013 World (pp. 1-7). IEEE, 2013.
- [16] A. Nordelöf, M. Messagie, A.M. Tillman, M.L. Söderman, J. Van Mierlo: *Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles - what can we learn from life cycle assessment?*. Int J Life Cycle Assess, 19(11), 1866-1890, 2014.
- [17] L. Ntziachristos, D. Gkatzoflias, C. Kouridis, Z. Samaras: *CO-PERT: a European road transport emission inventory model. In Information technologies in environmental engineering* (pp. 491-504). Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [18] W.J. Requia, M. Mohamed, C.D. Higgins, A. Arain, M. Ferguson: *How clean are electric vehicles? Evidence-based review of the effects of electric mobility on air pollutants, greenhouse gas emissions and human health*. Atmospheric Environment, 2018.
- [19] M. Romare, L. Dahlöf: *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries*. Stockholm. Zugriff am, 23, 2017.
- [20] S. Saxena, C. Le Floch, J. MacDonald, S. Moura: *Quantifying EV battery end-of-life through analysis of travel needs with vehicle powertrain models*. J. Power Sources, 282, 265-276, 2015.
- [21] A. Simons: *Road transport: new life cycle inventories for fossil-fuelled passenger cars and non-exhaust emissions in Ecoinvent v3*. Int J Life Cycle Assess, 21(9), 1299-1313, 2016.
- [22] SNAM - Bilancio di sostenibilità, 2014.
- [23] TERNA - Dati Statistici 2014, viewed Mar 2015, <<https://www.terna.it/it-it/sistemaelettrico/statisticheeprevisioni/datistatistici.aspx>>
- [24] E. Weymar, M. Finkbeiner: *Statistical analysis on empirical lifetime mileage data for automotive LCA*. Int J Life Cycle Assess, 21(2):215-223, 2016.