

Scelte politiche e innovazione tecnologica per la decarbonizzazione dei trasporti

ROMEO DANIELIS

ABSTRACT

Lo sviluppo economico aumenta la domanda di trasporto e, conseguentemente, la domanda di veicoli e di energia, fino ad ora soddisfatta quasi esclusivamente dai combustibili di origine fossile. Considerato che la popolazione mondiale è in aumento e che ampie zone del mondo hanno finora goduto di un accesso limitato alle infrastrutture ed ai veicoli, è naturale attendersi un aumento della domanda di trasporto ed un conseguente aumento della domanda di energia e delle emissioni di CO₂. La sfida del contenimento delle emissioni di CO₂ o addirittura della loro riduzione verso una progressiva decarbonizzazione, per quanto cruciale per mantenere il livello di aumento della temperatura, è quindi molto difficile da vincere. Il contributo si interroga su quali politiche possano efficacemente ed efficientemente contribuire ad avvicinare l'obiettivo non facile della decarbonizzazione dato che le politiche finora intraprese non hanno ridotto in modo significativo l'uso di mezzi di trasporto basati sui motori a combustione interna.

Economic development increases transport demand and, consequently, the demand for vehicles and energy, which up to now has been met almost exclusively by fossil fuels. Since the world's population is growing and large areas of the world have currently enjoyed limited motorized mobility, it is obvious to anticipate an increase in transport demand, energy demand and CO₂ emissions. The challenge of limiting CO₂ emissions or even of reducing them, although crucial for curbing the increase of the average world temperatures, is therefore very difficult to meet. This contribution discusses which policies could effectively and efficiently help meeting the difficult goal of decarbonising transport, given that the policies currently undertaken have not significantly reduced the use of fossil fuel based transport vehicles.

KEYWORDS

Trasporti; decarbonizzazione; carbon pricing; veicoli elettrici
Transport; decarbonization; carbon pricing; electric vehicle

1. INTRODUZIONE

Il trasporto ha dato e continua a dare un grande contributo allo sviluppo economico, promuovendo gli scambi di persone e di merci. Storicamente, all'impiego della energia umana ed animale nel trasporto terrestre si è accoppiato l'uso dell'energia eolica nel trasporto marittimo. L'impiego dei metalli e la costruzione dei motori a combustione interna, utilizzando prima il carbone e poi il petrolio, ha consentito di muoversi sempre più efficacemente via mare (navi a vapore e a gasolio), via terra (ferrovia, auto e camion) e via aria (aereo). Ne è conseguito anche un diverso utilizzo del territorio, permettendo insediamenti più dispersi e collegamenti con i luoghi più remoti del pianeta. Tali sviluppi, peraltro ancora in corso, hanno fatto un uso sempre più massiccio di combustibili fossili, in particolare di quelli derivanti dal petrolio, tant'è che il settore dei trasporti è quasi esclusivamente dipendente da questa fonte di energia (circa il 93% del settore è alimentato nel 2015 da prodotti petroliferi, IEA 2017). L'effetto avverso, della cui gravità ci si rende sempre più conto, sono le emissioni atmosferiche di gas inquinanti locali e di CO₂. Questo capitolo si incentra principalmente su quest'ultimo fenomeno in ragione del suo contributo all'innalzamento delle temperature del pianeta¹.

La domanda che qui ci si pone è se sia possibile ridurre o, meglio ancora, annullare le emissioni di CO₂ provenienti dai trasporti in modo da contribuire a limitare la crescita della temperatura media del pianeta secondo gli obiettivi formulati nel 2015 nell'Accordo di Parigi sui cambiamenti climatici. Tale domanda può essere riformulata in termini di decarbonizzazione dei trasporti, collegandoci all'ampia e crescente letteratura in materia (Gota *et al.*, 2019). Una prima impressione, basata su diversi studi multisettoriali (Clapp *et al.*, 2009; ITF 2017; Pietzcker *et al.*, 2014; Sims *et al.*, 2014; Shafiei *et al.*, 2017) è che tale obiettivo sia oltremodo difficile da raggiungere. In particolare, la decarbonizzazione del settore dei trasporti sarà probabilmente più impegnativa che in altri settori, vista la continua crescita della domanda globale di trasporto, in particolare nelle economie in via di sviluppo (Creutzig *et al.*, 2015, 2018). In questo contributo prenderemo in esame le politiche intraprese per contenere le emissioni, classificandole ed analizzandole per tipologia. Infine, analizzeremo le innovazioni tecnologiche più interessanti, che potrebbero contribuire a ridurre fino ad annullare le emis-

¹ L'anidride carbonica (CO₂) è nota come gas a effetto serra (GHG), un gas che assorbe ed emette radiazioni termiche, creando "l'effetto serra". Insieme ad altri gas serra, come il protossido di azoto e il metano, la CO₂ è importante per mantenere nel pianeta una temperatura abitabile: se non ci fossero i GHG, il nostro pianeta sarebbe semplicemente troppo freddo. È stato stimato che senza questi gas, la temperatura superficiale media della terra sarebbe di circa -18 gradi Celsius. Un eccesso di gas serra invece conduce ad un innalzamento delle temperature in grado di modificare significativamente le condizioni di vita sulla terra.

sioni di CO₂, tra cui, in particolare, i veicoli elettrici, l'uso dell'idrogeno in veicoli dotati di celle a combustibile e le potenzialità delle fonti rinnovabili nella produzione di energia elettrica.

2. IL PROBLEMA: L'AUMENTO DELLE EMISSIONI DI CO₂ CONNESSE AL TRASPORTO

Gli ultimi dati disponibili indicano che le emissioni di CO₂ hanno raggiunto a livello mondiale nel 2018 le 37,1 gigatonnellate (Gt). Tale aumento si associa ad un progressivo aumento della temperatura media. Una suddivisione delle emissioni per paese mostra che le dinamiche di crescita più preoccupanti sono attualmente in corso nei paesi asiatici come la Cina e l'India che, parallelamente allo sviluppo economico, usano progressivamente più energia ed emettono più CO₂ (10 Gt solo la Cina). I valori complessivi di CO₂ in Europa e negli Stati Uniti appaiono invece in calo, attestandosi rispettivamente su 3,5 e 5,2 Gt. In termini pro-capite, gli Stati Uniti rimangono di gran lunga il paese che ha le emissioni più elevate (16 tonnellate pro-capite), tre volte di più della media mondiale. La Cina sembra attestarsi sulle 7 tonnellate pro-capite, superiore all'Italia. L'India è ancora a circa 2 tonnellate pro-capite. I dati del Our World in Data indicano come i trasporti contribuiscano abbastanza costantemente per il 20%, mentre è in crescita la quota dovuta alla produzione di energia elettrica e di calore. Ciò equivale a circa 6,4 Giga tonnellate (20% di 37 Gt nel 2018)². Calante è sia il contributo dell'industria manifatturiera che quello del riscaldamento e condizionamento degli edifici residenziali e commerciali. In Europa, invece, il contributo dei trasporti si attesta sul 27%, in continua crescita dal 10% degli anni 60, mentre il settore della produzione di energia elettrica e di calore si è stabilizzato. È importante sottolineare che in queste statistiche il settore dei trasporti contiene le emissioni derivanti dalla combustione dei combustibili fossili con l'eccezione combustibili usati nel trasporto marittimo internazionale (*international marine bunkers*) e dal trasporto aereo internazionale per comprensibili ragioni di difficoltà di attribuzione dei consumi, mentre sono conteggiati i trasporti aerei e marittimi nazionali, la strada, la rotaia e gli oleodotti³.

² Gota *et al.* (2017) forniscono una stima maggiore includendo il trasporto marittimo e l'aviazione internazionale. Essi sostengono che “the transport sector (including aviation and shipping) currently accounts for 7.5 Gt of CO₂ emissions (tank to wheel), about 28% of global final energy demand, 14% of economy-wide global anthropogenic greenhouse gas, and about 23% of emissions due to fuel combustion”.

³ Il testo esplicativo è il seguente: “CO₂ emissions from transport contains emissions from the combustion of fuel for all transport activity, regardless of the sector, except for international marine bunkers and international aviation. This includes domestic aviation, domestic navigation, road, rail and pipeline transport, and corresponds to IPCC Source/Sink Category 1 A 3”.

Inoltre, bisogna tener conto che i trasporti contribuiscono al riscaldamento globale: a) in modo diretto, emettendo CO₂ durante la combustione che ha luogo nei motori a scoppio (ciclo Otto o ciclo Diesel⁴) e che produce l'energia cinetica necessaria per muovere il veicolo, o b) in modo indiretto, in quanto utilizzatori della energia finale prodotta dal settore energia. Quest'ultimo, per produrre l'energia secondaria nelle sue diverse forme (elettrica, idrogeno, petrolio e diesel), emette CO₂ che è formalmente a carico del settore energia, ma è di fatto utilizzata da altri settori finali come l'industria, il settore residenziale, l'agricoltura ed i trasporti. La contribuzione indiretta dei trasporti è limitata alle modalità che utilizzano l'energia elettrica.

Danielis (2019d) documenta che in Europa, confrontando il 2017 con il 1990, mentre a livello complessivo le emissioni totali sono calate del 23%, le emissioni del settore dei trasporti in senso stretto sono aumentate sia a livello assoluto, passando da 793,2 a 945,9 milioni di tonnellate, che a livello percentuale (dal 14% al 22%). Tutte le componenti dei trasporti hanno visto aumentare le loro emissioni a livello assoluto, con l'eccezione della ferrovia e della navigazione interna. La dinamica più elevata, in termini di aumento, è quella dei furgoncini. Il quadro diventa ancora più preoccupante se si estende lo sguardo ai trasporti internazionali. In particolare il trasporto aereo ha avuto un incremento di 2,29 volte.

La *Partnership on Sustainable Low-carbon Transport* (SLoCaT) ha pubblicato una di relazione (Gota *et al.*, 2016) che proietta le tendenze delle emissioni dei trasporti terrestri e il potenziale di mitigazione per l'anno 2050. L'obiettivo principale è stimare l'entità della mitigazione possibile nel settore dei trasporti entro il 2050, considerando le politiche a basse emissioni di carbonio proposte e/o indagate per l'attuazione in sessanta paesi con proiezioni dettagliate delle emissioni al 2050. Tali paesi nel 2010 rappresentavano circa l'89% delle emissioni globali del settore dei trasporti terrestri, circa il 76% della popolazione e circa l'84% del PIL globale. L'entità della riduzione delle emissioni raggiunte attraverso l'attuazione di politiche a basse emissioni di carbonio viene confrontata con le riduzioni di emissioni nel settore dei trasporti coerenti con il raggiungimento dell'obiettivo di due gradi Celsius (2DS, Degree Strategy) e con l'obiettivo 1,5 gradi (1.5DS, Degree Strategy), come definito nell'accordo di Parigi sui cambiamenti climatici. In uno scenario *business as usual* (BAU), le emissioni del settore del trasporto terrestre globale potrebbero crescere dai valori di 6,3 gigatonnellate (Gt) annuali del 2013 a 13 Gt entro il 2050. Dal 2010 al 2050, in uno scenario BAU, si prevede che le emissioni del settore dei trasporti nei paesi non OCSE au-

⁴ Il ciclo Diesel è un ciclo termodinamico per motori a combustione interna dove, a differenza del ciclo Otto, l'accensione della miscela non avviene attraverso una candela bensì per effetto dell'alta temperatura conseguente alla fase di compressione.

mentino di quasi tre volte (295%) mentre le analoghe emissioni nei paesi OCSE dovrebbero aumentare solo leggermente (17%).

Le previsioni del *ITF Transport Outlook* (2017) sono anche molto preoccupanti. Prevedono che le emissioni dei trasporti possono aumentare mediamente del 60% in uno scenario BAU. Per il trasporto merci è previsto un aumento del 160%, con una triplicazione dei volumi internazionali, a causa soprattutto del trasporto su strada su breve distanza, in assenza di collegamenti ferroviari, nelle regioni del Sud-Est asiatico. Si prevede che il trasporto aereo continui a crescere a ritmi del 3-6% annuali per connettere le principali città del mondo, incrementando le emissioni del 56% nel solo periodo 2015-30, nonostante l'incremento di efficienza dei motori degli aerei. La mobilità motorizzata è stimata crescere del 94% al 2050, prevalentemente utilizzando auto private. Si prevede una crescita particolarmente elevata nei paesi non-OECD.

Distinguendo tra trasporto delle persone e delle merci, possiamo osservare quanto segue. In Europa il trasporto stradale tramite automobili contribuisce 543,2 milioni di tonnellate di emissioni, pari al 13% del totale, in crescita rispetto all'8% del 1990. Ciò è avvenuto nonostante che il progresso tecnologico dei motori li abbia resi nel tempo più efficienti e nonostante l'elevata quota di automobili diesel che, rispetto a quelle a benzina, producono minori emissioni per km percorso. La spiegazione è probabilmente da ricercarsi nell'aumento dei tassi di motorizzazione⁵, già elevati nel 1990, in particolare nei paesi di nuova adesione, e nell'aumento delle percorrenze derivanti anche alla dispersione residenziale e commerciale.

Distinguendo per lunghezza del viaggio, ricorrendo ad evidenze empiriche italiane o internazionali, possiamo osservare quanto segue. Molta mobilità, in particolare quella urbana, ha luogo su distanze brevi. Isfort (2018) stima che più di un terzo degli spostamenti avvenga entro 2 km, il 76,5% entro 10 km, mentre gli spostamenti lunghi (oltre 50 km) siano meno del 3%. Nonostante ciò, l'utilizzo dell'auto nel 2017 resta prevalente, riguardando il 58,6% degli spostamenti, anche se in calo rispetto al 2016. La bici presenta un interessante valore in crescita (5,2%), lo spostamento a piedi ha quasi recuperato i valori del 2017, mentre il mezzo pubblico è sostanzialmente fermo al 6-7%. La sostanziale stabilità delle quote modali nel tempo, di poco intaccate dalle politiche di promozione della mobilità non motorizzata (definita sostenibile, dolce o attiva) o del trasporto pubblico messe in atto in Italia negli ultimi decenni, non fa ben sperare per il futuro. È quindi naturale chiederci se ci possiamo aspettare cambiamenti importanti nelle modalità di spostamento delle persone, data la difficoltà di alte-

⁵ In Italia, ad esempio, il parco autoveicoli circolante ha superato nel 2017 la soglia dei 38,5 milioni di veicoli, con un tasso di motorizzazione pari a 63,7 auto ogni 100 abitanti, contro il 58,8 del 2002 (Isfort, 2018).

rare in modo significativo ed in tempi rapidi l'assetto urbanistico e le abitudini e le esigenze di mobilità delle persone⁶.

Sulle distanze medie-lunghe, a livello UE28, nel 2016 l'82,9% del trasporto passeggeri (misurato in passeggeri-km) avviene su automobili private, il 9,4% su corriere o bus ed il 7,7% su treno. Pur essendoci differenza tra paesi, il treno tocca la quota del 10% solo nel caso della Svizzera e dell'Austria. Corriere e bus superano poche volte il 20%, mentre l'automobile è l'incontrastato mezzo preferito per il trasporto passeggeri. Nella tavola 6 non è presente l'aereo che, tuttavia, può presentare in alcuni casi valori percentuali di una certa importanza anche nei viaggi sulle medie-lunghe distanza nazionali. Considerato che nel 2007 il dato EU28 era 7.1%, 83.1%, e 9.8%, rispettivamente per treno, automobile, bus e corriera, si può concludere che il trasferimento modale non ha avuto luogo, nonostante sia stato molte volte definito come uno degli obiettivi più importanti della politica dei trasporti comunitaria. È evidente, quindi, che le speranze di decarbonizzazione non possono essere affidate alla strategia di redistribuzione modale (*shift*). Se le tendenze osservate in passato sono assunte come indicazione di cosa possiamo aspettarci per il futuro, è assai improbabile che la redistribuzione modale possa avvenire in modo da contribuire significativamente alla decarbonizzazione. Detto ciò, la redistribuzione modale rimane un obiettivo da perseguire ma certamente non strategico in quanto di efficacia alquanto contenuta.

Anche nel caso del trasporto merci disponiamo per i 28 paesi dell'Unione Europea solo di dati sul traffico nazionale interno per modalità e non per classi di lunghezza dello spostamento (Danielis, 2019d). Da essi si evince una certa stabilità nelle quote modali dal 2008 al 2017 con la strada in posizione stabilmente preminente. Il 76,7% delle merci nel 2017 usa la modalità stradale, in crescita rispetto al 2006, e con la ferrovia e le acque interne in leggero calo. Anche in questo caso gli obiettivi di redistribuzione modale sostenuti nei documenti di programmazione comunitaria risultano tutt'altro che raggiunti. In particolare, si nota un calo sostenuto della ferrovia a favore della strada nei paesi dell'est europeo di più recente adesione.

Sulla distribuzione urbana delle merci, ci serviamo, tra i pochi dati disponibili, di quelli relativi al Regno Unito da cui ricaviamo una evidenza empirica molto

⁶ È il caso comunque di sottolineare che l'Italia presenta livello di utilizzo del mezzo pubblico e della bicicletta inferiore ad altre città europee. Isfort (2018) riporta che, relativamente al mezzo pubblico, in alcune capitali europee il 35-40% di spostamenti avviene mediante trasporto pubblico, mentre in Italia solo poche città (Torino, Bologna, Ravenna e Padova) hanno quote di trasporto pubblico sopra il 20%. Riguardo alla bicicletta, a eccezioni di alcuni centri dell'Italia nordorientale, la stragrande maggioranza delle città italiane presenta percentuali di utilizzo della bici tra l'1% e il 5%, mentre città come Copenaghen, Eindhoven, Groningen, Leiden, Zwolle ed Amsterdam presentano livelli pari al 20% dei viaggi in area urbana. Punte estreme sono Munster e Friburgo con il 38% e il 34% di spostamenti in bici.

interessante, ovvero che il trasporto delle merci tramite furgoni (*vans*) rappresenta la tipologia di veicolo con la maggiore dinamica di crescita. Tale dinamica non sembra tanto da attribuirsi ad un aumento delle percorrenze (nel Regno Unito la percorrenza media risulta diminuita del 4% dal 1997 al 2017), quanto all'aumento del numero di furgoni presenti sulle strade (nel Regno Unito aumentato del 75% nello stesso periodo). Gli acquisti tramite internet e la consegna a domicilio sembrano essere uno dei fattori determinanti, in quanto sempre in UK, nel 2008 compravano on line il 55% degli adulti, saliti al 77% nel 2017. Dal punto di vista del tipo di combustibile utilizzato, la stragrande maggioranza dei furgoni è alimentata dal gasolio (89,9%), seguiti dalla benzina (7,7%), dal GPL o metano. Solo l'1,2% è ad alimentazione elettrica, e l'1,2% da altre forme di alimentazione (ACEA, 2018)

Nei trasporti internazionali, secondo l'ITF (2017), l'87% dei volumi trasportati (in tonnellate-km) avviene via mare, il 5% via ferrovia, l'8% via strada ed una quota residuale via aereo. Se predire l'andamento del trasporto internazionale delle merci è oltremodo complesso, è pensabile però che la globalizzazione degli scambi continui, anche se le crisi economiche e il protezionismo possono rallentare questa tendenza rispetto a quella che abbiamo conosciuto nelle ultime decadi. ITF (2017), sulla base di un modello basato su diverse ipotesi di elasticità del commercio internazionale rispetto alla crescita economica, ipotizza per il commercio mondiale tra 2015 e 2050 un aumento dei volumi economici pari a 3 volte e un corrispondente aumento delle tonnellate-km pari a 3,1 volte. Suddivisi per modalità di trasporto, il trasporto marittimo, per lo più su container, rappresenta la modalità che tale modello prevede avrà il maggior aumento in termini di volumi trasportati.

Traducendo questi scenari in termini di emissioni di CO₂, le stime suggeriscono un aumento delle emissioni del 120% nel periodo 2015-50. Da notare il cambiamento del contributo relativo delle modalità. Si prevede infatti che il trasporto stradale, nonostante i minori volumi, contribuisca per il 45.49% delle emissioni, con un contributo unitario molto maggiore di quello del trasporto marittimo a causa della molto inferiore efficienza per unità trasportata dei camion rispetto alle navi. Non appare invece una differenza significativa tra gli scenari ad alta e bassa elasticità del commercio.

Infine, va tenuto conto che il numero di passeggeri che usano l'aereo nelle relazioni internazionali è più che raddoppiato negli ultimi due decenni, utilizzando una rete di aeroporti in costante crescita. La liberalizzazione e la competizione hanno portato notevoli benefici ai consumatori in termini basse tariffe ed offerta ampia. Tale tendenza potrebbe continuare per ulteriori decenni. ITF (2017) sviluppa tre scenari di evoluzione del trasporto aereo internazionale: 1) nello scenario "di base" (baseline), basato sui trend di crescita

attuali, i volumi aumentano di quasi quattro volte al 2050; 2) in uno scenario definito “statico”, caratterizzato da una crescita più lenta, i volumi raddoppiano; 3) nello scenario “dinamico”, i passeggeri trasportati aumentano di quasi cinque volte. Accanto agli effetti positivi in termini di accessibilità, libertà di viaggiare e scambio di conoscenze, ci sono gli effetti negativi in termini di CO₂, che potrebbero essere mitigati dall’impegno delle compagnie ad aumentare l’efficienza degli aerei. Come documentato in precedenza, il trasporto aereo internazionale genera attualmente il 2% delle emissioni di CO₂. ITF (2017) propone alcuni scenari di aumento di CO₂. Nello scenario base (BAU) il settore al 2050 raddoppia le sue emissioni. Nella versione dinamica addirittura le triplica, mentre nello scenario statico l’aumento è del 50%. Solo l’implementazione di politiche *low-carbon* permetterebbero di contenere le emissioni al 2050 ai livelli attuali. Esse consistono essenzialmente nella ottimizzazione delle rotte e nell’uso dei carburanti a più basso contenuto di carbonio (Dincer e Acar, 2016; Chiaramonti, 2019).

3. LE POLITICHE ATTUABILI PER RIDURRE LE EMISSIONI DI CO2 DEI TRASPORTI

Esistono molti modi di classificare le politiche attuabili per ridurre le emissioni di CO₂ dei trasporti. Una di queste, molto citata in letteratura, è la “*Avoid, Shift, Improve strategies*”.

La *Avoid strategy* fa riferimento alla riduzione dei viaggi non necessari, evitabili grazie a variazioni urbanistiche (uso misto), organizzative (aumento dell’occupazione dei veicoli) o tecnologiche (teleconferenze, lavoro a distanza). La *Shift strategy* consiste nel trasferire la mobilità verso modalità a minori emissioni di GHG (trasporto pubblico, camminare, bicicletta) tramite strumenti fiscali (imposte e sussidi sull’acquisto, sull’uso e sul parcheggio) e regolamentari (divieti di accesso). La *Improve strategy* contiene un insieme di misure di tipo tecnologico sui sistemi di propulsioni e sui carburanti o sul traffico (gestione della domanda e del traffico) per ridurre le emissioni a parità di percorrenza.

Un’altra classificazione assai usata tra gli economisti è distinguere tra “politiche di prezzo” e “politiche di comando e controllo”. Le prime, anche definite “politiche fiscali” o “politiche di mercato”, mirano ad indurre comportamenti ritenuti più desiderabili alterando i prezzi (o i costi), anche usando imposte o sussidi. Le seconde impongono comportamenti o limiti massimi di emissione (per singolo impianto, per veicolo o per flotte di veicoli) pena il pagamento di penali o il ritiro del diritto di operare in un dato mercato. Una letteratura teorica ed empirica molto ampia ha messo a confronto i due approcci, anche con specifico riferimento ad obiettivi ambientali (ad esempio, Goulder e Parry, 2008).

Posto che molte delle politiche proposte possono essere pensate come complementari, invece che alternative, è utile il tema di valutare quale sia la combinazione di strategie più efficace ed efficiente per raggiungere l'obiettivo di una riduzione delle emissioni di CO₂ nei trasporti. Nel prossimo paragrafo analizzeremo in dettaglio la strategia del *carbon pricing*, spesso richiamata nel dibattito teorico e politico, per analizzarne il funzionamento e l'efficacia. Passeremo poi all'analisi di un'importante strategia *improve*, quella che obbliga i costruttori di veicoli a rispettare degli *standards* di emissione, per infine concludere con una loro comparazione.

3.1 *Carbon pricing*

Il *Carbon pricing* è definito come un insieme di strumenti che comprendono la tassa sul carbonio (*Carbon Tax*) e i diritti di emissione (*Emission Trade Scheme* o ETS). Il *Carbon pricing* è ritenuto da autorevoli economisti uno strumento assai efficace per ridurre le emissioni (Stiglitz *et al.*, 2017).

La tassa sul carbonio è un prezzo stabilito per tonnellata di carbonio o, più comunemente, per tonnellata di CO₂ emessa. Poiché le emissioni di CO₂ derivanti dalla combustione di combustibili fossili sono proporzionali al contenuto di carbonio del carburante, una tassa sul carbonio è, in effetti, una tassa sulla CO₂. Una tassa di \$1 per tonnellata di CO₂ equivale a una tassa di \$3,7 per tonnellata di carbonio, in quanto il peso del carbonio rappresenta circa 3/11 del peso di CO₂.

Gli ETS sono uno strumento di *cap-and-trade*, in quanto consistono in un tetto massimo di emissione di CO₂ (*cap*), fissato a livello politico, a cui corrispondono diritti di emissione (*emission allowances*) in mano alle aziende, e in un mercato in cui questi diritti possono essere scambiati (*trade*). I diritti di emissione possono essere assegnati gratuitamente alle imprese o venduti tramite aste. Nello scambio dei diritti l'incontro tra domanda e offerta dà luogo a un prezzo per il diritto di emettere una tonnellata di CO₂.

La tassa sul carbonio e gli ETS si differenziano per il tipo di certezza che forniscono. Dal punto di vista delle imprese, la tassa sul carbonio fornisce certezza sui prezzi, in quanto le aziende soggette all'imposta sanno quanto dovranno pagare per tonnellata di CO₂ emessa. Dal punto di vista del regolatore, invece, la definizione della tassa sul carbonio non garantisce un livello certo di riduzione delle emissioni, in quanto non sa a priori se le aziende decideranno di pagare la tassa o di ridurre le emissioni. Gli ETS, al contrario, fissando un tetto alle emissioni, forniscono al regolatore la certezza quantitativa sulle emissioni. Dal punto di vista delle imprese, però, le fluttuazioni dei prezzi nell'ambito della struttura del mercato di negoziazione non consentono una base solida per la pianificazio-

ne aziendale. A fronte a questi problemi sono state proposte ed implementate soluzioni ibride. Ad esempio, limiti minimi e massimi di prezzo per evitare che i prezzi siano "troppo bassi" o "troppo alti". Allo stesso modo, la tassa sul carbonio può essere dotata di meccanismi di adeguamento automatico connesso all'ammontare complessivo delle emissioni.

Le politiche di *carbon pricing* (tasse sul carbonio e ETS), come tutte le politiche di *pricing*, hanno caratteristiche che le rendono generalmente più efficienti rispetto alle politiche regolatorie, quali standards o prescrizioni. Esse sono:

- flessibilità. Il *carbon pricing* consente alle aziende di scegliere il metodo più efficiente per ridurre (o non ridurre) le emissioni in risposta al prezzo del carbonio o alla tassa. Nel caso delle politiche regolatorie (ad es., i mandati tecnologici), invece, un regolatore sceglie un unico metodo per una vasta gamma di aziende. Tali approcci uniformi possono portare a riduzioni inutilmente costose per alcune imprese anche in presenza di metodi più economici per ridurre le emissioni;
- pari costi marginali di abbattimento. Il *carbon pricing* applica un prezzo uniforme sulle emissioni di CO₂ indipendentemente dalla fonte. Di conseguenza, i costi marginali di abbattimento (i costi per le aziende di ridurre le proprie emissioni di una unità) sono eguagliati tra le imprese e i settori. In questo modo sono ridotti al minimo i costi complessivi di riduzione delle emissioni. I regolamenti, invece, pur in presenza di costi di abbattimento marginali diversi tra imprese e settori, impongono loro le stesse prescrizioni, non realizzando quindi la minimizzazione dei costi complessivi di abbattimento;
- incoraggiare la conservazione. Il *carbon pricing* incoraggia gli individui e le imprese a ridurre le proprie emissioni di carbonio più delle normative convenzionali. Un regolamento (ad es., uno standard di prestazione) stabilisce un limite rigoroso per le emissioni per unità di produzione, ma non fornisce incentivi per ridurre le emissioni oltre il limite stabilito dal regolamento;
- gettito. Il *carbon pricing* crea un nuovo flusso di entrate che può essere utilizzato in vari modi, ad esempio, essere investito in attività di ricerca e sviluppo per migliorare le tecnologie dei motori e batterie più performanti. L'uso delle entrate può influire in modo significativo sui costi economici e sulla fattibilità politica di una politica di fissazione dei prezzi del carbonio.

Gli ETS sono stati adottati in Europa già a partire dal 2005, grazie agli accordi collegati al protocollo di Kyoto, e sono applicati ai settori dell'energia, delle in-

dustrie siderurgiche, dei prodotti minerali, della ceramica, della carta e dell'aviazione civile (ma limitatamente ai voli nazionali). Si applicano ad oltre 12.000 centrali elettriche e aziende nei 28 stati membri dell'UE, oltre che in Islanda, Liechtenstein e Norvegia, coprendo circa il 45% delle emissioni di gas serra dell'UE. Non si applicano invece alle rimanenti modalità di trasporto, all'agricoltura ed al riscaldamento degli edifici⁷. Da un iniziale prezzo di mercato di 30 €/ton CO₂ equivalente nel 2006, il prezzo di mercato dei permessi di emissione è sceso nel 2016 a 5 €/ton CO₂ eq., Euro, verosimilmente a causa della crisi economica e di una strutturale eccessiva generosità nell'allocazione delle quote. Secondo Lepratti *et al.* (2017) ciò dimostra "l'incapacità per questo strumento di condizionare il mercato". Come rimedio al problema, alcuni paesi quali il Regno Unito e la Francia hanno adottato un meccanismo compensativo: il prezzo minimo sotto il quale il valore della tonnellata di CO₂ equivalente nell'ETS non può scendere⁸.

La tassa sul carbonio, invece, è applicata in Canada e in diversi paesi europei quali la Finlandia (il primo ad adottarla nel 1990), la Danimarca, i Paesi Bassi, la Norvegia, la Svizzera e l'Irlanda. In Italia Lepratti *et al.* (2017) scrivono che "dopo un effimero passaggio a fine anni novanta (la tassa nel 1998, era stata introdotta con l'art. 8 della legge n. 448 del 23 dicembre 1998, in linea con le conclusioni della conferenza di Kyoto del 1997), nell'aprile 2012, il Consiglio dei ministri aveva approvato il disegno di legge sulla delega fiscale, diviso in tre diversi settori. Uno di questi settori era dedicato al riordino della tassazione ambientale, al fine di promuovere la crescita e l'internalizzazione dei costi ambientali nelle spese di produzione; tra le intenzioni del Ministero dell'Ambiente vi era quella di destinare il gettito fiscale ricavato dall'introduzione della *Carbon Tax* al sistema di finanziamento delle fonti rinnovabili. Ad oggi il provvedimento non ha avuto attuazione".

Gli Stati impongono però anche imposte sulle fonti energetiche, come olio combustibile, gas naturale, benzina e diesel, nonché sull'elettricità. Un complesso sistema di tasse, prelievi ed esenzioni viene utilizzato per rendere più costose determinate fonti energetiche. Ad esempio, c'è una tassa più alta sulla benzina rispetto al diesel, ma la tassa di circolazione è più alta sulle auto diesel che su quelle a benzina. I criteri sono i più diversi e differiscono tra Stati. Inoltre, il cri-

⁷ Kerstine Appunn Julian Wettengel, "Putting a price on emissions: What are the prospects for carbon pricing in Germany?" 18 Jul 2019, 13:04 <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/putting-price-emissions-what-are-prospects-carbon-pricing-germany>

⁸ Lepratti *et al.* (2017) riportano che il Regno Unito ha stabilito un *floor price* nel settore energetico pari a 20 Euro per il periodo 2016-2020, che nella decade successiva dovrebbe salire fino a 30, mentre la Francia lo ha fissato a 14,50 Euro del 2015, e a 22 del 2016, per poi salire a 56 Euro entro il 2020.

terio della efficienza in termini di emissioni di CO₂ concorre con altre esigenze tra cui, in particolare, la generazione di gettito per l'Erario.

Un punto importante da definire è se e come estendere anche al settore dei trasporti e del riscaldamento degli edifici l'applicazione degli ETS. Sono state prese in considerazione due possibilità. La prima prevede un approccio a valle (utilizzato nel sistema ETS dell'UE) secondo il quale le quote sono acquistate dall'emettitore finale di CO₂. Nel caso dei settori dei trasporti e del riscaldamento, ciò significherebbe che un gran numero di consumatori finali di energia – i conducenti di automobili e i proprietari di case e appartamenti – dovrebbero acquisire certificati di emissione in base al loro consumo di energia. La seconda prevede invece un approccio a monte, in cui coloro che producono e/o vendono combustibili fossili – produttori, commercianti, importatori, raffinerie, stazioni di servizio – sono obbligati ad acquistare certificati di carbonio in base all'intensità di CO₂ del combustibile. Questo modello è generalmente considerato più fattibile e più facile da implementare. Qualsiasi nuovo schema tariffario dovrebbe però tenere conto anche delle imposte esistenti sui combustibili fossili o riformarle di conseguenza.

Alternativamente, una tassa sul carbonio applicata ai prodotti fonte di energia in base alla loro intensità di CO₂ avrebbe l'effetto di rendere i combustibili fossili, compreso il gasolio da riscaldamento, più costosi. La questione se preferire gli ETS o la tassa sul carbonio è oggetto di ampio dibattito sia a livello teorico che politico. Diversi autori giungono alla conclusione che – da un punto di vista tecnico – i due strumenti abbiano lo stesso effetto, purché siano strutturati in modo adeguato. Alcuni fanno notare che l'opzione relativa all'imposta sul carbonio ha maggiori possibilità di una rapida attuazione da un punto di vista amministrativo rispetto alla creazione di un sistema separato di scambio di quote di emissioni. Infine, vi è un consenso generale sul fatto che qualsiasi tipo di sistema di tariffazione del carbonio richiederà misure per alleviare l'onere dei costi per i consumatori, in particolare quelli con mezzi finanziari limitati. Ciò potrebbe essere fatto riducendo le tasse su altre energie (ad esempio l'elettricità) o utilizzando parte delle entrate del sistema di prezzi per offrire rimborsi alle famiglie. I nuovi fondi potrebbero anche essere utilizzati per incentivare lo sviluppo di energie rinnovabili, programmi di isolamento termico o ristrutturazioni del sistema di riscaldamento.

Se la giustificazione teorica per l'applicazione del *carbon pricing* ai trasporti è chiara, rimane incerto se questi strumenti modificano in modo significativo i comportamenti delle persone. La risposta è che probabilmente li modificano di poco nel breve periodo, ma in misura maggiore nel lungo periodo. Gli economisti verificano queste impatti stimando l'elasticità della domanda. L'osservazione dei trend passati ci fa dubitare che i comportamenti e le scelte modali si modifichino

in modo significativo (Danielis, 2019d), sia in termini di dimensione che di rapidità di adeguamento, in modo tale da ottenere una significativa riduzione delle emissioni di CO₂ dei trasporti, a meno di intervenire in modo molto pesante, ma politicamente poco accettabile.

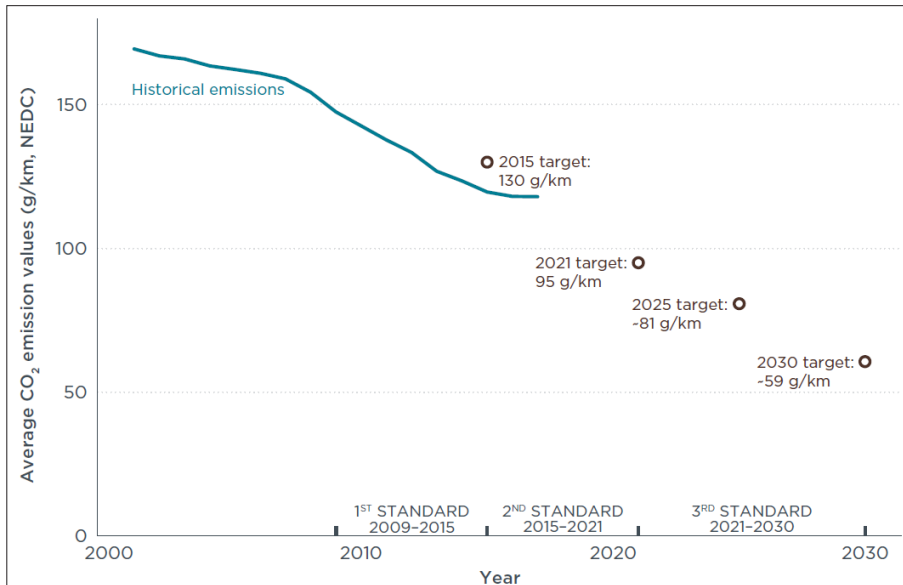
Gli esempi di applicazione finora realizzati sembrano confermare tali perplessità. Ad esempio, negli Stati Uniti fino ad ora solo la California ha stabilito un prezzo per le emissioni di carbonio generate dal trasporto, includendo a partire dal 2015 sia i veicoli a benzina che quelli diesel. I fornitori acquistano permessi di emissione per ogni tonnellata di carburante. Ciò aumenta i costi di carburante per i conducenti. Al prezzo attuale di circa 15 dollari per tonnellata, il programma aggiunge circa mezzo dollaro, 49 centesimi per l'esattezza, al costo di un litro di benzina. Si è osservato che tale valore è del tutto ininfluenza, essendo inferiore alla differenza di prezzo tra le pompe di benzina all'interno della città di Los Angeles. In ogni caso, grazie a questo programma la California ha raccolto oltre 9 miliardi di dollari dalle vendite di permessi dall'inizio del programma. Tale cifra ha permesso di finanziare le energie rinnovabili, il trasporto pubblico e i veicoli a basse emissioni. Per contribuire ad alleviare i costi per le classi meno abbienti, un terzo dei fondi raccolti è stato destinato a migliorare il trasporto pubblico nelle comunità meno abbienti. Ciò nonostante, l'effetto di queste misure di *carbon pricing* sulle emissioni di CO₂ della California è stato nullo. Dopo le diminuzioni tra il 2007 e il 2013, i gas a effetto serra dei veicoli sono aumentati ogni anno⁹. Per questo, è necessario usare, oltre che strumenti di prezzo, anche strumenti di regolazione quali gli standard di emissioni.

3.2 *Standard di emissione*

Uno standard di emissione di un veicolo stabilisce soglie massime da rispettare pena sanzioni finanziarie e non. È lo strumento più comunemente usato a livello internazionale per contenere le emissioni e per incentivare i produttori dei veicoli a migliorare le tecnologie dei motori. Come vedremo nel caso dell'Unione Europea, gli standard di emissione consistono in un insieme complesso di norme e regole che vengono continuamente monitorate ed aggiornate. L'Unione Europea ha stabilito standard per tutti i veicoli stradali (motorini, auto, furgoni, camion, ecc.), treni, chiatte e "macchine mobili non stradali" (come i trattori), con l'importante eccezione delle navi e degli aerei, data la loro operatività internazionale. Gli standard più noti sono quelli relativi agli inquinanti atmosferici

⁹ Per maggiori dettagli si consulti il seguente sito, visitato nel settembre 2019: <https://learningenglish.voanews.com/a/prices-proposed-for-carbon-dioxide-from-cars/4744039.html>

FIGURA 1 – Andamento delle emissioni medie effettive e livelli obiettivo per le auto immatricola in Europa. Valori CO₂ sulla base del NEDC



FONTE: ICCT (2019)

e sono identificati con la sigla Euro seguita da un numero. Sono stati introdotti con la seguente successione; Euro I: 1993, Euro II: 1997, Euro III: 2000, Euro IV: 2005, Euro Va,b: 2009-2011, Euro Vb,c,d: 2011-20. Dal momento dell'entrata in vigore di uno di questi standard, le case automobilistiche devono terminare la vendita di nuovi veicoli con gli standard precedenti. Gli standard normano le emissioni massime consentite per km relativamente ai seguenti inquinanti: ossidi di azoto (NO_x), idrocarburi totali (THC), idrocarburi non metanici (NMHC), monossido di carbonio (CO) e particolato (PM). Non essendo la CO₂ propriamente un inquinante, l'emissione della CO₂ è regolata a parte imponendo obiettivi da raggiungere a livello di flotta per ciascun produttore entro un dato anno, tramite un complesso sistema di calcolo e prevedendo opportune penalità e premialità. La prima direttiva di regolazione del CO₂ è del 2009.

La Figura 1 mostra come gli obiettivi, nel caso delle automobili, siano stati via via resi più stringenti, imponendo alle case costruttrici miglioramenti continui nei livelli di emissione. Data la stretta relazione tra emissioni di CO₂ e consumo di carburante, raggiungere un obiettivo di minori emissioni medie significa in primo luogo, ma non solo, ridurre i consumi di combustibile per km percorso,

tramite motori più efficienti o veicoli più leggeri. Si noti come le emissioni medie effettive per flotta nel 2015 sono state al di sotto dell'obiettivo proposto a livello politico (raggiunto con due anni di anticipo), evidentemente poco "ambizioso". Al 2017, il quadro per i principali costruttori si presenta come raffigurato nella Tavola 1 per le auto e nella Tavola 2 per i furgoni.

TAVOLA 1 – Automobili

Gruppo	EU quota di mercato 2017	Peso medio (kg) 2017	CO ₂ media (g/km) 2017	CO ₂ obiettivo (g/km) 2015	CO ₂ obiettivo (g/km) 2021	% di veicoli elettrici 2017
Toyota	5%	1,359	103	127	94	0.3%
PSA	16%	1,273	112	125	91	0.1%
Renault-Nissan	15%	1,310	112	126	93	2.5%
FCA	6%	1,259	120	124	91	0.0%
Ford	7%	1,393	121	128	95	0.0%
BMW	7%	1,570	122	139	101	5.0%
Hyundai	6%	1,348	122	129	94	1.4%
Volkswagen	23%	1,420	122	132	96	1.2%
Daimler	6%	1,607	127	139	103	2.6%
Media		1,390	119	130	95	1.4%

FONTE: ICCT (2019)

TAVOLA 2 – Furgoni

Gruppo	EU quota di mercato 2017	Peso medio (kg) 2017	CO ₂ media (g/km) 2017	CO ₂ obiettivo (g/km) 2015	CO ₂ obiettivo (g/km) 2021	% di veicoli elettrici 2017
Peugeot	0.11	1659	129	171	137	0.6%
Citroën	0.1	1647	129	170	136	0.5%
Renault	0.15	1675	145	172	138	1.7%
Fiat	0.09	1707	152	175	141	0.0%
VW	0.11	1842	160	188	154	0.1%
Opel	0.03	1738	163	178	144	0.0%
Ford	0.16	1949	166	198	165	0.0%
Nissan	0.03	1883	167	191	158	4.9%
Mercedes-Benz	0.09	2004	191	203	170	0.0%
Iveco	0.03	2255	209	226	194	0.0%
Media		1798	156	175	147	0.8%

FONTE: ICCT (2019)

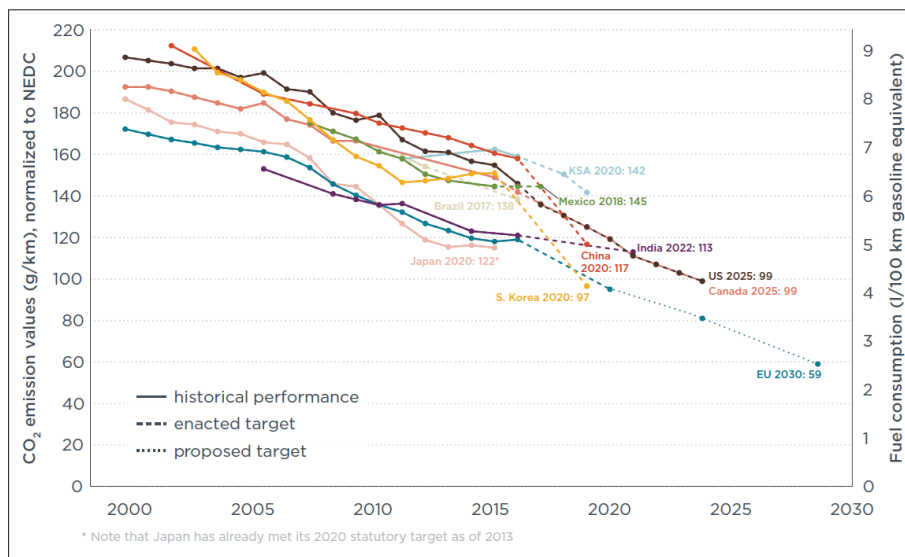
Come si può vedere, la media per i principali produttori di automobili nel 2017 è 119 g/km, ben al di sotto dell'obiettivo medio del 2015 (130 g/km). Analogamente per i furgoni. Il 17 aprile 2019, il Parlamento europeo e il Consiglio – dopo lunga e tormentata discussione che ha visto diversi paesi dissenzienti e le case produttrici molte critiche – hanno adottato il regolamento (UE) 2019/631 che stabilisce norme di prestazione in materia di emissioni di CO₂ per le nuove autovetture e per i nuovi veicoli commerciali leggeri (furgoni) nell'UE per il periodo successivo al 2020. L'obiettivo è di ridurre le emissioni medie di CO₂ delle nuove auto rispetto al 2021, del 15% nel 2025 e del 37,5% nel 2030. Per i veicoli commerciali leggeri è stato concordato un obiettivo del 15% per il 2025 e del 31% per il 2030. Il nuovo regolamento si applica dal 1° gennaio 2020. Pertanto, a partire dal 2021 l'obiettivo di emissioni medie a livello di flotta dell'UE per le nuove auto sarà di 95 g CO₂/km (corrispondente a un consumo di carburante di circa 4,1 litri/100 km di benzina o 3,6 litri/100 km di gasolio) che andrà poi a ridursi a 85 g CO₂/km nel 2025 e 59 g CO₂/km nel 2030. Rispetto al contesto internazionale, risulta che la EU ha formulato gli obiettivi più stringenti e più estesi nel tempo, spingendosi fino al 2030 (Figura 2). Come si può vedere dalla Tavola 1 e dalla Tavola 2, i target fissati per il 2021 sono piuttosto ambiziosi e richiederanno un notevole impegno a tutti i costruttori¹⁰.

I regolamenti comunitari hanno anche introdotto miglioramenti delle procedure di calcolo delle emissioni di CO₂. Infatti, a partire dal 1° settembre 2017, i nuovi modelli di auto devono superare nuovi e più affidabili test delle emissioni in condizioni di guida reali ("Emissioni di guida reali" – RDE), nonché un test di laboratorio migliorato ("World Harmonized Light Vehicle Test" – WLTP) prima di potere essere guidati su strade europee. A partire dal 1° gennaio 2019, i camion di nuova produzione devono determinare e dichiarare le proprie emissioni di CO₂ e il consumo di carburante utilizzando l'ultima versione disponibile dello strumento di simulazione VECTO. Per aiutare i conducenti a scegliere nuove auto a basso consumo di carburante, la legislazione dell'UE impone inoltre agli Stati membri di garantire ai consumatori informazioni pertinenti, tra cui un'etichetta che mostri l'efficienza del carburante di un'auto e le emissioni di CO₂.

Gli obiettivi di emissione vincolanti per i produttori sono fissati in base alla massa media dei loro veicoli, utilizzando una curva del valore limite e tenendo conto del peso dei veicoli. Ciò significa che ai produttori di auto più pesanti sono

¹⁰ Si noti che il target è differenziato per costruttore in relazione alla massa media dei veicoli, seguendo per le automobili la formula emissioni specifiche di CO₂ = 95 + a · (M – M₀) dove: M è massa in ordine di marcia del veicolo in chilogrammi (kg), M₀ è uguale a 1379,88 e a è posta pari a 0,0333. Tale formula innalza il target dei costruttori di auto più pesanti. Il target medio ottenuto è 95 g/km. Per i furgoni la formula è di CO₂ = 147 + a · (M – M₀) dove: M è massa in ordine di marcia del veicolo in chilogrammi (kg), M₀ è uguale a 1766,4 e a è posta pari a 0,096. Fonte: Regolamento (UE) 2019/631 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 17 aprile 2019.

FIGURA 2 – Confronto internazionale tra standard di emissione di CO₂ per le automobili



FONTE: ICCT (2019)

consentite emissioni più elevate rispetto ai produttori di auto più leggere. Se le emissioni medie di CO₂ della flotta di un costruttore superano l'obiettivo in un determinato anno, il costruttore deve pagare una sanzione per le emissioni in eccesso per ogni auto immatricolata. Fino al 2018, questa sanzione ammontava a: € 5 per il primo g/km di superamento, € 15 per il secondo g/km, € 25 per il terzo g/km, € 95 per ogni g/km successivo. Dal 2019 in poi, la penalità sarà di € 95 per ogni g/km di superamento dell'obiettivo. Per incoraggiare l'eco-innovazione, ai produttori possono essere concessi crediti di emissione per veicoli dotati di tecnologie innovative per le quali non è possibile dimostrare gli effetti di riduzione della CO₂ durante la procedura di prova utilizzata per l'omologazione del tipo di veicolo. Tali risparmi sulle emissioni devono essere dimostrati sulla base di dati verificati in modo indipendente. I crediti di emissione massimi per queste eco-innovazioni per produttore sono di 7 g/km all'anno. Ai produttori vengono dati ulteriori incentivi per immettere sul mercato automobili a emissioni zero e basse che emettono meno di 50 g/km attraverso un sistema di "supercrediti". Ai fini del calcolo delle emissioni specifiche medie di un produttore, tali auto saranno quindi conteggiate come: 2 veicoli nel 2020, 1,67 veicoli nel 2021, 1,33 veicoli nel 2022, 1 veicolo dal 2023 in poi. Un limite per i supercrediti è fissato a 7,5 g/km per produttore nei tre anni. Inoltre, i produttori possono raggrupparsi e agire

insieme per raggiungere il loro obiettivo di emissioni. Nel costituire un tale gruppo (*pool*), i produttori devono rispettare le norme del diritto della concorrenza.

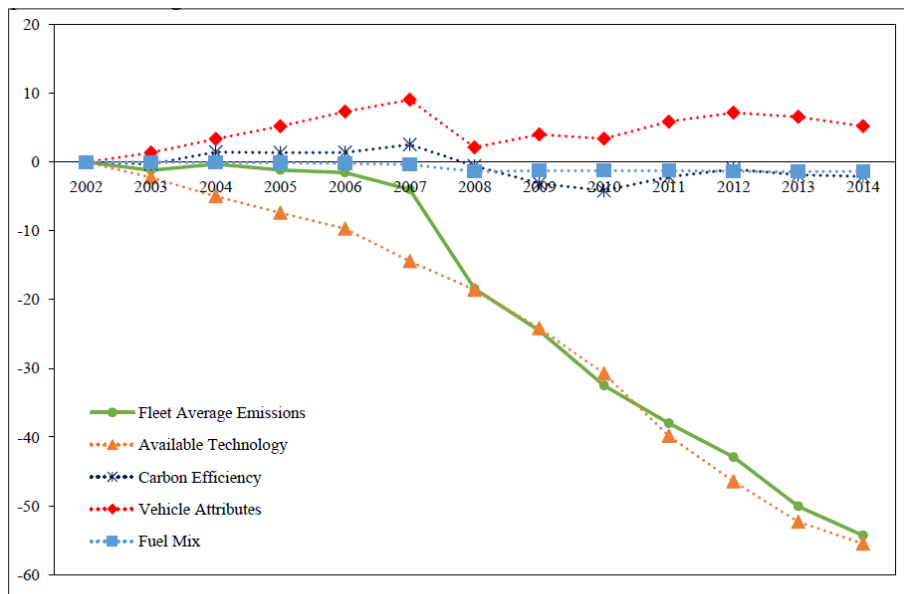
Queste opportunità, la norma che si applica alla flotta e non al singolo veicolo e il sistema dei supercrediti e quello del raggruppamento di produttori, per quanto presentino diversi elementi critici ed arbitrari evidenziati in letteratura¹¹, consentono alle case produttrici una maggiore flessibilità nel formulare la loro offerta. Sulla base delle informazioni che appaiono sui media, quasi tutti i costruttori hanno individuato nei veicoli elettrici un prodotto che consente di rispettare la normativa europea e di non incorrere in sanzioni pecuniarie. Ciò è alla base delle decisioni di investimento che stanno attuando in questo periodo e che sta conducendo a un progressivo ma sempre più consistente aumento della offerta di modelli elettrici nei loro listini.

3.3 *L'efficacia delle politiche a confronto*

Sul *carbon pricing* ci sono in letteratura opinioni contrastanti. Ad esempio, Baranzini *et al.* (2017) sostengono che “among all instruments, carbon pricing deserves the most serious attention from researchers, politicians, and citizens”. Tvinnereim e Mehling (2018) controbattono che “this is almost certainly true for reductions at the margin, but averting dangerous climate change requires more than incremental abatement of emissions”. Essi sostengono che il *carbon pricing* può bloccare la crescita delle emissioni, ma non può stabilizzare i livelli di concentrazione assoluta. Come esempio di efficacia essi citano che l'ETS dell'Unione Europea, attivato dal 2005 e attualmente in vigore in 31 paesi. La riduzione delle emissioni in tutti i settori regolati c'è stata, ma è stata pari al 3% durante i primi cinque anni relativamente al controfattuale BAU (Martin *et al.*, 2016). E anche in Svezia, che ha uno imposto una delle tasse sul carbonio più elevate, 140 US\$ per tonnellata di CO₂, la riduzione nel trasporto stradale dal 1990 al 2015 è stata solo del 4%. Naturalmente sarebbe possibile elevare talmente il prezzo del carbonio da ottenere effetti più consistenti; Tvinnereim e Mehling (2018) sostengono che ciò non è realizzabile per vincoli politici in quanto il costo ricade su alcuni gruppi di utenti mentre il beneficio è di tipo collettivo ed intergenerazionale, il che rende difficile trovare un sostegno politico alla tassa sul carbonio. A fronte di queste difficoltà, alcuni autori hanno proposto strade diverse, non basate esclusivamente sul *carbon pricing*. Acemoglu *et al.* (2012), ad esempio, raccomandano un misto di tassa sul carbonio e sussidi per l'innovazione. Jenkins (2014) propone

¹¹ Una delle criticità più rilevante è che si tiene conto delle sole emissioni durante l'uso e non delle emissioni lungo l'intero ciclo di vita.

FIGURA 3 – Contributo cumulativo da diversi determinanti della decarbonizzazione delle automobili in Finlandia dal 2002 al 2014



che il gettito della tassa sul carbonio venga usato per incentivare lo sviluppo tecnologico. Tvinnereim e Mehling (2018) concludono che alterare i prezzi ha un effetto sul capitale esistente; può essere utile ma non è sufficiente. Per avere una modifica più radicale del sistema e annullare l'incremento dello stock di CO₂ servono standard tecnologici, incentivi e politiche di innovazione capaci di influire in modo più radicale sulle scelte di investimento.

Un possibile modo di confrontare l'efficacia delle politiche proposte è la decomposizione dei fattori che determinano le emissioni medie di CO₂ dei veicoli. Zhou e Kuosmanen (2019) hanno effettuato un simile studio per i veicoli passeggeri in Finlandia nel periodo 2002-2014, i cui risultati sono riportati nella Figura 3.

Le emissioni medie delle automobili vendute in Finlandia sono diminuite di molto a partire dal 2007. In termini quantitativi, le emissioni sono passate dai valori di 217,4 g/km per le auto a benzina del 2002 ai 149,8 g/km del 2014. Anche le auto diesel hanno avuto una rapida diminuzione: dai 189,4 g/km del 2002 ai 138,8 g/km del 2014. Parallelamente, la massa media delle auto a benzina si è mantenuta circa costante (1.461 e 1.459 kg nei due anni di riferimento)

ed è leggermente aumentata per le auto diesel (1.665 e 1.719 kg). La potenza è aumentata per entrambi i tipi di veicoli (rispettivamente, da 116 a 127 e da 98 a 116).





Le variabili usate per la decomposizione sono le seguenti:

- la tecnologia disponibile (*available technology*) nelle auto offerte sul mercato in relazione al progresso tecnologico ed ingegneristico dei motori e agli stimoli proveniente dalla legislazione europea, che ha introdotto, come abbiamo visto, standard emissivi via via più stringenti e penalità economiche nel caso di non rispetto;
- la *carbon efficiency*, misurata come l'efficienza media in termini di CO₂ delle automobili scelte dai consumatori finlandesi, che riflette l'importanza che i consumatori attribuiscono alle emissioni anche in risposta agli stimoli fiscali del governo (la Finlandia è stato uno delle prime nazioni a introdurre una tassazione basata sulla CO₂ nel 2008);
- la *vehicle attribute*, ovvero le caratteristiche dei veicoli in termini di massa e dimensioni (ad esempio, i consumatori potrebbero acquistare auto più grandi all'aumentare dell'efficienza tecnologica);
- il *fuel mix* di combustibili, che riflette la composizione della auto acquistate per tipologia di sistemi di propulsione, in cui la parte preponderante sono le auto a benzina e diesel, dato che nel 2014 le automobili elettriche erano ancora poco diffuse.

La conclusione principale che gli autori traggono è che la riduzione delle emissioni medie è stata causata principalmente dall'offerta di auto con tecnologie più efficienti, grazie al progresso ingegneristico ed alla regolamentazione europea. Infatti, la curva delle emissioni medie effettive segue l'andamento della variabile *available technology*. I fattori di domanda che riflettono la scelta dei consumatori avrebbero invece sostanzialmente mantenuto le emissioni medie stabili. Infatti, il contributo della variabile *vehicle attribute* sarebbe quello di aumentare le emissioni medie. Anche la variabile *fuel mix* (composizione della flotta per sistemi di propulsione) ha un effetto modesto. La variabile *carbon efficiency*, che riflette le scelte dei consumatori, ha inizialmente un effetto di aumentare le emissioni medie, per poi invertire il segno del suo contributo dal 2008, con l'introduzione di una imposta di registrazione proporzionale alla CO₂ emessa.

Complessivamente quindi, le politiche che incidono sull'offerta sembrano essere più efficaci di quelle che incidono sulla domanda. Tale conclusione ovvia-

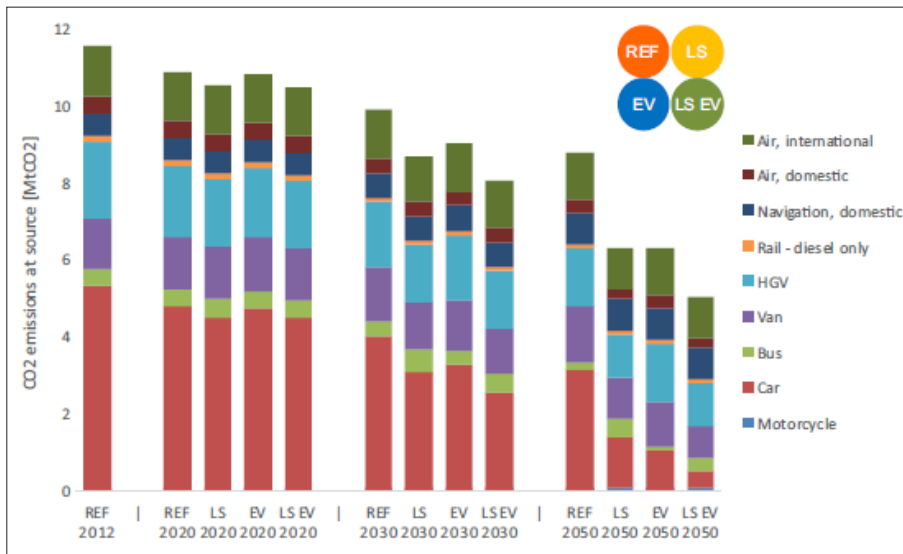
FIGURA 4 – Scenari formulati da Brand et al. (2019)

 Reference (REF)	 Lifestyle change (LS)
Projection of transport demand, supply, energy use and emissions as if there were no changes to existing transport and energy policy	Radical change in travel patterns and mode choice leading to relatively fast transformations and new demand trajectories
 Electric vehicle promotion and petrol/diesel ‘phase-out’ (EV)	 Combined lifestyle and EV pathway (LS EV)
Pathway of ‘high electrification’ + phasing out of conventional oil based ICVs: range of measures incl. pricing, taxation, investment, EV infrastructure, scrappage/purchase tax on future diesel and petrol cars, changing consumer preferences	Integration of radical change in travel patterns, mode choice, high electrification and phasing out of conventional petrol and diesel road vehicles

mente risente anche dalla intensità con la quale queste politiche sono esercitate. Un'altra considerazione degli autori è che le politiche che si possono emanare a livello europeo sono più efficaci di quelle che si possono emanare a livello nazionale. Il caso Norvegia, al contrario, mostra quello che è possibile ottenere a livello nazionale, con politiche di portata significativa e molto mirate, in questo caso a sostegno dei veicoli elettrici.

Sono dell'idea opposta, invece, Brand *et al.* (2019), i quali, esaminando il caso della Scozia, sostengono che riporre le proprie speranze solo sul miglioramento dell'offerta (“technological fix”) può essere rischioso, dato che il suo contributo alla decarbonizzazione è troppo lento e non sufficientemente intenso da potere garantire la soluzione del problema. Incoraggiare, invece, cambiamenti negli stili di vita, pur non essendo facile, può contribuire in modo significativo a ridurre le dimensioni del problema. Per cui gli autori suggeriscono di aggredire il problema sia dal lato offerta che da quello della domanda e sviluppano un complesso modello – la versione scozzese dell' UK Transport Carbon Model – comprensivo di: un modello di stima della domanda di trasporto, un modello che stima le decisioni di acquistare un'auto a livello familiare, un modello di scelta del veicolo, un modello che stima lo stock di veicoli e un modello che stima le emissioni lungo l'intero ciclo di vita di un veicolo per tipo di carburante. Vengono formulati i quattro scenari descritti in Figura 4. Lo scenario EV è relativo unicamente all'introduzione di veicoli elettrici tramite strumenti regolamentari e fiscali. Lo scenario LS prevede cambiamenti significativi nelle localizzazioni delle attività produttive e delle residenze, nei viaggi e nelle scelte modali. Lo scenario LS EV combina i due scenari precedenti.

FIGURA 5 – Impatto degli scenari formulati da Brand et al. (2019)



Il risultato principale è che lo scenario che prevede modifiche dello stile di vita (LS) genera riduzioni rispetto allo scenario di riferimento (REF) del 12% nelle emissioni di CO₂ nel 2030 e del 28% nel 2050 (Figura 5). Ciò è dovuto soprattutto alle riduzioni delle emissioni delle auto, compensate in parte dalle maggiori emissioni degli autobus, treni e moto dovute al cambiamento modalità. Lo scenario EV “tecnocentrico” è più lento e ottiene riduzioni simili solo nella seconda metà del periodo di valutazione, grazie al progressivo aumento della quota di veicoli elettrici. L’uso combinato e sinergico degli strumenti di offerta e di domanda nello scenario LS EV, genera nel 2050 una riduzione di più del 50%. Pertanto, concludono gli autori, la modifica degli stili di vita facilita la decarbonizzazione e richiede una quantità più limitata di modifiche al sistema trasporti-energia.

3.4 Innovazioni tecnologiche

Vista la difficoltà di ridurre la mobilità privata su strada, sia nel trasporto passeggeri che in quello delle merci, ci si chiede se i veicoli azionati da sistemi di propulsione alternativi, che non utilizzano combustibili fossili (e quindi non emettono

o emettono significativamente meno CO₂), possano rappresentare una soluzione per ottenere la decarbonizzazione dei trasporti. I candidati più accreditati al momento risultano essere i veicoli elettrici¹² e i veicoli ad idrogeno.

Come è noto, i veicoli elettrici non rappresentano una novità nella storia della motorizzazione, essendo essi la forma di propulsione usata all'origine dell'automobilismo. Il motivo principale per cui sono stati abbandonati durante il XX secolo è legato alla bassa densità energetica per unità di massa e di volume che era possibile accumulare nelle batterie, enormemente inferiore a quella disponibile nella benzina necessaria per alimentare il motore a scoppio. Le batterie al litio, infatti, hanno una densità energetica di due ordini di grandezza inferiori alla densità energetica di benzina e diesel. Le batterie al litio in rapporto al peso hanno una densità energetica pari a 0,36–0,875 MJ per kg e di 0,90–2,43 MJ per litro (1 MJ equivale a 277,778 wattore), mentre la benzina ha una densità energetica di 45 MJ per kg e 34,2 MJ per litro¹³.

Ma la comparazione non è finita qui in quanto:

- L'energia chimica deve essere trasformata in energia meccanica. A questo punto entra in gioco la maggior efficienza del motore elettrico, capace di un'efficienza compresa tra l'85% e il 90%. Ciò significa che un tale motore è in grado di convertire in lavoro utile una percentuale molto elevata dell'energia elettrica prelevata¹⁴. I motori a benzina convenzionali, invece, convertono in lavoro utile solo il 17-21% dell'energia immagazzinata nella benzina;
- L'energia elettrica deve viaggiare attraverso la rete elettrica per arrivare all'automobile. L'efficienza energetica delle auto elettriche, pertanto, si riduce in relazione alla distanza che tale energia deve percorrere. Una stima più

¹² Uno degli acronimi usati per identificare i veicoli elettrici nella letteratura internazionale è EV (Electric vehicles) che è in realtà è assai generico e comprende più tecnologie e più tipi di veicoli. Raggruppati sotto questo acronimo sono i BEV (Battery Electric Vehicle), gli EREV (Extended Range Electric Vehicle), i PHEV ((Plug-in Hybrid Electric Vehicle), e in qualche caso anche gli HEV (Hybrid Electric Vehicle), caratterizzati da decrescenti livelli di elettrificazione. A questo vanno aggiunti anche i veicoli a idrogeno basati sulle celle a combustibile. Questi veicoli includono le automobili per il trasporto persone, nei diversi segmenti dalle city car alle auto di lusso, i SUV e i pick-ups e i furgoni per il trasporto promiscuo (persone e merci) di diverse dimensioni. In una accezione più ampia si potrebbero includere anche le biciclette, i motorini, le moto ed anche i mezzi per il trasporto collettivo, quali gli autobus e le corriere. Inoltre, si potrebbero considerare anche i camion per il trasporto delle merci, a loro volta distinguibili per dimensione.

¹³ Dati tratti da <https://hypertextbook.com/facts/2003/ArthurGolnik.shtml>

¹⁴ La differenza tra l'efficienza del motore e l'efficienza complessiva di un'auto elettrica è dovuta alle perdite attribuite alla carica e allo scarico della batteria e, per alcune cariche (per alcune auto), alla conversione da corrente alternata a corrente continua e viceversa.

prudenziale viene, allora, dall'EPA quando afferma che "i veicoli elettrici convertono circa il 59%-62% dell'energia elettrica immessa nella rete in potenza alle ruote"¹⁵.

Si potrebbe pertanto concludere che le auto elettriche sono almeno 3 volte più efficienti di quelle a benzina nell'usare l'energia chimica disponibile, il che riduce in parte la differenza di densità energetica disponibile tra i due tipi di motori. Quindi, pur partendo da una densità energetica molto minore, le auto elettriche riescono a ridurre in parte lo svantaggio grazie ad una maggiore efficienza del loro motore in fase di utilizzo, in quanto l'energia elettrica può essere convertita facilmente in energia cinetica mentre la benzina o il diesel necessitano di un motore a combustione interna, che, oltre a produrre emissioni e calore, disperde molta dell'energia disponibile nel carburante.

Per chiarire, prendiamo il seguente esempio. Nell'ipotesi di 1 kg di massa di batteria – equivalente nel caso delle batterie Tesla a 250 Wh/kg o 0,9 MJ/kg – contro 1 kg di massa di benzina, che fornisce 45 MJ, il rapporto tra le densità energetiche della benzina e della batteria elettrica è pari a 50: qui le batterie hanno un grosso svantaggio in termini di densità energetica per unità massa. L'energia meccanica fornita è pari a 0,72MJ per il veicolo elettrico (nell'ipotesi di 62% di efficienza energetica) e a 7,65MJ per il veicolo a benzina, riducendo il rapporto da 50 (45: 0,9) a 13,7 (7,65: 0,72). Si noti inoltre che questo dato non è più solo tecnico, ma assume una valenza geografica ed economica perché dipende dal modo in cui è organizzata la produzione e distribuzione dell'energia. Una organizzazione della produzione dell'energia elettrica più distribuita e vicina all'utilizzatore finale può produrre infatti livelli di efficienza energetica più elevati. Inoltre, va tenuto conto che i veicoli elettrici hanno anche la proprietà di ricaricarsi durante l'uso, sfruttando le fasi di frenata dell'automobile durante le decelerazioni o le discese. Ciò aggiunge incertezza alla stima, in quanto questa rigenerazione dell'energia dipende dalle caratteristiche del veicolo e dallo stile di guida del conducente. Il confronto è in ogni caso tutt'altro che completo in quanto non considera le fasi a monte ed a valle, ovvero la produzione dell'energia elettrica e della benzina e lo smaltimento delle batterie e dei veicoli. Su questi ultimi elementi l'incertezza è ancora maggiore in considerazione: a) dei pochi dati, in particolare relativamente all'estrazione e al trasporto del petrolio ed alla raffinazione e distribuzione della benzina (gasolio), b) alle presumibili differenze geografiche e c) anche sulla produzione e smaltimento delle batterie con tecnologie ancora in evoluzione.

¹⁵ Si veda il sito EPA <https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml>

TAVOLA 3 – Confronto tra diversi modelli di automobili in termini di emissioni di CO₂

Modello	Consumo di energia	Emissioni di CO ₂ per miglio
Elettrica: Tesla Model 3	7,2/km	California (41% rinnovabile, 9% Nucleare, 4% carbone; 34% gas naturale): 0,0521 West Virginia (3,5% rinnovabile, 94% carbone; 2,5% gas naturale): 0,2366
Benzina: BMW Serie 3	40 km/gallone	0,3628
Ibrida: Toyota Prius PHEV	80 km/gallone	0,1814

Fonte: Why Battery Electric Cars are Dominating Hydrogen Fuel Cell Cars, <https://www.youtube.com/watch?v=k7JRIUPhSJE>

Se dalla considerazione di tipo energetico passiamo a quelle legate alle emissioni di CO₂, diventa decisivo tener conto del modo in cui è prodotta l'energia elettrica (mix elettrico). Un esempio può chiarire l'importanza di questo fattore.

Si confrontano tre modelli di automobili con tre diverse motorizzazioni. Nel caso che il mix elettrico sia quello californiano (con il 41% di rinnovabili), la Tesla Model 3 risulta l'auto che emette complessivamente di meno: 0,0521 CO₂/miglio contro lo 0,1814 CO₂/miglio della Toyota Prius PHEV e il 0,3628 CO₂/miglio della BMW Serie 3. Nel caso invece il mix elettrico sia quello della West Virginia (con il 94% di carbone), le emissioni della Tesla Model 3 salgono a 0,2366 CO₂/miglio, diventando quindi più inquinante della Toyota Prius PHEV. Ulteriori raffronti sull'effetto del mix elettrico sulle emissioni si possono trovare in Cavallaro *et al.* (2018) e Danielis *et al.* (2019a, 2019c, 2019d).

Sebbene queste considerazioni energetiche e ambientali siano molto rilevanti, esse non sono determinanti per capire quale sarà l'evoluzione del mercato e se i veicoli elettrici sostituiranno nei prossimi anni quelli con motore a combustione interna. I consumatori, infatti, prendono le loro decisioni di acquisto non solo sulla base di considerazioni energetiche e ambientali, ma anche (e anzi, forse, soprattutto) sulla base dei costi e delle prestazioni dei veicoli. In particolare, la letteratura ha evidenziato l'importanza del prezzo di acquisto, dell'autonomia dei veicoli e della diffusione delle infrastrutture di ricarica. Per una discussione sulle preferenze dei consumatori, si veda Danielis *et al.* (2018, 2019b), Giansoldati *et al.* (2017, 2018) e Scorrano *et al.* (2019).

3.4.1 Sistemi propulsivi: elettrico e idrogeno

I veicoli elettrici

Il dato incoraggiante è che i veicoli elettrici cominciano ad essere venduti in quantità non insignificanti. In valori assoluti a livello mondiale nel 2019 sono state venduti quasi 3 milioni di veicoli elettrici (puri + ibridi plug-in)¹⁶, rispetto ai poco più di 500 mila nel 2015. La parte più consistente di questi volumi è quella cinese (quasi il 50%) a causa di una netta spinta dirigitica decisa dalle autorità di governo con motivazioni sia ambientali che industriali. In termini percentuali sul totale delle immatricolazioni annuali, i veicoli elettrici rappresentano circa il 2,5%. La Norvegia è ancora di gran lunga un caso isolato con una quota di immatricolazioni superiore al 50% (38% puri ed il restante ibridi plug-in). Ma non mancano paesi che cercano di imitare il modello norvegese (Islanda, Olanda, Svezia) e che hanno raggiunto quote di immatricolazione superiori al 10%. Anche la Cina ha toccato nel 2019 la quota del 4.7%.

Vanno inoltre sottolineati i seguenti aspetti. Innanzitutto, lo sviluppo tecnologico, in particolare nel campo delle batterie, e l'industrializzazione nella produzione delle stesse, che stanno producendo una rapida caduta dei prezzi delle batterie (Bloomberg, 2019). Per ora ciò non ha comportato una riduzione dei prezzi di acquisto degli EV relativamente a quelli a combustione interna. La differenza di prezzo è infatti ancora considerevole (in Italia attorno ai 10 mila euro), solo in parte compensata dai risparmi di costi operativi che si ottengono nell'arco della vita utile del veicolo (Scorrano *et al.*, 2019). Sicuramente, però gli EV attualmente sul mercato dispongono di pacchi batterie e, quindi, un'autonomia più elevata di quelle disponibile alcuni anni fa (ancora comunque ben inferiore a quella delle auto convenzionali), tanto da rendere un problema meno sentito l'ansia da autonomia, ovvero la paura di rimanere senza carica.

A contribuire a ridurre la gravità del problema autonomia nell'effettuazione di viaggi lunghi ha concorso non poco la comparsa di fitte reti di colonnine di ricarica, sia costruite dalle case automobilistiche (es. Telsa, Ionity¹⁷) che dai distributori di energia (es. Enel X, E.on) che da imprese private specializzate in questo settore (es. Fastned in Olanda). Inoltre, è decisamente aumentata la potenza installata in alcune stazioni di ricarica arrivando ad oggi a 350 KW, il che, congiuntamente alla capacità delle più recenti batterie di ricaricarsi rapidamente

¹⁶ Si confronti https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car_use_by_country

¹⁷ Dal sito si legge "IONITY is a joint venture of BMW Group, Daimler AG, Ford Motor Company, and Volkswagen Group with Audi and Porsche. Our goal is simple: Building a high power charging network for electric vehicles along major highways in Europe".

te, rende possibile ad un veicolo di acquisire un'autonomia di centinaia di chilometri in meno di mezz'ora. Pur rimanendo quindi rilevante la differenza nei tempi di ricarica tra gli EV e gli ICEV, che nei lunghi viaggi può essere significativa, l'accettabilità degli EV in termini di autonomia è molto migliorata.

Ancora più incoraggiante è il fatto che il numero dei modelli di veicoli offerti dai produttori è in crescita. In Europa, secondo T&E (2019), il numero di modelli che alla fine del 2018 era pari a 60, dovrebbe crescere rapidamente con questa drammatica progressione: 176 nel 2020, 214 nel 2021, 333 nel 2025. Si può notare come il 2020 sarà un anno di svolta, con aumenti successivi di circa 30 modelli ogni anno. Si noti, inoltre, come qui non si tenga conto di possibili ingressi di modelli di produttori cinesi. Numerose case automobilistiche, con l'importante eccezione di Toyota, Ford e General Motor, investono massicciamente nella produzione degli EV e delle batterie. In particolare puntano sugli EV le case cinesi, su indicazione del proprio governo. T&E (2019) prevede, sulla base dei piani industriali finora annunciati, che le principali case automobilistiche innalzeranno la loro quota di EV prodotti sulla loro produzione complessiva, arrivando mediamente nel 2015 al 20%, con punto del 60% per la Volvo e valori invece inferiori al 19% per Toyota-Lexus e Hyundai-Kia. La Toyota-Lexus rimarrà invece la principale tra le ormai poche produttrici di HEV.

In conseguenza di questo, la produzione complessiva degli EV in Europa dovrebbe salire a 4 milioni nel 2025, a scapito soprattutto delle auto diesel, che scenderanno dagli attuali 7 milioni a 5 milioni. Ciò contribuirà presumibilmente a ridurre ulteriormente i prezzi e ad aumentarne i tassi di penetrazione.

Tra i produttori spicca ancora per qualità e prestigio la Tesla Motors, che rappresenta l'unica azienda, ormai di una certa consistenza, che costruisce esclusivamente veicoli elettrici e che anzi ha scelto di occuparsi di tutta la filiera dell'elettrico (costruzione di batterie, stazioni di ricarica, tetti fotovoltaici, accumulatori, ecc.). Tra le altre grandi case automobilistiche dei paesi avanzati, la principale, la Toyota, ha scelto per ora di non dedicarsi ai veicoli elettrici, se non a quelli ibridi plug-in, come estensione di quelli ibridi, che negli ultimi venti anni hanno rappresentato la sua tecnologia di punta. Similmente, la General Motors ha annunciato l'interesse a produrre veicoli elettrici ma senza peraltro realizzarli ancora in numeri significativi. Molte altre case, tra cui la Ford e la FCA, si sono limitate ad un solo modello, per testare la tecnologia e anche per obbedire alle prescrizioni dello Stato della California. Altre case, quali la Nissan, la Renault e la BMW, sin dall'inizio, invece, hanno sviluppato modelli elettrici che hanno avuto un ottimo successo (rispettivamente la Nissan Leaf, la Renault Zoe, la BMW i3), limitandosi poi a perfezionarli nelle versioni successive dello stesso modello con l'aggiunta di un pacco batterie di maggiori dimensioni. La VW, anche in seguito allo scandalo dei diesel, dopo aver sviluppato la VW e-Golf, ha annunciato, e

FIGURA 6 – Le politiche dirette a sostegno dei veicoli elettrici. Fonte: IAE, 2019

		Canada	China	European Union	India	Japan	United States
Regulations (vehicles)	ZEV mandate	✓*	✓				✓*
	Fuel economy standards	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Incentives (vehicles)	Fiscal incentives	✓	✓	✓	✓		✓
Targets (vehicles)		✓	✓	✓	✓	✓	✓*
Industrial policies	Subsidy	✓	✓			✓	
Regulations (chargers)	Hardware standards**	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Building regulations	✓*	✓*	✓	✓		✓*
		Canada	China	European Union	India	Japan	United States
Incentives (chargers)	Fiscal incentives	✓	✓	✓		✓	✓*
Targets (chargers)		✓	✓	✓	✓	✓	✓*

* Indicates that the policy is only implemented at a state/province/local level.

** Standards for chargers are a fundamental prerequisite for the development of EV supply equipment. All regions listed here have developed standards for chargers. Some (China, European Union, India) are mandating specific standards as a minimum requirement; others (Canada, Japan, United States) are not.

Notes: ZEV = zero-emissions vehicle. Check mark indicates that the policy is set at national level. Building regulations refer to an obligation to install chargers (or conduits to facilitate their future installation) in new and renovated buildings. Incentives for chargers include direct investment and purchase incentives for both public and private charging.

sta progressivamente perseguendo, una strategia di produzione su larga scala di una serie di modelli elettrici (VW I.D. 3) da offrire a prezzi accessibili ad ampi strati di popolazione. In particolare, ha fatto notizia che l'attuale amministratore delegato della VW abbia dichiarato che i veicoli elettrici rappresentano l'unica tecnologia adatta ai veicoli del futuro, Tutto questo mentre altre case produttrici si dichiarano aperte piuttosto ad altri sistemi di propulsione, che comprendono, oltre che ai convenzionali benzina e diesel (pur in netto calo rispetto ad alcuni anni fa), anche l'ibrido, ibrido plug-in e l'idrogeno.

Le prospettive di diffusione dei veicoli elettrici sono fortemente dipendenti dalle politiche messe in campo a livello internazionale, nazionale e locale, non garantendo nella fase iniziale un ritorno sugli investimenti equiparabile a quello dei veicoli a combustione interna. Un quadro di questi interventi è presentato in Figura 6.

Si può notare come vengano utilizzati un insieme di strumenti, sia regolamentari che fiscali, rivolti tanto ai veicoli che alle prese e alle stazioni di ricarica.

Parallelamente, è probabile che i progressi tecnologici continuino a generare sostanziali riduzioni dei costi grazie agli sviluppi nella chimica delle batterie e all'espansione della capacità produttiva negli impianti di produzione.

Il dibattito se un'auto elettrica emetta più o meno CO₂ dell'auto a combustione interna, considerando l'intero ciclo di vita, è ampio e vivace, sia nella letteratura scientifica (European Environment Agency, 2016; Cavallaro *et al.*, 2018; Danielis 2019a; Danielis 2019c, Danielis 2019d) che nei media. È emerso che non c'è una risposta unica e semplice, in quanto entrano in gioco diversi fattori. Il principale è il mix elettrico, ovvero come viene prodotta l'energia elettrica: nei paesi in cui l'energia elettrica è prodotta prevalentemente da rinnovabili o da nucleare, le emissioni complessive delle auto elettriche sono di molto inferiori a quelle delle auto tradizionali. Un altro aspetto di rilievo è la dimensione dell'automobile. Siccome, una quota considerevole delle emissioni di CO₂ delle auto elettriche è legata alla produzione della batteria, un'auto elettrica con una batteria piccola (e conseguentemente con un'autonomia limitata) ha meno emissioni di una corrispondente convenzionale. Il vantaggio si perde quando all'auto elettrica vengono montate batterie di grandi dimensioni. Un terzo elemento degno di nota è che le fasi della esplorazione, produzione, raffinazione e distribuzione del petrolio sono difficilmente quantificabili in termini di energia consumata e relativa CO₂ emessa, per cui molto spesso queste due quantità non vengono considerate nel confronto. Fatto questo che tende a sfavorire le automobili elettriche. Infine, all'automobile elettrica vengono attribuite emissioni legate allo smaltimento della batteria, anche se, in un'ottica di economia circolare, il riciclo ed il riuso della batteria viene progressivamente sperimentato e vengono proposte soluzioni che potrebbero limitarne le corrispondenti emissioni di CO₂.

IEA (2019) stima che, in media, considerato l'intero loro ciclo di vita, sia l'auto elettrica a batteria di piccole dimensioni (200 km di autonomia) sia un'auto elettrica ibrida plug-in che utilizzano elettricità caratterizzata dall'attuale intensità media globale del carbonio (518 grammi di CO₂ equivalente per chilowattora [g CO₂-eq/kWh]) emettano meno GHG rispetto a un veicolo con motore a combustione interna (ICE). Ma l'entità della riduzione dipende fortemente dal mix elettrico, vale a dire dal mix di generazione di energia, a disposizione: i risparmi di emissioni di CO₂ sono significativamente più alti per le auto elettriche utilizzate nei paesi in cui il mix di generazione di energia è dominato da fonti a basse emissioni di carbonio. Se il mix è a zero emissioni (il caso della Norvegia), il risparmio tocca l'80%. In Italia, dove il mix elettrico è di poco superiore ai 330 g CO₂-eq/kWh (Danielis *et al.*, 2019c), il risparmio varia tra il 10% ed il 60%, a seconda del tipo di auto elettrica considerato. Nei paesi in cui il mix di generazione di energia è dominato dal carbone, sono invece i veicoli ibridi a presentare emissioni inferiori rispetto ai veicoli elettrici.

IEA (2019) stima inoltre che le emissioni di gas serra (GHG) dei veicoli elettrici continueranno a essere inferiori rispetto ai veicoli con motore a combustione interna convenzionale. Nello scenario *New policies*, le emissioni di gas a effetto serra della flotta di veicoli elettrici raggiungono quasi 230 milioni di tonnellate di anidride carbonica equivalente (Mt CO₂-eq) nel 2030, riducendo le emissioni di circa 220 Mt di CO₂-eq rispetto a quanto si avrebbe con i veicoli convenzionali. Le emissioni complessive del settore continuerebbero ad aumentare ma, ovviamente, in misura più limitata. Lo scenario EV30@30 è coerente con lo scenario di sviluppo sostenibile programmato dallo IEA. Il risparmio di emissioni evitate sarebbe pari a circa 540 Mt CO₂-eq, riducendo le emissioni dell'intero settore.

Criticità che si accompagnano alla diffusione dei veicoli elettrici riguardano l'impatto sulle infrastrutture elettriche, l'approvvigionamento dei materiali rari per le batterie (Watari *et al.*, 2019), lo smaltimento delle stesse e la riduzione delle imposte sul petrolio. Tutti temi estremamente importanti per i quali rimandiamo alla letteratura (IEA, 2019).

I veicoli ad idrogeno

L'idrogeno può essere prodotto in diversi modi. Una delle possibilità è estrarlo dal gas naturale (*natural gas steam reforming*), producendo però CO e CO₂. Il problema di questa procedura è che l'E_ROI (*Energy Return on Investment*) è inferiore a 1, ovvero per produrre 1 MJ di energia di idrogeno è necessario utilizzare più 1 MJ di energia di gas naturale, ovvero, è una procedura energeticamente inefficiente. Una seconda procedura più interessante è l'elettrolisi, un processo in cui la molecola dell'acqua viene separata nei suoi componenti idrogeno e ossigeno tramite corrente elettrica. Il vantaggio è di non produrre emissioni di CO₂ ma l'E_ROI, con le tecnologie attualmente disponibili, resta comunque inferiore ad 1¹⁸. Pur essendo energeticamente inefficiente, l'idrogeno potrebbe però essere utilmente sfruttato per l'accumulo di energia (Parra *et al.*, 2019).

Uno svantaggio considerevole dell'idrogeno rispetto all'elettricità è che, mentre quest'ultima può utilizzare (con miglioramenti non eccessivamente onerosi)

¹⁸ Il sito dell'Associazione per la promozione in Europa dell'Idrogeno, Hydrogen Europe, afferma che "The most important primary energy source for hydrogen production currently is natural gas, at 70 %, followed by oil, coal and electricity (as a secondary energy resource). Steam reforming (from natural gas) is the most commonly used method for hydrogen production. To date, only small amounts of hydrogen have been generated from renewable energies, although that amount is set to increase in future. Electrolysis currently accounts for around 5 % of global hydrogen production. If hydrogen is extracted from water using a machine called an electrolyser, which uses an electric current to split H₂O into its constituent parts and renewable or carbon free electricity is used, the gas has a zero-carbon footprint, and is known as green hydrogen." (<https://hydrogeneurope.eu/hydrogen-basics-0>).

le linee elettriche esistenti (in molti paesi), non esiste invece una infrastruttura di ricarica dei veicoli ad idrogeno. Pertanto questa deve essere creata ex-novo, incorrendo in spese ingenti, e l'idrogeno deve essere trasportato presso queste stazioni o prodotto localmente. Nel primo caso, la produzione è concentrata e può godere di economie di scala ma deve sopportare elevati costi di trasporto. Nel secondo caso, questi ultimi vengono meno ma l'efficienza della produzione ne risente in modo considerevole.

Confrontando il bilancio energetico dei veicoli elettrici e ad idrogeno si può notare quanto segue. Le batterie dei veicoli elettrici si caricano con il 98% di efficienza, mentre l'elettrolisi ha una efficienza dell'80%. Ma l'idrogeno, per essere utilizzato, deve essere stoccato ad una pressione di 700 atmosfere perdendo nella compressione il 15% dell'energia iniziale, per cui la quantità di energia rimanente è il 65% dell'energia iniziale. Nel caso in cui venga prodotto centralmente e poi distribuito, un ulteriore 20% viene perso nel trasporto del gas compresso. In confronto, le perdite da trasporto dell'energia elettrica ammontano a circa il 5%. Aggiungendo poi la perdita di efficienza dei motori elettrici (trasformazione della corrente da alternata a continua e trasmissione), nel confronto tra i relativi veicoli, l'efficienza residua è pari al 65% per i veicoli elettrici ed al 20% per i veicoli a idrogeno. Il risultato di questa elevata differenza di efficienza è che il costo per chilometro di un veicolo a idrogeno è più elevato di quello di un veicolo elettrico. Si stima che il costo di utilizzo di una Tesla Model 3 sia 2-2,4 cent di dollaro a km (\$10-\$12 per 500 km di autonomia) mentre per la Toyota Mirai è 17,7 cent di dollaro a km (\$85 per 480 km di autonomia), come riflesso del fatto che è costoso produrre¹⁹ e distribuire l'idrogeno.

A questo si aggiungono i costi di costruire una rete di infrastrutture di ricarica che al marzo 2020 è molto limitata (attualmente esistono: solo un distributore di idrogeno in l'Italia, a Bolzano, 55 in Germania, 36 in California, 160 sono programmate per il 2021 in Giappone, che vuole accreditarsi come paese leader della mobilità ad idrogeno), anche in ragione del loro costo, valutabile in quasi 2 milioni di euro a stazione. Ciò fa sì che i proprietari di veicoli a idrogeno abbiano difficoltà o debbano percorrere lunghe distanze per caricare i loro veicoli²⁰, mentre i proprietari di auto elettriche possono farlo tranquillamente a casa, durante il periodo di sosta notturna. Tutto ciò fa sì che le immatricolazioni di veicoli ad idrogeno sono ancora estremamente limitate, nonostante l'impegno di alcune

¹⁹ Secondo il sito di Energy Innovation (<https://energyinnovation.org/2018/04/02/hydrogen-in-the-energy-system-focus-on-production/>) il costo di produrre tramite l'idrogeno l'elettrolisi varia da \$6.1 a \$12.1 per kg H₂, ben maggiore di quello tramite *steam reforming* del gas naturale che è pari a \$1,39 per kg H₂.

²⁰ Anche nel caso dei veicoli a idrogeno è segnalato, inoltre, il problema della mancanza di uno standard unico, che aggrava il problema della ricarica.

case produttrici come Toyota (Mirai), Hyundai (Nexo), Honda (Clarity) e BMW (X5 programmata).

Tuttavia, data la sua elevatissima densità energetica per unità di massa (104,4 MJ/kg o 39 kWh/kg contro 13 kWh/kg della benzina e 0,25 kWh/kg delle batterie), l'idrogeno può rappresentare un vettore energetico importante per quei veicoli, quali camion, navi, aerei, che hanno dimensioni tali che difficilmente possono essere alimentati da batterie, vista la loro limitata densità energetica. Infatti, un camion con batterie al litio, come quello proposto dalla Tesla stessa (Tesla Semi), potrebbe avere un peso in batterie così elevato da ridurre in modo considerevole la sua portata utile. Uno degli svantaggi dell'idrogeno è però la densità energetica per unità di volume, che è 4 volte quella della benzina, per cui i veicoli a idrogeno, come quelli elettrici, usano lo spazio del veicolo in modo meno efficiente. Ciò può essere un problema serio nel trasporto passeggeri (nonostante il design e diverse soluzioni tecniche cerchino di compensare questo limite), mentre dovrebbe esserlo molto meno nel trasporto delle merci.

Con riferimento ai camion, almeno due aziende hanno presentato prototipi e si apprestano a passare alla fase della produzione: Tesla Motors con il Semi-truck completamente elettrico e Nikola sia con camion elettriche che con camion a idrogeno. I vantaggi di questi ultimi sono descritti in questo modo: la possibilità di fare il pieno in 15 minuti; un'autonomia di 500-700 miglia simile ai veicoli diesel; un minor peso rispetto ai camion elettrici e l'assenza di emissioni durante l'utilizzo. Nikola ha intenzione di costruire 700 stazioni di ricarica negli Stati Uniti. L'avvio della produzione è previsto per il 2022²¹.

Un'altra sperimentazione interessante riguarda i traghetti che collegano le isole Western Isles e la costa occidentale della Scozia²². Finanziato in parte dal

²¹ Si vedano i seguenti siti: <https://nikolamotor.com/hydrogen>. How Nikola Plans to Make Hydrogen the Truck Fuel of the Future <https://www.truckinginfo.com/330127/how-nikola-plans-to-make-hydrogen-the-truck-fuel-of-the-future>

²² Il sito del progetto fornisce le seguenti informazioni (<https://www.cruiseandferry.net/articles/scotland-explores-feasibility-of-hydrogen-powered-ferries>): "Ferry and port operator Caledonian Maritime Assets Ltd has joined with community-owned wind farm company Point and Sandwick Trust and other companies to assess the feasibility of using local wind farms to produce hydrogen fuel for future ferries operating in the Western Isles and West Coast of Scotland. Assessments found that the highest scoring route for a large ferry was the vessel operating on the long crossing from Stornoway to Ullapool, which would require 3,767 tonnes of hydrogen produced by 15 wind turbines. Estimates suggest this could save 21,815 tonnes of carbon dioxide equivalent per year, the equivalent of removing 4,742 cars off the road annually. Prices of hydrogen would range between £3.70 and £5.60 (US\$4.50 and US\$6.82 per kilogram), which equates to between £0.11 and £0.17 (US\$0.13 and US\$0.21) per kilowatt-hour. Current marine diesel fuel is £0.05 (US\$0.06) per kilowatt-hour. However, if hydrogen produced from renewable resources for marine transport was to be included in the UK government's Renewable Transport Fuel Obligation mechanism, it was calculated that the price would fall to between £2.90 and £4.00 (US\$3.53 and US\$4.87) per kilogram, or £0.09 and £0.12 (US\$0.11

governo scozzese, il progetto ha esplorato la fattibilità pratica ed economica di utilizzare nuovi parchi eolici insulari per la produzione di combustibile a idrogeno a zero emissioni di carbonio per i futuri traghetti. Il progetto ha esaminato la fattibilità tecnica, le soluzioni possibili e la fattibilità economica. Per quanto riguarda quest'ultima, i costi della produzione e dell'utilizzo dell'idrogeno rimangono ancora superiori, anche se non di molto, rispetto a quelli del diesel marittimo. Per colmare il divario, lo studio ha scoperto che la Scozia deve compiere ulteriori progressi nella progettazione e costruzione di navi più efficienti dal punto di vista energetico e migliorare l'economia della produzione eolica e dell'idrogeno.

Relativamente agli autobus utilizzati in ambito urbano, esistono sperimentazioni in fase avanzata sia relativamente alla propulsione elettrica che a quella a idrogeno. Si stima che oramai siano circa 400 mila gli autobus elettrici in funzione nel mondo, per il 98% in città, e in un numero crescente (4000 nel 2019) anche in Europa²³. Gli autobus a idrogeno – sperimentati in alcune realtà quali Aberdeen (Scozia) e Tokio, che nelle prossime Olimpiadi del 2020 prevede di utilizzarne 100 – non sono ancora prodotti in serie ed il loro costo è ancora ben maggiore di quelli diesel (1 milione di euro contro €250.000), anche se si prevede che il loro costo potrà diminuire molto rapidamente (<https://www.hydrogeneurope.eu/hydrogen-buses>).

In ogni caso, è bene sottolineare che tanto i veicoli elettrici che i veicoli a idrogeno dipendono dalla disponibilità di energia elettrica: produrre energia elettrica in modo pulito diventa quindi il problema cruciale.

3.4.2 *La produzione sostenibile di energia elettrica*

La buona notizia è che il peso delle fonti rinnovabili nella produzione di energia elettrica cresce continuamente in molti contesti geografici.

In Europa, ad esempio, si è percentualmente dimezzato l'uso del carbone e ridotto di molto l'uso del petrolio, progressivamente sostituiti dal gas naturale, che in termini di emissioni di CO₂ è più pulito. Le fonti rinnovabili – comprensive di energia idrica, solare ed eolica – sono passate dal 13% a quasi il 30%. Il nucleare continua a rappresentare una fonte consistente, pur essendosi ridotto leg-

and US\$0.15) per kilowatt-hour. Findings suggest that the price gap between using imported oil and local renewables is smaller than initially expected. However, to close the gap, the study found that Scotland needs to make further progress with designing and building more energy-efficient ships, and improve the economics of wind farm and hydrogen production.”

²³ Si confronti il sito: <https://www.sustainable-bus.com/electric-bus/electric-bus-public-transport-main-fleets-projects-around-world/>

TAVOLA 4 – Composizione percentuale del mix elettrico a livello mondiale 1990-2016 (valori percentuali)

Anno	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016
Carbone	37	38	39	40	40	39	38
Petrolio	11	9	8	6	5	4	4
Gas	15	15	18	20	22	23	23
Biofuel	1	1	1	1	1	2	2
Rifiuti	0	0	0	0	0	0	0
Nucleare	17	18	17	15	13	11	10
Idro	18	19	17	16	16	16	17
Geo-termia	0	0	0	0	0	0	0
Solare PV	0	0	0	0	0	1	1
Solare termico	0	0	0	0	0	0	0
Vento	0	0	0	1	2	3	4

FORNITORE: IEA Electricity Information 2018 – <https://www.iea.org/statistics/?country=CHINA&year=2016&category=Electricity&indicator=ElecGenByFuel&mode=chart&dataTable=ELECTRICITYANDHEAT>

germente dal 30% al 25%. Un andamento simile nello stesso periodo si è avuto in Italia, con la differenza che l'Italia ha rinunciato a costruire centrali nucleari. Le rinnovabili in Italia contribuiscono per il 38%, un valore più elevato della media europea. Nel periodo 2016-18, tale trend si è rafforzato. Le fonti convenzionali (petrolio, carbone e gas naturale) sono scese dal 48,8% al 45,9%.

I mix elettrici nazionali dei paesi europei sono molto differenziati, riflettendo sia le risorse naturali disponibili (si noti la Norvegia che produce il 95% della sua energia elettrica usando l'acqua) che le scelte politiche e di investimento. L'energia solare, ad esempio, mostra una dinamica molto contenuta (dal 4% al 4,7%) e alcuni paesi mediterranei la utilizzano meno della Germania.

Una dinamica molto simile si è avuta negli Stati Uniti dove c'è stata una progressiva sostituzione del carbone con il gas naturale e stanno crescendo le fonti rinnovabili. Nel 2018, circa il 63% dell'elettricità proviene da combustibili fossili (carbone, gas naturale, petrolio e altri gas), il 20% da energia nucleare e il 17% da fonti energetiche rinnovabili, senza contare però la parte generata da sistemi fotovoltaici di piccola scala.

A livello mondiale (Tavola 4), le tendenze sono invece leggermente diverse: il carbone continua a mantenere una quota importante; sono diminuiti il petro-

lio ed il nucleare; è aumentato il gas naturale e cominciano a crescere le fonti rinnovabili diverse dall'acqua, quali l'eolico ed il solare. Nel 2016 le fonti fossili (carbone, petrolio, gas naturale) rappresentano ancora il 65%, addirittura in crescita rispetto al 1990 (63%). Resta ancora molto da fare, quindi, per ottenere un significativo cambiamento nel modo di produrre l'energia elettrica a livello mondiale. Dai dati provvisori di fonte IEA, nel 2018 sembra continuare il progresso delle rinnovabili, attestandosi al 26% (solare + eolico raggiungono il 7%, idroelettrico al 19%), un valore comunque ancora basso e senz'altro migliorabile con opportuni stimoli politici.

Secondo il Wood Mackenzie's forecast²⁴, il 7% attuale di solare ed eolico è triplicabile entro il 2040, ma ciò non basterà per raggiungere gli obiettivi di Parigi, anche tenuto conto che la domanda di energia elettrica è stimata crescere al 2040 del 25% (van Ruijven *et al.*, 2019). È quindi necessario che i governi operino un vero e proprio cambio di passo, cominciando dall'eliminazione dei sussidi ai combustibili fossili, stimati pari a 400 miliardi di dollari a livello mondiale.

4. CONSIDERAZIONI FINALI

Lo sviluppo economico e i trasporti sono fortemente correlati. Lo sviluppo economico aumenta la domanda di trasporto e, conseguentemente, la domanda di veicoli e di energia, fino ad ora soddisfatta quasi esclusivamente dai combustibili di origine fossile. La costruzione delle infrastrutture per il trasporto e la diffusione dei veicoli facilitano lo sviluppo economico, direttamente, tramite gli effetti indotti della loro produzione e distribuzione, ed indirettamente, tramite l'aumento della mobilità delle persone e delle merci. Considerato che la popolazione mondiale è in aumento e che ampie zone del mondo hanno finora goduto di un accesso limitato alle infrastrutture ed ai veicoli, è naturale attendersi un aumento della domanda di trasporto, con il conseguente aumento della domanda di energia e delle emissioni di CO₂. La sfida del contenimento delle emissioni di CO₂ o addirittura della loro riduzione verso una progressiva decarbonizzazione, per quanto cruciale per mantenere il livello di aumento della temperatura (auspicabilmente) entro l'1,5 gradi o al massimo entro i 2 gradi rispetto ai livelli preindustriali, è quindi molto difficile da vincere. Infatti, anche in una area tecnologicamente ed economicamente avanzata come l'Europa, in cui la tassazione sui carburanti convenzionali è molto elevata, si è visto

²⁴ <https://www.woodmac.com/news/feature/can-the-energy-industry-rise-to-the-challenge-of-climate-change/>

che il contributo dei trasporti alle emissioni di CO₂ è in aumento invece che in diminuzione, in controtendenza rispetto agli altri settori industriali.

I trasporti rappresentano un sistema complesso, che comprende sia la mobilità delle persone che quella delle merci. Inoltre, gli spostamenti hanno luogo con lunghezza diverse. Negli spostamenti brevi, spesso in aree urbane, c'è sicuramente spazio per aumentare l'uso di modalità a basso o nullo impatto ambientale o l'uso dei trasporti pubblici, ma le politiche finora intraprese non hanno ridotto in modo significativo l'uso di mezzi di trasporto privato siano essi auto o motocicli. Pertanto, la sostituzione dei veicoli privati a combustione interna con veicoli elettrici rappresenta l'unica possibilità di realizzare una riduzione delle emissioni inquinanti, sia locali che globali. Inoltre, esistono anche buone prospettive di sostituire gli autobus convenzionali con autobus elettrici o a idrogeno. Negli spostamenti dei passeggeri su distanze medie e lunghe, a parte il treno già prevalentemente funzionante a energia elettrica in molte parti del mondo, le corriere e gli aerei (ed in parte minore le navi traghetto) giocano un ruolo importante. In questo caso il peso dei veicoli e la distanza percorsa rendono l'uso dei veicoli elettrici alimentati a batteria non tecnologicamente ed economicamente proponibili. Allo stato attuale della tecnologia, la bassa densità energetica per unità di peso e volume delle batterie, limita l'autonomia e la portata utile dei veicoli elettrici. I veicoli a celle a combustibile, alimentati ad idrogeno, sono promettenti ma, allo stato attuale, mancano i presupposti economici ed infrastrutturali per una loro diffusione su ampia scala. Pertanto, per gli spostamenti medio-lunghi di passeggeri su mezzi collettivi, non esistono ad oggi alternative alle corriere o aerei con motori a combustione interna. L'unica possibilità è continuare a rendere i motori termici sempre più efficienti. Analogo discorso vale per il trasporto stradale delle merci su distanze medio-lunghe. Per i trasporti urbani o su distanze giornaliere entro i 100 chilometri, invece, i furgoni elettrici rappresentano già una soluzione alternativa ai furgoni convenzionali. Il trasporto delle merci via nave, un settore cruciale per lo sviluppo economico mondiale, è invece saldamente ancorato all'uso dei motori diesel e non esistono al momento alternative tecnologicamente credibili.

Dal punto di vista della decarbonizzazione dei trasporti, la difficoltà tecnologica principale è quella di sostituire i combustibili fossili derivati dal petrolio con fonti energetiche secondarie derivanti da fonti non-fossili rinnovabili. Affinché ciò riesca consentendo una mobilità delle persone e delle merci simile a quelle attualmente ottenute, sono necessari nuovi veicoli, funzionanti con sistemi di propulsione elettrici o a idrogeno, e dotati di batterie o celle a combustibile adeguate in termini di peso e volume. Ciò richiede una continua ricerca sui materiali e sulla chimica delle batterie, al fine di migliorarne le prestazioni contenendone allo stesso tempo i prezzi. Dal punto di vista infrastrutturale, è necessaria una

ristrutturazione complessiva degli impianti di produzione, dispacciamento e distribuzione dell'energia elettrica secondo un modello ben diverso dal modello centralizzato attualmente prevalente. È interessante osservare che i progressi tecnologici sono stati più rapidi di quanto alcuni commentatori ritenessero possibile. Il costo di produzione delle batterie è sceso più rapidamente di quanto atteso, la quantità prodotta aumenta ad un ritmo quasi esponenziale e sempre più produttori di veicoli si stanno impegnando nella loro produzione con ingenti investimenti. Non è una sfida che riguarda solo il mondo della ricerca ma anche quello produttivo-industriale che necessiterà di trasformazioni profonde dell'intera filiera produttiva dell'industria automobilistica, con ripercussioni profonde in termini di competitività dei sistemi nazionali e di possibili perdite occupazionali. Le sfide tecnologiche si svolgono in contemporanea e devono essere accompagnate da quelle economiche, politiche e sociali, che hanno una natura ed una complessità non minore di quelle tecnologiche. La mobilità è, infatti, percepita come un bene essenziale, come un diritto, e la sua tassazione, sia al fine di limitarne il tasso di crescita che di ridirigerla verso modalità meno impattanti, solleva sempre forti opposizioni politiche (es., in Francia il movimento delle giubbe gialle è sorto come reazione alla proposta di introduzione di una tassa sul carbonio; in Germania, l'opposizione alla tassa sul carbonio viene da entrambi i principali partiti popolari, la CDU e la SPD; la costruzione delle piste ciclabili solleva sempre grande opposizione per la perdita dei parcheggi per le autovetture, ecc.). In assenza di soluzioni unanimemente migliorative (*win-win*) che possano accontentare tutte le parti in gioco²⁵, la metodologia economica impone di porsi domande di efficacia delle politiche rispetto agli obiettivi prefissi e di efficienza statica e dinamica, quest'ultima ovviamente molto più difficili da valutare.

Relativamente alle politiche, l'evidenza empirica passata ci sembra confermare che le politiche classificate come *avoid* e *shift*, seppur importanti, non hanno in passato sortito effetti rilevanti. Non si vede come potranno farlo in futuro. Le principali speranze vanno quindi riposte nelle strategie di *improve*. In ogni caso le politiche, se usate in modo congiunto, sono più efficaci e richiedono cambiamenti in genere politicamente più accettabili delle politiche basate su pochi strumenti. Le politiche della domanda e quelle dell'offerta devono essere tra loro complementari. Correggere i prezzi, attraverso ad esempio la tassa sul carbonio, è importante, ma cambiamenti radicali intervengono solo se si riesce tramite standard e incentivi a influenzare gli investimenti in infrastrutture (energetiche e trasportistiche) e in veicoli che permettano tendenzialmente di azzerare le emissioni di CO₂, stabilizzando lo stock esistente.

²⁵ Neanche l'avvento dell'automobile all'inizio del XX secolo è stata una innovazione *win-win*, in quanto tutta l'industria e le professioni che si muovevano attorno al cavallo si sono progressivamente trovate escluse dal mercato.

Il potenziale dei veicoli elettrici, sia alimentati a batteria che a idrogeno, è interessante. Ci sono segnali di una possibile diffusione ad ampia scala dei veicoli elettrici a batteria che fanno ben sperare. Essi però rappresentano una soluzione solo nella misura in cui l'elettricità è prodotta da fonti rinnovabili senza uso di combustibili fossili. Come abbiamo visto, la situazione attuale è molto differenziata tra paesi. Alcuni paesi per motivi geografici e politici fanno un uso molto elevato delle rinnovabili. I grandi paesi in via di sviluppo come la Cina e l'India, invece, hanno un mix elettrico molto basato sul carbone, che tra l'altro possiedono in grandi quantità mentre sarebbero costrette a importare il gas naturale per realizzare quella sostituzione che ha permesso all'Europa ed agli Stati Uniti nel giro di poche decadi di ottenere un mix energetico più pulito. L'eolico ed il solare, se dal punto di vista dei costi presentano interessanti vantaggi, dall'altro sono più problematici da organizzare e gestire. Pongono il problema della "l'aleatorietà" (o "intermittenza") e "non programmabilità", che impongono un ripensamento globale delle reti elettriche e la necessità di costruire grandi infrastrutture per lo stoccaggio dell'energia, come ad esempio bacini idroelettrici di pompaggio o la costruzione (con materiali rari o inquinanti) di accumulatori elettrochimici. Tale problema trova particolarmente impreparati i paesi in via di sviluppo, che pure disponendo di condizioni climatiche favorevoli sono spesso incapaci di sfruttarle. Gli aiuti internazionali e lo scambio di conoscenze potrebbero, a questo proposito, contribuire ad accelerare in questi paesi il passaggio alle rinnovabili, con vantaggi per tutta la comunità internazionale.

In conclusione, c'è una reale possibilità che le politiche e l'innovazione tecnologica consentano di "decarbonizzare i trasporti", ottenendo una riduzione delle emissioni di CO₂ che permetta di raggiungere gli obiettivi di contenimento della temperatura a 1,5° o 2° al 2050? Molti autori che hanno esaminato il tema condividono questa conclusione scettica, se non pessimista (Eisenkopf and Knorr, 2018²⁶). Altri hanno un atteggiamento più ottimista, pur sottolineando le difficoltà e i passi necessari per superarle. Cosa succederà nei prossimi trenta anni è ovviamente difficile da prevedere. È possibile che il procedere dell'innalzamento della temperatura convinca sempre più persone, e quindi governi, a operare scelte coraggiose, al momento impopolari. È possibile anche, e anzi forse decisivo, che i progressi della tecnologia permettano di muoversi più rapidamente verso veicoli elettrici e a idrogeno con costi comparabili a quelli attuali e con prestazioni simili, se non migliori. Nella produzione di energia elettrica, infatti, la

²⁶ Eisenkopf and Knorr, 2018 sostengono che "Although the European Commission has defined very challenging modal shift targets, it has failed to operationalize the political measures to reach these goals. It seems that the necessary radical measures to reduce greenhouse gas emissions in the transport sector would give rise to unacceptable economic losses and social tensions."

direzione di marcia attuale verso un maggiore uso delle fonti rinnovabili è quella corretta, ma la velocità del cambiamento resta ancora insufficiente.

Per realizzare l'obiettivo della decarbonizzazione dei trasporti sono quindi, e non sorprendentemente, necessari: consapevolezza della gravità del problema, volontà di realizzare gli obiettivi, sviluppo delle conoscenze tecnologiche necessarie, capacità di implementazione industriale delle nuove tecnologie e disponibilità ed interesse ad accoglierle da parte dei consumatori.

- Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L., Hemous, D. (2012). The environment and directed technical change. *American Economic Review* 102 (1), 131-166.
- Baranzini, A., van den Bergh, J.C.J.M., Carattini, S., Howarth, R.B., Padilla, E., Roca, J. (2017). Carbon pricing in climate policy: seven reasons, complementary instruments, and political economy considerations. *WIREs Climate Change* 8 (e462), 1-17.
- Bloomberg (2019). A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices. <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/>
- Brand, C., Anable, J., Morton, C. (2019). Lifestyle, efficiency and limits: modelling transport energy and emissions using a socio-technical approach. *Energy Efficiency*, 12(1), 187-207.
- Cavallaro, F., Danielis, R., Nocera, S., Rotaris, L. (2018). Should BEVs be subsidized or taxed? A European perspective based on the economic value of CO₂ emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 64, 70-89.
- Chiaramonti, D. (2019). Sustainable Aviation Fuels: the challenge of decarbonization. *Energy Procedia*, 158, 1202-1207.
- Clapp, C., Karousakis, K., Buchner, B., Château, J. (2009). National and sectoral GHG mitigation potential: a comparison across models. *OECD/IEA Climate Change Expert Group Papers*, No. 2009/07. Paris: OECD Publishing.
- Creutzig, F., Jochem, P., Edelenbosch, O. Y., Mattauch, L., van Vuuren, D. P., McCollum, D., et al. (2015). Transport: a roadblock to climate change mitigation? *Science*, 350(6263), 911-912.
- Creutzig, F., Roy, J., Lamb, W. F., Azevedo, I. M. L., Bruine de Bruin, W., Dalkmann, H., Edelenbosch, O. Y., Geels, F. W., Grubler, A., Hepburn, C., Hertwich, E. G., Khosla, R., Mattauch, L., Minx, J. C., Ramakrishnan, A., Rao, N. D., Steinberger, J. K., Tavoni, M., Ürge-Vorsatz, D., Weber, E. U. (2018). Towards demand-side solutions for mitigating climate change. *Nature Climate Change*, 8(4), 268-271.
- Danielis, R., Giansoldati, M., Rotaris, L. (2018). A probabilistic total cost of ownership model to evaluate the current and future prospects of electric cars uptake in Italy. *Energy Policy*, 119, 268-281.
- Danielis, R., Giansoldati, M., Scorrano, M. (2019a). Consumer- and society oriented cost of ownership of electric and conventional cars in Italy. *Working Paper SIET*, 3, http://www.sietitalia.org/wpsiet/WP%20SIET%202019_3%20-%20Danielis.pdf.
- Danielis, R., Giansoldati, M., Rotaris L., Scorrano, M. (2019b). A meta-analysis of the importance of the driving range in consumers' preferences studies for battery electric vehicles. *Working Paper SIET*, 2, http://www.sietitalia.org/wpsiet/WP%20SIET%202019_2%20-%20Danielis.pdf
- Danielis, R., Giansoldati, M., Scorrano, M. (2019c). Comparing the life-cycle CO₂ emissions of the best-selling electric and internal combustion engine cars in Italy. *Working Paper SIET*, 1, http://www.sietitalia.org/wpsiet/WP%20SIET%202019_1%20-%20Danielis.pdf

- Danielis, R. (a cura di) (2019d). *La decarbonizzazione dei trasporti: è un obiettivo possibile?*. Trieste, EUT Edizioni Università di Trieste, <https://www.openstarts.units.it/handle/10077/29332>
- Dincer, I., Acar, C. (2016). A review on potential use of hydrogen in aviation applications. *International Journal of Sustainable Aviation*, 2(1), 74-100.
- Eisenkopf, A., Knorr, A. (2018). Decarbonizing Europe—Will the Transportation Sector Undermine This Policy? *Review of Integrative Business and Economics Research*, 7(4), 48-62.
- European Environment Agency (2016). Monitoring CO₂ emissions from new passenger cars and vans in 2017. *EEA Report*, 15/2018.
- Giansoldati, M., Danielis, R., Rotaris, L., Scorrano, M. (2018). The role of driving range in consumers' purchasing decision for electric cars in Italy. *Energy*, 165, 267-274.
- Giansoldati, M., Rotaris, L., Danielis, R., Scorrano, M. (2017). La stima della domanda di auto elettriche basata sulla metanalisi. *Rivista di Economia e Politica dei Trasporti*, 2, article 5.
- Gota, S., Huizenga, C., Peet, K., Medimorec, N. (2017). *E-mobility overview*. http://slocat.net/sites/default/files/e-mobility_overview.pdf.
- Gota, S., Huizenga, C., Peet, K., Medimorec, N., Bakker, S. (2019). Decarbonising transport to achieve Paris Agreement targets. *Energy Efficiency*, 12(2), 363-386.
- Gota, S., Huizenga, C., Peet, K. (2016). Implications of 2DS and 1.5 DS for land transport carbon emissions in 2050, *Partnership Sustainable Low-Carbon Transportation (SLoCaT)*, PPMC.
- Goulder, L. H., Parry, I. W. (2008). Instrument choice in environmental policy. *Review of environmental economics and policy*, 2(2), 152-174.
- ICCT (2018). *Global Warming of 1.5 °C. Special report*. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- ICCT (2019). *CO₂ emission standards for passenger cars and light-commercial vehicles in the European Union*, https://theicct.org/sites/default/files/publications/EU-LCV-CO2-2030-ICCTupdate_201901.pdf
- IEA (International Energy Agency) (2016). *Global EV Outlook 2016*. Paris, IEA Publications.
- IEA (International Energy Agency) (2017). *Global EV Outlook 2017*. Paris, IEA Publications.
- IEA (International Energy Agency) (2019). *Global EV Outlook 2019. Scaling-up the transition to electric mobility*. Paris, IEA Publications.
- Isfort (2018). *15° Rapporto sulla mobilità degli italiani*, Roma.
- ITF (2017). *ITF Transport Outlook 2017*, OECD Publishing, Paris.
- Lepratti, M., Romano, R., Silvestrini, G., Valetto, M. (2017). *Programmare un'economia a crescita 1,5° il carbon pricing in Europa e in Italia*. Associazione economia e sostenibilità (EStà). ISBN 978-88-94200-31-7.
- Martin, R., Muûls, M., Wagner, U.J. (2016). The impact of the European Union emissions trading scheme on regulated firms: what is the evidence after ten years? *Review of Environmental Economics and Policy*, 10 (1), 129-148.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2018). *Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti*, Roma.
- Parra, D., Valverde, L., Pino, F. J., Patel, M. K. (2019). A review on the role, cost and value of hydrogen energy systems for deep decarbonisation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 279-294.
- Pietzcker, R. C., Longden, T., Chen, W., Fu, S., Kriegler, E., Kyle, P., Luderer, G. (2014). Long-term transport energy demand and climate policy: alternative visions on transport decarbonization in energy-economy models. *Energy*, 64 (Supplement C), 95-108.
- Scorrano, M., Danielis, R., Giansoldati, M. (2017). Conviene acquistare un'automobile elettrica? Un'applicazione all'Italia del modello del costo totale di possesso. *Rivista di Economia e Politica dei Trasporti*, 2, article 4.
- Scorrano, M., Danielis, R., Giansoldati, M. (2019). The cost gap between electric and petrol cars. An estimate via a persona-based deterministic and a probabilistic total cost of ownership model. *International Journal of Transport Economics*, XLVI/3, 93-122.
- Shafiei, E., Davidsdottir, B., Leaver, J., Stefansson, H. (2017). Energy, economic, and mitigation cost implications of transition toward a carbon-neutral transport sector: a simulation-based comparison between hydrogen and electricity. *Journal of Cleaner Production*, 141, 237-247.

- Sims, R., Schaeffer, R., Creutzig, F., Cruz-Núñez, X., D'Agosto, M., Dimitriu, D., *et al.* (2014). Transport. In *Climate Change 2014: mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (599-670). New York: Cambridge University Press.
- Stiglitz, J.E., Stern, N., Duan, M., Edenhofer, O., Giraud, G., Heal, G., Lèbre la Rovere, E., Morris, A., Moyer, E., Pangestu, M., Shukla, P.R., Sokona, Y., Winkler, H. (2017). *Report of the High-Level Commission on Carbon Prices*. World Bank, Washington, DC.
- T&E (Transport & Environment) (2019). *Electric surge: Carmakers' electric car plans across Europe 2019-2025*. European Federation for Transport and Environment AISBL.
- Gota, S., Huizenga, C., Peet, K. (2016). *Transport Carbon Emissions in 2050*. <http://www.ppmc-transport.org/wp-content/uploads/2016/11/SLoCaT-1.5DS-2050-Report-2016-11-07.pdf>
- Tvinnereim, E., Mehling, M. (2018). Carbon pricing and deep decarbonisation. *Energy Policy*, 121, 185-189.
- UK Department for Transport (2018). *Statistical Release – Annual Road Traffic Estimates*, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/741953/road-traffic-estimates-in-great-britain-2017.pdf
- van Ruijven, B.J., De Cian, E., Wing, I.S. (2019). Amplification of future energy demand growth due to climate change. *Nature communications*, 10(1), 1-12.
- Watari, T., McLellan, B. C., Giurco, D., Dominish, E., Yamasue, E., Nansai, K. (2019). Total material requirement for the global energy transition to 2050: A focus on transport and electricity. *Resources, Conservation and Recycling*, 148, 91-103.
- Zhou, X., Kuosmanen, T. (2019). What Drives Decarbonization of New Passenger Cars? In *Local Energy, Global Markets*, 42nd International Association for Energy Economics (IAEE) International Conference, May 29-June 1, 2019.